



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية والمعمارية
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GCA/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Voie et Ouvrage d'Art

**Stabilisation des sols fins: Etude expérimentale de l'argile de Mers-
el-Kébir**

Présenté par :

- AMMOUR Randa
- MEHAL Samira

Soutenu le 30/ 06/ 2020 devant le jury composé de :

Président: MALIKI Mustapha

Examineur: MEHALLA Tewfik

Encadrante: LAREDJ Nadia

Année Universitaire : 2019 / 2020

REMERCIEMENTS

Avant tout, on tient à remercier Dieu pour tout et surtout pour nous avoir donné le courage et la volonté pour entreprendre et finaliser cette étude.

On tient à remercier vivement notre directrice de mémoire, Professeur LAREDJ Nadia, qui nous a guidé dans l'élaboration de ce travail et qui a suivi de près nos démarches scientifiques pour mener à bien ce travail.

On adresse aussi nos remerciements à Mme MOSTEFA, Dr et enseignante à l'université de Mostaganem, pour son aide au laboratoire, ainsi que Monsieur GOUAL et Monsieur AZIZ, ingénieurs à LTPO d'Oran, qui ont bien voulu nous accorder du temps pour nous expliquer les techniques des différents essais effectués.

On adresse nos remerciements à Mr MALIKIM., maître de conférences à l'université de Mostaganem, pour avoir accepté de présider le jury de notre soutenance, ainsi que Monsieur MEHALA T., enseignant et maître-assistant à l'université de Mostaganem, qui a bien voulu nous accorder du temps afin d'examiner ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à Monsieur HAMADOUCHE, Dr à l'école Nationale Polytechnique d'Oran, qui nous a aidés, soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire

DEDICACE

On tient à dédier ce mémoire :

A nos très chères Mères et à nos chers Pères, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes nôtres années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour notre éducation, nos instruction et pour nous voir atteindre ce but.

A nos sò urs et nos frères.

A toute la famille.

A Toutes nos amies sans exception.

A toutes la promotion LMD Génie Civil 2019/2020.

ملخص

لطالما كانت التربة الدقيقة المختلفة التي شاهدها معادنها المعقدة تطرح مشاكل في الإنشاءات. بشكل رئيسي من الطين ، لديهم سلوك دقيق للغاية يعتمد على محتوى الماء ودرجة التشبع. ونظرًا للانتشار الواسع للتربة الشاسعة والنظر في الأضرار الهائلة التي لحقت بالمنشآت المثبتة على هذه التربة ، فقد أبرز بحثنا هذه التربة من خلال دراسة مكوناتها الكيميائية وخصائصها الفيزيائية والميكانيكية ، وكذلك يمكن أن تساعد دراسة ظاهرة طرق التورم طرق إستقرار هذه التربة واقتراح حلول مناسبة أخرى في تقليل هذا الضرر.

الكلمات المفتاحية: المعادن ,الطين ,التورم ,الاستقرار.

RESUME

Les différents sols fins, vus leurs minéralogies complexes, ont toujours posé des problèmes pour les constructions. Principalement les sols argileux, qui ont un comportement très délicat qui dépend de la teneur en eau et du degré de saturation.

En raison de la grande diffusion des sols expansifs et vue les dégâts énormes subis aux constructions installées sur ce type de sol, notre recherche met en évidence les sols fins à travers l'étude de leur composants chimiques et de leurs propriétés physiques et mécaniques, ainsi que l'étude du phénomène du gonflement. Les méthodes de stabilisation proposées représentent des solutions qui peuvent contribuer à la réduction de ces dommages sur les ouvrages et les structures en génie civil.

Mots clés : minéralogies, les argiles, gonflement, stabilisation.

ABSTRACT

The fine grained soils, seen their complex mineralogy, caused various problems on constructions. Mainly clayey soils, they have a very complex behavior which depends on the water content and the degree of saturation.

Due to the great spread of the soil and the enormous damages caused to the constructions installed on this soil, our research aims to explain the chemical components and the physical and mechanical properties of these soils. This study aims to explain the complexity of swelling phenomenon. The stabilization methods propose appropriate solutions that can contribute to the reduction of such damage on civil engineering constructions.

Key words: mineralogy, clays, swelling, stabilization.

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1 : Différentes structures des groupes des argiles.	8
Fig.I.2 : Adsorption à l'équilibre et échange ionique.	13
Fig.I.3 : Charge variable de minéraux argileux. Influence de pH sur le silanol (Si-OH) et aluminol (Al-OH) en fonction des bords interrompus d'une kaolinite.	13
Fig.I.4 : Sites de surface aluminols, >Al-OH, et silanols, >Si-OH, en bordure de feuillet pour une kaolinite, et sites de surface silanols pour une smectite.	14
Fig.I.5 : Variation du rapport surface/volume en fonction du diamètre des particules.	15
Fig.I.6 : Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique.	15
Fig.I.7 : Surface des particules argileuses: interne et externe.	16
Fig.I.8 : Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), floculée (B) et coagulé.	18
Fig.I.9 : Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance à la particule.	19
Fig.I.10 : Représentation schématique de la chute du potentiel de surface et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique.	19
Fig.II.1 : types de gonflements.	22
Fig.II.2 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.	23
Fig.II.3 : Courbe du gonflement en fonction du temps.	23
Fig.II.4 : Influence de la densité sèche sur le gonflement.	29
Fig.II.5 . Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement mesurée par la méthode de gonflement libre.	29
Fig.II.6 : Evolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification.	30
Fig.II.7 : Cycle de succion.	32
Fig.II.8 : Variations de volume d'une argile gonflante lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes.	39
Fig.II.9 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman.	36
Fig.II.10 : Classification de Seed et al.	37
Fig.II.11 : La classification de Williams et Donaldson.	38
Fig.II.12 : Méthode de gonflement à volume constant.	41
Fig.II.13 : Forces électrostatiques dans la double couche, Répartition des ions autour d'une particule chargée.	42
Fig.II.14 : Phénomène osmotique idéal.	44
Fig.III.1 : La chaux vive.	48
Fig.III.2 : Le cycle de la chaux.	49
Fig.III.3 : Une carrière de calcaire ou pierre à chaux.	50
Fig.III.4 : Four à chaux.	51
Fig.VI.1 : Etuve.	57
Fig.VI.2 : Appareil de Casagrande et les différents outils.	59
Fig.VI.3 : Essai pour la détermination de la limite de liquidité.	61
Fig.VI.4 : Essai pour la détermination de la limite de plasticité.	64
Fig.VI.5 : Classification IP selon l'abaque de casagrande.	63
Fig.VI.6 : Tamis.	64
Fig.VI.7 : La sédimentométrie.	69
Fig.VI.8 : Graphe de sedimentometrie.	72
Fig.VI.9 : Le bâti Edométrique.	70
Fig.VI.10 : Courbe de compressibilité de l'argile non traité.	71
Fig.VI.11 : Moule Proctor & Dames.	74
Fig.VI.12 : Types de moule Proctor.	75

Fig.VI.13 : Un Calcimètre	78
Fig.VI.14 : Un agitateur.	81
Fig.VI.15 : Essai de la tache sur papier filtre.	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des différentes argiles selon leur composition chimique (en pourcentage).	9
Tableau I.2 : Classification des principaux types de minéraux argileux.	11
Tableau 1.3 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux.	16
Tableau II.1 : Potentiel de gonflement d'après Altmeyer.	34
Tableau II.2 : Potentiel de gonflement d'après Seed, Woodward Et Lungreen.	35
Tableau II.3 : Potentiel de gonflement d'après RanganathamEt Satyanarayana (1965).	35
Tableau II.4 : Potentiel de gonflement d'après Snethen	35
Tableau II.5 : Potentiel de gonflement d'après l'établissement de Recherche bâtiment.....	35
Tableau II.6 : Potentiel de gonflement d'après Ghen	36
Tableau II.7 .Potentiel de gonflement d'après Holtz, DakshanamurthyRaman	37
Tableau II.8 : Modèles d'estimation du taux de gonflement (Eg) et de la pression de gonflement(ag)	38
Tableau II.9 : Dimensions des cations hydratés et non hydratés.	43
TableauIII.1 :Les différents types de chaux	54
TableauVI.1 : Résultats de l'essai de la limite de liquidité.	61
TableauVI.2 : Résultats de l'essai de la limite de plasticité.	62
TableauVI.3 : classification de l'indice de plasticité.	63
Tableau VI.4 : Résultat de l'essai de sedimentomètre.	68
TableauVI.5 : Résultats de l'essai œdométrique.	71
Tableau VI.6 : les charges utilisées durant l'essai oedométrique.	71
Tableau VI.7 : Exploitation des résultats suivant l'indice de gonflement Cg et l'indice de compression Cc.	73
Tableau VI.8 : moule de CBR et de PROCTOR.	76
Tableau VI.9 - Densité sèche.	77
Tableau VI.10 : Teneur en eau.	77
Tableau VI.11 : classification selon la teneur en carbonate. -	79
Tableau VI.12 : classification de bleu méthylène.	83
Tableau V-1 : avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (FerrahFerrah 2006).....	93

LISTE DES SYMBOLES

A_g : la pression de gonflement.

B : masse de bleu de méthylène.

C : la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

D : le diamètre de la particule en cm.

e : indice des vides.

E_g : taux de gonflement.

g : le poids spécifique de la particule en g/cm^3 .

I_p : Indice de plasticité.

L_L : Limite de liquidité.

L_p : Limite deplastique.

m_0 : Masse sèche.

N : Nombre de coups.

P : surcharge extérieure.

P_c : la pression capillaire.

V : la vitesse de décantation en cm/s.

VB_s : quantité de bleu méthylène.

W_h : masse de l'échantillon dans l'état humide.

W_L : la limite de liquidité.

W_s : masse des grains solides contenus dans l'échantillon.

δ : le poids spécifique de la particule en g/cm^3 .

δ_0 : le poids spécifique de liquide en g/cm^3 .

η : la viscosité du liquide.

σ) est la tension de surface eau-air.

ω : La teneur en eau.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL :	1
Chapitre I : GENERALITES SUR LES ARGILES :	3
I.1-Introduction :	3
I.2-La place de l'argile dans l'histoire	3
I.3-Formation des argiles :	3
I.4-Minéraux argileux :	4
I.5-Les caractéristiques minéralogiques des argiles :	5
I.6-La nature et les différents types des sols argileux :	5
I.7-Classification des argiles selon la structure chimique :	5
I.7.1- Kaolin :	6
I.7.1.1-Humidité du kaolin dans le kaolin :	6
I.7.1.2-Les kaolins primaires ou kaolins résiduels :	6
I.7.2-Smectites :	6
I.7.3-Illites :	7
I.7.4-Vermiculites :	8
I.7.5-Chlorites :	8
I.8-Minéraux argileux inter-stratifiés :	9
I.9-Structure des minéraux argileux :	10
I.9.1-Les types des minéraux :	10
I.10-Propriétés des argiles:	11
I.10.1-Absorbante et Adsorbante :	11
I.10.2-Propriétés physico-chimique des argiles :	12
I.10.2.1-Charge des surfaces argileuses :	12
I.10.2.1.1-Charge permanente du feuillet :	12
I.10.2.1.2-Charge de bordure de feuillet :	13
I.10.2.2-La surface spécifique :	14
I.10.3-Propriétés colloïdes des argiles :	16
I.10.4-Acide, oxydo-réductrice, photovoltaïque, radioactive :	20
I.11-conclusion :	20
Chapitre II: PHENOMENE DE GONFLEMENT DES SOLS	21
II.1.Introduction	21
II.2.Description du phénomène de gonflement :	21
II.3.Mecanismes du gonflement des argiles :	23
II.3.1.Le gonflement au sens physico-chimique :	23
II.3.1.1.Hydratation des espaces interfoliaires :	24
II.3.1.2.Répulsion entre les particules :	25
II.3.2.Le gonflement au sens mécanique :	26
II.4.Cinétique du gonflement :	28
II.5.Paramètres moteurs du gonflement :	28
II.5.1.La composition minéralogique :	28
II.5.2.L'état initial du sol :	28
II.5.3.Modification des contraintes mécaniques : -	30
II.5.4. Modification des contraintes hydriques :	31
II.5.5.Cycle de séchage / humidification :	31

II.6.Classification et prédiction :	33
II.6.1. Le paramètre de gonflement :	33
II.6.2.Méthode d'estimation du gonflement :	34
II.6.2.1.Identification qualitative des sols gonflants :	34
II.6.2.2.Estimation du gonflement –Méthodes empiriques (indirectes) :	38
II.6.2.3.Estimation du gonflement –Méthodes directes:	40
II.7. Principales causes de gonflement :	42
II.7.1.Hydratation par adsorption :	42
II.7.2. Hydratation par osmose :	43
II.7.3.Hydratation par capillarité :	44
II.8.Facteurs qui affectent le gonflement :	45
II.8.1-Facteurs intrinsèques :	45
II.8.2.Facteurs externes :	45
II.9.Conclusion :	46
Chapitre III TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX :	47
III.1-Introduction :	47
III.2- Définition :	47
III.3-Utilisation de la chaux :	47
III.4- Le cycle de la chaux :	49
III.5-Fabrication de la chaux :	49
III.5.1-Fabriquer la chaux: une technique millénaire :	50
III.5.2-Usine de chaux :	50
III.6-Nuances de chaux :	50
III.7-Four à chaux :	51
III.8- Pigments de chaux :	51
III.9-Traitement de sols :	52
III.9.1-Le traitement des sols à la chaux :	52
III.9.2-Le traitement des sols en place à la chaux :	52
III.9.3-Etude préalable :	53
III.9.4-Action de la chaux sur les sols :	53
III.9.5-Teneur en eau :	53
III.10-Amélioration des propriétés géotechniques :	54
III.11-Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux :	54
III.12-Eléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique :	54
III.13-Conclusion :	55
Chapitre VI : ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ARGILE DE MERS-EL-KEBIR...	56
VI.1-Localisation et description du sol étudié:	56
VI.2-Les Essais Géotechniques :	56
VI.3-Les essais physiques :	57
VI.3.1- Essai de teneur en eau :	57
VI.3.2- Les limite d'Atterberg :	58
VI.3.3- Essai de granulométrie par tamisage :	53
VI.3.4- Essai de granulométrie par sédimentation:	65
VI.4- Les Essais Mécaniques :	69
VI.4.1- Essai de compressibilité à l'œdomètre :	69
VI.4.2- Essai Proctor :	73
VI.5- L'Analyse Chimique :	77
VI.5.1- La teneur en carbonate:	77
VI.5.2- Essai au Bleu de Méthylène (Essai à la tache):	79
VI.6-Cocclusion :	83

Chapitre V : LES PRINCIPALES METHODES DE STABILISATION DES SOLS GONFLANTS :	85
V.1-Introduction :	85
V.2-But de la stabilisation :	85
V.3- Diversité des techniques de stabilisation des sols gonflants :	86
V.4-Stabilisation mécanique :	86
V.4.1-Drainage :	87
V.4.2-Application de fortes pressions :	87
V.4.3-Compactage :	87
V.4.4-Préhumidification :	88
V.4.5-Substitution :	88
V.5-Stabilisation chimique :	89
V.5.1-Stabilisation par Liants :	89
V.5.1.1-Liants hydrauliques :	89
V.5.1.1.1-Stabilisation par la chaux :	90
V.5.1.1.2-Stabilisation par l'ajout du ciment :	90
V.5.1.1.3-Traitement mixte (chaux et ciment) :	91
V.5.1.1.4-Traitement aux cendres volantes :	91
V.5.1.1.5-Traitement aux Sels :	92
V.5.2-Liants organiques :	93
V.5.2.1-Stabilisation au sable :	93
V.6-Traitement thermique :	93
V.7-Conclusion :	95
CONCLUSION GENERALE :	96
Références bibliographiques :	97

INTRODUCTION GENERALE

Dans les projets géotechniques, les exigences requises font en sorte que certains sols ne répondent pas aux conditions du fait de leur nature physique, chimique et mécanique. Les sols argileux présentent le plus souvent des caractéristiques liées à leur microstructure. Ces derniers sont constitués de minéraux dont l'affinité avec 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.

Les sols argileux provoquent des phénomènes physiques non encore maîtrisés dans le domaine de la mécanique des sols est celui du changement de volume d'un corps ou milieu soumis à des conditions particulières, notamment celui du gonflement des argiles. Ce phénomène est spécifique à certains sols argileux. Les grands changements des caractéristiques de ces sols sont liés principalement aux variations de leur conditions hydriques et état de compacité. Lorsque celle-ci augmente, on assistera à un phénomène de gonflement du sol se traduisant par des dommages souvent importants sur les ouvrages de génie civil.

En Algérie, les zones arides représentent près de 95% du territoire national dont 80% sont hyper arides. Plusieurs cas de désordres liés au phénomène de gonflement des ont été signalés dans de nombreuses régions telles que : Batna (hôpital de N'Gaous); Illizi (raffinerie de In Amenas), Oran (hôpital de Sidi Chahmi),

Toutefois, on dispose des méthodes d'amélioration qui peuvent utiliser de la chaux, la pouzzolane, le ciment et d'autres ajouts cimentaires, moins coûteuses et plus pratiques. Des études récentes ont montré que ces méthodes avaient des répercussions à long terme sur le sol. Dans cette étude, on s'est intéressé à l'étude d'un sol argileux qui provient de la région de Mers El Kébir (Oran). Les échantillons d'argile ont été prélevés à partir de 2 à 4m de profondeur.

Dans ce mémoire, il est proposé une investigation expérimentale pour l'étude d'une argile gonflante à savoir : l'argile de Mers El Kébir (Oran). Le protocole expérimental a été réalisé d'abord sur la caractérisation et l'identification de l'argile. Le traitement à la chaux, qui avait été programmé comme étape finale de cette étude, a dû être changé à cause de l'épidémie du COVID 19 qui a empêché l'accès au laboratoire afin de finaliser les essais.

Le présent mémoire est subdivisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux définitions des argiles en général, tels que les différents types d'argiles, les minéraux argileux, la structure des sols argileux et les liaisons structurelles.
- Le deuxième chapitre met en évidence le phénomène de gonflement. On a expliqué dans ce chapitre les principaux facteurs qui influencent le phénomène de gonflement, l'impact du gonflement sur les ouvrages et la mesure directes et indirectes du potentiel et la pression du gonflement.
- Le troisième chapitre présente une des techniques d'amélioration du sol argileux qui est la stabilisation par ajout de chaux.
- Le quatrième chapitre présente l'étude expérimentale sur la caractérisation et l'identification du sol étudié. Ce chapitre met le point sur les différents essais effectués pour la caractérisation du sol qui permettent de les différencier vis-à-vis de leur comportement à la déformation due au gonflement.
- Le cinquième chapitre présente les principales méthodes de stabilisation des sols gonflants telles que : la méthode de compactage, de substitution, la stabilisation par ajout de sable, les liants hydrauliques (chaux, ciment), cendres volantes, tout en décrivant les avantages et les inconvénients de chaque technique de stabilisation.

Enfin, en dernier lieu sont exposées les principales conclusions.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES ARGILES

I.1-Introduction :

Ce sujet est particulièrement vaste car les argiles constitue une famille de minéraux très diversifiée, et leurs utilisations, surtout aujourd'hui, sont tout aussi variées. On peut noter que les argiles, en tant que matériau d'origine des poteries et des briques, représente sans doute, après la pierre taillée ou polie, et le bois, l'un des tout premiers matériaux naturels utilisé par l'espèce humaine.

Il nous faudra d'abord définir les argiles, ce qui peut déjà se faire de plusieurs manières selon que l'on parle d'argiles en tant que minéraux ou en tant que roches contenant majoritairement les dits minéraux. La description des minéraux argileux permettra d'en dégager les principales propriétés, qui éclaireront les utilisations de ces matériaux. On abordera ensuite leurs modes de formation, en remarquant que les minéraux argileux sont exclusivement cantonnés à la partie la plus superficielle de la croûte terrestre. Ce n'est qu'ensuite que l'on détaillera certains intérêts des argiles.

I.2-Sa place dans l'histoire :

Une équipe de scientifiques américains de la NASA soutient que la vie sur terre aurait pris naissance dans l'argile et non dans « la soupe originelle ». La Montmorillonite (type d'argile décrite ultérieurement) serait le catalyseur au niveau des acides nucléiques. Sa charge anionique (ionique négative) ainsi que son pH spécifique permettent de catalyser une réaction d'activation des acides nucléiques entraînant la formation d'ARN. La NASA a également évoqué la présence d'argile sur Mars dont de la Montmorillonite.

Dès trente cinq mille ans avant notre siècle, l'argile était utilisée par la main de l'homme, en tant que matériau pour produire des dessins dans les grottes, des histoires, traces du passé. Les premières traces d'habitation sont situées en Mésopotamie, sur les rives du tigre et de l'Euphrate. Aujourd'hui plus d'un tiers des habitations sont à base d'argile.

I.3-Formation des argiles :

Les argiles entre dans la famille de roches sédimentaire. Ils sont les produits de décomposition des roches siliceuses, par désagrégation physique et mécanique, puis par

altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fine. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions dans lesquelles elles se sont formées. L'altération de diverses roches, de part les temps géologiques, sont à l'origine des différentes argiles.

L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètre qui représente les individus cristallins (phase minérale pure) appelés minéraux argileux responsable de ses propriétés tel que le gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. Mais dans les sols, ces particules élémentaires sont en général liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organiques, composés minéraux amorphes ou oxydes et hydroxyde de fer et d'aluminium, quartz feldspaths) au sein d'agrégat de tailles beaucoup plus grandes

Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicates (Feldpaths, mica...).

On distingue les argiles suivant leur origine :

- *Les argiles d'altération* : formées principalement par l'altération des calcaires en climat tempérés ou l'altération des latérites en climat chaud et humide.
- *Les argiles fluviatiles* : Elles se déposent surtout dans le lit majeur des fleuves, lors des décrues.
- *Les argiles lacustres* : déposées dans les lacs et étangs,
- *Les argiles marines* : Ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par la diagénèse.

I.4-Minéraux argileux :

Les argiles sont constituées de fines particules de dimensions inférieures à 2 micromètre chargées négativement, leur présence rend l'argile fortement sensible aux molécules d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des paramètres mécaniques.

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. Ces minéraux sont composés des particules de formes aplaties et de dimensions très petites, les cristaux ressemblent à des minces plaques ou plaquettes.

I.5-Les caractéristiques minéralogiques des argiles :

Cette section reprend brièvement les principales caractéristiques minéralogiques des argiles car celles-ci ont une importance primordiale pour une bonne compréhension du phénomène de gonflement. Les minéraux argileux font partie du groupe des phyllosilicates qui contiennent une grande proportion d'eau emprisonnée entre des feuillets de silice. Sur le plan chimique, ce sont des aluminosilicates hydratés ajoutés à d'autres ions métalliques.

I.6-La nature et les différents types des sols argileux :

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

Le mot « particules élémentaires » désigne les produits de l'altération physique ou chimique de roches en minéraux isolés ou fragments de minéraux, monocristaux ou des combinaisons amorphes.

Les particules élémentaires peuvent être subdivisées en minéraux différents : kaolinite, illite, montmorillonite, ... etc.

I.7-Classification d'argiles selon la structure chimique :

Les argiles font parties des silicates hydratés. Ceux-ci sont soit amorphes, soit cristallisés (cas des argiles). Les cristaux sont regroupés en deux classes : phylliteux (roche métamorphique foliée) et semi-phylliteux. Les chlorites sont les seules représentantes des semi-phylliteux. Les phylliteux, quant à eux, sont séparés selon que leurs feuillets soient continus ou discontinus. L'attapulgite ainsi que la sépiolite présentent des feuillets discontinus. Les feuillets continus ont une structure simple ou complexe. La structure dite complexe voit ses feuillets se superposer selon 2 ou plusieurs équidistances apparentes ou réelles. Aucune argile n'est recensée dans cette classe.

I.7.1- Kaolin :

Cette roche argileuse tire son nom du site chinois kao-Ling, où elle fut découverte. Son nom est dérivé du terme chinois "gaoling" traduit par "hautes collines". On appelle la roche kaolin et le minéral argileux kaolinite. Cette argile blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice. Riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique. C'est une des rares argiles inerte chimiquement. Cette caractéristique en fait un composant idéal pour le papier, en tant que liant dans les peintures, dans les plastiques, ainsi que dans les médicaments.

I.7.1.1-Humidité du kaolin Dans le kaolin :

l'eau existe sous deux formes différentes :

- *Eau d'absorption (eau hygroscopique)* : C'est l'eau qui est retenue physiquement par adhérence aux particules argileuses. Elle ne rentre pas dans la formule du kaolin. Durant le chauffage, elle s'évapore sans aucune modification de sa forme cristalline.
- *Eau de constitution* : C'est l'eau indiquée dans la formule du kaolin. Quand on chauffe l'argile au-dessus de 400°C, le réseau cristallin sera modifié et l'argile deviendra amorphe. Origine des Kaolins et minéraux associés

I.7.1.2-Les kaolins primaires ou kaolins résiduels :

La plupart des argiles et minéraux argileux proviennent de la transformation de silicates primaires ou de roches volcaniques, sous l'influence de processus physiques et chimiques impliquant l'eau de la surface de l'écorce terrestre. La kaolinite provient généralement de l'hydrolyse de n'importe quel minéral ou verre silicoalumineux. Par exemple la formation de kaolinite à partir de feldspath potassique peut s'écrire : $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2(s) + 2H_2O(aq) \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O(s) + 4SiO_2(s) + 2K(sol)$

I.7.2-Smectites :

Cette famille d'argile regroupe les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les nontronites, les beidelites , Ces différentes argiles sont connues pour leur capacité à piéger les molécules d'eau. Elles sont appelées argiles gonflantes. Sous l'action de l'eau, elles peuvent augmenter leur volume jusqu'à 30%. En piégeant l'eau elles fixent aussi des cations permettant les échanges par adsorption. Elles prennent une texture de type gel, pouvant

transporter des ions ou des molécules actives, cette propriété est à la base des technologies de pansements pour le tube digestif.

- *Montmorillonite* : Argile la plus communément récoltée, elle est généralement vendue verte mais peut-être trouvée sous d'autres coloris : gris, blanc, bleuté. Son nom provient de sa ville d'origine, Montmorillon située dans la Vienne. Elle détient une forte concentration en silice, en minéraux, dont de la potasse, des oxydes de magnésium, de fer, de manganèse, d'aluminium, de la soude ; D'une rare pureté, l'argile Montmorillonite présente des qualités et des attraits supérieurs à n'importe quelle autre argile verte. Ceci explique que c'est l'argile la plus commune à la vente.
- *Attapulgite ou Bentonite* : L'origine du nom attapulgite provient du site d'Attapulgis, en Géorgie aux États Unis, bien qu'également découverte à Mormoiron dans le Vaucluse en France et en Floride. Sa forme commerciale est appelée palygorskite. Argiles attapulgite ou bentonite, dont le nom vient de Fort Benton, aux États-Unis, ont un fort pouvoir absorbant. Retrouvées dans la composition de pansements gastriques, dans le traitement d'ulcère de l'estomac, constipation, diarrhée, reflux gastrique... Elles sont aussi utilisées dans les litières pour chat. La terre de Sommières et la terre de Carpentras, qui sont des bentonites, se voient dotées d'un fort pouvoir absorbant, jusqu'à 80 fois leur poids en eau, leur permettant de détacher à sec et sans laisser d'auréoles, des taches grasses, sur les surfaces fragiles telles que textiles, ameublements, tapis, cuirs, marbres,... Elles peuvent aussi être utilisées pour absorber, neutraliser les taches d'urine. La bentonite a une origine volcanique et hydrothermale. Certaines bentonites sont riches en sodium, d'autres en calcium, potassium ou magnésium. Les bentonites à base de sodium sont dotées de très grandes capacités d'absorption des liquides et susceptibles de se transformer en gel à partir d'une certaine concentration. En présence d'eau la bentonite gonfle de 10 à 15 fois son volume initial et absorbe 6,5 fois son poids en eau. Ayant la faculté de favoriser la pénétration des principes actifs à travers la peau, elle est incorporée aux cosmétiques naturels. Appelée également terre à Foulon, la bentonite est aussi capable d'absorber les protéines et de réduire l'activité des enzymes. Ce sont les bentonites riches en calcium qui sont utilisées au niveau de la sphère digestive.

I.7.3-Illites :

Son nom fait référence à l'Illinois, aux États-Unis où elle a été étudiée. Sa composition est riche en calcium (14%), en fer (9%) et pauvre en magnésium. Elle présente un bon pouvoir d'absorption environ 25 % de son poids et un faible pouvoir d'adsorption. Cette argile est retrouvée dans le nord de la France où elle est connue pour ces propriétés. Malgré sa composition, elle est tout de même de qualité inférieure à la Montmorillonite. Elle se révèle néanmoins avoir un pouvoir d'absorption important. On l'utilise en tant que cataplasme épais à appliquer sur les contusions diverses (entorses...), ou encore pour absorber des impuretés (déchets organiques, micro-organismes,...).

I.7.4-Vermiculites :

Les vermiculites sont des argiles ayant une origine volcanique, riches en magnésium.

Elles sont formées par hydratation de minéraux basaltiques. Lorsqu'elle est chauffée, elle éprouve un phénomène de dilatation, la rendant particulièrement utile comme isolant thermique pour les constructions, ce matériau ayant une faible masse, une incapacité à brûler et étant imputrescible et inaltérable.

I.7.5-Chlorites :

Ce nom leur a été attribué pour leur couleur verdâtre, du grec « chloros » signifiant vert. Des chlorites de couleur jaune, rouge ou blanche sont également retrouvés. De structure similaire aux illites et smectites, l'espace entre leurs feuillets abrite une couche supplémentaire d'hydroxyde de magnésium, de fer ou d'aluminium.

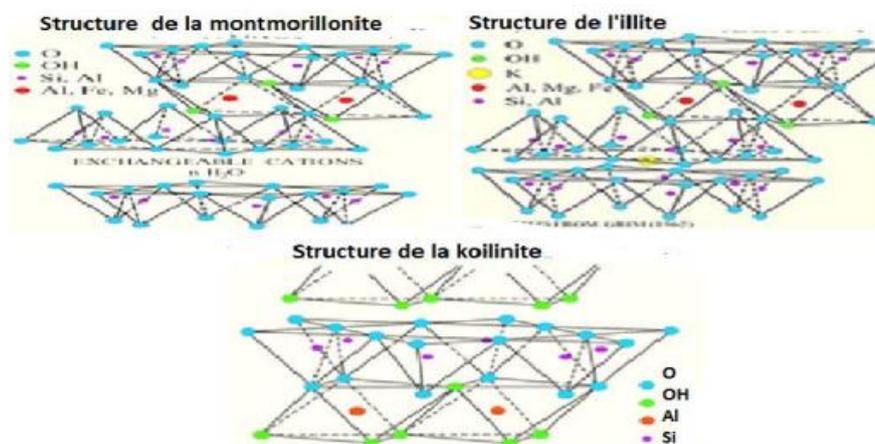


Fig.I.1 : Différentes structures des groupes des argiles.

I.8-Minéraux argileux inter-stratifiés :

C'est le nom donné aux argiles dont la structure par alternance de feuillets de natures différentes correspond à une étape de transformation d'un minéral argileux à un autre. C'est le cas des illite-smectite, glauconite-smectite, chlorite-vermiculite,... La ghassoulite, minéral interstratifié est appelée également ghassoul, rhassoul ou rassoul, Cette argile est considérée comme cousine de la Montmorillonite. Sa richesse en minéraux dont du silicium, calcium, potassium, fer, sodium, magnésium,... en font un produit de qualité. Extraite au Maroc, elle est retrouvée dans les hammams pour ses nombreuses qualités. Elle est proposée en morceaux, pâte ou en fine poudre. Le tableau I.1 ci-dessous répertorie la composition des différentes argiles citées précédemment.

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des différentes argiles selon leur composition chimique (en pourcentage).

		SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Mgn	K₂O
Les kaolins	Max	53.72	46.28	0.00	0.00	0.00
	min	53.72	46.28	0.00	0.00	0.00
Montmorillonite	Max	61.47	23.00	4.32	4.65	0.84
	min	48.24	16.54	0.30	0.03	0.12
Attapulгите	Max	58.10	17.52	4.12	1035	0.39
	min	54.64	10.33	3.01	7.28	0.00
Illites	Max	54.09	38.84	8.16	5.90	7.98
	min	43.95	21.12	0.72	3.60	5.48
Vermiculites	Max	54.09	38.84	8.16	5.90	4.97
	min	43.95	21.12	0.72	1.84	0.00
Chlorites	Max	39.01	52.00	5.01	10.14	1.52
	min	29.50	32.15	0.00	0.00	0.00

I.9-Structure des minéraux argileux :

Les minéraux argileux se caractérisent principalement par une structure en feuillets dans la plus part des cas, d'où leur appellation de phyllosilicates. Ces feuillets sont constitués de deux types de couches, octaédrique et tétraédrique, dont les sommets sont occupés par les ions O_2^- et OH^- . Ces ions chargés négativement ont tendance à se repousser et forment une charpente où peut être logée des cations qui assurent la stabilité électrostatique de l'ensemble de la structure. La représentation structurale des minéraux argileux peut être schématisée comme une unité qui associe un feuillet et un espace interfoliaire. Généralement le feuillet est formé par deux types de couches :

- *La couche tétraédrique* : formée par un atome centrale A, en principe le silicium, entouré de quatre atomes d'oxygène. chaque tétraèdre est lié aux autres tétraèdres voisins en partageant trois angles. L'association de six tétraèdres forme une cavité hexagonale. L'épaisseur de la couche tétraédrique est de 4,6 Å.
- *La couche octaédrique* : est formée par un atome centrale A, souvent l'aluminium, entouré par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles ;Chaque octaédrique est connecté aux autres octaèdres voisins en partageant uniquement les arrêts entre eux. L'épaisseur de cette couche octaédrique est de 5,05 Å

I.9.1-Les types des minéraux :

- *Minéraux de type 1* : ou (T-O) Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. L'équidistance caractéristique est d'environ 7.1 Å. À ce type correspond le groupe de la kaolinite
- *Minéraux de type 2*: ou (T-O-T) La distance inter foliaire est de 10 Å, tel que le groupe des micas ou de 14 Å compte tenu des cations inter foliaires dans les smectites tétraédriques-octaédrique — tétraédrique ou 2/1 avec une couche octaédrique inter foliaire soit 2/1/1 ou (T-O-T-O), le paramètre de feuillets est de 14 Å, tel que le groupe des chlorites.
- *Minéraux de type [2 : 1]* : ou (T-O-T-O) L'argile est constituée par l'alternance de feuillets T-O-T et de couche octaédrique inter foliaire. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14Å. Minéraux inter stratifiés Il existe bien entendu des minéraux interstratifiés formés d'un empilement régulier ou irrégulier de feuillets de deux types différents. Lorsque l'un des feuillets est de type smectites, le comportement peut

s'avérer gonflant. c'est le cas de la kaolinite montmorillonite, la saponichlorite, montmorillonite-mica, l'illite montmorillonite.

Tableau I.2 : Classification des principaux types de minéraux argileux

Type	Groupe	Sous groupe	Especies
1 : 1	Kaolinite	Kaolinite	Dickite,nacrite ,kaolinite
			Métahalloysite,halloysite
2 : 1	smectites	Smectites di octaédrique	montmorillonite
		Smectites tri octaédrique	sponite
2 : 1	micas	Micas di octaédrique	muscovite
		Micas tri octaédrique	phlogofite
2 : 1 : 1	Chlorïtes	Chlorite di octaédrique	sudoite
		Chlorite tri octaédrique	Especies différentes

I.10-Propriétés :

Les propriétés sont définies par la constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets de l'argile.

I.10.1-Absorbante et Adsorbante :

L'absorption correspond à l'internalisation d'un liquide ou d'un gaz. L'exemple typique est celui de l'éponge s'imbibant de liquide. Au niveau de l'argile ce phénomène est passif, il se produit par capillarité, contrairement à l'absorption au niveau du tube digestif. Les argiles les plus absorbantes ne sont pas conseillées en usage interne. Le risque de constipation est trop important. Elles sont généralement utilisées comme capteur de liquides et d'odeur (entrent dans la composition des litières) ou comme détachant,... L'adsorption est une autre qualité des argiles. Contrairement au phénomène d'absorption qui internalise les molécules (à l'état liquide ou gazeux), l'adsorption correspond à la fixation de molécules en surface. Elle s'applique également aux liquides et aux gaz. Cette fixation peut être ionique, électrostatique ou encore relative aux tensions superficielles. Deux types d'adsorptions sont identifiés. Le premier est physique, par la formation de complexes avec des molécules organiques, les liens électrostatiques entre les feuillets et les cations inter foliaires étant très faibles (liaisons de

Van der Waals), ils permettent la fixation de molécules organiques externes. Le second l'adsorption chimique, qui relève des liaisons ioniques, est la majeure partie du pouvoir adsorbant. Les argiles étant chargées négativement à l'intérieur et positivement en surface. Les atomes de silicium (Si) et aluminium (Al), à l'intérieur de la structure, sont positifs. Les ions oxygène (O) et hydroxyles (OH) au sommets de la structure sont négatifs. Ces ions négatifs à la surface du feuillet sont fixés à des atomes de sodium (Na), chargés positivement. L'adsorption est mesurable par les échanges ioniques, par la méthode CEC (capacité d'échange de cations). C'est une méthode colorimétrique à l'aide de bleu de méthylène exprimée en milliéquivalents de colorant adsorbé pour 100g d'argile.

I.10.2-Propriétés physico-chimique des argiles :

Les propriétés donnant aux argiles des spécificités bien définies sont nombreuses, elles peuvent être physiques et chimiques.

Les effets physico-chimiques sont fonctions des propriétés d'hydratation et de l'absorption des cations. En effet, les particules d'argiles ont une texture de surface qui permet une forte liaison à l'eau Cette affinité à l'eau est responsable du gonflement du sol.

I.10.2.1-Charge des surfaces argileuses :

Les minéraux argileux portent une charge électrique nette devant être compensée par l'adsorption d'ions de signe opposé venant de la solution. Selon son origine, cette charge est soit « permanente », c'est-à-dire indépendante de la physico-chimie du milieu, soit « variable » selon la composition de la solution, particulièrement selon le pH .

I.10.2.1.1-Charge permanente du feuillet :

La charge permanente peut être définie comme la charge nette résultant des substitutions isomorphes à l'intérieur du feuillet.

L'existence de substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques.

Afin de rétablir l'électroneutralité, cette charge est compensée par un cation alcalin ou alcalino-terreux plus ou moins hydraté dit cation compensateur et qui vient se loger dans l'espace interfoliaire entre deux feuillets d'argile.

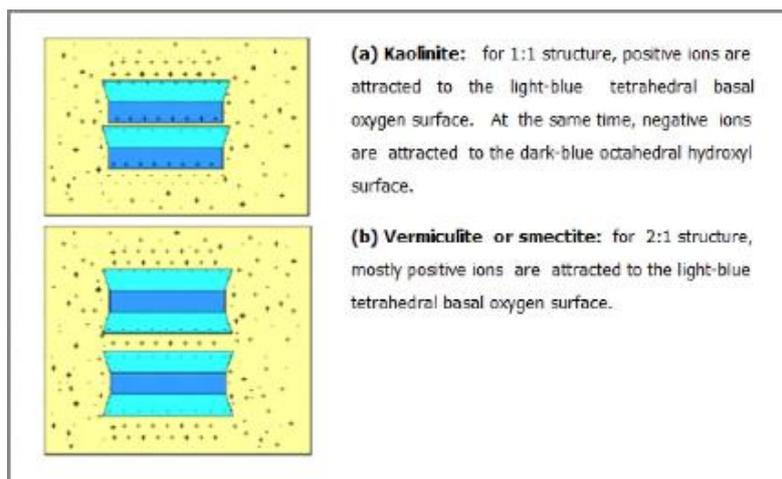


Fig.I.2 : Adsorption à l'équilibre et échange ionique .

1.10.2.1.2-Charge de bordure de feuillet :

Aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour compenser ces valences, des molécules d'eau s'hydrolysent et il y a apparition de groupes silanols (Si-OH) ou aluminol (Al-OH) qui en fonction du pH peuvent capter ou libérer des protons. Le nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront donc directement liés au pH.

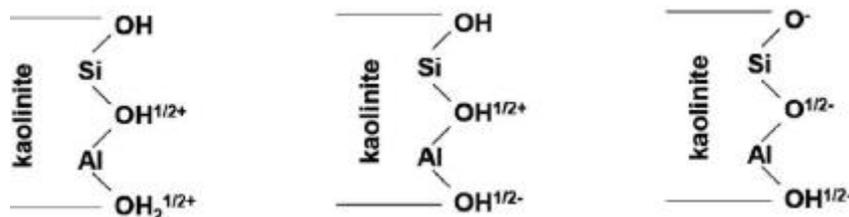


Fig.I.3-Charge variable de minéraux argileux. Influence de pH sur le silanol (Si-OH) et aluminol (Al-OH) en fonction des bords interrompus d'une kaolinite .

Les groupes hydroxyles, présents sur les faces latérales des argiles 1/1 et 2/1 (Figure I.3), sont chargés à la surface du minéral, et sont sensibles à la variation du pH de l'eau porale (groupe amphotère). Il existe aussi des réactions d'adsorption spécifique, situées sur les faces latérales, de certains ions de l'eau porale (par exemple le sodium Na^+). Ces adsorptions se produisent sur les sites où les valences des atomes du réseau ne sont pas toujours compensées..

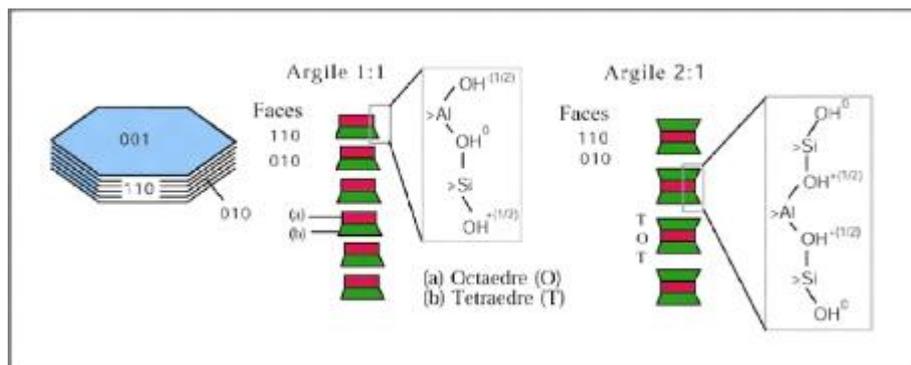


Fig.I.4 : Sites de surface aluminols, $>Al-OH$, et silanols, $>Si-OH$, en bordure de feuillet pour une kaolinite, et sites de surface silanols pour une smectite.

Les deux types de charges des minéraux argileux présentés ci-dessus interviennent dans la Capacité d'Échange Cationique (CEC).

La CEC se définit comme étant le nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge électrique de 100 grammes de minéral calciné et s'exprime en milliéquivalent/100g d'argile calcinée.

L'ordre de grandeur de la CEC des minéraux argileux est variable allant de quelques méq/100g pour la kaolinite (charge variable) à 150 méq/100g pour les vermiculites et smectites (importance de la charge permanente)

I.10.2.2-La surface spécifique :

Par définition, la surface spécifique (S_s) appelée aussi « Aire massique » représente la surface totale (A_s) par unité de masse (M) et on l'exprime généralement en m^2/g :

$$S_s = \frac{A_s}{M}$$

La fine taille des minéraux argileux leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre

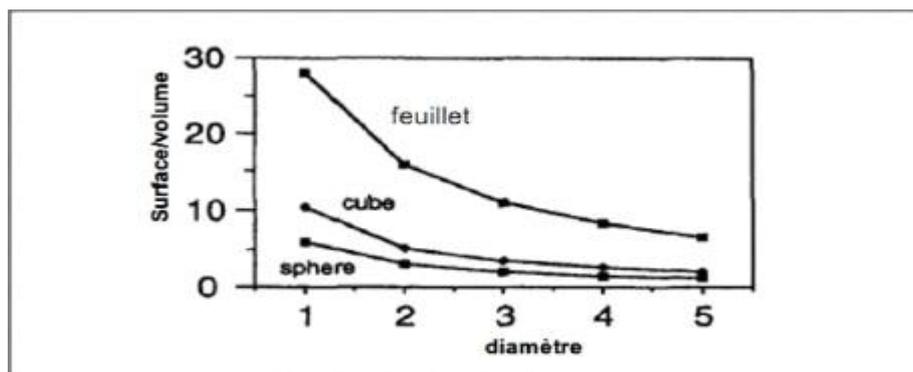


Fig.I.5 : Variation du rapport surface/volume en fonction du diamètre des particules.

La surface des minéraux argileux est supérieure à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. La figure I.5 montre également que la surface spécifique (S_s) dépend de la forme de la particule. On peut remarquer que celle-ci a tendance à s'aplatir quand la surface spécifique (S_s) augmente.

La surface des minéraux argileux est supérieure à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. La figure I.6 montre également que la surface spécifique (S_s) dépend de la forme de la particule. On peut remarquer que celle-ci a tendance à s'aplatir quand la surface spécifique (S_s) augmente.

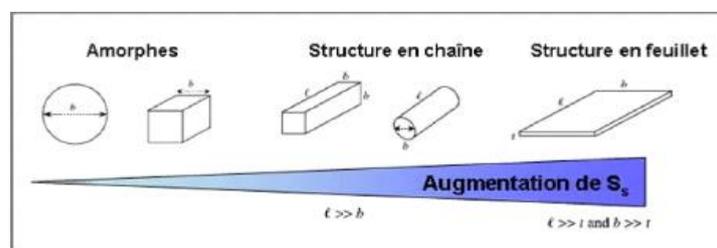


Fig.I.6 : Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique.

Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface interne et externe. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace interfoliaire (Figure I.7).

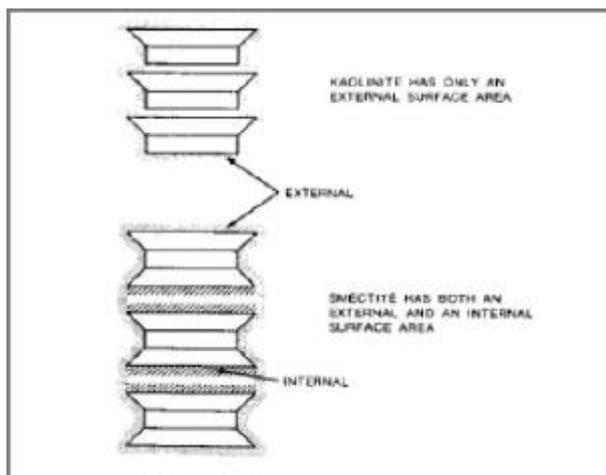


Fig.I.7 : Surface des particules argileuses: interne et externe.

- ✓ *Composition minéralogique* : Le tableau I.3 présente les différentes valeurs de la surface spécifique (S_s) des minéraux les plus courants. Il est à noter que la smectite possède les valeurs les plus importantes de surface spécifique en comparaison avec tous les autres minéraux.

Tableau 1.3 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux.

Minéral	Surface interne (m^2/g)	Surface externe (m^2/g)	Surface totale (m^2/g)	C .E.C (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10 - 30	10 - 30	3 - 15
Illite	20 - 55	80 -120	100 -175	10 - 40
Smectites	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	10-70	760	100-150
colloïdes	---	100-175	100-175	10-40

I.10.3-Propriétés colloïdes des argiles :

Dans la littérature, la stabilité colloïdale des particules chargées se résume, en grande partie, à l'étude de la distribution des charges électriques sur les surfaces des particules argileuses hydratées (*la double couche électrique*) et à l'étude des différentes conditions de stabilité ou d'agrégation à travers la combinaison entre toutes les forces d'attraction et de répulsion dans le système (la théorie DLVO).

- *la théorie DLVO* : Cette théorie permet d'expliquer la stabilité des suspensions colloïdales des particules chargées; elle a été établie à partir du modèle de la double couche par ses précurseurs Derjaguin et Landaud'une part et Verwey et Overbeek d'autre part. La théorie DLVO consiste à sommer l'énergie d'interaction répulsive due aux doubles couches électriques, et l'énergie d'interaction attractive due aux forces de Van der Waals. Contrairement à l'énergie d'attraction de Van der Waals qui reste constante en fonction de la charge ionique du milieu, l'énergie répulsive de la double couche varie, en raison de la contraction de la double couche en présence d'une force ionique élevée. Lorsque la force ionique augmente, la répulsion de double couche diminue pouvant entraîner l'agrégation ou la coagulation des particules, on distingue trois cas de stabilité suivant l'intensité des forces ioniques :
 - ✓ Pour de faibles forces ioniques (cas A) et pour un potentiel de surface élevé, le potentiel répulsif est supérieur au potentiel attractif. Les particules se repoussent mutuellement et la suspension est dans un état de dispersion stable. Plus le maximum primaire Φ_{max} est élevé, plus la suspension n'est stable.
 - ✓ Pour des forces ioniques modérées (cas B), la courbe présente un maximum primaire Φ_{max} et un maximum secondaire Φ_{max} . Lorsque les particules sont localisées dans ce minimum secondaire, elles sont en équilibre et sont floculées. L'état de floculation est réversible lorsque le minimum secondaire n'est pas très profond : $(-\Phi_{sec}/KBT) < 20$. Par contre, si $(-\Phi_{sec}/KBT) > 20$, le minimum secondaire est beaucoup plus profond et la suspension est fortement floculée.
 - ✓ Pour des forces ioniques élevées (cas C), la courbe ne présente plus de maximum. Les particules floculent très rapidement et de façon irréversible. La distance entre particules correspond alors au minimum primaire Φ_{min} . La suspension est dans un état de coagulation.

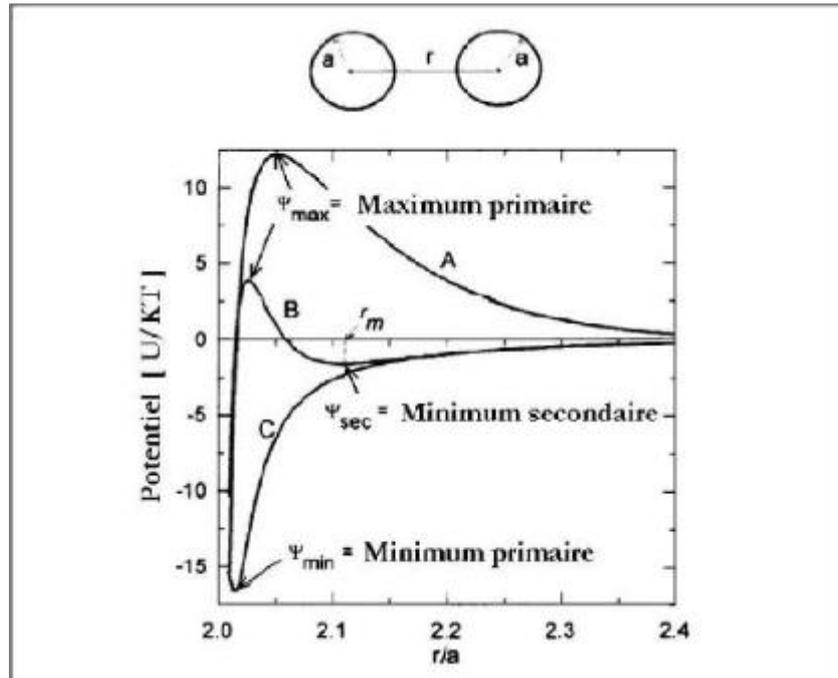


Fig.I.8 :Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), floculée (B) et coagulé.

- *Théorie de la double couche* :Les feuillets des minéraux argileux sont chargés négativement, et les ions compensateurs hydratés sont attirés par la surface négative des feuillets. la population des cations attirés par la surface pour rétablir l'électro neutralité au voisinage de celle-ci peut être séparée en deux couches. Une couche de cations immobiles liés à la surface, appelée couche de Stern, et une couche de cations mobiles au voisinage de la surface appelée couche diffuse. La limite entre la couche de Stern et la couche diffuse est appelée plan d'Helmutz ou plan de cisaillement. L'ensemble de ces deux couches constitue la double couche électrique de la particule en suspension. La concentration en ions positifs est donc importante au voisinage de la surface et décroît progressivement lorsqu'on s'éloigne de la particule. Au voisinage de la surface, il y a également un déficit en anions, repoussés de la surface par les forces électrostatiques. Cette différence de concentration entre anions et cations crée un potentiel électrique. Nous avons représenté schématiquement l'évolution de la concentration en ions, et celle du potentiel électrique, en fonction de la distance à la surface de la particule. L'existence de la couche de Stern (ions immobiles à la surface du feuillet) est cependant controversée.

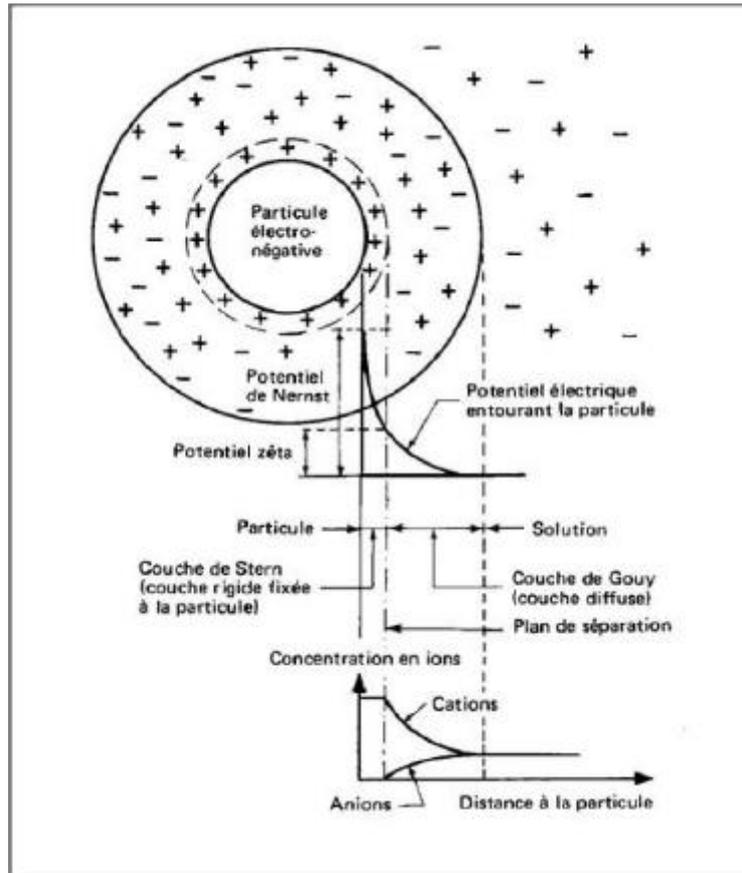


Fig.I.9 : Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance à la particule .

Le potentiel électrique vaut W_0 à la surface de la particule et décroît linéairement dans la couche de Stern. La valeur du potentiel au plan d'Helmholtz est le potentiel ζ (potentiel Zêta). C'est la seule valeur accessible expérimentalement selon la théorie de Gouy .

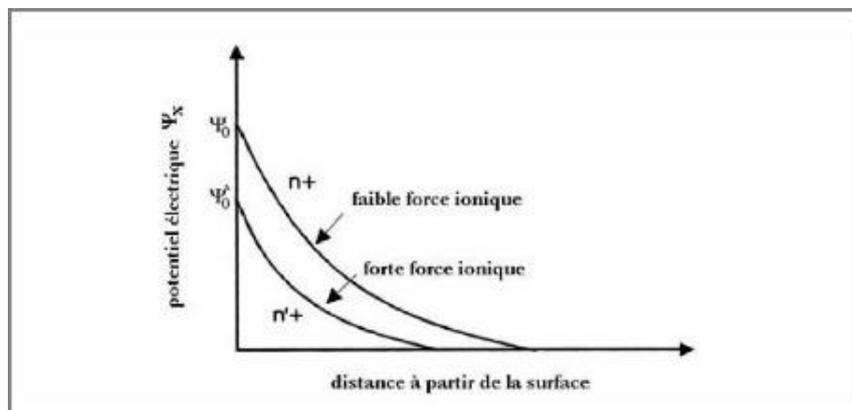


Fig.I.10 : Représentation schématique de la chute du potentiel de surface et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique.

I.10.4-Acide, oxydo-réductrice, photovoltaïque, radioactive :

Le pH de l'argile varie de 4,6 à 10,2. Les argiles présentent des atomes de surface à caractère accepteur ou donneur d'électrons. Les sites donneurs vont piéger les accepteurs d'électrons et inversement. Ceci est lié à un caractère acide des argiles. Les minéraux argileux vont réagir comme des catalyseurs acides. Une charge sera transférée entre les formes adsorbées ou entre cations échangeables ou bien l'oxydation ou la réduction du cation à la surface de l'argile par le champ électrique fort du cation. Cette propriété varie selon les argiles ainsi que les substances en contact avec celles-ci. La nature du cation échangeable de l'argile, sa teneur en eau ou encore sa charge électrique négative feront varier l'acidité. L'argile peut capter, transférer et cumuler l'énergie solaire (et également radioactive). Une expérience de la NASA recense qu'un bombardement d'argile par des charges énergétiques électrique et photonique modifie sa structure par acceptation d'électrons libres. Cette propriété est relative à la présence de silice dans la structure de l'argile. Cet oligoélément est capable de retenir les photons et de les stocker sous forme d'énergie électrique, principe du photovoltaïque. L'énergie électromagnétique engendrée par l'argile au contact du soleil est transmise au corps en contact avec celle-ci. Si l'argile est mise en suspension dans un verre d'eau en verre fin, celui-ci se casse malgré l'absence de choc. Dans le même ordre d'idée, l'argile ne doit pas être touchée avec du métal afin de ne pas recevoir de décharge. On appelle propriété « radioactive » de l'argile la présence de roches dégradées présentant une faible radioactivité résiduelle. L'argile possède donc une certaine radioactivité naturelle. Elle profite à l'argile comme actif. Cette radioactivité est régénératrice, l'argile peut même absorber certaines radiations nocives. Elle est capable de capter la radioactivité en excès dans les corps ou d'en transmettre en cas de carence offrant une protection naturelle à l'organisme.

Ces propriétés expliquent la raison pour laquelle l'argile est dite riche en énergie.

I.11-conclusion :

Parmi tous les matériaux naturels que nous trouvons sur la face de la Terre, les argiles sont parmi les plus fascinants, la fertilité du sol est déterminée en grande partie par la présence d'argile. Au-delà de son importance agricole, l'argile est utilisée depuis des millénaires en tant que matériau de construction (briques), pour la poterie, les soins du corps (masques et bains de boue) et même pour des utilisations médicales ; encore aujourd'hui il est possible d'acheter des produits d'argile à consommer.

Chapitre II

PHENOMENE DE GONFLEMENT DES SOLS

II.1-Introduction :

Les sols argileux sont connus pour leur forte propension à réagir avec l'eau. Une humidification des Particules argileuses provoque le gonflement. Ce phénomène est complexe, il est dû d'une part à la Saturation des pores du sol qui neutralise les forces capillaires et d'autre part à l'absorption des molécules d'eau sur la surface des particules argileuses avec pénétration d'eau entre les feuillets qui constituent ces particules.

Le phénomènes de gonflement causent de nombreux désordres pour les structures de génie civil fondées en surface des sols gonflants et pour les ouvrages enterrés. Divers désordres ont été répertoriés dans ce domaine.

L'étude du comportement des argiles gonflantes est donc un domaine important qui peut aboutir à améliorer la maîtrise de leur utilisation et à la réduction des effets indésirables qu'elles peuvent induire. Le gonflement des argiles met en jeu un couplage entre plusieurs phénomènes physico-chimiques et mécaniques. Le gonflement relève de deux phénomènes principaux : gonflement cristallin par hydratation des espaces inter foliaires et gonflement osmotique par répulsion entre les feuillets des particules. Les modifications de l'état de chargement mécanique et du degré de saturation du sol peuvent influencer considérablement ces deux mécanismes de base.

Le phénomène de gonflement se développe à l'échelle microscopique, au niveau des particules. Mais, Dans la pratique il est préférable de le caractériser par une approche macroscopique. Des essais peuvent alors servir à quantifier le processus de gonflement en fournissant des paramètres directement exploitables dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil. Dans la pratique les essais peuvent être faits soit in-situ soit en laboratoire.

II.2-Description du phénomène de gonflement :

ont distingués deux types de gonflement, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire .

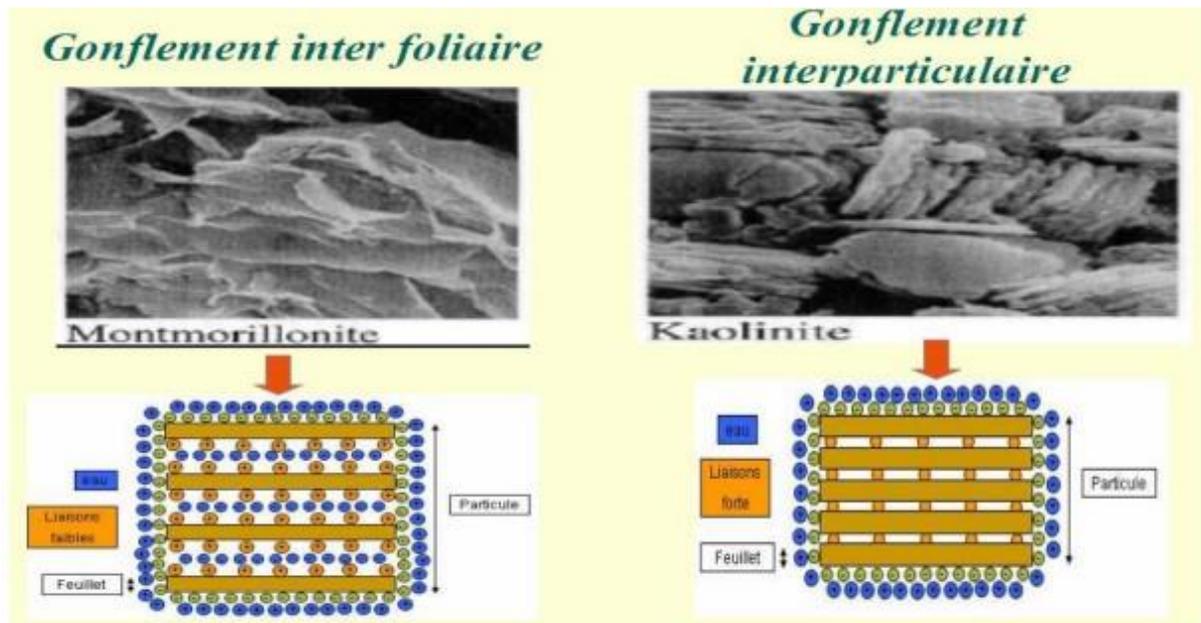


Fig.II.1 : types de gonflements

- *Le gonflement intraparticulaire ou interfoliaire* : Il s'agit de l'adsorption de molécules d'eau sur la surface externe de la particule d'argile. Lors d'une hydratation interparticulaire, les changements de volume qui s'ensuivent sont généralement faibles.
- *Le gonflement interparticulaire* : pour les argiles dont la structure fait intervenir des cations compensateurs, il se produit au contact de l'eau une hydratation de ces cations. Le cation hydraté acquiert une taille plus importante parce qu'il s'entoure de molécule d'eau. Il en résulte une augmentation de la distance interfoliaire et par voie de conséquence un affaiblissement de la liaison entre les feuillets. Ce qui permet à d'autres molécules d'eau de s'immiscer entre les feuillets d'une même particule, c'est l'adsorption interfoliaire.

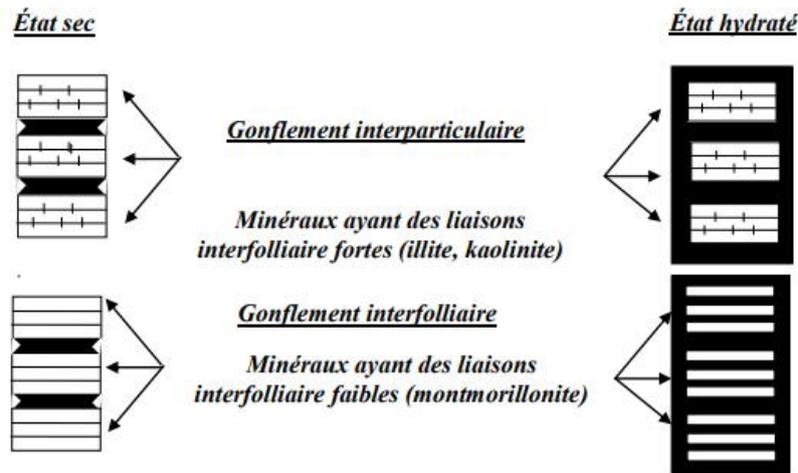


Fig.II.2 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.

- Les spécialistes ont divisé le gonflement en un gonflement primaire et un gonflement secondaire, (figure II.2) représente la variation relative de la hauteur d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :

- ✓ Gonflement primaire: qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- ✓ Gonflement secondaire : qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe

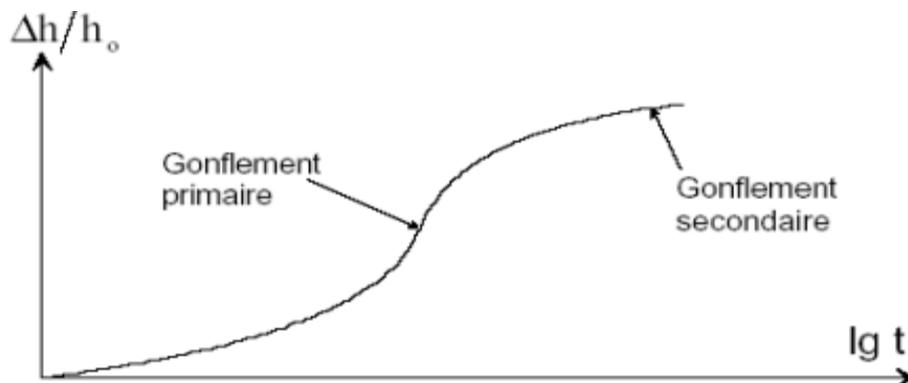


Fig.II.3: Courbe du gonflement en fonction du temps..

II.3-Mécanismes du gonflement des argiles :

II.3.1-Le gonflement au sens physico-chimique :

Les phénomènes physico-chimiques et mécaniques varient. Le gonflement d'un sol peut résulter de la diminution des contraintes en place à la suite d'un déchargement, après une excavation, ou par imbibition du sol. Il se traduit par une augmentation du volume du sol ou

un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le matériau peut se déformer ou non. Il est à noter que l'augmentation de la teneur en eau lors d'une imbibition ne provoque pas toujours une augmentation de volume suivant la nature du matériau.

En effet, un sol sec essentiellement sableux ou silteux peut s'humidifier par remplacement de l'air contenu dans les vides, sans augmentation conséquente de volume. Par contre, dans le cas de sols argileux, le gonflement résulte de forces de répulsion qui s'exercent entre les particules argileuses, entraînant une augmentation de volume à mesure que la teneur en eau augmente. Le gonflement des particules argileuses, à l'échelle microscopique, est directement lié à leurs Propriétés minéralogiques, électrochimiques et à leurs surfaces spécifiques qui varient d'une famille d'argiles à l'autre; le phénomène de gonflement paraît relever de deux causes :

- l'hydratation des espaces interfoliaire, entraînant une augmentation de la porosité interfoliaire (gonflement interfoliaire ou gonflement cristallin).
- la répulsion entre les particules, soit l'augmentation de la porosité interfoliaire et inter particulaire pouvant affecter toutes les argiles (gonflement inter particulaire ou gonflement osmotique).

II.3.1.1-Hydratation des espaces inter foliaires :

Lors de l'hydratation d'une éprouvette d'argile sèche, l'eau pénètre dans l'espace inter foliaire et s'organise en couches mono moléculaires, puis interagit avec les feuillets et les cations déjà présents. Cette hydratation favorise la création d'une pression, appelée pression de disjonction, qui a pour conséquence une augmentation de la distance inter foliaire et donc un gonflement de l'ensemble des deux feuillets, c'est le gonflement cristallin.

Ce gonflement n'est possible que lorsque les liaisons interfeuillets sont très faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. C'est le cas par exemple de la montmorillonite.

Le phénomène de gonflement est influencé par la nature des cations interfoliaire. Ainsi la montmorillonite sodique (Na^+) gonfle plus qu'une montmorillonite calcique (Ca^{2+}).

En effet, le rayon ionique de Na^+ est plus proche de la taille de la molécule d'eau et son interaction avec cette dernière est plus faible que pour le cation Ca^{2+} . L'eau se répartit alors plus facilement à la surface du feuillet.

Dans les argiles illitiques, le gonflement cristallin est très faible et il est quasiment inexistant dans les kaolinites. Ce type de gonflement ne représente qu'environ le dixième du gonflement macroscopique total d'une argile gonflante. Il est donc nécessaire selon lui d'envisager un autre mécanisme de gonflement que celui relevant uniquement des seules variations interfoliaire.

II.3.1.2-Répulsion entre les particules :

Le gonflement osmotique se produit lorsque l'énergie d'hydratation est suffisante pour franchir la barrière de potentiel due aux forces électrostatiques attractives entre feuillets.

L'adsorption des cations par les particules argileuses et la formation de la double couche diffuse sont responsables de la répulsion des deux particules. En effet, dans une argile sèche, les cations sont fortement adsorbés à la surface des feuillets argileux. Les cations en excès, par rapport à ceux assurant l'électroneutralité des particules argileuses et des anions associés, sont présents sous forme de sels. Si l'argile sèche est placée au contact de l'eau, les sels s'y dissolvent, mais les différents ions se répartissent de manière non homogène, la concentration en cation devient plus forte au voisinage des surfaces externes des argiles, tandis que les anions ont plutôt tendance à s'éloigner des surfaces argileuses. La zone perturbée, ainsi créée par cette répartition non homogène des cations et des anions, est appelée la double couche diffuse. Cette dernière assure l'électro neutralité du système entre la particule d'argile et la double couche diffuse du modèle de Stern. La théorie de la double couche diffuse a permis de démontrer mathématiquement que le recouvrement de deux couches diffuses de même signe est responsable de la répulsion de deux particules. Appliquée à la multitude de particules constituant une éprouvette d'argile, cette théorie permet d'expliquer le gonflement à l'échelle macroscopique.

Une autre approche plus fréquemment utilisée permet, d'expliquer le gonflement de manière plus pratique, c'est le concept de "pression osmotique". Dans cette approche, du fait des différences de concentration au sein de la couche diffuse, des pressions osmotiques sont développées à chaque fois que les doubles couches de deux particules se chevauchent. La surface argileuse chargée négativement jouerait un rôle comparable à celui d'une membrane semi-perméable, séparant deux solutions de concentration en sel différentes (aucun cation ne vient cependant traverser la surface argileuse). La différence de pression osmotique créée entre les deux particules et la solution à l'équilibre environnant les particules d'argile est

appelée "pression de répulsion inter particulaire". On peut alors imaginer qu'à l'échelle macroscopique, ce phénomène d'origine microscopique, répété un très grand nombre de fois, se répercute par l'apparition d'un gonflement observable. Rappelons également que le gonflement d'un sol argileux dépend non seulement de la minéralogie des argiles mais aussi de la texture, c'est-à-dire de l'agencement du squelette et du réseau poreux de ces minéraux au sein des autres minéraux constituant le matériau. Sous certaines conditions, les minéraux argileux gonflants peuvent se retrouver piégés au sein d'une matrice siliceuse ou carbonatée, créant des complexes susceptibles d'empêcher ou d'annuler le gonflement de ces minéraux.

En résumé, la pression osmotique joue un rôle prépondérant dans le gonflement des argiles saturées. Une diminution de contraintes effectives dans le sol se traduit au niveau macroscopique par le gonflement des argiles. La théorie de la double couche fournit une interprétation intéressante des phénomènes physico-chimiques sur le plan qualitatif, mais l'application quantitative de cette théorie aux minéraux argileux ne permet pas toutefois de caractériser au mieux la texture réelle et complexe d'un matériau argileux. De plus, lorsque les argiles ne sont plus saturées, suite à une dessiccation répétée par exemple, d'autres forces deviennent prépondérantes dans l'hydratation des argiles, comme les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces capillaires de Van der Waals et les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables. L'ensemble de ces forces constitue la force de succion qui agit directement sur les molécules d'eau. Cette succion est faible à nulle pour des sols saturés et très forte pour des sols secs.

II.3.2-Le gonflement au sens mécanique :

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Un sol est constitué de 3 phases :

- phase solide (les particules solides)
- phase liquide (eau interstitielle en général)
- phase gazeuse (bulles d'air)

Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire si tous les vides

interparticulaires sont occupés par l'eau interstitielle. Considérons ici un élément de sol saturé à l'équilibre. Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale σ' (géostatique ou surcharge extérieure), cette dernière se décompose de la façon suivante :

$$\sigma = \sigma' + u \text{ (Théorie de Terzaghi, 1951)}$$

Où u désigne la pression interstitielle de l'eau des pores et σ' la contrainte effective, c'est-à-dire la contrainte exercée sur le squelette solide du sol.

Si l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une cote z , la pression

Dans un milieu poreux, l'existence conjointe d'une phase gazeuse et liquide provoque le développement de ménisques capillaires air-eau. Le développement de ces ménisques dans la structure du sol est la caractéristique principale d'un milieu non saturé ; et traduit une pression négative de l'eau appelée succion. Si la contrainte se est alors supprimée, le même phénomène se produit en sens inverse, et immédiatement :

La pression interstitielle u devient négative (succion négative) et opposée à la variation de la contrainte totale. Dans des conditions de libre circulation de l'eau, un phénomène de gonflement va alors se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert d'une contrainte négative de l'eau sur le squelette solide, jusqu'à l'état final où :

$$u = 0$$

$$\sigma' = 0$$

Il est donc possible d'affirmer que si la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à u_0 , le gonflement exprime quant à lui la diminution de la succion ($-u$) jusqu'à son annulation. La succion capillaire du terrain s'exprime alors par la relation suivante

$$: S = u_a - u_w$$

Où u_a représente la pression de l'air dans le sol et u_w , la pression interstitielle de l'eau dans le sol.

II.4-Cinétique de gonflement :

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.

La cinétique du gonflement, c'est-à-dire la relation existant entre la déformation et le temps, est en générale très lente et dépend de la nature et de l'état du sol et du niveau de chargement (figure II.3).

II.5-Paramètre moteurs du gonflement :

Le gonflement des sols argileux dépend de plusieurs facteurs définis à l'échelle microscopique et macroscopique.

II.5.1-La composition minéralogique :

La quantité d'argile gonflante (type smectite) est l'un des premiers facteurs qui conditionne le gonflement d'un sol argileux. En effet, les propriétés gonflantes du sol seront d'autant plus marquées que le pourcentage de minéraux expansifs du type smectite sera élevé.

II.5.2-L'état initial du sol :

Les paramètres géotechniques de base tels que la teneur en eau initiale et le poids volumique sec, définis à l'échelle macroscopique lors de l'échantillonnage, jouent un rôle important sur le processus de retrait et du gonflement des sols argileux.

la pression de gonflement est essentiellement une fonction de la densité sèche initiale du matériau et qu'elle est indépendante de la teneur en eau initiale. Par contre Komornik et David et Basmaet al. ont noté que la pression de gonflement des sols augmente avec la densité sèche initiale et lorsque la teneur en eau initiale diminue, mais sans obtenir de bonnes corrélations entre les paramètres concernés. L'influence de la teneur en eau est donc variable, et dépend des caractéristiques du sol comme des conditions d'essai, tandis que la densité sèche est reconnue comme le facteur ayant le plus d'importance sur le potentiel de gonflement. Par ailleurs, El-Sohby et Rabba ont remarqué que l'effet de la teneur en eau initiale sur le taux et la pression de gonflement n'est pas significatif lorsqu'elle est inférieure à la limite de retrait, mais que son effet devient important sur le gonflement final lorsqu'elle est supérieure à la limite de retrait. Guiras-Skandaji a montré que la teneur en eau initiale d'échantillons

compactés à la même densité sèche a une influence considérable sur les caractéristiques du gonflement. Il établit que la pression de gonflement croît lorsque la teneur en eau initiale diminue.

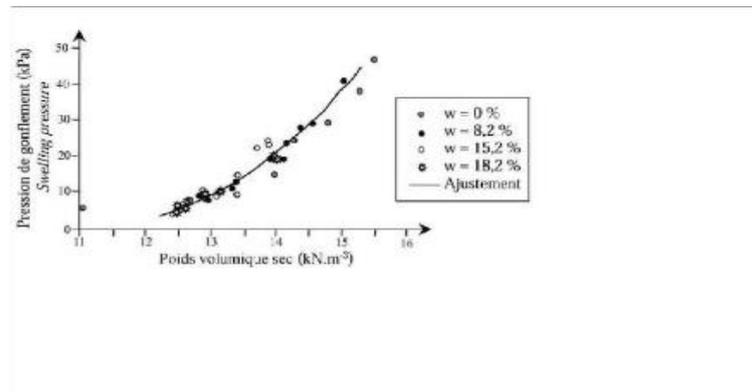


Fig.II.4 : Influence de la densité sèche sur le gonflement.

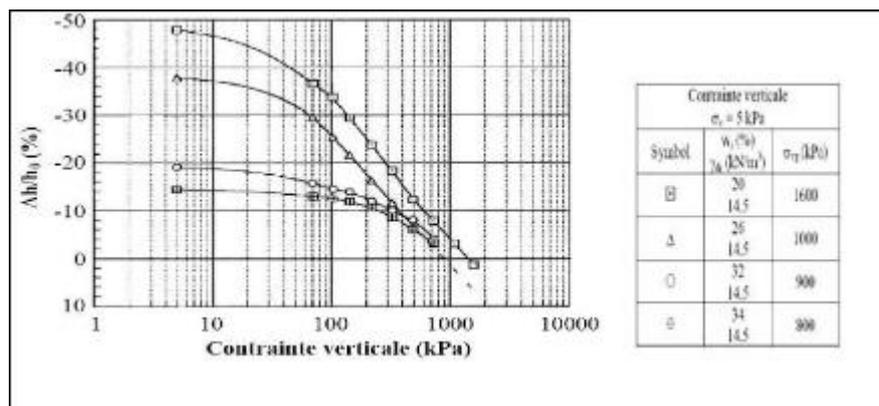


Fig.II.5 : Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement mesurée par laméthode de gonflement libre.

D'autres auteurs ont travaillé en laboratoire sur des argiles plastiques compactées afin de montrer que la hauteur des échantillons remaniés a une influence importante sur la succion et sur la pression de gonflement.

Les résultats ont montré que plus l'échantillon est dense, plus le gonflement est important. Alonso et al. Ont pu observer que la pression de gonflement passe par un maximum avant de décroître au cours de l'hydratation (Figure II.5).Des essais à succion contrôlée sur des échantillons d'argiles de Boom compactés ont donné les mêmes résultats.

En même temps que la succion diminue et que la pression de gonflement augmente, la résistance entre les agrégats du sol diminue et à partir d'un certain seuil, les particules s'effondrent et provoquent la baisse de la pression de gonflement. Ceci indique que la teneur en eau initiale et la densité sèche initiale d'un sol argileux ont un effet sur le taux et la pression de gonflement. Comme la pression de gonflement et le taux de gonflement d'un sol argileux dépendent du poids volumique sec initial et de la teneur en eau initiale, ils dépendent aussi de la succion initiale. En effet, lorsque la succion initiale du sol diminue, sa capacité d'absorption en eau diminue d'autant jusqu'à saturation du sol, ce qui réduit le taux de gonflement du sol.

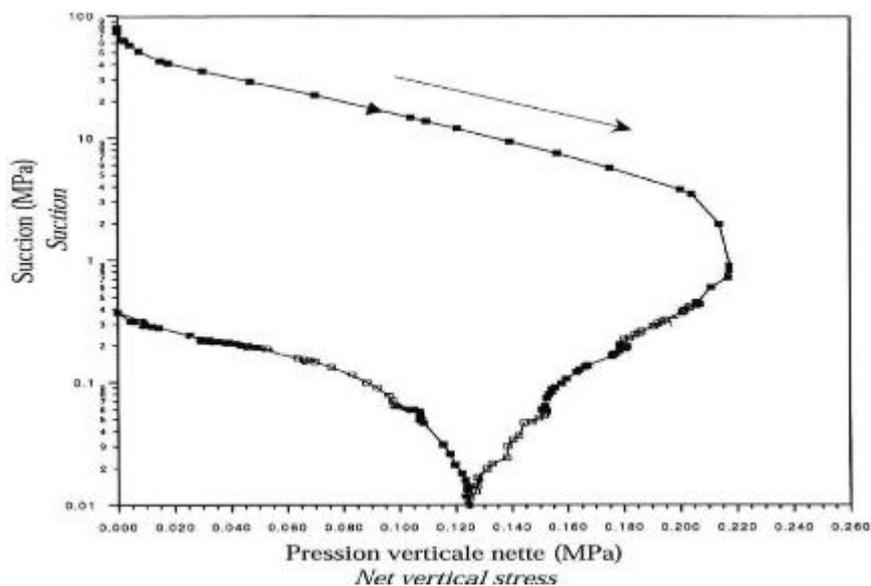


Fig.II.6 : Evolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification.

Ce pendant il ne faut pas négliger d'autres paramètres pouvant aussi influencer aussi le processus de retrait-gonflement in-situ et que l'on ne peut reproduire en laboratoire à cause de l'effet d'échelle. Ces paramètres sont le micro-climat, la topographie, le type de végétation, l'hydrogéologie et enfin la température de l'air et du sol du lieu d'étude.

II.5.3-Modification des contraintes mécaniques :

La modification de l'état de contraintes totales dans le sol, du fait par exemple de l'adjonction ou de l'enlèvement de charges ou de surcharges conduit, lorsqu'un nouvel équilibre s'est établi, à une déformation du sol, qui se traduit en général par un déplacement en surface (tassement, soulèvement). Ce déplacement est le résultat de la somme des déformations élémentaires créées en tout point du massif de sol par la modification de l'état des contraintes.

II.5.4- Modification des contraintes hydriques :

Un changement dans l'environnement hydrique du sol conduit à une modification des pressions interstitielles régnant en son sein. Par exemple, la variation du niveau de la nappe modifie le champ de pression interstitielle aussi bien au-dessus qu'en-dessous du niveau de la nappe, influence l'état de contrainte effective, et induit des variations de volume dans le milieu.

II.5.5-Cycle de séchage / humidification :

L'influence des cycles de séchage/humidification sur le comportement hydromécanique des sols gonflants a été étudiée par plusieurs auteurs. Un sol gonflant a tendance à converger vers un état d'équilibre après avoir subi plusieurs cycles d'humidification/séchage, dans cet état, le comportement du sol est supposé élastique. La (figure II.7 a) présente les résultats expérimentaux de cycles hydriques successifs sous une charge constante de 7 kPa sur un sol gonflant. Le gonflement volumique plastique se produit dans le premier cycle de mouillage, après plusieurs cycles de succion, l'accumulation de déformation diminue et le comportement reste approximativement réversible pendant les derniers cycles d'humidification et de dessiccation. Les auteurs ont présenté le même type de résultats sur l'argile d'Hoheneggelsen qui a manifesté une contraction après les cycles successifs de succion à une charge constante. Subba Rao et al. ont réalisé des essais cycliques sur un sol gonflant compacté à des teneurs en eau différentes sous une faible charge (6,25 kPa) sans mesure de succion. Leurs essais montrent que la valeur de l'indice des vides reste inchangée, pour une valeur initiale de l'indice des vides qui était égale à 0,65, après avoir subi plusieurs cycles d'humidification et de séchage pour les différentes conditions initiales. Day et Tripathy et al. ont réalisé aussi les mêmes expériences sans mesure de succion. Ils montrent que le chemin réversible est atteint au bout de quatre ou cinq cycles d'humidification et de séchage.

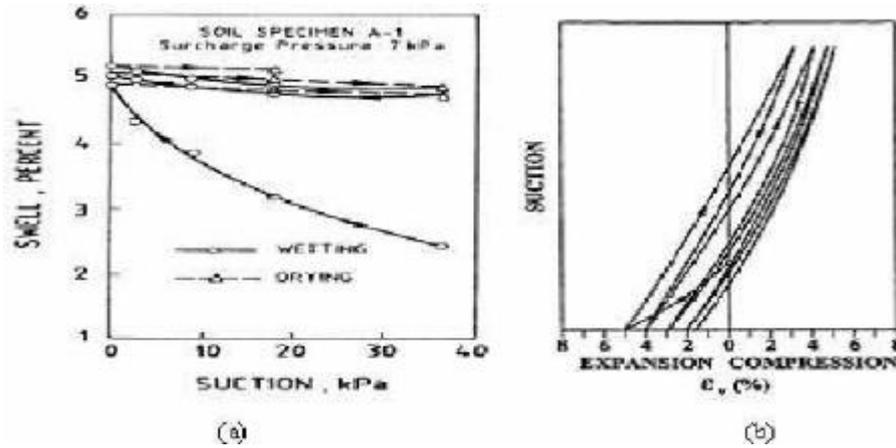


Fig.II.7 : Cycle de succion.

Alonso et al ont réalisé des essais de sollicitations hydriques cycliques sous différentes charges verticales constantes. Le matériau étudié était l'argile de Boom compactée selon une procédure permettant de réaliser des éprouvettes comportant une double structure. Leurs résultats montrent qu'il est possible d'obtenir une accumulation de déformations de compression ou d'extension avec un même type de sol, uniquement en faisant varier la contrainte verticale. Ceci a été confirmé par une étude similaire, présentée par Alonso et al. et menée sur un mélange sable/bentonite. Alonso et al. Concluent que la contrainte verticale, par le biais du rapport de pré consolidation rapport entre la pression verticale appliquée et la pression de compactage détermine le comportement du sol sous sollicitations hydriques cycliques.

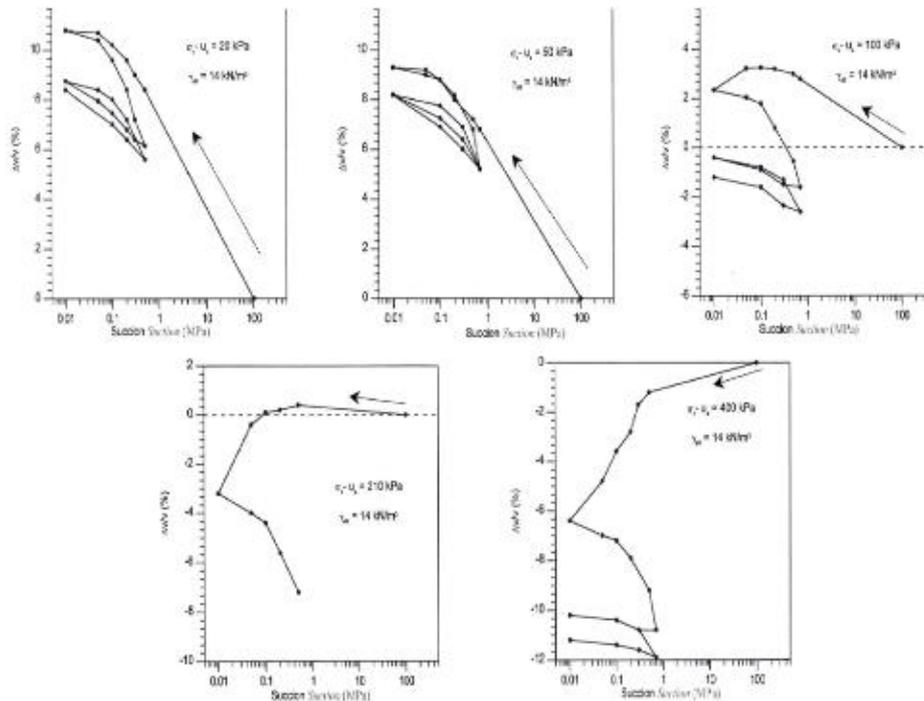


Fig.II.8 : Variations de volume d'une argile gonflante lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes.

II.6-Classification et prédiction :

II.6.1- Les paramètre du gonflement :

Dans la littérature géotechnique, on distingue trois principaux paramètres pour la caractérisation des Paramètres hydromécaniques des sols gonflants.

Ces paramètres sont : la pression de gonflement, le potentiel de gonflement et l'indice de gonflement.

- *La pression de gonflement* : d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète. Cette définition de la pression de gonflement est la plus usitée mais elle n'est pas la seule.
- *Le potentiel de gonflement* : d'un sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale (h/h_0) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état

De contrainte nulle ou quasi nulle jusqu'à sa saturation complète.

- *L'indice de gonflement* : C_s d'un sol traduit l'importance de la déformation de gonflement induite par un déchargement par rapport à un état de contrainte donnée, il est défini par la pente de la courbe $e = f(\log x)$ obtenue en déchargement lors d'un essai oedométrique classique.

Il n'y a pas de proportionnalité entre la pression de gonflement et le potentiel de gonflement. Ainsi, certains matériaux possèdent une pression de gonflement très élevée mais un potentiel de gonflement très faible, pour d'autres matériaux c'est l'inverse. Il faut donc connaître ces deux paramètres pour caractériser le gonflement.

II.6.2-Méthode d'estimation du gonflement :

II.6.2.1-Identification qualitative des sols gonflants :

L'identification des sols gonflants est généralement abordée à partir des paramètres physico-chimiques facilement mesurables lors des essais préliminaires. Or, cette identification se trouve compliquée par l'existence de plusieurs approches qui ne se basent ni sur les mêmes paramètres ni sur le même nombre.

Le recensement à partir de la bibliographie des classifications permet de les ranger en trois classes en fonction du nombre de paramètres physico-chimiques utilisés.

Ainsi, la classification d'Altmeyer donnée par le tableau II.1 celle de Seed, Woodward et Lundgren donnée par le tableau II.2 celle de Ranganatham et Satyanarayana donnée par le tableau II.3 et celle de Snethen donnée par le tableau II.4 se basent tous sur un seul paramètre. Les classifications basées sur deux paramètres sont celle établie par l'établissement de recherche en bâtiment donnée par le tableau II.5 celle établie par Ghen donnée par le tableau II.6, celle établie par Vijavergia et Ghazzaly et celle établie par Dakshanamurphy et Raman. Ces deux dernières classifications utilisent l'abaque de plasticité de Casagrande la ligne A sépare les sols gonflants au-dessus des sols non gonflants au-dessous. Dakshanamurphy et Raman y introduisent des bornes en fonction de la limite de liquidité.

Tableau II.1 : Potentiel de gonflement d'après Altmeyer .

W_R (%)	Potentiel de gonflement
<10	Fort

10 -12	Critique
>12	faible

Tableau II.2: Potentiel de gonflement d'après Seed, Woodward Et Lungreen.

Taux de gonflement	S (%)	Ip
Faible	0 -1,5	0 -10
Moyen	1,5 -5	10 -20
Elevé	5 -25	20 -35

Tableau II.3: Potentiel de gonflement d'après RanganathamEt Satyanarayana (1965).

I _R	Potentiel de gonflement
0- 20	Faible
20- 30	Moyen
30- 60	Fort
>60	Très fort

Tableau II.4: Potentiel de gonflement d'après Snethen .

I _R	Potentiel de gonflement
>35	Faible
22- 48	Moyen
22- 32	Fort
<18	Très fort

Tableau II.5: Potentiel de gonflement d'après l'établissement de Recherche bâtiment.

Ip (%)	P<2m	Potentiel de gonflement
>35	>95	Très élevé
22- 48	60- 95	Elevé

18- 22	30- 60	Moyen
<18	<30	30

Tableau II.6: Potentiel de gonflement d'après Ghen .

P<74m	WL (%)	Pression de gonflement (6 ans)	Potentiel de gonflement
> 95	> 60	10	Très élevé
60 - 95	40 - 60	2,5 - 5	Elevé ablist
30 - 60	30 - 40	1,5 - 2,5	Moyen
< 30	< 30	< 0,5	Faible

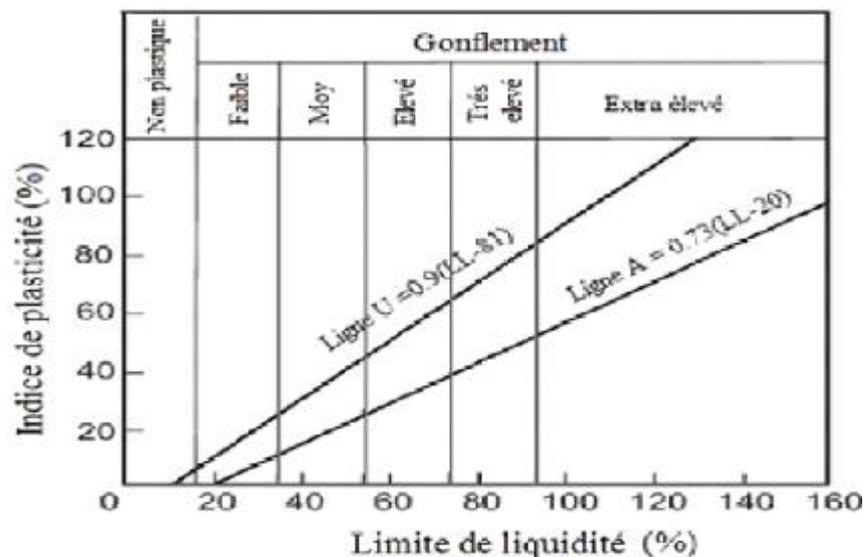


Fig.II.9 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman.

Enfin, dans la catégorie des classifications utilisant trois facteurs, on cite la classification de Holtz, Dakshanamurthy et Raman donnée par le tableau II.7, celle de Seed et al. Et celle de Williams et Donaldson. Ces deux dernières classifications sont données respectivement par

les figures II.10 et II.11 données ci-après. Sur ces figures est représenté le nuage de points représentatifs des sols testés.

Tableau II.7. Potentiel de gonflement d'après Holtz, DakshanamurthyRaman .

Potentiel de gonflement	Ip (%)	WR (%)	WL (%)
Faible	< 18	> 15	20 - 35
Moyen	15 - 25	10 - 15	35 - 50
Fort	25 - 41	7 - 12	50 - 70
Très fort	> 35	< 11	> 70

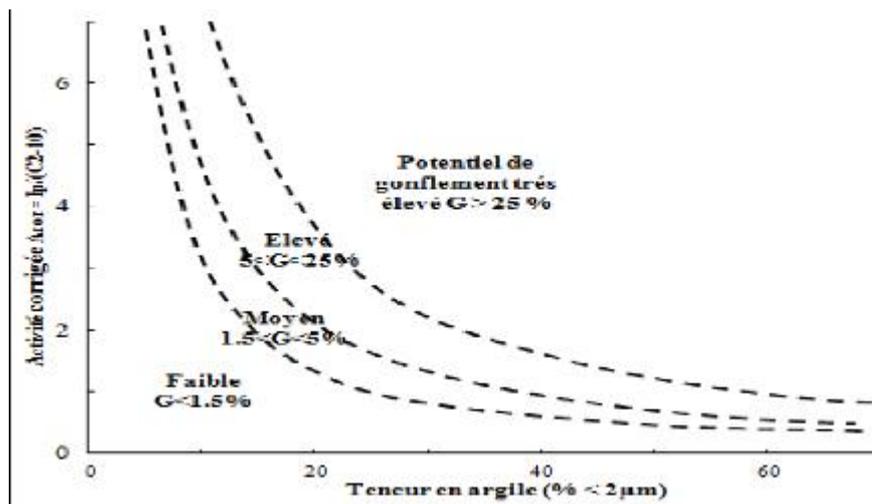


Fig.II.10 : Classification de Seed et al.

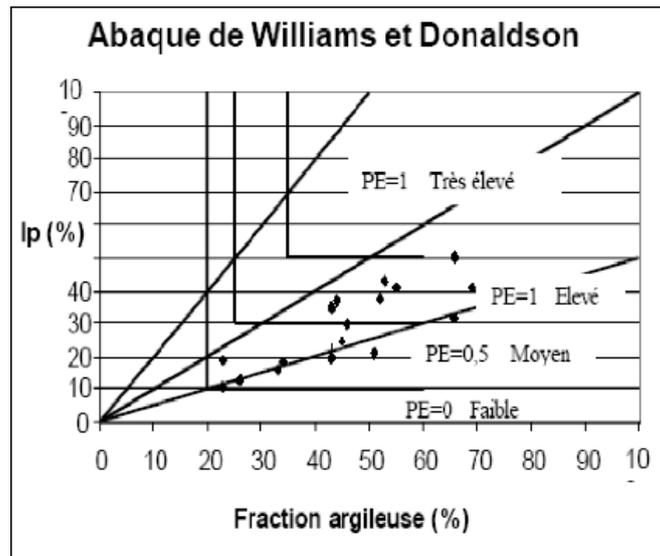


Fig.II.11 : La classification de Williams et Donaldson.

II.6.2.2-Estimation du gonflement –Méthodes empiriques (indirectes) :

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques.

De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement σ_g ou le potentiel de gonflement C_g aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale w_i ,

densité sèche initiale d , limite de liquidité W_L , indice de plasticité IP , limite de retrait w_s , pourcentage des particules d'argiles < 2 micromètre,...) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles. Plusieurs relations empiriques ont été proposées.

Tableau II.8: Modèles d'estimation du taux de gonflement (E_g) et de la pression de gonflement (σ_g).

Auteur(s)	Équations	Paramètres
Seed et al.	$E_g = 2,16 \cdot 10^{-3} (Ip)^{2,44}$	E_g et Ip
Ranganatham et	$E_g = 41,13 \cdot 10^{-5} (W_L - W_s)$	E_g , W_L et W_s

Satyanarayana		2,67	
Komornik David	et	$E_g = 6,7 + 2,4I_p$ (marnes) $E_g = 0,9 + 2,1I_p$ (argiles) $\log a_g = -2,132 + 0,0208 WL + 6,66 \cdot 10^{-4} y_d - 0,0269 W_i$	E_g (%) a_g (kPa) W_i (%) WL (%) y_d (kg/m ³)
Vijavergia Ghazzaly	et	$\log E_g = 0,033 WL - 0,083 W_i + 0,458$ $\log a_g = 0,033 WL - 0,083 W_i + 1,967$	E_g (%) a_g (kPa) W_i (%) WL (%)
Vijavergia Ghazzaly	et	$\log E_g = 0,033 WL + 0,0032 y_d - 6,692$ $\log a_g = 0,033 WL + 0,0032 y_d - 5,154$	E_g (%) a_g (kPa) WL (%) y_d (kg/m ³)
Didier et al.		$\log a_g = uWL + v y_d - t W + k$ $= 2,55 (y_d/y_w) - 1705$	u, v, t et k sont des constantes W : teneur en eau naturelle (%) WL (%), y_d (g/cm ³) et a_g (bars)
O'Neill Ghazzaly	et	$E_g = 2,77 + 0,131 WL - 0,27 W_i$	E_g (%) W_i et WL sans unités
Brackley		$E_g = (5,22 - 147(e/I_p) \log P) \cdot (0,525 I_p + 4,1 - 0,85 W_i)$ $E_g = 5,22 - 147(e/I_p)$	a_g (kPa) e : indice des vides P : surcharge extérieure (kPa) W_i (%) et I_p (-)

Komine et Ogata	$E_g = (K_{yd} - 1) * 100$	K est un constant y_d (g/cm ³)
Guiras-Skandaji	$E_g = -117,59 + (3,0571 \cdot W_i)$	E_g (%) W_i (%)
Yilmaz	$E_g = 0,155 W_L - 0,763 CEC - 2,04$	$E_{get} W_L$ sans unités CEC (meq/100g)

II.6.2.3-Estimation du gonflement –Méthodes directes:

- Méthode de gonflement libre* : Dans l'essai de gonflement libre, l'échantillon, soumis à une faible pression correspondant au poids du piston et de la pierre poreuse, est laissée en contact avec de l'eau. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, l'échantillon quasi-saturé suit un chemin de chargement par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener le volume de l'échantillon à sa valeur initiale. Cette méthode peut se faire dans un oedomètre ou un appareil triaxial. Le mode de chargement influe sur la valeur de la pression de gonflement. En effet, Guiras-Skandaji a montré que la pression de gonflement déterminée à partir des essais de gonflement libre dépend de la vitesse de chargement. Un chargement rapide, après 24 heures, aboutit à une pression de gonflement plus importante qu'un chargement lent (à la fin de la phase de consolidation primaire : après stabilisation des déformations). Ce comportement a déjà été constaté également par Tisot.

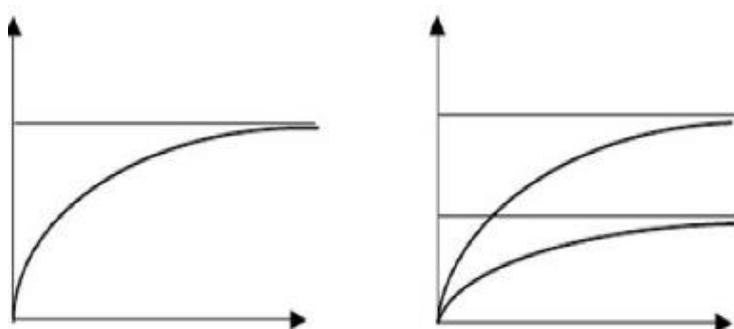
L'avantage de cette méthode est qu'elle nécessite une seule éprouvette et permet d'obtenir, outre la Pression de gonflement et le gonflement libre, la courbe de compressibilité du sol saturé (après gonflement). Cependant, l'inconvénient est qu'elle n'est pas représentative du chemin de contrainte suivi par le sol lorsqu'il subit un gonflement sous confinement.

- Méthode de gonflement sous charges constantes* : Pour éviter l'inconvénient de la stabilisation de chaque palier de la méthode précédente, on peut utiliser une méthode dite « méthode de gonflement sous charges constantes » ou « méthode de gonflement en parallèle ». Elle nécessite plusieurs échantillons identiques, chaque échantillon est soumis à une humidification sous charge constante (pression verticale à l'odomètre ou contrainte isotrope à l'appareil triaxial), selon la valeur de la charge, il se produit un

gonflement ou un effondrement du sol. En traçant la courbe des déformations volumiques en fonction des contraintes appliquées ($\log \sigma$) lors de l'humidification, on peut déterminer la contrainte correspondant à une déformation nulle, qui est la pression de gonflement. Selon Gilchrist, Noble, Sridharan et al., Guiras-Skandaji, Bigot et al., et Yahia-Aïssa, cette courbe est une droite, tandis que Chu & Mou trouvent une courbe exponentielle et Philipponnat, une droite ou une hyperbole. Le potentiel de gonflement dans cette méthode est variable, il correspond à la variation de hauteur sous une pression donnée.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de s'approcher le plus des conditions in situ. En effet, le gonflement vertical in situ se fait généralement sous charge verticale constante. En revanche, l'inconvénient est qu'elle nécessite au minimum trois échantillons identiques, qui dans certains cas, sont difficiles à préparer si l'on veut travailler sur des échantillons intacts. C'est pour cela qu'elle est plutôt utilisée pour des matériaux remaniés.

- *Méthode de gonflement à volume constant* : Le principe de cette méthode est d'humidifier une éprouvette tout en maintenant son volume constant. L'essai est pour suivi jusqu'à ce que l'échantillon ne présente plus de tendance au gonflement. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement. A l'oedomètre ceci consiste à bloquer le piston sur un bâti de presse afin d'empêcher la déformation de hauteur et à mesurer l'évolution de la contrainte de gonflement verticale σ_{vg} (figure II.12 a) à l'aide d'un capteur de force intercalé entre la cellule et le bâti de presse. Pour l'appareil triaxial, la contrainte de gonflement latérale (figure II.12 b) est aussi mesurée à l'aide d'un contrôleur pression-volume.



a) chemin oedométrique

(b) chemin triaxial

Fig.II.12 : Méthode de gonflement à volume constant

II.7- Principales causes de gonflement

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement :

- hydratation par adsorption.
- hydratation par osmose.
- hydratation par capillarité.
- transformations chimiques.

II.7.1-Hydratation par adsorption

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes :



Fig.II.13 : Forces électrostatiques dans la double couche, Répartition des ions autour d'une particule chargée.

- *Forces d'attractions* : Généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins
- *Forces de répulsion* : Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs). Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance interparticulaire. Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes. Les variations de concentrations en cations, et en anions dans la double couche, diffusée, sont déterminées à partir de l'équation de Poisson-BOLTZMANN et sont présentées sur la figure II.13. A proximité de la surface chargée, la concentration en cations est plus élevée que celle en anions.

La nature des cations compensateurs joue un rôle important. En effet, le rayon ionique hydraté varie avec le type du cation échangeable comme le tableau II.10 présente, lors de l'hydratation du cation compensateur, l'écartement des feuillets d'argiles sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté sera petit.

Tableau II.9: Dimensions des cations hydratés et non hydratés.

Cation compensateur	Rayon ionique (Å°)	
	Non hydraté	hydraté
Li*	0.6	7.3
Na*	0.95	5.6
Ka ⁺	1.33	3.8
Rb ⁺	1.58	3.6
Cs ⁺	1.67	3.6
Ca ²⁺	0.99	9.6
Mg ²⁺	1.08	10.8

ABOUBEKER et AISSA MAMOUNE, ont montré l'influence du rayon hydraté de la solution chimique (KCl, NaCl, et CaCl) sur le gonflement des argiles. Leurs essais du gonflement libre témoignent du fait que le cation (Ca²⁺) cause le plus grand gonflement, (K⁺) le plus faible et (Na⁺) est intermédiaire. La stabilité des cations compensateurs est aussi très importante. En effet, les cations sont liés aux feuillets par des forces de nature électrostatique et possèdent les propriétés d'être échangeables. Cette facilité d'échange sera aussi un facteur influant sur le gonflement. Le classement général admis est le suivant :

Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Al³⁺.

D'après cette série, le lithium est le plus facile à remplacer alors que l'aluminium est le plus difficile.

II.7.2-Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semiperméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la

solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique

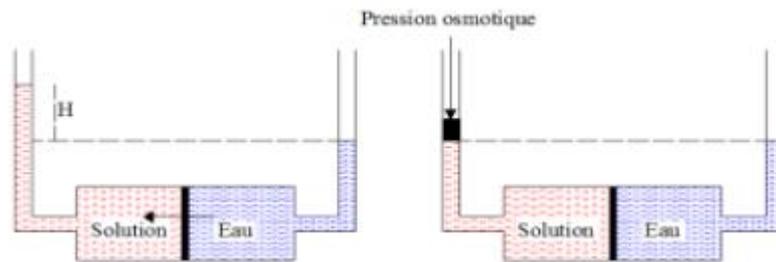


Fig.II.14 : Phénomène osmotique idéal.

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, ils ont résultent alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses entraînant l'augmentation de la distance inter feuillet. Par contre, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux. Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins.

II.7.3-Hydratation par capillarite

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation. La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux. La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité. Dans l'hypothèse de pores cylindriques, la pression capillaire (P_c) est déterminée par la loi de Jurin :

$$P_c = U_a - U_w = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{r_c}$$

(u_a) et (u_w) sont respectivement les pressions d'air et d'eau, (σ) est la tension de surface eau-air et (θ) est l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide. Cette relation implique qu'au niveau du ménisque, plus r_c est petit, plus la pression d'eau est inférieure à la pression d'air. Comme en mécanique des sols ou des roches, la pression atmosphérique est négative. Plusieurs facteurs affectent la capillarité des milieux poreux :

- La pression et la distribution des pores.

- Les fluides et solides impliqués et l'histoire de saturation.

En résumé, l'attraction de l'eau par un matériau argileux non saturé se réduit pas simplement à l'action de la succion totale ou interviennent également les actions d'adsorption physico-chimiques.

SANTOS et al, ont exposé deux échantillons d'argilite initialement sèches à l'eau et à l'huile. L'échantillon mis en contact avec de l'eau est altéré. Malgré le fait que l'huile soit infiltrée dans le deuxième échantillon, ce dernier n'a pas réagi. Les auteurs ont attribués ce phénomène aux interactions physico-chimiques primordiales dans les milieux argileux et non à l'effet de la capillarité.

II.8-Facteurs qui affectent le gonflement

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs :

- les facteurs intrinsèques ;
- les facteurs externes.

II.8.1-Facteurs intrinsèques

- ✓ La composition minéralogique ;
- ✓ Le type de cations compensateur ;
- ✓ La Capacité d'échange en cations (CEC) ;
- ✓ La Surface spécifique ;
- ✓ La structure du sol ;
- ✓ La quantité de minéraux non argileux.

II.8.2-Facteurs externes

D'autres paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante peuvent avoir une influence importante sur le gonflement, on cite en particulier :

- ✓ Les conditions de compactage (statique ou dynamique) ;
- ✓ L'énergie de compactage ;
- ✓ La teneur en eau initiale ;
- ✓ La densité sèche ;
- ✓ L'effet d'échelle ;

- ✓ Le régime de contraintes ;
- ✓ le frottement latéral ;
- ✓ Les cycles retrait-gonflement ;
- ✓ La durée des essais et la température.

II.9-Conclusion :

S'agissant du gonflement des sols argileux, il apparaît qu'on est devant un phénomène très complexe. Ce phénomène survient suite à l'interaction du matériau argileux avec l'eau, à différents stades entraînant la modification de plusieurs de leurs mécanismes physiques et chimiques. Cette modification apparaît surtout sur la structure et de la texture du matériau argileux, du fait du nouveau réarrangement des particules et de la compensation des vides.

Chapitre III

TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX

III.1-Introduction :

Le traitement des sols à la chaux est une pratique très ancienne, comme en témoignent les bétons de terre traditionnels (argile+sable+chaux) et de façon plus spectaculaire, la Grande Muraille de Chine dont le matériau de nombreuses sections est un mélange compacté d'argile et de chaux. La fabrication de la chaux remonte à l'âge de la pierre, où elle a été utilisée comme liant dans les constructions. Plusieurs études ont montré que la chaux est un bon stabilisateur des sols argileux, grâce aux réactions qui peuvent prendre place, surtout par le phénomène chimique de la floculation des grains.

III .2- Définition :

Dans le cadre des techniques de modification des caractéristiques des sols, il faut faire la distinction entre trois termes:

1. **Traitement** : ce terme désigne un procédé consistant la modification des caractéristiques d'un matériau donné pour qu'il puisse remplir les fonctions auxquelles on le destine.
2. **Amélioration** : consiste à améliorer les caractéristiques géotechniques du matériau (sol), mais il garde sa nature.
3. **Stabilisation** : lors d'une stabilisation, les propriétés mécaniques du sol sont nettement augmentées (à court ou à long terme). Le matériau sera amené à un état définitif plus stable vis-à-vis de l'eau (variation de la teneur en eau) et du gel.

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde.

III.3.Utilisation de la chaux :

L'utilisation de chaux aérienne, dans le domaine du Génie Civil, est conditionnée par le respect de la directive européenne sur les produits de construction qui impose, entre autres, la conformité à la norme NF EN 459 : Chaux de construction. Cette norme distingue deux catégories de chaux aériennes pour la construction :

- **calcique** (notation CL) qui comprend :
 - l'oxyde de calcium : CaO ,
 - l'hydroxyde de calcium : Ca(OH)_2 ;
- **dolomitique** (notation DL) qui comprend :
 - l'oxyde de calcium et de magnésium : CaO.MgO ,
 - l'hydroxyde de calcium et de magnésium : $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$.

Les chaux aériennes sont sans addition de composants dotés de propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques et elles peuvent se présenter sous deux formes :

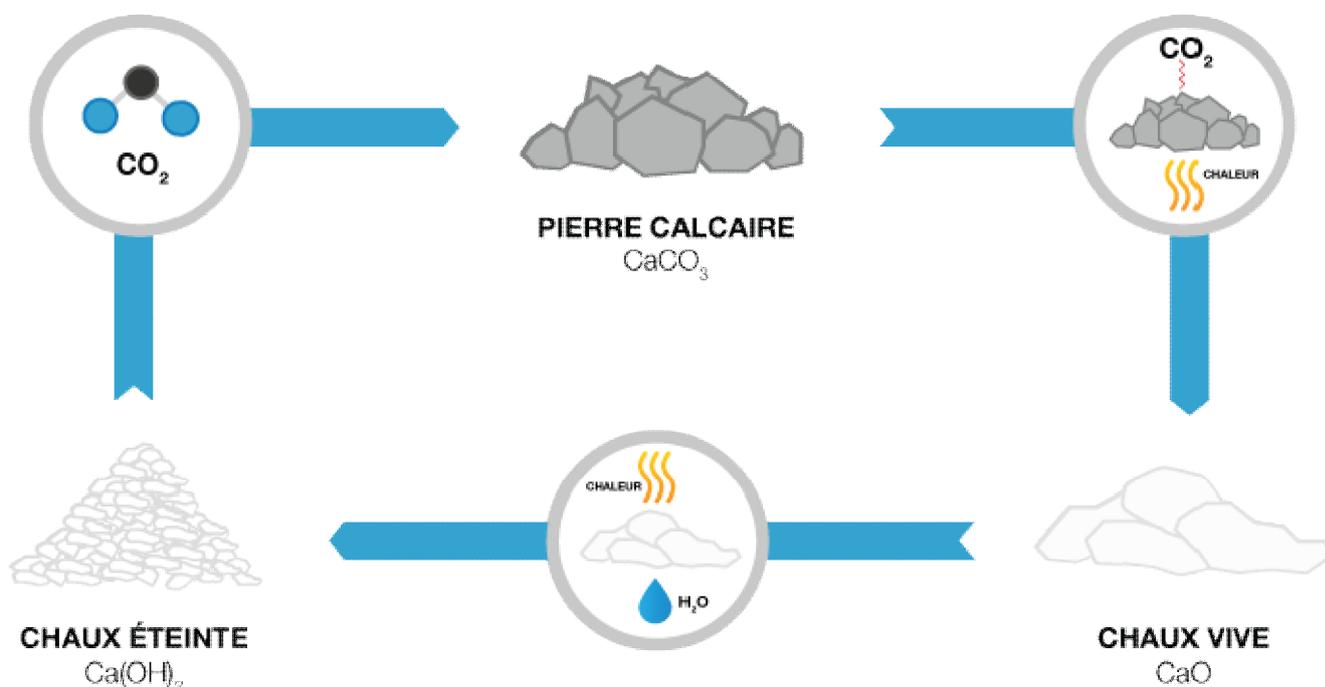
- **chaux vive** (notation Q) qui existe sous forme d'oxyde et réagit de façon exothermique avec l'eau ;
- **chaux hydratée** également qualifiée d'éteinte – (notation S) essentiellement sous forme d'hydroxyde obtenu par hydratation – ou extinction – contrôlée de l'oxyde. La chaux hydratée est disponible à l'état de poudre d'une part, et en suspension dans l'eau, d'autre part. Dans ce dernier cas, on obtient, du plus concentré au plus dilué, une pâte, un coulis ou un lait de chaux.



Fig III .1 :La chaux vive.

III.4. Le cycle de la chaux :

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)_2) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans cet état, le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère ou provenant de procédés industriels peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux. Le temps requis à la chaux pour retourner à l'état de calcaire peut-être de quelques minutes avec l'aide de procédés industriels à plusieurs années si elle est laissée aux conditions atmosphériques.



FigIII.2 :Le cycle de la chaux.

III.5.Fabrication de la chaux :

Fabriquer de la chaux est une technique qui remonte à l'âge de bronze et les antiques fours à chaux n'auraient pas honte devant les modernes usines! Entre nuances, colorants et pigments, plongeons dans un univers millénaire et pourtant ultra-moderne.



Fig III .3 :Une carrière de calcaire ou pierre à chaux.

III.5.1-Fabriquer la chaux: une technique millénaire :

Rien de plus simple, en principe, que de fabriquer de la chaux! Une roche sédimentaire abondante, le calcaire, un peu de chaleur et le tour est joué. Il suffit de porter des blocs de calcaire à très haute température, entre 900 et 1200°C⁽¹⁾ pour obtenir une poudre aux propriétés saisissantes: la chaux vive.

III.5.2-Usine de chaux :

Le processus a lieu dans d'immenses fours et les usines sont souvent situées à côté des carrières de calcaire. La calcination de la roche émet énormément de CO₂, d'une part pour obtenir les températures voulues dans les fours, et d'autre part par la réaction chimique au sein de la roche elle-même. Celle-ci perd près de 45% de sa masse sous forme de CO₂.

III.6-Nuances de chaux :

Il existe plusieurs types de chaux et elles n'ont pas toutes les mêmes propriétés:

- **La chaux vive.** C'est la poudre qu'on obtient à la sortie du four. Elle n'est pas utilisable directement et est même **dangereuse**. En effet, quand mise en contact avec de l'eau, une réaction chimique puissante a lieu, libérant de grandes quantités de chaleur. Sa manipulation demande donc des précautions.
- **La chaux aérienne.** Une fois hydratée, la chaux vive devient de la chaux éteinte, ou aérienne. C'est elle qu'on utilise en maçonnerie, dans l'agriculture et dans l'industrie. Elle peut se présenter en poudre ou en pâte. Elle se solidifie au contact de l'air, en absorbant le dioxyde de carbone qui y est présent.

- **La chaux hydraulique.** Si le calcaire utilisé à la base est impur, c'est qui est souvent le cas avec la présence d'argile (silice), on obtient une chaux hydraulique après hydratation. Celle-ci se solidifie au contact de l'eau, d'où son nom. Moins perméable que la chaux aérienne, elle sèche aussi moins vite à l'air libre.
- **la chaux désigne** aussi le matériau final de chaulage, la matière ou liant « ayant fait prise » après utilisation. Bien que ce ne soit que le liant, on parle d'un mur à la chaux, mais chimiquement la chaux en question est majoritairement redevenue du calcaire (principalement du carbonate de calcium (CaCO_3)).

III.7-Four à chaux :

Les fours à chaux existent depuis l'Antiquité à travers le bassin méditerranéen et permettent la fabrication de la chaux. Les fournaisses modernes n'ont pas changé le principe qui existe depuis des siècles.



FigIII.4 :Four a chaux.

III.8- Pigments de chaux :

D'apparence blanchâtre, oscillant entre le blanc franc et le gris-marron suivant le type de produit, la chaux traditionnelle ne convient pas forcément à tous les goûts. La couleur a longtemps posé problème à cause des réactions chimiques associées au pigment et colorants organiques. La chaux absorbe en effet le carbone...

Les pigments à chaux utilisés sont donc des pigments minéraux : oxydes, ocres et terres naturelles sont les solutions les plus fréquentes. Le dosage reste délicat et le risque est de provoquer une réaction chimique qui aboutirait à une faïence par cuisson des terres...

III.9-Traitement de sols :

Le traitement des sols à la chaux permet de les assécher, les rendre plus meubles et surtout d'augmenter leur portance. Technique provenant du génie civil et souvent réservée aux routes, elle s'utilise de plus en plus pour stabiliser les terrains.

III.9.1-Le traitement des sols à la chaux :

-L'idée global est que certains sols à l'état naturel sont impropres à supporter des charges lourdes, s'affaissent, se déforment et réagissent au cycle du gel et du dégel. Il faut donc les stabiliser avant de construire dessus, notamment des routes et autoroutes. Plutôt que de retirer les couches "molles" et d'importer des matériaux de substitution, l'idée est apparue de les traiter à la chaux.

-La chaux vive permet en effet d'assécher très rapidement des sols détrempés, d'abord par hydratation de la chaux pour son extinction et simultanément par évaporation. La réaction d'extinction est exothermique et dégage beaucoup de chaleur, qui contribue à assécher le sol.

-Au-delà de cette première réaction immédiate, la chaux se mélange aux argiles du sol et il y a **floculation**, c'est-à-dire que la chaux agit comme liant avec les particules argileuses et les agrège ensemble. Le sol devient beaucoup plus meuble. Il suffit ensuite de le compacter avec un engin lourd pour avoir un support ferme.

- Si le sol traité est relativement sec et argileux, on peut même se dispenser de l'étape de la chaux vive, en utilisant directement une chaux aérienne.

Dernier effet recherché par un traitement à la chaux, **l'éradication des matières organiques** permet d'assainir considérablement le terrain. Pour assécher et assainir des sols marécageux, on utilisera ainsi un mélange de sable et de chaux vive.

Dans le traitement des sols à la chaux, trois caractéristiques de l'additif (la chaux) sont très importantes :

- ✓ la teneur en CaO libre ou disponible.
- ✓ La finesse qui conditionne l'homogénéité du mélange chaux – sol.
- ✓ La réactivité à l'eau des chaux vives.

III .9.2-Le traitement des sols en place à la chaux :

Le traitement des sols par un liant hydraulique vise à rendre un sol, dont les caractéristiques ne seraient pas adéquates, apte à supporter une chaussée, une plateforme (parking, aire

commerciale ou industrielle) ou tout simplement le passage d'engins de travaux. Ce traitement vise également à le rendre résistant aux aléas climatiques auxquels il peut être soumis.

L'idée de base, éminemment économique, du traitement de sol est de considérer le sol lui-même comme un matériau.

Cette technique, développée dans les années 50 pour la réalisation d'assises de chaussées dans des pays tropicaux, s'est acclimatée en France dans les années 60.

III.9.3-Etude préalable :

Une étude d'analyse des sols avant traitement est toujours nécessaire afin que celui-ci soit aussi adapté que possible. Cette étude est confiée à des laboratoires spécialisés qui peuvent :

- caractériser la nature de l'argile par diffraction du rayon X
- évaluer la teneur en argile par sédimentométrie
- évaluer différents teneurs des sols par des analyses chimiques : teneur en carbone organique, teneur en nitrates, capacité d'échanges ioniques.

Le traitement du sol proprement dit est précédé de planches d'essais qui permettent d'approcher les formulations et les dosages adéquats. Les sols étant très hétérogènes, les chantiers de grandes surfaces doivent multiplier ces types d'essais.

III.9.4-Action de la chaux sur les sols :

Les sols fins à teneur élevées en argiles ou limons ne présentent aucune stabilité au regard des conditions météorologiques : ils gonflent en présence d'eau, se rétractent par sécheresse et foisonnent quand il gèle. Leur utilisation routière est donc très incertaine. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement entre 1 et 3%.

Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux.

III.9.5-Teneur en eau :

La teneur en eau du sol est abaissée du fait de la consommation d'eau liée à l'hydratation de la chaux vive, $\{CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 12 \text{ kJ.mol}^{-1}\}$, de l'évaporation provoquée par la chaleur d'hydratation de la chaux, par l'apport de matériau sec, enfin par l'aération du sol provoquée par le malaxage.

Pour mémoire, la teneur en eau d'un sol peut baisser de 1 à 2% pour un ajout de 1% de chaux.

III.10-Amélioration des propriétés géotechniques :

L'agglomération par floculation des particules argileuses sous l'action de la chaux modifie très rapidement les paramètres géotechniques du sol considéré :

- Diminution de l'indice de plasticité
- Augmentation de l'indice portant immédiat
- Diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.

En d'autres termes, le sol passe d'un état plastique à un état solide.

III.11-Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux :

La chaux, qui est une base forte, élève le pH du sol. Ce fort pH favorise l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Ces produits en solution réagissent avec le calcium du sol pour produire des aluminates et des silicates de calcium hydratés, ainsi que des silicoaluminates de calcium hydratés qui jouent le rôle de liant en cristallisant entre les grains du sol (réaction pouzzolanique). Cette réaction peut se prolonger sur des mois et même des années.

III.12-Eléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique :

Certains éléments sont défavorables à une prise normale du liant hydraulique et peuvent même l'empêcher. D'autres éléments provoqueront des gonflements dommageables : minéraux soufrés, micas, matière organique, fertilisants et engrais, teneur excessive en argile... Ces perturbations peuvent être anticipées par des études préalables menées dans les laboratoires compétents.

Tableau III.1 : Les différents types de chaux :

Appellations ou noms	Chaux libre (%)	Argile (%)	Indice d'hydraulicité	Temps de prise (j)	Résistance à la compression à 28 j (kg/cm^2)
CL 90	90	~0	0 - 0,1	>30	
DL 85	85 (CaOMgO)	~0	0 - 0,1	>30	

CL 80	80	~0	0 - 0,1	>30	
DL 80	80 (CaOMgO)	~0	0 - 0,1	>30	
CL 70	70	~0	0 - 0,1	>30	
DL 70	80 (CaOMgO)	~0	0 - 0,1	>30	
NHL 2	50	5 - 8	0,1 - 0,16	10 - 25	20 - 70
NHL 3,5		8 - 14	0,16 - 0,3	10 - 15	35 - 100
NHL 5	15	14 - 20	0,3 - 0,4	2 - 4	50 - 150
NHL-Z, éminemment hydraulique, <u>clinker</u>	chaux <2	20 - 30	0,4 - 0,5	<2	>150

III.13-Conclusion :

La chaux est un matériau qui a des avantages très importants :

- contribue à limiter les différents problèmes liés à l'humidité.
- laisse circuler les vapeurs d'eau et « respirer » les murs.
- diminue l'apparition des fissures avec ses caractéristiques « souple » et « élastique ».
- protège les murs des intempéries et le ruissellement d'eau.
- esthétique avec une belle patine sur les années.

Chapitre VI

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ARGILE DE MERS-EL-KEBIR

VI.1-Localisation et description du sol étudié:

Notre étude a été effectuée sur des échantillons de sol provenant de la région de Mers-El-Kébir situés au nord-ouest du pays à proximité de la ville d'Oran. Le sol de ce site est à l'origine de soulèvements non négligeables des fonds de fouille ayant entraîné la fissuration des longrines de la briqueterie de Mers-El-Kébir. Le site, situé au nord-ouest d'Oran, est constitué par des marnes grises et vertes. Ce sont des formations sédimentaires marines lagunaires vers le sommet, connues sous l'appellation de marnes bleues du Miocène supérieur (Hachichi et al ; 2002). Leur épaisseur peut parfois dépasser 300 mètres.

VI.2-Les Essais Géotechniques :

La réalisation des essais en laboratoire de mécanique des sols est complémentaire et nécessaire aux essais in situ afin d'établir un rapport géotechnique complet. Dans notre travail, les essais ont été réalisés au laboratoire LTPO d'Oran, conformément aux normes (françaises et européennes) et aux modes opératoires en vigueur. Les essais que nous avons effectués sur les échantillons de sol sont :

A. Les essais physiques :

- Essai teneur en eau
- Les limites d'Atterberg.
- Analyse granulométrique par tamisage
- Analyse granulométrique par sédimentation.

B. Les essais mécaniques :

- Essai de compressibilité à l'odomètre.
- Essai Proctor.

C. L'analyse chimique

- Teneur carbonate de calcium
- Essai au bleu méthylène

VI.3-Les essais physiques :**VI.3.1- Essai de teneur en eau :****a. Principe de l'essai :**

Le but de l'essai est la détermination de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de matériaux par séchage dans une étuve. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

b. Appareillage :

- Une étuve.
- Une balance.
- Cuillères ou louches de laboratoire.
- Récipients métalliques.
- Des tares.
- Des couteaux.



Fig.VI.1:Etuve

c. Mode opératoire de l'essai :

- Ouvrir l'échantillon tout en vérifiant qu'il n'est pas fissuré (infiltration de la paraffine).

- Noter la nature de l'échantillon (aspect ; couleur ; nature géologique.....etc).
- Procéder au taillage.
- Peser le matériau dans l'état dans lequel il se trouve, c'est-à-dire humide soit: W_h .
- Sécher le matériau pendant 24h à 105°C pour les sols insensibles, et à 50°C pour les sols sensibles.
- Peser le matériau sec soit : W_s .

d. Expression des résultats :

On détermine la teneur en eau (ω) de notre échantillon de sol en utilisant la formule suivante :

$$\omega = [(W_h - W_s) / W_s] \times 100$$

$$\omega = \frac{2222.22 - 2222.2}{2222.2} \times 100 = 2.22\%$$

Avec :

ω : la teneur en eau pondérale exprimée en %.

W_h : masse de l'échantillon dans l'état humide.

W_s : masse des grains solides contenus dans l'échantillon.

VI.3.2- Les limites d'Atterberg :

a .But de l'essai :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance. Cet essai est destiné à la détermination de deux limites (limite de liquidité et limite de plasticité). L'essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Il se fait uniquement sur les éléments fins du sol (les éléments passent à travers le tamis de dimension d'ouverture de maille de 400µm).

b- Principe de l'essai :

- Détermination de la limite de liquidité W_L :

On recherche la valeur de la teneur en eau pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués.

- Détermination de la limite de plasticité W_P :

Il s'agit de rechercher la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

c- Appareillage :

- Un appareil de Casagrande.
- Une coupelle (lisse ou rugueuse).
- Un outil à rainurer.
- Des spatules ; des capsules ; des godets.
- Une balance.
- Une étuve.



Fig. VI.2 :Appareil de Casagrande et les différents outils

d. Mode opératoire de l'essai :*- Préparation du sol :*

- Echantillonner le sol et homogénéiser par brassage.

- Imbiber une masse de sol dans un récipient d'eau pendant au moins 24 heures.
- Tamiser par voie humide au tamis 400 μ m.
- Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac.
- Siphonner l'eau claire du bac sans entraîner de particules solides après une décantation d'au moins 12 heures.
- Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépasse pas 50°C.
- Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène.

-Détermination de la limite de liquidité :

Le sol est mélangé à une quantité d'eau. La pâte obtenue est placée dans une coupelle de 100 mm de diamètre environ. On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial. A l'aide d'une came, on fait subir une série de chocs à la coupelle. On observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure. La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Cette relation s'écrit comme suit :

$$W_L = \omega \times (N/25)^{0.121}$$

Avec :

W_L : la limite de liquidité.

ω : La teneur en eau au moment de l'essai.

N : Nombre de coups.



Fig.VI.3:Essai pour la détermination de la limite de liquidité.

TableauVI.1 : Résultats de l'essai de la limite de liquidité.

Moule	Nombre de coups	Poids de la tare	Poids humide	Poids sec	Poids sec-poids tare	Poids sec -tare	W%
P	15	12.7	40.6	31.8	27.9	19.2	45%
A	19	11.8	32.8	27.1	21	15.3	37%
3	27	12.3	32.2	26.2	19.9	13.9	43%

La Limite de liquidité de notre échantillon de sol est calculée comme suit :

$$LL = \frac{45\% + 37\% + 43\%}{3} = 41.67\%$$

-Détermination de la limite de plasticité :

On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau; on façonne avec la pâte un rouleau de 3 mm \pm 5 de diamètre pour une longueur de 10 mm. La limite de

plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.



Fig.VI.4 : Essai pour la détermination de la limite de plasticité

TableauVI.2 : Résultats de l'essai de la limite de plasticité.

moûle	Poids de la tare	Poids humide	Poids sec	Poids humide - tare	Poids sec - tare	W%
T1	11.6	16.6	15.6	5	4	25%
S	11.6	15.4	14.6	3.8	3	26.66%

Limite de plasticité : $L_p = 25\% + 26.66\% = 25.83\%$

d- Expression des résultats :

- La limite de liquidité (W_L) : caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.
- La limite de plasticité (W_P) : caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau pondérale, en pourcentage, maximale pour travailler un sol et éviter la compaction.
- Indice de plasticité (I_P) : différence entre les limites de liquidité et de plasticité, cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_P = W_L - W_P$$

Pour notre échantillon de sol : $I_P = 41.66\% - 25.83\% = 15.83\%$

$I_P = 15.83\%$

Selon la valeur de leur indice de plasticité, les sols peuvent être classés comme suit :

Tableau VI.3 : classification de l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Selon le tableau si dessus et la figure si dessous notre argile et de **type plastique**

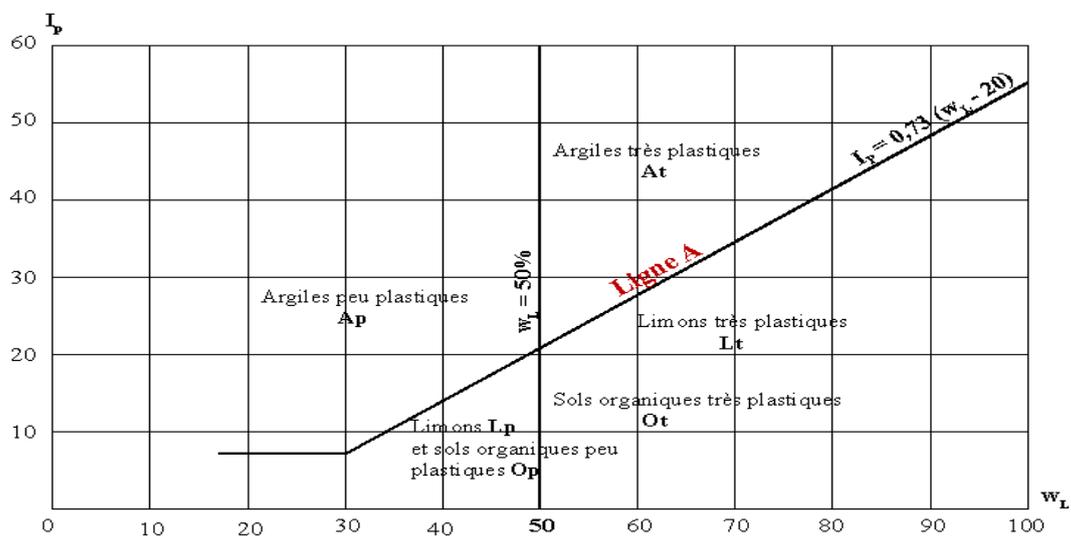


Fig.VI.5 : Classification IP selon l'abaque de casagrande.

VI. 3.3- Essai de granulométrie par tamisage :

a. But de l'essai :

Déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale supérieure à 0.08mm.

b. Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.

c. Appareillage :

- Une série de tamis (5mm-2mm-1mm-0.4mm-0.2mm-0.1mm-0.08mm).
- Une balance.
- Une étuve.
- Un dispositif de lavage avec arroseur.
- Un récipient.



Fig. VI.6 : Tamis

d. Mode opératoire de l'essai :

- Choisir une masse d'échantillon à tamiser.
- Tamisage des fines par lavage en utilisant le plus petit tamis de l'analyse.
- Mettre le matériau à l'étuve.

- Peser le matériau après séchage.
- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne.
- Terminer le tamisage lorsque le refus dans un tamis ne se modifie pas.
- Peser le 1^{er} refus.
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.
- Peser le 2^{ème} refus sans vider le récipient qui contient le 1^{er} refus « **le refus cumulé** ».
- Cette opération se reproduite ainsi de suite jusqu'au dernier tamis.

e. Expression des résultats :

Les calculs s'orientent pour définir le pourcentage de tamisât cumulé sur chaque tamis.

Les pourcentages de tamisât cumulé peuvent être présentés soit sous forme de tableau soit le plus souvent sous forme de courbe granulométrique.

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats, c'est la ligne brisée qui joint les points mesurés avec :

- En abscisses : les dimensions des tamis.
- En ordonnées : le pourcentage du tamisât cumulé des grains de 0% à 100%.

VI. 3.4- Essai de granulométrie par sédimentation:

a. But de l'essai :

C'est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description.

Il s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure à 0.08mm.

b. Principe de l'essai :

La sédimentométrie est basée sur la loi de stock qui exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule selon la relation suivante :

$$V = g \times \frac{\delta - \delta_0}{18\eta} \times D^2$$

Avec :

V : la vitesse de décantation en cm/s.

ρ : le poids spécifique de la particule en g/cm^3 .

ρ_0 : le poids spécifique de la particule en g/cm^3 .

ρ_l : le poids spécifique de liquide en g/cm^3 .

η : la viscosité du liquide.

D : le diamètre de la particule en cm.

c. Appareillage :

- Une étuve.
- Un tamis.
- Une balance.
- Un agitateur.
- Un densimètre.
- Thermomètre.
- Chronomètre.
- Eprouvettes en verre à contenance 20000ml.
- Pilon en caoutchouc plus mortier.
- Réservoir pour eau distillée &Défloculent.



Fig.VI.6 : La sédimentométrie

d. Mode opératoire de l'essai :

- Recueillir le tamisât du tamis de 0.08mm, préparé avec son eau de lavage dans un bac.
- Mettre à décanter.
- Siphonner l'eau du bac, une fois que celle-ci soit redevenue claire, sans entraîner d'éléments fins.
- Placer ensuite le bac et son contenu dans une étuve.
- Prélever une prise d'essai de 80g sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéiser.
- Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé.
- Ajouter 500cm³ du mélange : eau distillé ou déminéralisée plus defloculent (60cm³+440cm³).
- Laisser imbiber pendant au moins 15h à la température ambiante.
- Disperser la prise d'essai dans la solution d'eau et de defloculent au moyen de l'agitateur électrique.
- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation électrique.
- Rincer le récipient avec de l'eau distillée.
- Recueillir le liquide de rinçage dans l'éprouvette.
- Compléter par de l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 2000cm³.
- Verser les 2000cm³ dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre.
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel.
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre.
- Plonger le densimètre immédiatement après déclenchement du chronomètre.
- Faire les lectures depuis le début de l'essai au temps suivant en minutes : 0.5-1-2-5-10-20-40-80-240-1440 .

- Noter à chaque lecture, au sommet du ménisque, la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin.
- Procéder aux trois premières lectures sans retirer le densimètre de la solution.
- Retirer le densimètre de la solution, le nettoyer et le plonger dans l'éprouvette d'eau distillée après la 3^{ème} lecture et à chaque mesure.

e. Expression des résultats :

- On prend des lectures sur la densité des éléments.
- On calcule le diamètre équivalent et le pourcentage des grains.

Tableau VI.4 : Résultat de l'essai de sedimentomètre.

Heure	Temps(s)	Lecture densimètre	C_t	D (μm)
8h20	15s	12.4	12.5	0.100
	30s	12.0	12.1	0.075
	1'	12.0	12.1	0.055
	2'	11.5	11.6	0.038
8h25	5'	10.3	10.4	0.025
8h30	10'	8.8	8.9	0.017
8h40	20'	8.0	8.1	0.012
9h00	40'	7.2	7.3	0.008
9h40	80'	6.4	6.5	0.006
11h00	160'	6.0	6.1	0.004
13h40	360'	6.0	6.1	0.003
	24h	4.5	4.6	0.002



FigVI. 7 :Graphe de sedimentometrie.

Selon la figure VI.7 qui représente le résultat de l'essai de sédimentomètre, le sol étudié contient 52% d'argile.

VI.4- Les Essais Mécaniques :

VI.4.1- Essai de compressibilité à l'œdomètre :

a- But de l'essai :

- Déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol tels que :
 - P_c : la pression de consolidation.
 - C_c : le coefficient de compression.
 - C_g : le coefficient de gonflement.
- Tracer une courbe de comportement appelée la courbe œdométrique ou courbe de compressibilité.
- Ces caractéristiques permettent d'estimer le tassement en fonction du temps.

b.Principe de l'essai :

Le matériau est placé dans une enveloppe rigide, entre deux pierres poreuses destinées à permettre la consolidation du sol par dissipation des pressions interstitielles. On

exerce sur sa partie supérieure une pression variable à l'aide d'un piston et on mesure les affaissements observés après stabilisation.

c. Appareillage :

- Le bâti.
- Une cellule.
- Une étuve.
- Une balance.
- Un comparateur.



FigVI.8 : Le bâti oedométrique.

d. Mode opératoire de l'essai :

- Tailler l'échantillon paraffiné.
- Mettre l'échantillon dans une cellule.
- Mettre la cellule dans le bâti.
- Remplir le châssis avec de l'eau.
- Régler le comparateur à 5000.
- Appliquer des forces verticales suivant la norme.

- Mesurer les tassements à des temps réguliers.

e. Expression des résultats :

Calculer l'indice des vides et tracer les courbes de compressibilité (l'indice des vides en fonction des contraintes).

Tableau VI.5 : Résultats de l'essai œdométrique

Pression (Bars)	Lecture	Tassement moyen (cm)	Indice des vides (eo)
0.013	0	0.000	0.591
0.070	0	0.000	0.591
0.180	0	0.000	0.591
0.460	28	0.0028	0.589
1.025	228	0.0228	0.571
2.145	580	0.058	0.540
4.950	1258	0.1258	0.479
9.450	1854	0.1854	0.426
2.145	1720	0.172	0.438
0.460	1594	0.1594	0.449
0.070	1056	0.1056	0.497

- Tracer les courbes de consolidation (le tassement en fonction du temps).

NB :

Lorsque l'échantillon contient des éléments de dimension supérieure à 5 mm ou 20% d'éléments supérieurs 2 mm l'essai oedométrique sera annulé.

Tableau VI.6 : les charges utilisées durant l'essai oedométrique

(bar)	0.013	0.070	0.180	0.460	1.026	2.145	4.950	9.450
N(Kg)	piston	100g	200g	500g	1Kg	2Kg	5Kg	8Kg

Les résultats de l'essai œdométrique sont représentés dans la figure VI.9

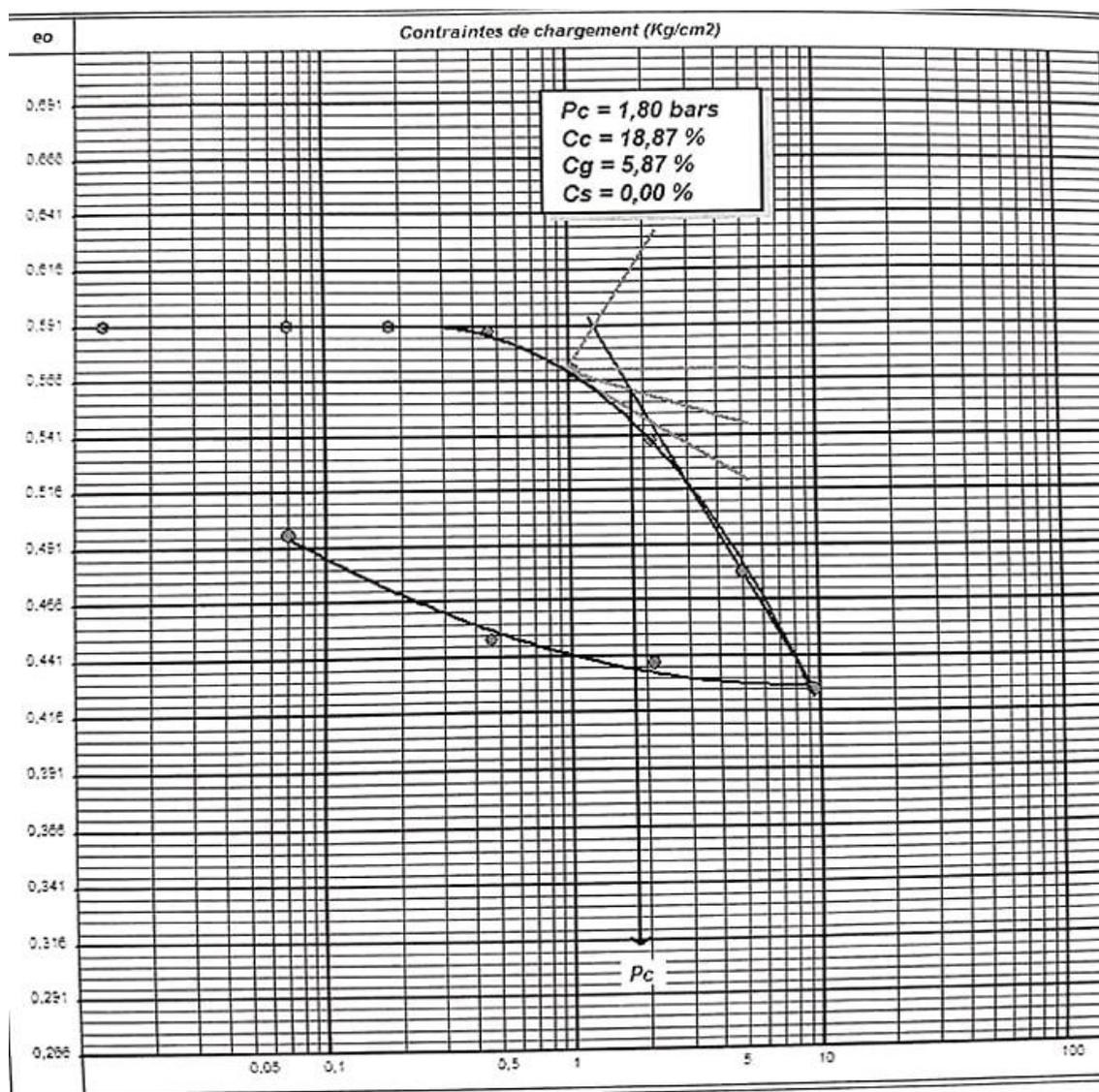


Fig. VI.9 : Courbe de compressibilité de l'argile non traité.

Tableau VI.7 : Exploitation des résultats suivant l'indice de gonflement C_g et l'indice de compression C_c .

$C_c < 0.02$	Sol incompressible		
$0.02 < C_c < 0.05$	Sol très peu compressible		
$0.05 < C_c < 0.1$	Sol peu compressible		
$0.1 < C_c < 0.2$	Sol moyennement compressible	$C_g > 0.05$	Sol gonflent
$0.2 < C_c < 0.3$	Sol assez fortement compressible	$C_g < 0.05$	Sol peu gonflent
$0.3 < C_c < 0.5$	Sol très compressible		
$0.5 < C_c$	Sol extrêmement compressible		

La figure VI.9 montre la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte verticale appliquée pour l'argile étudié non traitée. Selon le tableau ci-dessus, la valeur moyenne de l'indice de gonflement correspondante à 5.85% est un sol gonflant et de l'indice de compression correspondante à 18.87% est un sol moyennement compressible.

VI.4.2- Essai Proctor :

a. But de l'essai :

- Déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du sol et des granulats analysés.

b. Principe de l'essai :

- L'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante).
- L'énergie de compactage dépend de la destination de l'ouvrage, on distingue :
 - L'essai Proctor Normal : énergie de compactage modérée pour remblais en terre (ouvrages en terre, couches de forme,...).
 - L'essai Proctor Modifié : énergie de compactage intense pour fondation de chaussées, piste d'aérodromes,.....etc. Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

c. Appareillage :

- Moule Proctor ou CBR.
- Dame Proctor normal ou modifié.
- Règle à araser.
- Balance.
- Etuve.
- Tamis.
- Récipients.



Fig.VI.10 : Moule Proctor & Dames.

d. Mode opératoire de l'essai :

- Une quantité du matériau séchée à l'air ou dans une étuve.
- Après séchage, le matériau est tamisé à 20mm.
- Diviser le matériau par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.
- Humidifier le matériau à plusieurs teneurs en eau.
- Choisir le moule de compactage.
- Compacter la 1^{ère} couche et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.
- Après le compactage de la dernière couche araser l'excédent du matériau.
- Peser l'ensemble du moule avec le matériau.

- Après le démoulage de l'éprouvette, on prend deux échantillons représentatifs pour déterminer la teneur en eau.

NB :

Le choix du type de moule est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme suivant :

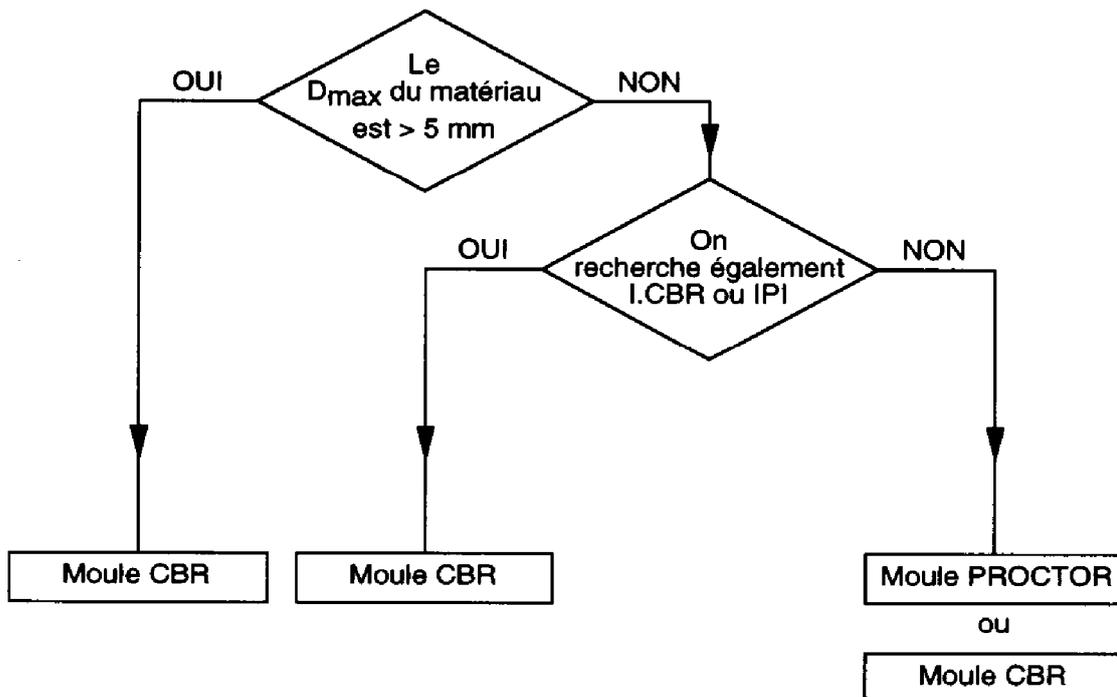


Fig. VI.11 :Types de moule Proctor.

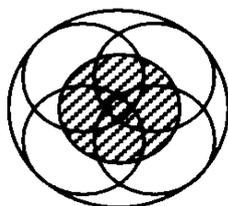
Pour le compactage des éprouvettes humidifiées en respectant les modalités indiquées dans le tableau suivant :

Tableau VI.8 : moule de CBR et de PROCTOR.

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor Normal	Masse de la dame.	2490g	2490g	<p>3 couches, à raison de:</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor normal Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton.	51mm	51mm	
	Hauteur de chute.	305mm	305mm	
	Nombre de couches.	3	3	
	Nombre de coups par couche.	25	56	
Essai Proctor Modifié	Masse de la dame.	4535g	4535g	<p>5 couches, à raison de:</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor modifié Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton.	51mm	51mm	
	Hauteur de chute.	457mm	457mm	
	Nombre de couches.	5	5	
	Nombre de coups par couche.	25	56	

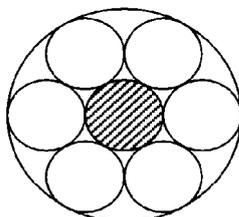
Le principe de la répartition des coups de dame sur une couche est indiqué selon le schéma suivant :

Moule Proctor



Par couche : trois séquences de huit coups répartis, et le 25^e au Centre.

Moule CBR



Par couche : huit séquences de sept coups, six approximativement Tangents à la périphérie et le 7^e au centre.

e.Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- La teneur en eau.
- La masse de matériau sec contenu dans le moule.
- La masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utiliser.

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique $\rho_d = f(w \%)$ et on trace ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux.

Résultat de l'essai de Proctor modifié :

Tableau VI.9- Densité sèche.

Poids d'eau ajouté	14%	16%
Poids total humide	5488	5545
Poids du moule	3560	3560
Poids du sol humide	1928	1985
Volume du moule	989	989
Densité sèche	1.70	1.71

Tableau VI.10 : Teneur en eau.

N° de la tare	N	S
Poids total humide	715	755
Poids total sec	765	695
Poids de la tare	415	365
Poids de l'eau	50	60
Poids du sol sec	350	339
teuneur en eau	14.3	17.7

VI.5- L'Analyse Chimique**VI.5.1- La teneur en carbonate:**

a. But de l'essai :

- Déterminer le rapport entre la masse de carbonate CaCO_3 contenue dans le sol (ou roche) et la masse du sol sec (ou roche sèche).

b. Principe de l'essai :

- L'essai consiste à déterminer le volume d'oxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai (l'essai se réalise au calcimètre Dietrich-Fruhling).

c. Appareillage :

- Un Calcimètre.



Fig. VI.13 :Un Calcimètre.

d. Mode opératoire de l'essai :

L'essai est effectué sur deux prises d'essai.

- Introduire 0.5g de l'échantillon dans le flacon à réaction.
- Remplir l'ampoule et la burette graduée avec de l'eau distillée ou déminéralisée.
- Introduire 0.5gd'acide chlorhydrique - HCl- dans un tube d'essai placé dans le flacon à réaction.
- Obturer le flacon à réaction au moyen de son bouchon et ouvrir le robinet.

- Régler le niveau de l'ampoule sur le zéro de la burette et fermer le robinet.
- Le dégagement gazeux exerce une pression sur l'eau de la burette, donc lire le volume V_1 .
- Renouveler l'essai sur la deuxième prise d'essai (avec 0.5g de carbonate de calcium pur et 0.5g de Hcl).
- Lire le volume V_2 .

e.Expression des résultats :

- La teneur en carbonate est calculée à partir de la formule suivante:

$$\text{Teneur en carbonate (\%)} = \frac{\text{volume des carbonates de l'échantillon } n}{\text{volume des carbonates purs}}$$

Le tableau suivant indique les catégories de sols selon le pourcentage de la teneur en carbonate :

Tableau VI.11 :classification selon la teneur en carbonate.

CaCo3 (%)	Classification
0 - 10	Argile
10 – 30	Argile marneuse
30 – 70	Marne
70 – 90	Calcaire marneux
90 – 100	Calcaire

Pour notre échantillon de sol, la teneur en carbonate se calcule comme suit :

$$\text{CaCo}_3\% = \frac{22 \times 222}{222} = 22\%$$

On peut conclure d'après le résultat obtenu que notre sol est de type argile marneuse.

VI.5.2- Essai au Bleu de Méthylène (Essai à la tache):

a.But de l'essai :

- Déterminer la quantité et la nocivité des éléments argileux contenus dans les fines du granulat.

b. Principe de l'essai :

- L'essai est effectué en ajoutant successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène dans une suspension aqueuse de matériau et par vérification de l'absorption de la solution colorée par un test à la tâche sur papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.
- L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tâche.

c. Appareillage :

- Un agitateur.
- Une burette de 50 ml à 100 ml graduée.
- Un jeu de papiers- filtre.
- Une tige en verre.
- Un flacon de solution de bleu ou un paquet de poudre.
- Une balance.
- Un tamis.
- Un chronomètre.
- Un thermomètre.
- Une étuve.
- Eau déminéralisée.



Fig. VI.14 : Un agitateur.

d. Mode opératoire de l'essai :

- Prélever une masse « m » du matériau (selon D_{\max}).
- Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5mm contenue dans cet échantillon.
- Préparer une prise d'essai de masse « m_h ».
- Mise en suspension cette masse dans 500cm^3 d'eau déminéralisée.

Disperser à l'aide d'un agitateur à vitesse 700tr/min pendant au moins 5mn.

- Introduire dans la suspension 5 cm^3 à 10 cm^3 de solution de bleu.
- Procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :
 - Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant.
 - Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre.
 - La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre.
- L'essai est dit alors positif si la goutte centrale bleue est cerclée d'une zone teintée de bleu plus claire et cette auréole reste visible pendant 5min, à partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution.

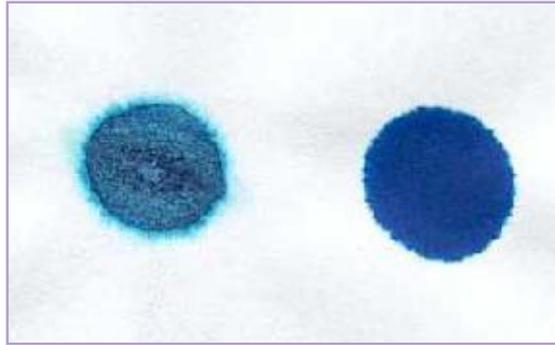


Fig. VI.15 : Essai de la tache sur papier filtre.

NB :

- Si l'auréole disparaît durant les quatre premières minutes, ajouter une autre dose de 5 ml de solution de colorant.
- Si l'auréole disparaît à la cinquième minute, ajouté seulement 2 ml de solution de colorant.
- En tous les cas, continuer l'agitation et les tests à la tache jusqu'à ce qu'une auréole reste visible pendant 5 min.
- Enregistrer le volume total de solution de colorant, $V_1 = 85\text{ml}$, ajouté pour obtenir une auréole qui est restée visible pendant 5min.

e. Expression des résultats :

Les calculs à exécuter sont :

- Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm).

$$W = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

- Masse sèche de la prise d'essai.

$$m_0 = \frac{m_h}{1 + W}$$

- Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l).

$$B = V \times 0.01 = 0.85$$

- La quantité de bleu de méthylène V_{BS} est la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée pour 100 g de fines :

- Pour les matériaux dont le D_{max} est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$V_{B_s} = \frac{B}{m_0} \times 100 = 2.83$$

- Pour les matériaux dont le D_{max} est supérieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$V_{B_s} = \frac{B}{m_0} \times C \times 100 = 2.83$$

Avec :

C : la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92 six catégories de sols sont définies selon la valeur de V_{BS} :

Tableau VI.12 : classification de bleu méthylène.

Valeur de bleu de méthylène (V_{BS})	Catégorie de sol
$V_{BS} < 0,1$	sol insensible à l'eau
$0,2 \leq V_{BS} < 1,5$	sol sableux limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq V_{BS} < 2,5$	sol sableux argileux, peu plastiques
$2,5 \leq V_{BS} < 6$	sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq V_{BS} < 8$	sol argileux.
$V_{BS} > 8$	sol très argileux.

Plus la valeur au bleu est élevée, moins le sable est propre.

Selon le tableau de classification de vbs, le sol étudié est un sol de plasticité moyenne.

VI.6-Coclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les modes opératoires ainsi que les résultats obtenus des essais fondamentaux en mécanique des sols effectués sur notre échantillon de sol. Cela nous a

permis de caractériser et de classer le sol étudié afin de prendre une vision générale sur sa nature et son comportement.

Chapitre V

LES PRINCIPALES METHODES DE STABILISATION DES SOLS GONFLANTS

V.1-Introduction :

Malgré ses propriétés de résistance, lorsque le sol naturel est simplement compactée, puis mise en œuvre et soumis aux conditions extérieures, il devient très sensible aux variations de températures et d'hygrométrie. La stabilisation du sol a pour objet essentiel, de rendre ce matériau moins sensible aux variations de sa teneur en eau et de l'empêcher, à la fois de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'action de l'humidité. Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants.

V.2-But de la stabilisation :

Les principaux buts de la stabilisation des sols sont :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- Colmater les vides que l'on peut supprimer;
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau.

L'intervention au niveau du sol a pour but de rendre ce dernier moins gonflant et stable. Elle se fait par deux méthodes et dépend surtout de l'intensité du gonflement:

- Décapage de la couche de sol expansif, si de faible épaisseur.
- Traitement des sols : qui est souvent opéré afin d'augmenter la résistance, réduire ou augmenter la perméabilité, diminuer la compressibilité et minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

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

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

V.3- Diversité des techniques de stabilisation des sols gonflants :

Les techniques de stabilisation des sols expansifs sont issues de procédés mécaniques, physiques, chimiques ou thermiques. Ces procédés sont plus ou moins pratiques, efficaces, durables et coûteux les uns par rapport aux autres.

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

- *Les caractéristiques géotechniques du sol*; en particulier le potentiel de gonflement de celui-ci. Plus explicitement, des grandeurs quantifiant la nature géologique du terrain (structure minéralogique, type d'argile, stratification, épaisseur de la couche gonflante), et des grandeurs physiques et mécaniques (densité, saturation, porosité, compressibilité, perméabilité). Ce type d'information contribue au choix d'une solution par rapport à une autre.
- *Les conditions climatiques du site (précipitations, vent, humidité, évaporation, etc.)*. Les conditions climatiques sont reconnues affectant sensiblement l'expansivité du sol. Les matériaux de substitution ou de traitement du sol. En effet, les quantités de matériaux nécessaires, leurs mises en œuvre, leurs rapports coûts/délais / qualité sont, tout aussi bien, des paramètres clés dans le choix de la solution à adopter.
- *L'importance du projet, à sa conception architecturale, et à son mode de fonctionnement*. Les petites constructions, (à usage d'habitation par exemple) peuvent admettre un niveau de qualité inférieur. Le cas des structures stratégiques ou industrielles est bien plus exigeant.
- *La durabilité et coût de la solution envisagée*. Dans le reste du présent chapitre, – quelques techniques considérées comme contribuant en faveur de solutions de construction sur sols gonflants sont présentées.

V.4-Stabilisation mécanique :

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

V4.1-Drainage :

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

V.4.2-Application de fortes pressions :

C'est une méthode qui consiste à appliquer au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. Cette pression correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, donc on parle de la pression de gonflement réelle. Cette pression peut être appliquée, in-situ, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais de sols non gonflants, soit par l'édifice lui-même. (Mouroux.1969) cité par (Belabbaci, 2014).

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. IL s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant 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, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais de sols non gonflants (Mouroux.1969). C'est une solution à déconseiller.

V.4.3-Compactage :

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal. Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur optimale en eau (W_{opm}) permettant l'obtention de la densité sèche du sol la plus élevée (ρ_{opm}) est utilisée lors des études de la stabilisation et aussi lors du chantier. La granulométrie, la morphologie des particules du sol, l'abrasivité et la teneur en argile, ont une influence sur le comportement du sol lors du compactage. En raison de leur petite taille (quelques microns) les particules d'argiles permettent d'augmenter la densité sèche du sol en comblant sa porosité. Le comportement du sol dépend de la teneur en argile. Dans le cas des sols fins, un simple compactage ne permet pas de garantir les caractéristiques de la couche de forme. La cohésion est avant tout liée à la présence d'eau : c'est un phénomène de tension superficielle qui lie les particules du sol. Les caractéristiques de la couche de forme sont donc tributaires de la teneur en eau du sol. Cette cohésion ne crée pas de

liaison suffisamment solide entre les particules pour s'opposer au gonflement des argiles. L'utilisation d'agents chimiques permettant une stabilisation irréversible est donc nécessaire. Plusieurs produits existent et sont couramment employés.

V.4.4-Préhumidification :

(Mouroux et al, 1988) cité par (BENMESSAOUD, 2017) ont décrit le principe de cette technique en disant que l'augmentation de la teneur en eau provoque un gonflement qui, par la suite, reste constant en gardant la teneur en eau élevée par arrosage artificiel, cela peut diminuer le soulèvement de la structure. La mise en œuvre de cette technique est plutôt recommandée en fin de la saison pluviale. On construit une fois le gonflement du sol est stabilisé. Cette technique est possible dans les régions à grande pluviométrie et dans les régions dont l'arrosage artificiel peut être garanti, et destiné généralement pour les structures légères posées sur un radier général. Elle est utilisée pour la stabilisation du sol sur une profondeur d'environ 1.2m.

Selon Chen (1988), la couche de sol sous-jacente à celle pré-humidifiée absorbe continuellement de l'eau. Donc, on ne peut pas considérer le sol totalement stabilisé qu'après 10 ans de préhumidification.

V.4.5-Substitution :

C'est la suppression de la couche du sol gonflant et son remplacement par un sol non expansif. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sables ou un autre sol non gonflant. La technique de réalisation, les moyens mis en œuvre, la réduction du potentiel de gonflement, la profondeur de substitution sont des facteurs à discuter selon le cas. L'expérience montre que si la structure est fondée sur un remblai granulaire d'au moins 1.5 m, celle-ci ne sera pas affectée par le gonflement du sol sous-jacent. Selon Chen (1988), l'eau descendante à partir de la surface n'atteint gère le sol gonflant. Dans le cas limite, si un gonflement est occasionné, il est consommé dans les pores du sol remblai. Ce dernier devrait donc être suffisamment fin pour éviter les infiltrations descendantes et suffisamment graveleux pour encaisser les éventuels gonflements. Une alternative possible à l'égard à cette situation est de réaliser le remblai en couches de plus en plus granulaires dans le sens descendant. Généralement, les couches de sol expansif sont entièrement à enlever. Dans le cas échéant, la couche à substituer est déterminée selon les

critères technico-économiques du projet. Selon Chen (1988), la profondeur recommandée est estimée de 1m à 1.3m. (Zenkhrri 2009).

V.5-Stabilisation chimique :

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol telles que les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain qui demande une attention particulière concernant l'épaisseur du sol à traiter, le type d'additifs à utiliser et les dosages des ajouts à respecter. Le traitement des sols en place ou rapportés par l'utilisation des additifs seuls ou combinés (ciment, chaux, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.) est actuellement très largement employé dans la plupart des pays du monde.

V.5.1-Stabilisation par Liants :

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

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

V.5.1.1-Liants hydrauliques :

Les liants hydrauliques sont définis comme étant des minéraux qui donnent, en présence d'eau, des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion(Belabbaci, 2014). Les matériaux les plus utilisés sont le ciment et la chaux, voyant leur disponibilité et leur facilité de la mise en place.

V.5.1.1.1-Stabilisation par la chaux :

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique a été largement expliquée dans le chapitre III .

V.5.1.1.2-Stabilisation par l'ajout du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux. Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel.

Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel. On utilise des ciments de classe 45 qui sont les meilleurs marchés. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter.

La stabilisation des sols gonflants par du ciment exige une analyse minéralogique du sol afin de choisir le type de ciment à utiliser. L'utilisation d'un ciment résistant aux sulfates est nécessaire si le sol contient du sulfate. Les techniques de mise en place du ciment sont quasiment les mêmes que celles relatives à la chaux. Par ailleurs, le traitement des sols expansifs au ciment stabilise, non seulement, ces derniers mais augmente leur capacité portante. Ceci car le ciment rigidifie le squelette solide du sol. Cependant, à cause de la différence des prix unitaires, le coût global de traitement par ciment reste plus élevé comparativement à celui de la chaux.

Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel. On utilise des ciments de classe 45 qui sont les meilleurs marchés. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter.

V.5.1.1.3-Traitement mixte (chaux et ciment) :

Le choix de matériau utilisé pour la stabilisation dépend essentiellement de l'état de sol, par exemple, on préconise la chaux pour le sol est humide et on utilise un dosage de 0,5 à 2 % de la chaux poursuite de ciment pour le sol peu argileux. La mise en œuvre de cette technique se divise en deux parties, un traitement à la chaux de 1% permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau, précède la préparation de l'ajout de ciment. Ce processus réduit considérablement l'indice de plasticité, ce qui rend le sol moins gonflant.

V.5.1.1.4-Traitement aux cendres volantes :

Les cendres volantes sont une poudre très fine se composant de particules sphériques d'un diamètre inférieur à 50 micromètres. Elles sont l'une des pouzzolanes les plus couramment utilisées dans l'industrie de la construction. Les pouzzolanes sont des matières siliceuses et aluminosiliceuses capables de former des composés cimentaires lorsqu'ils sont mélangés à la chaux [hydroxyde de calcium - $\text{Ca}(\text{OH})_2$] et à l'eau. Les cendres volantes se composent, généralement, d'oxyde de calcium (CaO) et de silice (SiO_2). D'après Al-Rawas et al., (2006), ces composants interviennent essentiellement sur les gonflements interfoliaire et interparticulaires. Leur exploitation est similaire à celle du ciment dans le béton ou pour la stabilisation du sol. (Zenkhrri 2009).

Les cendres volantes de type « self-cementing » sont une matière cimentaire hydraulique possédant des propriétés pouzzolaniques dont la teneur élevée en oxyde de calcium lui permet de durcir à la suite d'une réaction chimique avec l'eau. La réaction chimique qui se produit pendant le processus d'hydratation des cendres volantes de type « self-cementing » est semblable au processus d'hydratation du ciment Portland.

L'étape suivante consiste à ajouter suffisamment de chaux permettant de favoriser les réactions pouzzolanique entre la chaux et les pouzzolanes disponibles dans les cendres volantes. 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 et al, 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 et al, 1962). (NEDJAH I A. RAOUF Et DJOUDI ABDELKRIM (2015))

En conséquence, grâce à leurs propriétés pouzzolanique, la chaux et les cendres volantes peuvent continuer à augmenter la résistance mécanique d'un sol pendant plusieurs années. Il est important de noter que les cendres volantes peuvent se comporter différemment en raison de leur teneur en chaux. Par exemple, les cendres silico-alumineuses possèdent peu de chaux dans leur composition chimique et ne peuvent ainsi agir comme un liant hydraulique à elles seules. Elles ont toutefois les caractéristiques d'une pouzzolane qui les rapprochent des cendres volcaniques. Il est donc nécessaire de leur ajouter de la chaux pour qu'elles fonctionnent.

Pour obtenir un vrai liant avec un mélange de cendres volantes et de chaux, il faut utiliser un ratio approprié. Mateos et Davidson (1962) proposent une combinaison chaux/cendre volante respectivement de :

- 3% / 6% à 10% / 25% pour les sols friables.
- 5% / 9% à 10% / 25% pour les sols argileux.

V.5.1.1.5-Traitement au Sels :

L'application de la technique de la stabilisation des sols gonflants par les sels a pour but d'augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau. Les sels les plus utilisés sont le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium (CaCl₂). D'un degré moins fréquent, sont utilisés le chlorure de potassium (KCl), le sulfate de sodium (Na₂SO₄) et le sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄). Le choix du sel à mettre en œuvre dépend du type de sol résumé principalement en sa composante chimique. En fait, l'adduction des sels induits, d'une part, des mécanismes de succion et d'électro-osmose (échange cationique), et d'autres parts des réactions de substitution isomorphique à échelle interfoliaire. Le chlorure de sodium (NaCl) augmente la limite de retrait et la résistance au cisaillement des sols ayant une grande limite de liquidité (Nelson et al., 1992). Le chlorure de calcium (CaCl₂) affaiblit notablement le transfert d'humidité dans le sol, diminue le potentiel de gonflement de celui-ci et réduit l'effet du gel sur le sol. (Nelson et al., 1992). Les techniques de traitement des sols gonflants par ajout de sels présentent l'avantage d'avoir des rendements assez appréciables du fait que c'est l'eau qui est le conducteur des charges électriques. A rappeler le risque de lessivage des sols traités aux sels si les conditions environnementales sont favorables.

V.5.2-Liants organiques :

Ce sont des produits semblables à de la colle, des composés organiques qui permettent une bonne adhésion au squelette métallique. On distingue deux types de liants organiques :

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

L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

V.5.2.1-Stabilisation au Sable :

(SATYANARAYANA, 1969) cité par (Belabbaci, 2014) a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Ainsi, que l'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement, principalement en raison de la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. (KOMORNIK et IIVNEH, 1969) cité par (Belabbaci, 2014) ont utilisé des mélanges argile - sable et argile- marbre à différents pourcentages, ils ont trouvé que la faible densité de l'argile et à l'augmentation du matériau inerte dans les mélanges cause la diminution du taux du gonflement, ainsi que le taux de l'humidité de l'argile a une influence sur la valeur de la pression du gonflement. D'autres auteurs (Mouroux, 1969 ; Seed et al, 1969 ; El Sayed et d'EL Sohby, 1981 ; Bengeraa, 2004) cité par (Belabbaci, 2014) ont traité des cas de sols gonflants avec du sable, ils ont illustré l'influence de ce matériau sur la diminution des paramètres du gonflement.

V.6-Traitement thermique :

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

Tableau V-1 : avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (FerrahFerrah 2006)

technique	procédés	avantages	inconvénients
	Compactage	- Le compactage est	Il faut une grande

Stabilisation mécanique		le plus économique - Réduire le potentiel expansif	quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une wn élevée)
	Substitution		-L'épaisseur de la couche. -Disponibilité du matériau
	Pré-humidification		-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de wn
Amélioration Par congélation	Circulation d'un fluide froid (azote liquide) dans des tubes	Lorsqu'aucune solution n'est possible	-La réalisée le plus rapidement possible. -Il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	Réduire la répulsion électrique entre les particules.	Très coûteuse
Stabilisation chimique (Par ajout de matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange	Le choix d'un type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	-Augmenter la	Utilisation d'un

		résistance. Diminuer la plasticité. - Réduire le potentiel de variation de volume. - Augmenter la limite de retrait	dosage important
	La chaux	-Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. -Augmenter la résistance et wopt. -Utilisation d'un faible dosage	Carbonatation de la chaux

V.7-Conclusion :

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux. Autour de cette idée que s'articule ce chapitre, a été consacré à l'étude bibliographique présentant l'état d'avancement de la recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux. Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement

CONCLUSION GENERAL

Les matériaux argileux, que ce soit les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses.

Il faut voir recensé les conséquences du gonflement sur le comportement des ouvrages géotechniques. Et ensuite, il convient d'étudier plus en détail les caractéristiques et de la texture des matériaux argileux. Dans cette étude, nous avons défini les divers facteurs affectant le gonflement, l'influence des facteurs intrinsèques et facteurs externes sur le potentiel et la pression de gonflement.

Une étude bibliographique a été présentée dans ce mémoire pour mettre en relief l'importance et les conséquences du gonflement sur la stabilité et le comportement des sols de nature gonflante. Cela nous a permis aussi de mettre en évidence la complexité de ce phénomène, tout particulièrement à l'échelle microscopique en raison de divers interaction impliquées à savoir l'adsorption, l'osmose et la capillarité. Ces mécanismes ont été décrits théoriquement dans les chapitres qui leur sont consacré. Aussi, il a été décrit dans ce mémoire, les différents travaux et procédures qui ont été menés pour l'identification et la caractérisation des sols gonflants. Dans le contexte de ce travail, il a été également présenté les diverses méthodes de stabilisation du gonflement des sols tout en décrivant les avantages et les inconvénients de chacune.

A la lumière des conclusions exposées obtenues, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- Utilisation d'autres types d'ajouts disponibles en Algérie pour la stabilisation des sols gonflants.
- Étudier l'effet des combinaisons des ajouts minéraux avec différents pourcentages sur la stabilisation des sols.
- Effectuer une étude technico-économique sur les différentes procédures de stabilisation pour permettre un choix judicieux
- 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 afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

BIBLIOGRAPHIE

1. BEKKOUCHEA., AissaMamoune S. M. et Djedid A., (2002), —Techniques de stabilisation des sols expansifs, Journées d'Études sur les Sols Gonflants (JÉSG), Laboratoire Eau et Ouvrage dans Leur Environnement, Département de Génie Civil. Université de AboubakrBelkaïd, Tlemcen.
2. BENGRAA.L (2004). « Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran ». Mémoire de magister .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004.102p.
3. CHEN F.H., (1988), —Foundation on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Company INC., New York, USA.
4. CAILLERE, SIMONNE. « Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés physicochimiques », Paris, Masson.
5. DELFAUT Abel , et SOYEZ Bertrand October 1990"Mode d'exécution des remblais sur sols mous renforcement par colonnes de sol traité à la chaux vive, Site expérimental de limay (78)" rapports des laboratoires- série ; géotechnique-mécanique des sols -sciences de la terre.
6. DIDIER, G., (1972), —Gonflement Cristallin et Macroscopiques de Bentonite, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.
7. FATIMA ZOHRA AZZOUZ 2006, « contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen », Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil spécialité Mécanique des Sols et Géotechnique Présenté, Université Tlemcen.
8. 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.
9. G.RAJASEKARAN, Ocean Engineering, Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays, Vol. 32, 2005.

10.GLEN LÉGÈRE.ING.F. « étude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière ».Montréal (Québec), le 25 janvier 2001.

11.GOVIN A., « Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification du ciment par le bois ». Thèse de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne.

12.GUERIDI Fatima 2009, « stabilisation des sols a la chaux : détermination du taux optimal ». Thèse présentée Pour obtenir le grade de MAGISTER Délivrée par l'école nationale supérieure des travaux publics - Alger.

14.HACHICHI A., Bourokba S., Benaissa A., « Etude de la stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran », 1^{ière} Journée d'études sur les sols gonflants, Université AboubekrBelkaid, Tlemcen (Algérie), 27-28 octobre 2002.

13.HACHICHIA. et Fleureau. J.M, (1999) ; «Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algie», Revue Française de géotechniques.

15.HOUSSINE EJJAOUANI 2009, « interactions des fondations et des sols gonflants : pathologie, calculs et études expérimentales ». Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTEUR de l'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES Spécialité Géotechnique.

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

17.INVACO2 : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTION N° : 1P-259 Hachichi A., Université Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie.

18.JEROME GAOMBALET 2004. « le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage ». Thèse présentée en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Ecole Poly technique Ecole Polytechnique.

19.KEBAILI, M., (2008), —Construction sur Sols Gonflants au Service du Développement, Laboratoire Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zone Arides, Université Kasdi Merbah, Ouargla.

20.KORMI, T., (2003), —Modélisation Numérique du Gonflement des Argiles non Saturées, Thèse de Doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussées.

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