

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

Spécialité : Génie Civil

Option : structures

Présenté par :

KOUADRIA HANANE

MAHMOUD HOURIA

*Sujet du mémoire*

***Influence des particules fines sur la prise des  
liants hydrauliques dans les sols argileux***

*Soutenu publiquement le 12/10/2020 devant le jury composé de :*

Mr, BEKKI Hadj	President
Mr, SERBAH Boumediene	Rapporteur
Mlle, RENNAK Zohra	Examineur
Mme, DRAOUI Aicha	Examineur

PROMOTION : 2019/2020

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma Mère Malika qui par sa présence seule, apaise le cœur et  
donne le gout de vivre.*

*A mon Père Belkacem qui est à la fois mon idole et ma  
sécurité, jamais je saurai ce que j'aurai été sans lui.*

*A mes très chères sœurs « Fatima et Ikram » et a mes chers  
Frères« Mohamed et Madani» qui ont fait de moi ce que je  
suis Aujourd'hui.*

*Je dédie ce travail tout spécialement aux plus chères  
personnes à ma vie qui étaient toujours présentes pour moi*

*« Houria, Djihane, Ikram, Maroua »*

*A toute la famille Kouadria*

## Dédicace

*C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail ;*

*A l'être le plus cher de ma vie, Ma mère « FATMA »*

*A celui qui m'a fait de moi une femme, Mon père « ABED »*

*A mes chers frères « KADA, KHALED et ALI » et leurs enfants.*

*A mes chers sœurs « MOKHTARIA, BENTANBI et RACHIDA » et  
leurs enfants.*

*Qui m'avez toujours soutenue et encouragé durant ces années  
d'études.*

*A chère amie avant d'être binôme « HANANE ».*

*A tous mes amis et toute personne qui occupe une place dans  
mon cœur.*

*A tous membre de ma famille et toute personne qui porte le  
nom « MAHMOUD ».*

# Remerciements

*Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le  
Tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste  
travail.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier nos chers parents qui nous ont  
encouragés et nous ont aidés à atteindre ce stade de notre étude.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur M Serbah  
pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa  
compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner  
notre travail.*

*Nos professeurs qui nous ont enrichis de connaissances et tout le  
département de génie civil.*

*Pour tous ceux qui nous ont aidés, on dit merci.*

## Résumé

---

Plusieurs études ont été effectuées sur le traitement des sols argileux par des liants hydrauliques (chaux et ciment). Afin d'améliorer ses propriétés physico-chimiques et mécaniques

Dans ce travail, une étude approfondie a été menée sur les effets de l'ajout de chaux sur les propriétés géotechniques des sols argileux pour l'utilisation comme matériaux utilisables en génie civil. (matériaux en techniques routiers et construction, brique de terre crue compressée)

Par la suite nous avons étudié l'effet pouzzolanique

Les paramètres qui influent sur l'effet pouzzolanique sont :

- Teneur en eau élevée favorise la réaction pouzzolanique
- la température entre 20 °C et 50 °C multiplie la vitesse de la réaction pouzzolanique par 6 (six fois plus rapide)
- le type d'argile : la réaction de la montmorillonite plus vite que l'illite et la kaolinite à cause de la présence de cations hydratés dans l'espace inter-foliaire

Le but de ce mémoire est de déterminer les paramètres nécessaires de la réaction pouzzolanique dans le mélange du sol argileux-chaux et son effet sur la densification, la portance et résistance mécanique de ce matériau.

Nous avons valorisé et exploité les résultats des travaux récents du sol argileux dans notre travail.

L'analyse et l'interprétation de ces résultats nous a montré que la chaux agit, d'une façon très significative, sur l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques des sols argileux.

**Mots-clés** : liants hydrauliques ; sols argileux ; chaux ; ciment ; pouzzolane, l'espace inter-foliaire

## Abstract

---

Several studies have been carried out on the treatment of clay soils with hydraulic binders (lime and cement). In order to improve its physic-chemical and mechanical properties

In this work, an in-depth study was carried out on the effects of lime addition on the geotechnical properties of clay soils for use as materials usable in civil engineering (materials in road techniques and construction: compressed earth brick)

Then we studied the pozzolanic effect

The parameters which influence the pozzolanic effect are:

- High water content promotes the pozzolanic reaction
- the temperature between 20 °C and 50 °C multiplies the speed of the pozzolanic reaction by 6
- the type of clay: the reaction of montmorillonite faster than illite and kaolinite due to the presence of hydrated cations in the interfoliar space

The aim of this study is to determine the necessary parameters of the pozzolanic reaction in the clay-lime mixture and its effect on the densification, the bearing capacity and the mechanical resistance of this material. We have valued and exploited the results of recent work.

Analysis and interpretation of these results showed us that lime acts, in a very significant way, on improving the physic-chemical characteristics of clay soils.

**Keywords** :hydraulic binders ; Clay soils ; lime ; cement ; pozzolan ;interfoliar space

## ملخص

تم إجراء العديد من الدراسات حول معالجة التربة الطينية بالمواد الهيدروليكية (الجير والإسمنت). من أجل تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية

تم في هذا العمل دراسة معمقة لتأثيرات إضافة الجير على الخواص الجيوتقنية للتربة الطينية لاستخدامها كمواد قابلة للاستخدام في الهندسة المدنية (المواد في تقنيات الطرق والبناء: طوب طيني مضغوط) ثم درسنا التأثير البوزولاني

العوامل التي تؤثر على التفاعل البوزولاني هي

المحتوى المائي العالي يعزز التفاعل البوزولاني

درجة الحرارة بين 20 درجة مئوية و 50 درجة مئوية تضاعف سرعة التفاعل بمقدار 6ضعاف.

- نوع الطين: تفاعل لمونتموريلونيت أسرع من الإيلايت والكاولين بسبب وجود الكاتيونات الرطبة بين الأوراق الهدف من هذه المذكرة هو تحديد المعلمات الضرورية لتفاعل البوزولاني في خليط التربة الطينية-الجير وتأثيره على التكتيف والقدرة على التحمل والمقاومة الميكانيكية لهذه المادة. لقد قيمنا واستغلنا نتائج أعمال الأخيرة في عملنا. أظهر لنا تحليل وتفسير هذه النتائج أن الجير يعمل بطريقة مهمة جداً على تحسين الخصائص الفيزيائية الكيميائية للتربة الطينية.

**الكلمات المفتاحية:** روابط هيدروليكية ، تربة طينية ، جير ، أسمنت ، بزولان، مساحة بين الأوراق

# Sommaire

---

## Résumé

## Abstract

## ملخص

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction générale

### Chapitre I Généralité sur les sols argileux

<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Définitions des argiles .....</b>	<b>3</b>
I.2.1. Le feuillet.....	3
I.2.2. La particule (appelée aussi cristallite) .....	4
I.2.3. L'agrégat (appelé aussi grain) .....	4
<b>I.3. Aspects microstructuraux des argiles (silicates et aluminium) .....</b>	<b>5</b>
I.3.1. L'espace inter-foliaire.....	5
I.3.2. phyllo-silicates.....	5
<b>I.4. Classification des minéraux argileux.....</b>	<b>7</b>
I.4.1. Phyllo-silicates TOT:O ou 2 : 1 : 1.....	7
I.4.2. Phyllo-silicates TOT ou 2 : 1.....	7
I.4.3. Phyllo-silicates TO ou 1 : 1 .....	8
<b>I.5. Différentes familles de minéraux argileux .....</b>	<b>8</b>
I.5.1. Les Smectites .....	8
I.5.2. Les Kaolins .....	10
<b>I.6. Propriétés des minéraux argileux .....</b>	<b>11</b>
I.6.1. La surface spécifique .....	11
I.6.2. La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau .....	12
I.6.3. Capacité d'échange cationique (CEC).....	12
I.6.3.1. Facteur influençant sur l'échange.....	12
I.6.3.1.1. Influence de la nature minéralogique des argiles .....	12
I.6.3.1.2. Influence du Ph.....	13
<b>I.7. Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile .....</b>	<b>13</b>
I.7.1. La structure de l'atome (Si, O, AL).....	14
I.7.2. les liaisons hydrogènes .....	17
I.7.3. les forces d'attraction de Van der Waals: .....	18
I.7.4. L'hydratation des cations échangeables .....	19



# Sommaire

---

I.7.5.L'attraction par osmose : .....	19
I.7.6.L'attraction dipolaire (analogie avec un condensateur) : .....	19
<b>I.8. Les principaux problèmes des sols argileux.....</b>	<b>20</b>
I.8.1.Phénomène de gonflement.....	20
I.8.1.1.Nature du phénomène de gonflement.....	21
I.8.1.2.Conséquences due au gonflement.....	21
I.8.2.Phénomène de glissement.....	23
<b>I.9. Conclusion.....</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre II LES LIANTS HYDRAULIQUE</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>II-2 Types des liants.....</b>	<b>26</b>
II.2.1.liants hydrocarbonés.....	26
II.2.2.Les liants minéraux .....	26
II.2.2.1. Ciments.....	26
II.2.2.1.1production de ciments.....	27
II.2.2.1.2types de ciments.....	28
II.2.2.2. Définition de la chaux .....	28
II.2.2.2.1.procéduredeFabrication de la chaux .....	28
II.2.2.2.2.Différent type de la chaux .....	30
II.2.2.2.3. Caractéristiques importantes des chaux .....	32
II.2.2.2.4 Utilisation de la chaux.....	32
<b>II.3. Réactions chaux - sol argileux.....</b>	<b>34</b>
<b>II.4. Conclusion .....</b>	<b>36</b>
<b>Chapitre III L'EFFET POUZZOLANIQUE</b>	
<b>III.1.Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2. Matériaux pouzzolaniques.....</b>	<b>38</b>
III.2.1.Pouzzolanes naturelles .....	38
III.2.2.Pouzzolanes artificielles.....	40
<b>III.3.Réaction pouzzolanique .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3.1.Mécanismes de la réaction pouzzolanique .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3.2. Facteurs influant sur la réaction pouzzolanique .....</b>	<b>44</b>
<b>III.4.Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.Activité pouzzolanique.....</b>	<b>46</b>
III.5.1.Estimation de l'activité pouzzolanique .....	46
<b>III.6.Comportement de La pouzzolane .....</b>	<b>46</b>
<b>III.7. Différentes utilisations de la pouzzolane .....</b>	<b>47</b>

# Sommaire

---

## Chapitre IV INFLUENCE DES LIANTS HYDRAULIQUES SUR LES ARGILES

<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>50</b>
<b>IV.2. Influence de la chaux sur le sol fin .....</b>	<b>50</b>
IV.2.1. Influence de la chaux sur la consistance du sol .....	50
IV.2.2. Effet de la chaux sur les caractéristiques de compactage : .....	51
IV.2.3. Effet de la chaux sur les paramètres de compressibilité et de cisaillement ..	53
IV.2.4. Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour différents temps de cure.....	54
<b>IV.3. Dosage et le point de fixation de la chaux pour différents types de sols en fonction de PH .....</b>	<b>56</b>
<b>IV.4. Influence du ciment sur le sol .....</b>	<b>59</b>
IV.4.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg .....	59
IV.4.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage .....	60
<b>IV.5. Conclusion .....</b>	<b>61</b>

## Chapitre V ANNALYSE DES RESULTAS RECENTES

<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>62</b>
<b>V.2. Caractérisation mécanique.....</b>	<b>63</b>
V.2.1. Essai Proctor modifié .....	63
V.2.2. Essais de résistance à la compression .....	72
<b>V.3. Caractérisation physique.....</b>	<b>74</b>
V.3.1. limite Atterberg .....	74
V.3.2. Détermination du Gonflement volumique GV.....	78
<b>V.4. influence de la température sur effet pouzzolanique .....</b>	<b>79</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>85</b>
<b>Références bibliographique .....</b>	<b>87</b>
<b>Annexe 1.....</b>	<b>91</b>
<b>Annexe 2.....</b>	<b>93</b>
<b>Annexe 3.....</b>	<b>94</b>
<b>Annexe 4.....</b>	<b>95</b>

# Liste de tableau

---

## Chapitre I

<b>Tableau. I. 1 : Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileuses</b> .....	<b>12</b>
--	-----------

## Chapitre IV

<b>Tableau. IV. 1 : Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg [32]</b> .....	<b>50</b>
<b>Tableau. IV. 2 : Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg [33]</b> .....	<b>51</b>
<b>Tableau. IV. 3 : Résultats des tests de pH [38]</b> .....	<b>57</b>

## Chapitre V

<b>Tableau V. 1 Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur essai Proctor modifié</b> .....	<b>64</b>
<b>Tableau V. 2 Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur la résistance à la compression</b> .....	<b>72</b>
<b>Tableau V. 3 Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur la limite atterberg</b> .....	<b>75</b>
<b>Tableau V. 4 effet des liants sur le gonflement volumique</b> .....	<b>78</b>
<b>Tableau V. 5 Effet de températures sur effet pouzzolanique</b> .....	<b>79</b>
<b>Tableau V. 6 Traitement des sols à la chaux : Recensement non exhaustif des travaux rapportées dans la littérature depuis une quarantaine d'années</b> .....	<b>81</b>

# Liste figures

---

## Chapitre I

Figure.I. 1 Différents niveaux structuraux des sols gonflants[5].....	5
Figure. I. 2 Unité structure du minéral.....	5
Figure.I. 3 la structure de base des silicates .....	6
Figure.I. 4 Schéma (a) d'un tétraèdre de silicium, et (e) d'une couche tétraédrique .....	6
Figure.I. 5 Schéma (a) d'un octaèdre d'aluminium et (b) d'une couche octaédrique[7].....	7
Figure.I. 6 Modèle schématique de chlorite.....	7
Figure.I. 7 : Modèle schématique de smectite .....	8
Figure.I. 8 Modèle schématique kaolinite.....	8
Figure.I. 9 Modèle structural d'une smectite .....	9
Figure. I. 10 Représentation schématique de l'empilement des feuillets .....	9
Figure.I. 11 Modèle structural d'une kaolinite .....	10
Figure. I. 12 Représentation schématique de l'empilement des feuillets .....	11
Figure.I. 13 Surface des particules argileuses: interne et externe .....	11
Figure.I. 14 modèle schématique de L'atome de silicium .....	14
Figure.I. 15 répartition des électrons d'oxygène.....	15
Figure.I. 16 modèle schématique de l'ion aluminium.....	15
Figure.I. 17 modèle schématique de l'ion oxygène.....	16
Figure.I. 18 répartition des électrons du silicium .....	16
Figure.I. 19 les liaisons du silicium.....	17
Figure.I. 20 les liaisons de l'oxygène .....	17
Figure.I. 21 Structure de la molécule d'eau.....	18
Figure.I. 22 Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire [19].....	18
Figure.I. 23 Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses .....	20
Figure.I. 24 Retrait-Gonflement .....	21

## Liste figures

---

Figure.I. 25 Dégradations et fissurations des façades des bâtiments (Photo prise à Tizi-Ouzou).....	22
Figure.I. 26 Fissure sur les murs [24].....	22
Figure.I. 27 Désordres due au gonflement(Photo prise à Tizi-Ouzou) .....	23
Figure.I. 28 Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain et Fissuration d'une maison d'un glissement de terrain .....	24

### Chapitre II

Figure. II. 1 : ciment en poudre .....	26
Figure. II. 2 : Processus de fabrication de ciment.....	27
Figure. II. 3 : chaux en poudre .....	28
Figure. II. 4 : le gisement de la matière première de la chaux (calcaire).....	28
Figure. II. 5 : Transport de calcaire.....	30
Figure. II. 6 : Concassage de la pierre .....	29
Figure. II. 7 : La calcination (cuisson) de la pierre (calcaire).....	29
Figure. II. 8 : stockage de la chaux en silos.....	31
Figure. II. 9 : stockage en sacs .....	30
Figure. II. 10 : Transformation du calcaire en chaux vive.....	30
Figure. II. 11 : Cycle de la chaux.....	31
Figure. II. 12 : Différentes utilisation de la chaux dans le bâtiment .....	33
Figure. II. 13 : Utilisation de la chaux dans le domaine routier .....	33

### Chapitre III

Figure. III. 1: Verre volcanique.....	39
Figure. III. 2 : Tufs volcaniques .....	39
Figure. III. 3: Cendres volantes.....	40
Figure. III. 4 : laitier granulé de haut fourneau .....	41
Figure. III. 5 : Fumée de silice .....	41
Figure. III. 6 : Représentation schématique de la réaction C3S-pouzzolane .....	43
Figure. III. 7: Schéma du mécanisme de réaction chaux–argile [27].....	45

## Liste figures

---

### Chapitre IV

Figure. IV. 1 Modification des caractéristiques de compactage d'un sol argileux en fonction de la teneur en chaux [34]. .....	51
Figure. IV. 2 Courbes Proctor Normal d'un sol limono-argileux non-traité et traité [35]. .....	52
Figure. IV. 3 Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2 % de chaux vive [36]. ....	52
Figure. IV. 4 Effet de la chaux et du temps de maturation sur l'indice. ....	53
Figure. IV. 1 Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [34]. .....	54
Figure. IV. 6 Variation de la résistance en compression simple des trois minéraux [37]. .....	55
Figure. IV. 7 Essai de compression simple du sol traité à la chaux et leurs modules d'élasticités au cours du temps .....	55
Figure. IV. 8 Variation instantanée du pH des mélanges chaux–Impersol .....	57
Figure. IV. 9 Détermination du point de fixation de la chaux pour le sol limono-argileux [35]. .....	58
Figure. IV. 10 La variation du pH avec l'ajout de chaux [39]. .....	58
Figure. IV. 11 Évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée [40] .....	59
Figure. IV. 12 Effet de la chaux et de ciment sur les limites d'Atterberg [34]. .....	60

### Chapitre V

Figure.V. 1 influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau $w_{opm}$ [41]. ...	65
Figure.V. 2 influence des liants (chaux) sur Teneur en eau $w_{opm}$ [42]. .....	65
Figure.V. 3 influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau $w_{opm}$ [43]. ...	66
Figure.V. 4 influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau $w_{opm}$ [46]. ...	66

## Liste figures

---

<b>Figure.V. 5 influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau <math>\omega_{opm}</math> [44]</b> .....	<b>67</b>
<b>Figure.V. 6 influence des liants (chaux, ciment) sur Poids volumique sec maximal <math>\gamma_{dmax}</math>[41].....</b>	<b>67</b>
<b>Figure.V. 7 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal <math>\gamma_{dmax}</math>[42] .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure.V. 8 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal <math>\gamma_{dmax}</math>[43] .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure.V. 9 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal <math>\gamma_{dmax}</math>[46] .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure.V. 10 influence des liants (chaux, ciment) sur Poids volumique sec maximal <math>\gamma_{dmax}</math>[44].....</b>	<b>69</b>
<b>Figure.V. 11 influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat[43].. .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure.V. 12 influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat[44] .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure.V. 13 influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat[41] .....</b>	<b>71</b>
<b>Figure.V. 14 courbe comparative de la résistance à la compression en fonction de temps [41].....</b>	<b>73</b>
<b>Figure.V. 15 courbe comparative de la résistance à la compression en fonction de temps [43].....</b>	<b>73</b>
<b>Figure.V. 16 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [41] .....</b>	<b>76</b>
<b>Figure.V. 17 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [45] .....</b>	<b>76</b>
<b>Figure.V. 18 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [43] .....</b>	<b>77</b>
<b>Figure.V. 19 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [44] .....</b>	<b>77</b>
<b>Figure.V. 20 Résultats de la pouzzolanité effectuée sur le sol à l'état brut et calcinée[47] .....</b>	<b>80</b>

# **Introduction générale**



## Introduction générale

---

Les sols argileux sont constitués de différents minéraux telles que les Illites, les Smectites et les kaolinites, dont la sensibilité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre leurs structures en feuillet. Quand ces sols argileux subissent des influences extérieures, ils peuvent engendrer des dégâts importants difficiles à maîtriser.

Les problèmes d'instabilité des structures fondées sur des sols argileux sont dus au soulèvement du sol à la saturation en période pluviale et au retrait en période estivale. Les désordres constatés sont de plusieurs types et touchent pratiquement tout genre de structure

Actuellement, la technique de traitement des sols à la chaux (et/ou) au ciment est largement utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques du sol. Cette méthode de traitement des sols est anciennement reconnue et de plus en plus utilisée.

Les Romains ont utilisé le mélange à base de pouzzolane et de chaux comme matériaux liant pour de nombreuses structures. Ces monuments romains sont en usage aujourd'hui dans de nombreux pays. Cela est attribuable à la forte durabilité de ce liant dans diverses conditions environnementales. Aujourd'hui, peu d'études utilisent la pouzzolane naturelle avec la chaux pour stabiliser les sols. Cette étude est menée par les chapitres suivants :

- Le premier chapitre intitulé « généralités sur les sols argileux » est une étude bibliographique qui consiste à décrire les sols argileux, leurs minéralogies, ainsi que les principaux problèmes liés à ces sols.
- Le deuxième Chapitre « les liants hydrauliques » rassemble une synthèse des données concernant les liants hydraulique (chaux et ciment).
- le troisième chapitre est consacré à l'effet pouzzolanique.
- Le quatrième chapitre « influence des liants hydrauliques sur les argiles (regroupe l'ensemble des résultats obtenus)
- Le dernier chapitre « analyses des résultats récentes »

A la fin, une conclusion générale sera donnée qui résume tous les résultats obtenus pour cette étude.

**chapitre01**  
**Généralités sur les sols argileux**

## I.1. Introduction

Les argiles sont des sols très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les ouvrages en géotechniques. Beaucoup d'ouvrages sont érigés sur des dépôts d'argile, dont le comportement est considérablement influencé par les propriétés physico-chimiques des minéraux argileux. Certains sols argileux changent de volume en fonction de leur teneur en eau et peuvent, de ce fait, créer des désordres dans les ouvrages géotechniques. Ce chapitre consiste en une recherche bibliographique sur les sols argileux, les types de minéraux argileux, les principaux problèmes et les désordres liés

## I.2. Définitions des argiles

Le mot argile provient du latin Argilla. Ce même mot est dérivé du grec argillos, dont la racine, Argos, signifie "d'une blancheur éclatante".

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille des phyllo-silicates. Leur phase solide est structurée suivant une organisation spatiale particulière le feuillet, la particule et l'agrégat [1].

Donc, les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets (phyllosilicates) de structure bien définie, séparés par des intervalles désignés sous le nom **d'espace inter-foliaire** [2]

### I.2.1. Le feuillet

Il est défini comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types de couches :

- **Les couches tétraédriques**, de formule générale  $\text{SiO}_4$  et dont l'épaisseur est de 3 Å, l'oxygène occupant les sommets du tétraèdre et le centre étant occupé par un atome de silicium
- **Les couches octaédriques**, de formule générale  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  ou  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$  et dont l'épaisseur est de 4 Å ; dans ces dernières, les octaèdres ont leurs sommets occupés par des hydroxyles OH tandis que le centre est occupé par un atome d'aluminium ou un atome de magnésium.

Le feuillet formé par la liaison d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique est dit de type 1:1 ou Te-Oc, l'épaisseur du feuillet est de l'ordre de 7,2 Å. En revanche, le feuillet formé par l'intercalage d'une couche octaédrique entre deux couches Tétraédriques est de type 2:1 ou Te-Oc-Te, l'épaisseur du feuillet dans ce cas étant de l'ordre de 9,6 Å [3]

### I.2.2. La particule (appelée aussi cristallite)

Elle est un empilement (superposition) de feuillets argileux suivant différentes configurations, qui peut atteindre une taille maximale de  $2\ \mu\text{m}$ . La position des feuillets les uns par rapport aux autres et le nombre de feuillets par particule sont variables suivant le type d'argile considéré et dépendent de son état hydrique [4] L'espace entre deux feuillets est appelé **espace inter-foliaire** et ses dimensions peuvent atteindre plusieurs **nanomètres**. Lorsque l'on s'intéresse à des particules argileuses, on peut observer deux types de porosité :

- **La porosité inter-lamellaire** (ou inter-foliaire, ou intra-particulaire) définie entre deux surfaces internes d'une même particule.
- **la porosité Inter-particulaire** (ou lenticulaire) définie entre les surfaces externes de deux particules.

### I.2.3. L'agrégat (appelé aussi grain)

IL est un assemblage désordonné entre les particules d'argile dont la forme et les dimensions peuvent varier. A l'échelle de l'agrégat, trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués :

- **l'infrastructure** qui correspond à la particule argileuse,
- **la microstructure** qui correspond aux agrégats formés par l'assemblage des particules argileuses et des autres éléments du sol,
- **la macrostructure** qui correspond à l'assemblage macroscopique des agrégats.

Une représentation de cette structure est donnée sur la figure ci-dessous. L'approche Microstructurale de base qui permet d'expliquer le comportement réel des argiles sujettes au phénomène de retrait-gonflement doit tenir compte de ces différents niveaux structuraux. Ceci n'est pas du tout évident dans la pratique, car il est difficile d'établir une relation entre ces différents niveaux. Pour simplifier, en mécanique des sols, Gens et Alonso (1992) ont limité le nombre de niveaux structuraux à deux :

- ✓ le niveau microstructural où sont réunies l'infrastructure et la microstructure
- ✓ le niveau macrostructural. C'est ce que ces auteurs qualifient de double structure.

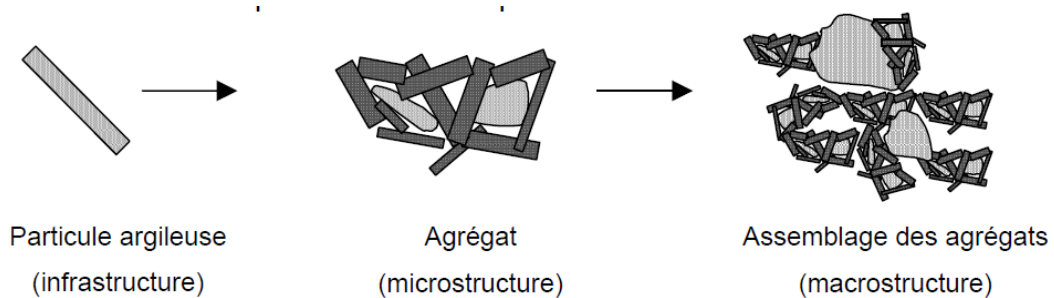


Figure.I. 1 Différents niveaux structuraux des sols gonflants[5]

**I.3. Aspects microstructuraux des argiles (silicates et aluminium)**

**I.3.1. L'espace inter-foliaire**

C'est le vide séparant deux feuillets de même structure, il peut être occupé par des cations.

L'association d'un feuillet et d'un espace inter-foliaire représente l'unité structurale du minéral-phylliteux [6] et l'épaisseur de celle-ci, nommée "distance basale"

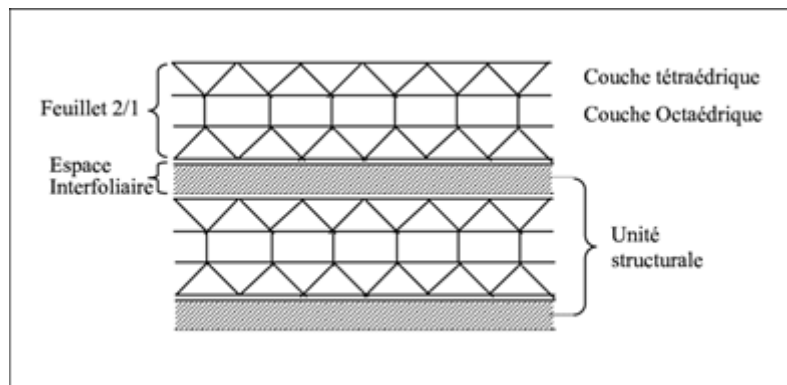


Figure. I. 2 Unité structure du minéral

**I.3.2. phyllo-silicates**

Les phyllo-silicates, ou silicates en feuilles, sont un groupe important de minéraux qui comprend les micas, le chlorite, la serpentine, le talc et les minéraux argileux.

L'élément structural fondamental des silicates, le tétraèdre  $[SiO_4]^-$ , est constitué d'un cation silicium  $Si^{4+}$  entouré par 4 anions oxygène  $O^{2-}$ , donnant un groupe anionique  $(SiO_4)^-$  formant un tétraèdre.

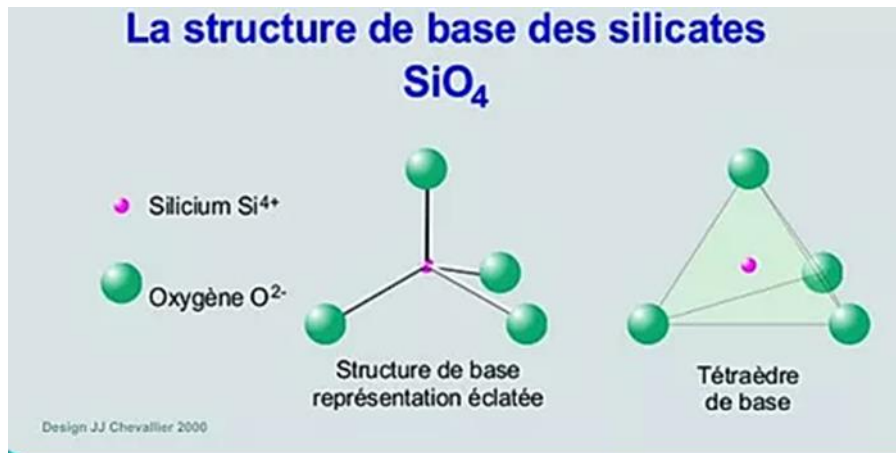


Figure.I. 3la structure de base des silicates

Dans les minéraux argileux le feuillet est formé par deux types de couches :

- **La couche tétraédrique** Chaque tétraèdre est lié aux autres tétraèdres voisins en partageant trois angles. L'association de six tétraèdres forme une cavité hexagonale

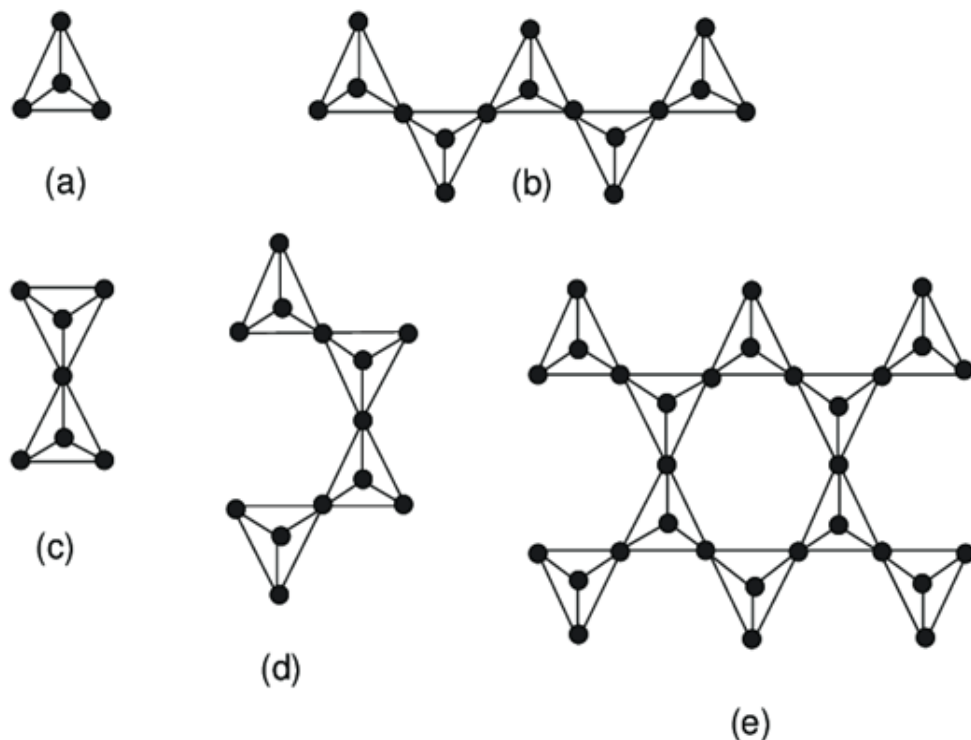


Figure.I. 4Schéma (a) d'un tétraèdre de silicium, et (e) d'une couche tétraédrique

- **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.

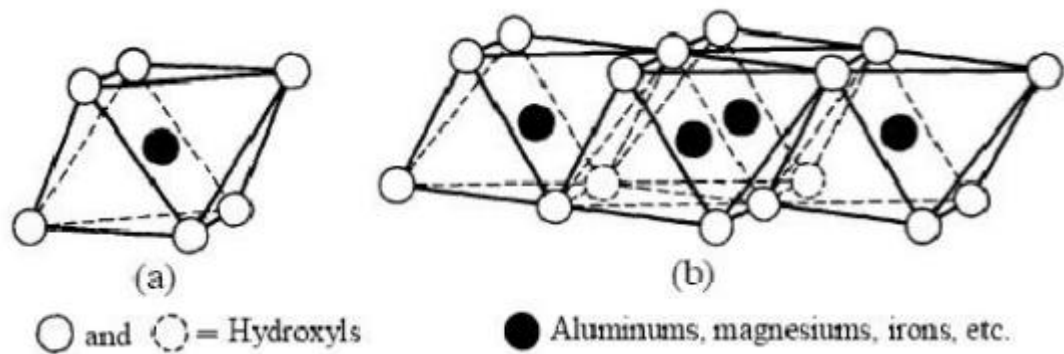


Figure.I. 5 Schéma (a) d'un octaèdre d'aluminium et (b) d'une couche octaédrique[7]

#### I.4. Classification des minéraux argileux

Selon le type de couche, les minéraux argileux sont classés dans les groupes suivants:

**I.4.1. Phyllo-silicates TOT:O ou 2 : 1 : 1** où le feuillet est formé de trois couches T-O-T et une autre couche O isolé, l'épaisseur de le feuillet étant environ 14Å Groupe de chlorite

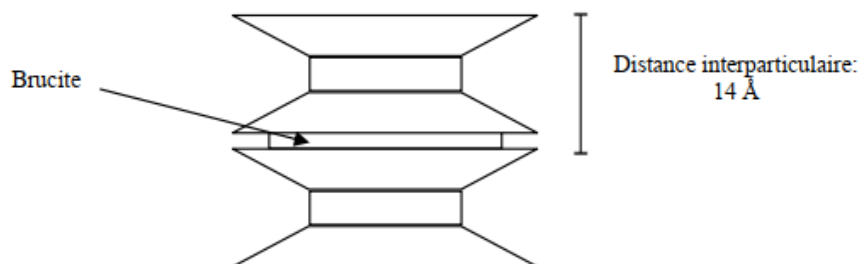


Figure.I. 6 Modèle schématique de chlorite

**I.4.2. Phyllo-silicates TOT ou 2 : 1**, Où le feuillet est formée de deux couches T dans les deux côtés d'une couche O, l'épaisseur du feuillet varie de 9.3 à 15 Å. (smectite) Souvent, dans les minéraux de type 2/1, des substitutions cationiques sont observées. Dans les tétraèdres, elles correspondent au remplacement de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  et/ou  $\text{Fe}^{3+}$ . Dans les octaèdres,  $\text{Al}^{3+}$  est remplacé par  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  par  $\text{Li}^{+}$ . Cette substitution entraîne un déficit de charge positive au niveau du feuillet, compensé par des cations dans l'espace interfoliaire, généralement des ions potassium ou sodium, qui peuvent être substitués par d'autres cations en solution.

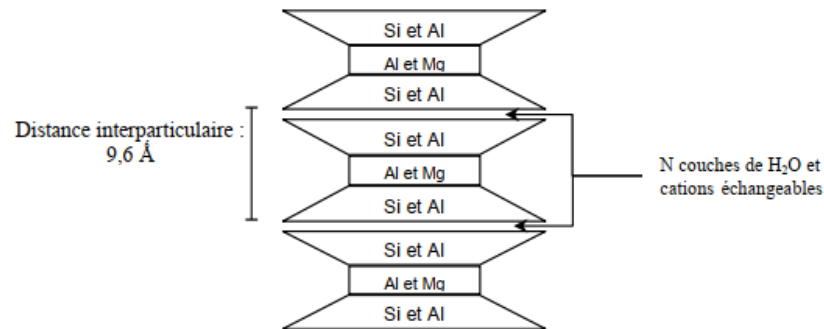


Figure.I. 7: Modèle schématique de smectite

**I.4.3. Phyllo-silicates TO ou 1 : 1**, Où le feuillet est formé d'une couche T et une couche O, l'épaisseur de feuillet étant environ 7 Å : (kaolinite)

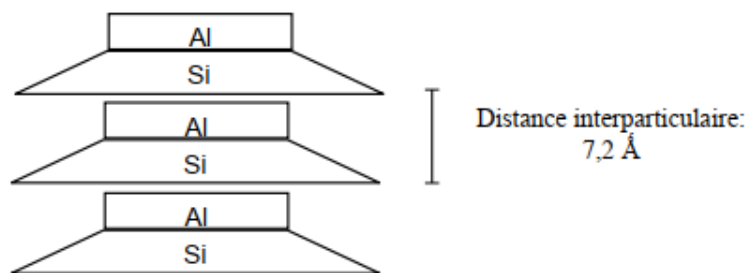


Figure.I. 8 Modèle schématique kaolinite

**I.5. Différentes familles de minéraux argileux**

**I.5.1. Les Smectites**

Les smectites correspondent à un groupe d'argiles qui inclut la montmorillonite, la nontronite, la beidelite. Le feuillet est composé de deux couches tétraédriques enserrant une couche octaédrique. Les tétraèdres pointent vers la couche octaédrique avec laquelle ils partagent un anion  $O_2^-$ . La montmorillonite est la smectite la plus abondante, elle possède des substitutions dans les deux types de couches mais celles localisées dans la couche octaédrique sont généralement plus nombreuses ;  $Mg^{2+}$  est le cation dominant en remplaçant le cation  $Al^{3+}$  [8]

**Formule théorique :**  $Si_8 Al_4 O_{20} (OH)_4, n H_2O$  (smectite)



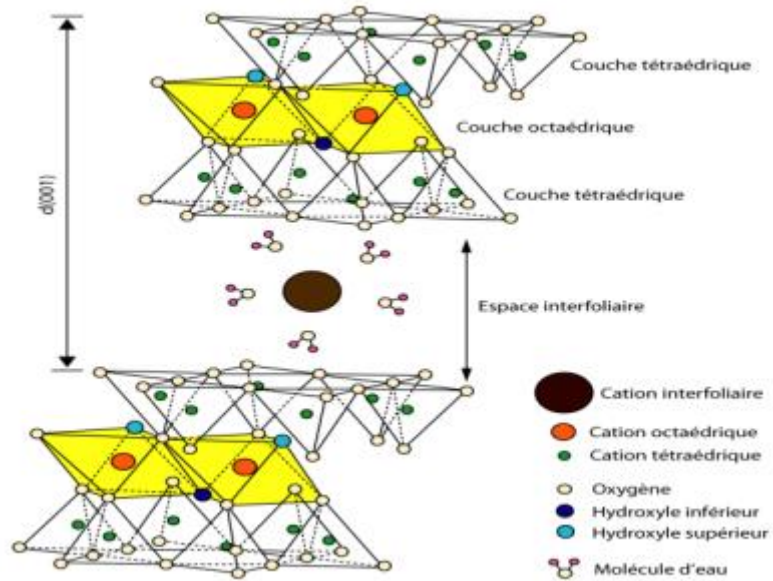


Figure.I. 9Modèle structural d'une smectite

Pour chaque type d'argile il est important de connaître la distribution des feuillets pour pouvoir expliquer son comportement physico-chimique dans le milieu réactionnel. Pour cela, il est fondamental de s'intéresser à l'épaisseur des feuillets  $e$  et à la distance interfoliaire[8]

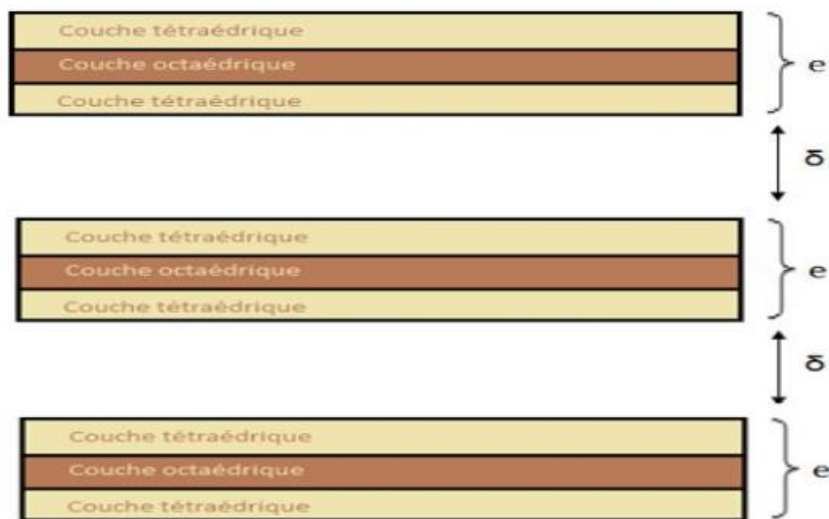


Figure. I. 10Représentation schématique de l'empilement des feuillets

Le dessin représente troisfeuillets, avec trois couches chacun, qui figure ainsi une particule de montmorillonite. La distance deséparation des feuillets est  $\delta$  et l'épaisseur est  $e$

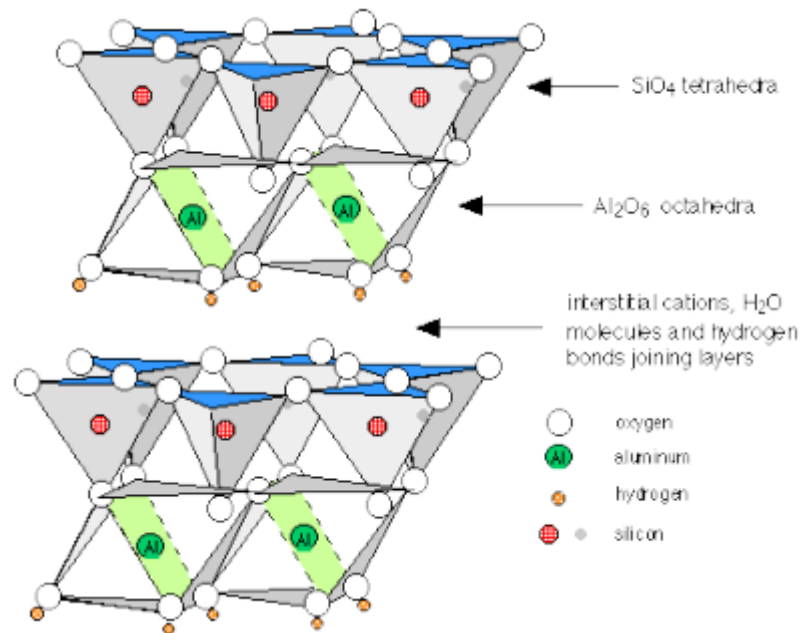
$$\delta = 0.7271 \pm 0.0019 \text{ nm}$$

L'espace inter-foliaire  $\delta$  varie selon la nature des cations compensateurs et la quantité de molécules d'eau retenues dans l'espace

**I.5.2. Les Kaolins**

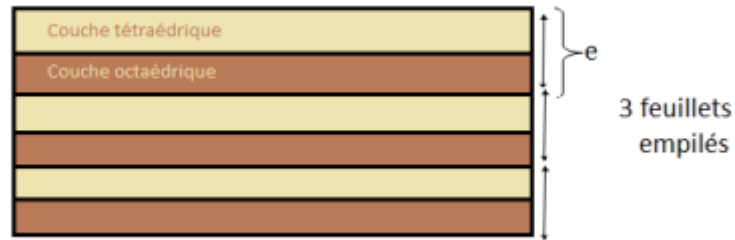
La structure du feuillet de la kaolinite est composée d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique qui partage des anions  $O^{2-}$  (Figure I.11). Les feuillets possèdent 2 surfaces basales [8]

La première est constituée par des tétraèdres d'ions  $O^{2-}$  contenant des cations de  $Si^{4+}$  et forment un réseau hexagonal plan avec des cavités situées au-dessus d'un groupe  $OH^-$  appartenant à la couche octaédrique. [9]



**Figure.I. 11** Modèle structural d'une kaolinite

La figure I.12 montre l'empilement des feuillets de la kaolinite. Il n'y a pas d'espace interfoliaire dans ce type d'argile, constitué d'une alternance de feuillets octaédriques et tétraédriques



**Figure. I. 12** Représentation schématique de l'empilement des feuillets

Le dessin représente trois feuillets empilés qui figure ainsi une particule de kaolinite...

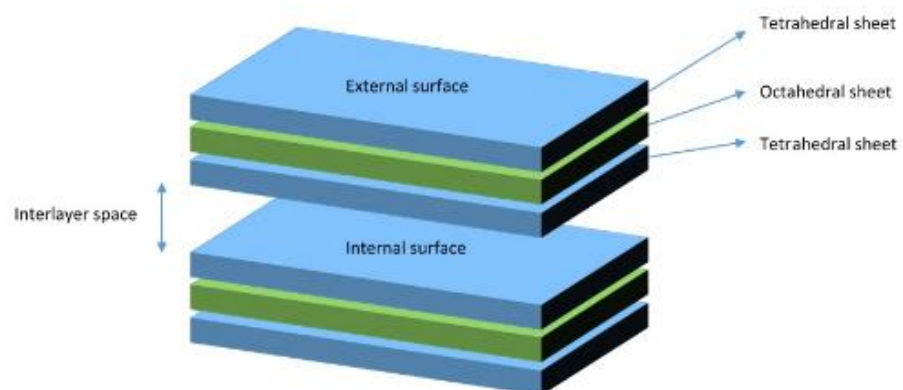
### I.6. Propriétés des minéraux argileux

Les minéraux argileux se caractérisent par plusieurs propriétés physico-chimiques dont les principales sont :

- La surface spécifique
- La capacité d'adsorption d'eau et de gonflement
- La capacité d'échange cationique

#### I.6.1. La surface spécifique

Malgré leur taille fine, les argiles possèdent une grande surface spécifique qui dépend de la nature du minéral argileux. La surface totale des argiles comprend une surface externe facilement accessible et une surface interne qui correspond à celle développée par l'espace inter-foliaire durant son expansion. [10]



**Figure.I. 13** Surface des particules argileuses: interne et externe

Les minéraux de la famille des smectites se caractérisent par une surface spécifique très importante par rapport à celle des autres types d'argiles due à leurs propriétés de

gonflements. Elle peut atteindre les 800 m<sup>2</sup>/g si les particules sont complètement hydratés [10]

**Tableau. I. 1 : Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileuses**

Argiles	Surface interne (m <sup>2</sup> /g)	Surface externe (m <sup>2</sup> /g)	Surface total (m <sup>2</sup> /g)
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	1	751
Chlorite	0	15	15

### **1.6.2. La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau**

Généralement, toutes les argiles possèdent une capacité de rétention des molécules d'eau plus au moins importantes. Mais seulement quelques-uns sont capables d'incorporer des quantités appréciables de molécules d'eau dans leur espace inter-foliaire. Les smectites, les vermiculites et les minéraux inter-stratifiés sont parmi les argiles qui se caractérisent par une forte capacité d'adsorption d'eau entre les feuillets de leur structure ce qui provoque une variation de leurs volumes et provoque ainsi leur gonflement. [10]

### **1.6.3. Capacité d'échange cationique (CEC)**

Les argiles ont donc la capacité de pouvoir échanger une partie des cations retenus dans l'espace inter-foliaire ou d'en absorber en surface. La capacité d'échange est appelée CEC (Capacité d'Echange Cationique), elle est mesurée le plus souvent en meq/g. Elle concerne en particulier les cations suivants, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> Ce paramètre est exprimé en quantité de charge par unité de masse (meq/100g) [10]

La CEC correspond donc au nombre de sites négatifs proposés à l'adsorption par l'argile

## **3.1. Facteur influençant sur l'échange**

### **3.1.1. Influence de la nature minéralogique des argiles**

Les minéraux argileux ont tous la propriété d'être chargés électro-négativement, mais ce qui diffère entre eux, ce sont les caractéristiques et les propriétés de leur réseau, de ce fait leur comportement vis-à-vis de la sélectivité d'échange diffère.

Les argiles avec leur grande surface spécifique (du fait de leur structure en feuillet), chargée le plus souvent négativement, possèdent généralement une grande capacité d'échanges de cations.

Dans le cas des illites et des smectites, la structure du feuillet est la même alors que les CEC sont différentes. La différence provient du mode de formation des argiles. Dans le cas de l'illite, les cations intégrés à l'intérieur de la structure sont différents de ceux d'une smectite : le déficit de charge n'est pas le même et les CEC sont donc différentes. Si les kaolinites ont une surface spécifique et un pouvoir d'échange cationique faibles, c'est parce que leur constitution rend l'accès entre les couches minérales presque impossible à cause des fortes liaisons qui sont établies entre elles. Au contraire, les smectites montrent une très grande facilité de séparation de leurs couches, ce qui explique l'importance de leur surface spécifique et du pouvoir d'échange cationique. [11]

Les illites constituent un cas intermédiaire où les surfaces chargées sont seulement les surfaces latérales et basales externes alors que les autres sont « soudées » par le biais du cation potassium. On note que la présence d'éléments non argileux réduit considérablement la surface spécifique d'une argile [12]

### **3.1.2. Influence du pH**

Le pH intervient dans la sélectivité d'échange par le fait qu'il est à l'origine des charges variables des argiles et cela par la dissociation des hydroxyles et des carboxyles [13]

Quant une argile se trouve en milieu acide, ce qui diminue le nombre de cations échangeables, elle retiendrait mieux les ions  $Ca^{++}$  [14]

Le pH de la solution du sol joue également un rôle important, il impose la densité de charge surfacique et détermine l'activité des protons, ceux-ci pouvant entrer en compétition avec les ions pour accéder aux sites de surface. La sorption spécifique des cations métalliques sur argiles augmente ainsi généralement avec le pH [15].

## **I.7. Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile**

Les feuillets d'une argile ne sont pas toujours électriquement neutres. En effet, il arrive que certaines substitutions, ou remplacements isomorphiques, de  $Si^{4+}$  par  $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$  aient lieu dans les couches tétraédriques, et de  $Al^{3+}$  par  $Mg^{2+}$  ou  $Fe^{2+}$  dans

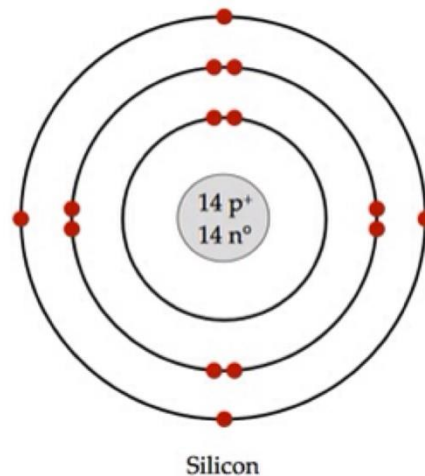
les couches octaédriques. Ces substitutions sont dites isomorphes, car elles se font sans modifications de la morphologie du minéral et les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Une autre source de charge non équilibrée sur les minéraux argileux est la neutralisation incomplète **de charges des atomes** terminaux aux extrémités des couches, ainsi que des charges de bordure qui apparaissent lorsqu'un cristal se rompt. Il existe alors un déséquilibre électrique au sein des couches d'argiles, donc au sein de la particule. Par conséquent, les particules argileuses auront une charge négative à la surface. Nous allons détailler cette électronégativité des particules qui est une des caractéristiques fondamentales des argiles.

### I.7.1. La structure de l'atome (Si, O, AL)

Un atome est la plus petite unité de n'importe quelle substance et il peut se combiner chimiquement avec un autre. Lorsque les atomes établissent des liaisons entre eux, ils forment alors une molécule.

Un atome contient un noyau constitué de protons et de neutrons, situé en son centre et des électrons qui "tournent autour" du noyau.

**Exemple:** L'atome de silicium (silicone) contient 14 protons, 14 neutrons et 14 électrons.



**Figure.I. 14** modèle schématique de L'atome de silicium

Ces électrons vont se répartir sur différentes couches électroniques à différentes distances du noyau. Chaque couche est caractérisée par une lettre. La première couche est la couche K, la seconde L, la troisième M est ainsi de suite, dans l'ordre alphabétique. Il paraît logique qu'au plus la couche sera éloignée du noyau, au plus

elle pourra comporter d'électrons. En effet, la première couche comporte au maximum deux électrons ; la seconde, 8 ; la troisième 18... Selon la loi : Sur la nième couche, on  $2n^2$  électrons.

**Exemple** L'atome d'oxygène contient 8 électrons. C'est-à-dire que 2 électrons sont dans le premier niveau énergétique (couche K) et six sur le deuxième sur la deuxième couche électronique (L).

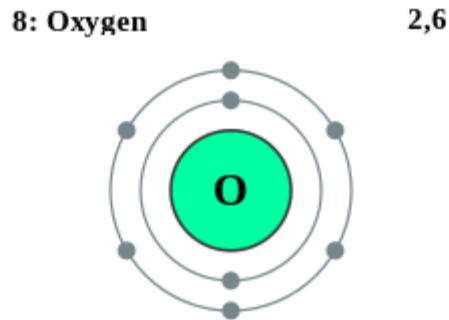


Figure.I. 15répartition des électrons d'oxygène

**La couche externe**(La couche de valence) d'un atome est la dernière de ses couches accueillant des électrons lorsqu'il se trouve dans son état fondamental (le plus stable). Cette couche est d'une importance capitale pour expliquer et prévoir les caractéristiques chimiques d'un atome et elle permet en particulier de déterminer :

- Quels ions (anion ou cation) atome peuvent former.

Si nous prenons l'aluminium pour exemple, Il comporte 3 électrons de valences. , il devra faire un don de ses trois électrons de la couche d'externe. Il deviendra donc Al  $3+$  ,.Il devient un cation

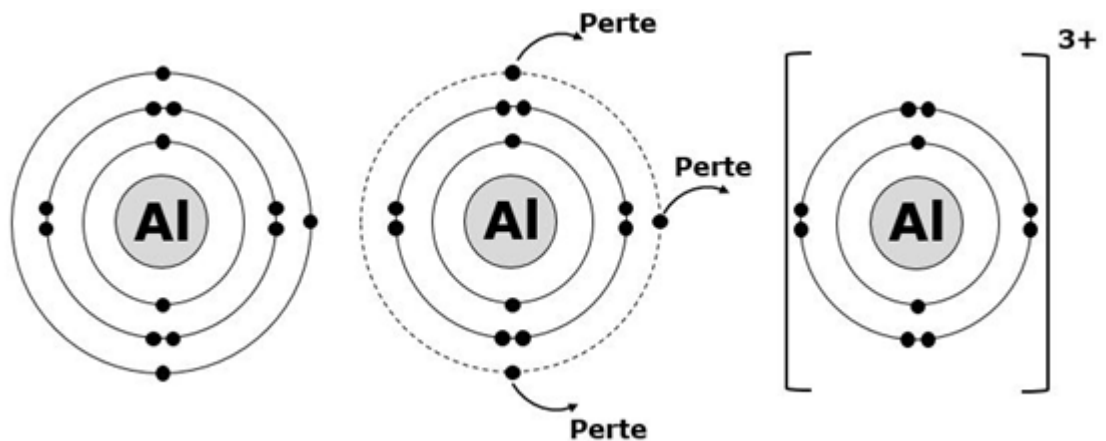


Figure.I. 16modèle schématique de l'ion aluminium

Si nous prenons l’oxygène pour exemple il contient 6 électrons dans sa couche externe (L) Il aura tendance à capter deux électrons Il devient un anion

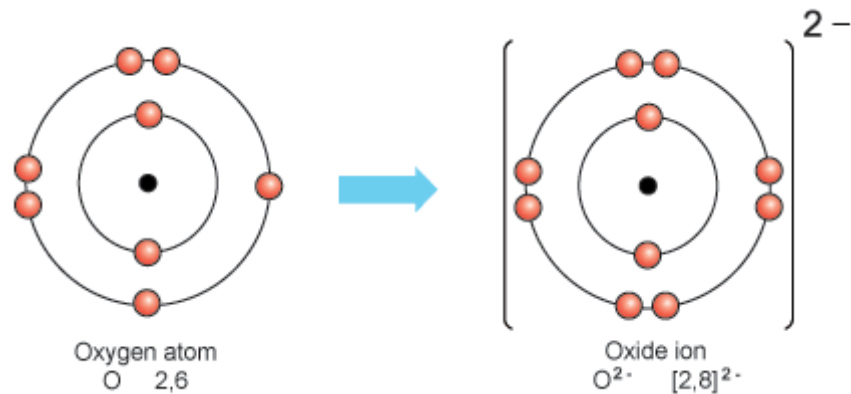


Figure.I. 17modèle schématique de l’ion oxygène

Dans le Atome silicium est particulier sens où il a le choix entre perdre ou capter 4 électrons pour arriver à une couche périphérique de 8 électrons.

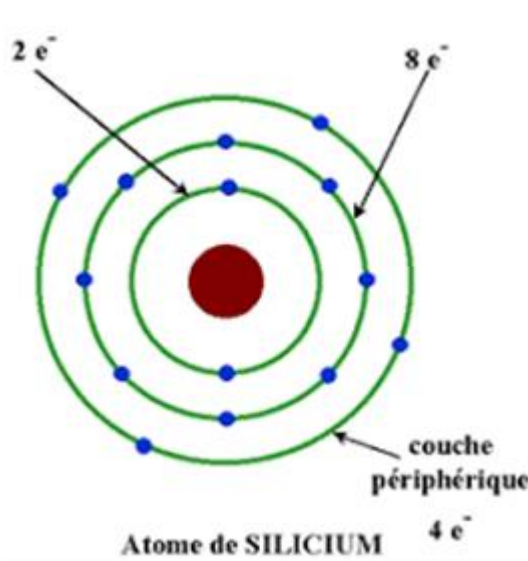
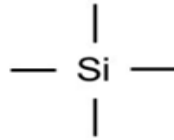


Figure.I. 18répartition des électrons du silicium

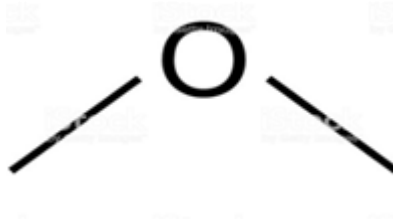
Le nombre de liaisons chimiques covalentes qu’il peut établir au sein d’une molécule.si nous prenons le silicium et oxygène pour exemple Le silicium va former quatre liaisons pour être stables [16]





**Figure.I. 19**les liaisons du silicium

Oxygène va former deux liaisons pour être stable



**Figure.I. 20**les liaisons de l'oxygène

Au sein même d'une couche ou entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons interatomiques sont des liaisons de valence primaire très fortes. Entre deux feuillets successifs, les liaisons sont en général 10 à 100 fois moins fortes que les précédentes en raison des cations adsorbés. En effet, différents mécanismes d'interaction vont pouvoir s'établir dans l'espace inter-foliaire (ou au voisinage de la surface externe d'une particule), entre les feuillets chargés négativement et l'eau. Ces mécanismes sont les suivants [17]

### **I.7.2.les liaisons hydrogènes**

Figure 1.24 présente la relation entre les molécules d'eau et les oxygènes ou hydroxyles situés à la surface du feuillet. En effet, les atomes d'oxygène sont susceptibles d'attirer les pôles positifs de la molécule d'eau, de la même manière que les groupements hydroxyles attirent le pôle négatif de l'eau.

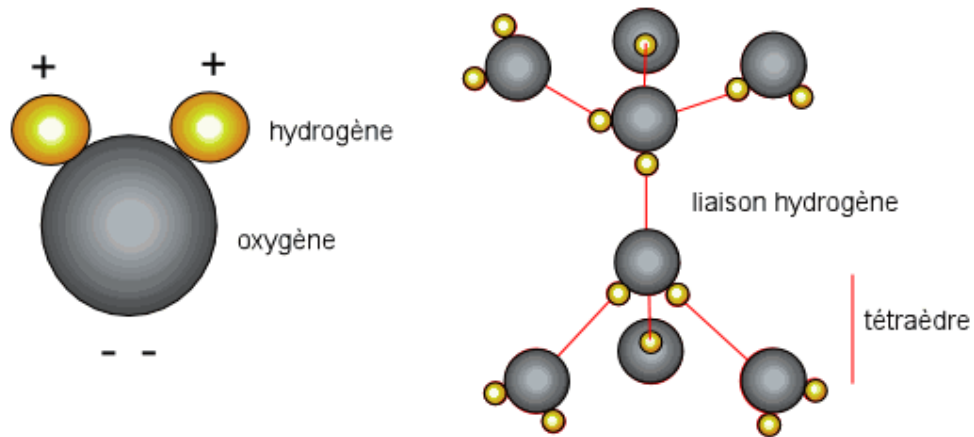


Figure.I. 21 Structure de la molécule d'eau

**I.7.3.les forces d'attraction de Van der Waals:**

Du fait de la charge négative diffuse du feuillet, des liaisons électrostatiques du type Van der Waals (attractives) peuvent s'établir entre l'eau et les sites où les charges négatives manifestent leur action attractive (Figure I.22) ;

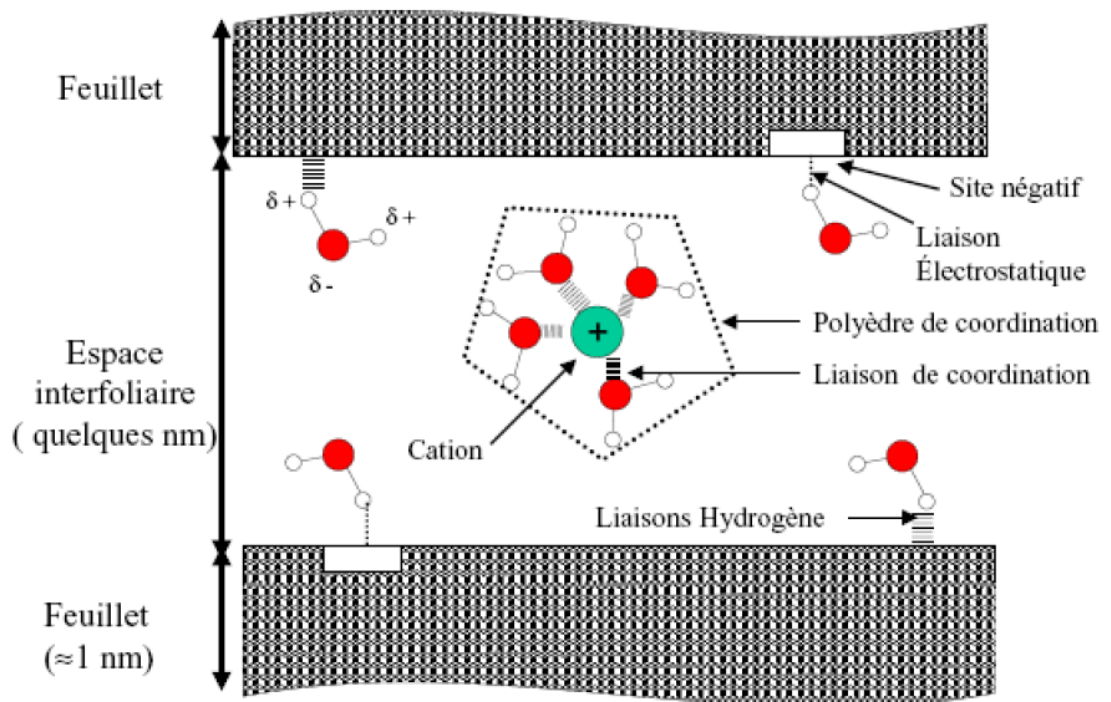


Figure.I. 22 Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire [19]

**I.7.4.L'hydratation des cations échangeables**

Les cations présents dans l'espace inter-foliaire deviennent des sites privilégiés dans lesquels viennent se fixer les molécules d'eau (Figure 22), l'ensemble formant un polyèdre de coordination [18]

Une illustration schématique de ces trois modes de liaisons possibles de l'eau inter-foliaire est présentée à la figure I.22.

**I.7.5.L'attraction par osmose :**

Plus on se rapproche de la surface chargée négativement du feuillet, plus la concentration en cations augmente ; afin d'annihiler ce gradient de concentration, les molécules d'eau ont tendance à se diffuser vers la surface (Figure I.23-a) ; notons que la concentration en cations adsorbés décroît exponentiellement au fur et à mesure que la distance par rapport à la surface d'argile augmente

**I.7.6.L'attraction dipolaire (analogie avec un condensateur) :**

Les surfaces argileuses peuvent être considérées comme le pôle négatif d'un condensateur ; les molécules d'eau orientent alors leurs pôles positifs en direction des surfaces négatives ; au milieu de l'espace inter-foliaire, les cations compensateurs vont s'interposer afin d'éviter d'avoir des pôles négatifs de l'eau adjacents l'un à l'autre (Figure I.23-b)

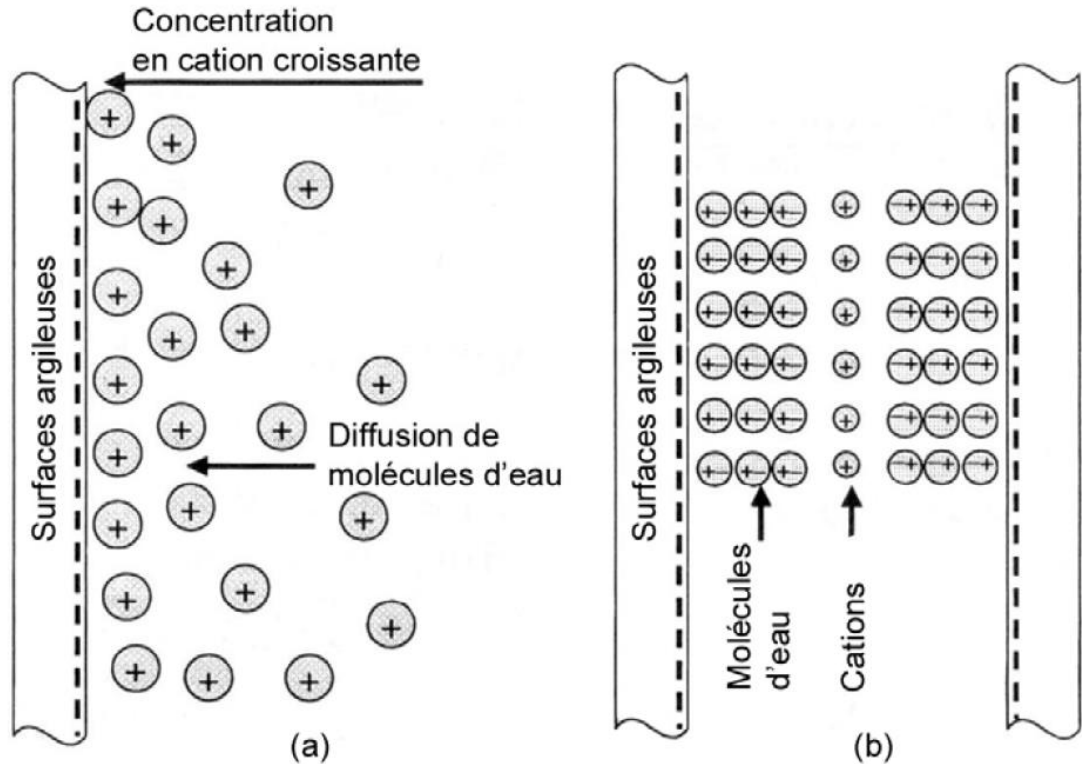


Figure.I. 23 Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses

a) Attraction par osmose, b) Attraction dipolaire [3]

## I.8. Les principaux problèmes des sols argileux

### I.8.1. Phénomène de gonflement

Le gonflement de sol est un terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lié aux changements d'humidité des sols très argileux, qui sont capables de fixer l'eau disponible, mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse (phénomène de retrait). (figure I.24) Le phénomène de retrait et de gonflement des sols argileux occasionne des dégâts considérables aux bâtiments. Il est à l'origine de tassements différentiels des terrains d'assise des constructions qui provoquent des désordres parfois très importants

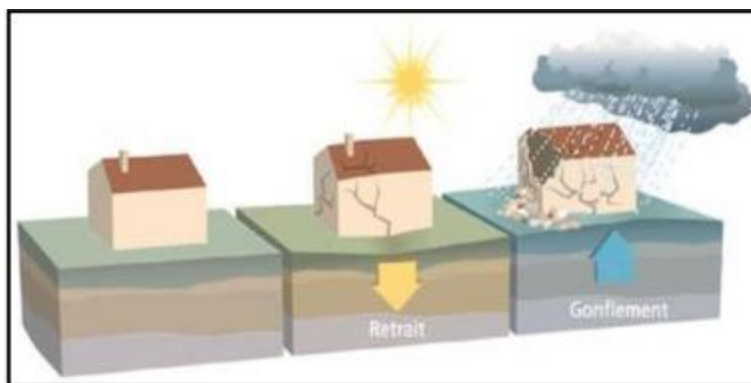


Figure.I. 24 Retrait-Gonflement

#### I.8.1.1.Nature du phénomène de gonflement

En général, le retrait/gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se modifie. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche d'une amplitude bien plus petite [19]

Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement, de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé. La structure du réseau cristallin des minéraux et leur capacité d'échange ionique joue également un rôle important. Les réseaux cristallins des minéraux argileux sont constitués de deux éléments structurels principaux, des silicates et des aluminates [20]

#### I.8.1.2.Conséquences due au gonflement

##### ▪ Cas des bâtiments

Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants, présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radié... qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs [21]



**Figure.I. 25** Dégradations et fissurations des façades des bâtiments  
(Photo prise à Tizi-Ouzou)



**Figure.I. 26** Fissure sur les murs [22]

Autres désordres provoqués par ce phénomène :

- Distorsion des portes et fenêtres ;
- Dislocation des dallages et des cloisons ;
- Décollement des éléments composites (carrelage, plâtre,)

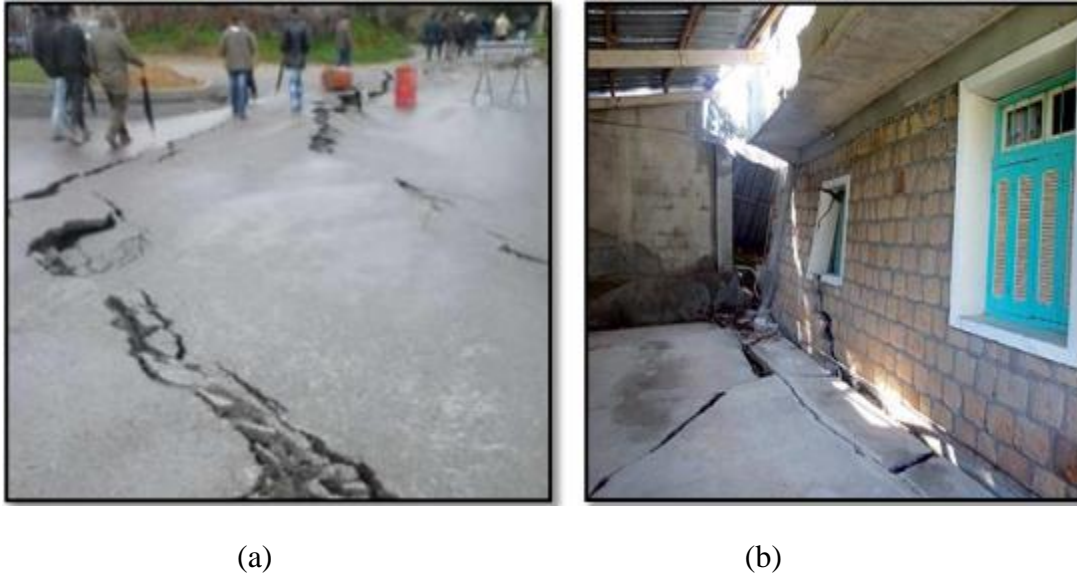


**Figure.I. 27 Désordres due au gonflement(Photo prise à Tizi-Ouzou)**

### **I.8.2.Phénomène de glissement**

Le glissement de terrain est un déplacement lent par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. Il peut-être superficiel ou profond. Les glissements se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles.). Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil ; Quelques désordres provoqués par ce phénomène

- Fissuration des maisons individuelles
- Déversement des structures, décollement, affaissement des terrasses, des escaliers
- Décollement, fissuration des dallages intérieurs et extérieurs ;
- Déformation des réseaux enterrés ;
- Fissuration des murs de soutènement



**Figure.I. 27: Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain et Fissuration d'une maison d'un glissement de terrain**

### **I.9. Conclusion**

L'argile est un matériau complexe de par sa composition chimique ; il existe de nombreuses argiles parmi lesquelles on recense la kaolinite, les smectites et l'illite. Ces trois dernières se différencient entre elles par les éléments d'insertion disposés entre les feuillets. Ces argiles sont très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions géotechniques



# **chapitre02**

## **les liants hydrauliques**

## II.1. Introduction

Les liants sont des substances utilisées pour agglomérer les particules (organiques, minérales et fibres), dans le but de produire des éléments résistants. Cela s'obtient généralement à partir d'une réaction chimique qui s'opère en présence soit de chaleur, soit d'eau soit d'autres substances, soit exposition à l'air.

## II-2 Types des liants

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles :

### II.2.1.liants hydrocarbonés

Pour la construction routière ex : bitumes, goudrons

### II.2.2.Les liants minéraux

Sont des poudres finement broyée, selon leur mode de durcissement, ils peuvent être groupés en deux familles :

- Les liants aériens : durcissement à l'air (la chaux aérienne)
- Les liants hydrauliques (ciment,)

#### II.2.2.1. Ciments

Les ciments sont des liants hydrauliques constitués de poudres fines de faire prise et de durcir progressivement au bout d'un temps plus ou moins long. Les composés obtenus sont stables au contact des eaux usuelles. Les ciments sont livrés dans le commerce en sacs ou en vrac



Figure. II. 1 : ciment en poudre

#### II.2.2.1.1. Production du ciment

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450-1550 C° des mélanges de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs, appelés **clinkers** ; c'est en

broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland (CEM I).

D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles



Figure. II. 2 : Processus de fabrication de ciment

#### II.2.2.1.2. Types de ciment

La norme NF- EN 197-1 subdivise le ciment en cinq types en fonction de leur composition à savoir :

- Le ciment Portland (CEM I); Clinker > 95% + Gypse (CaSO<sub>4</sub>).
- Le ciment Portland composé (CEM II) ; 65% < Clinker < 95% + 5 à 35% de Cendres Volantes, Schistes calcinés, Calcaire etc.
- Le ciment de haut-fourneau (CEM III) ; 5% < Clinker < 65% + 36% < Laitiers HF < 95%.
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV) ; 45% < Clinker < 89% + Pouzzolanes, fumées de silice, cendres volantes.
- le ciment composé (CEM V) 20% < Clinker < 64% + 18% < Laitier HF < 50% + éléments pouzzolaniques.

### II.2.2.2. Définition de la chaux

La chaux est un produit naturel, qui respecte l'environnement. La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction.



Figure. II. 3 : chaux en poudre

#### II.2.2.2.1. procédure de Fabrication de la chaux

La procédure de fabrication de la chaux est résumée aux étapes suivantes :

- Extraction de la matière première (calcaire et argile) ;

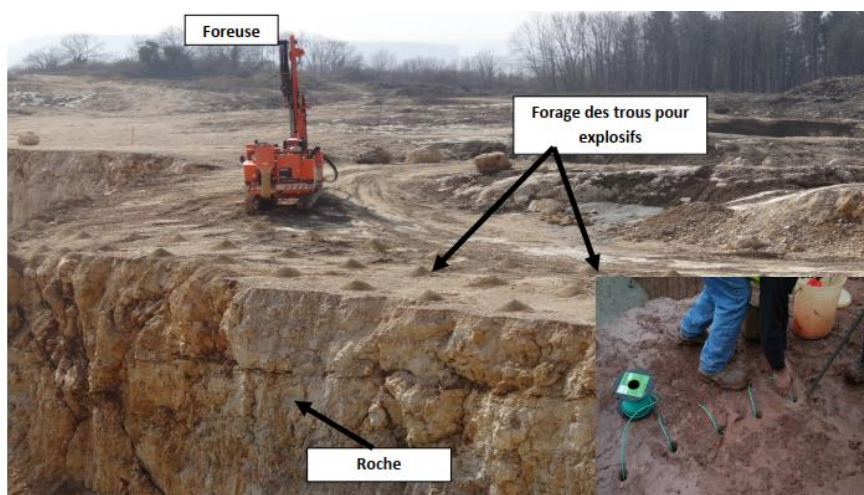


Figure. II. 4 : le gisement de la matière première de la chaux (calcaire)

- Transport, Concassage et criblage de la pierre ;



**Figure. II. 5 : Transport de calcaire pierre**



**Figure. II. 6 : Concassage de la pierre**

- La calcination (cuisson) à 950°C de la pierre ;



**Figure. II. 7 : La calcination (cuisson) de la pierre (calcaire)**

- Stockage du produit en silo ou misent en sacs

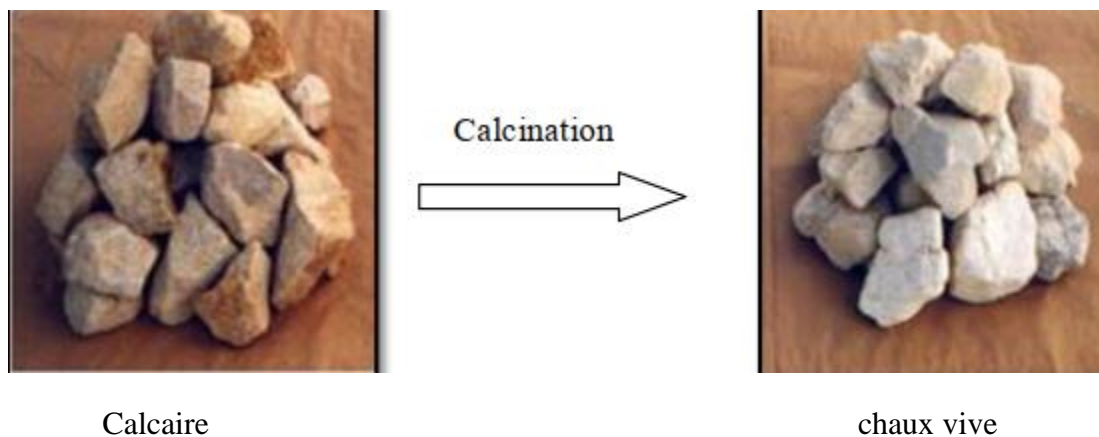


Figure. II. 8 : stockage de la chaux en silos Figure. II. 9 : stockage en sacs

#### II.2.2.2. Différent type de la chaux

- La chaux vive

Elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %).  $\text{CaCO}_3$  (calcination à  $900^\circ\text{C}$ )  $\text{CaO} \rightarrow$  (chaux vive) + (dégagement de  $\text{CO}_2$ )



Calcaire

chaux vive

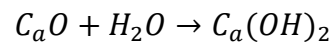
Figure. II. 10 : Transformation du calcaire en chaux vive

- Chaux éteinte (ou hydratée)

Elle est fabriquée par l'ajout d'eau (extinction) de la chaux vive

La réaction chimique qui se produit lors de l'extinction de la chaux vive est la suivante :

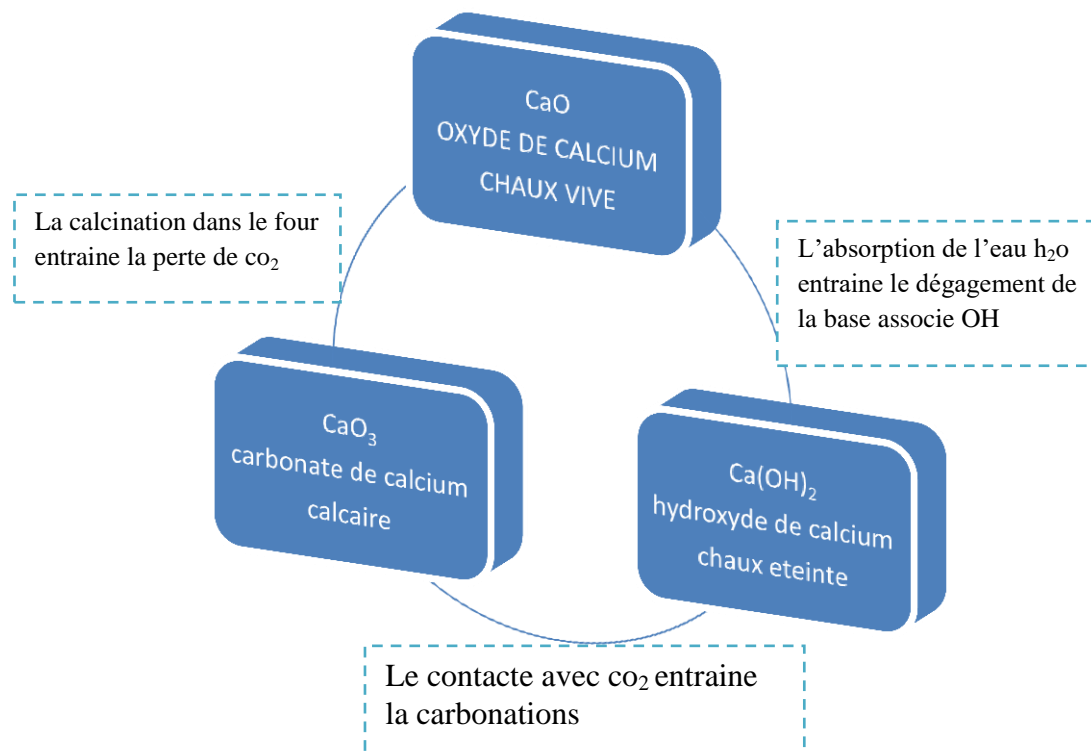
Chaux vive + eau → chaux éteinte



- **Lait de chaux**

Il est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait.

Le schéma suivant représente les étapes de fabrication de la chaux, depuis l'extraction du calcaire jusqu'à ce que la chaux éteinte fasse sa prise



**Figure. II. 11 : Cycle de la chaux**

- Si on pousse la température au-delà de **1000°C**, on fabrique des chaux sur cuites ou des ciments naturels.
- La cuisson lente (une journée entre 800° et 1100°) améliorerait la finesse de la chaux et par conséquent la qualité de la chaux produite.
- La réaction chimique qui permet de passer de la chaux vive à la chaux éteinte nécessite une quantité d'eau égale à 1/3 du poids de chaux vive.
- Éviter tout excès d'eau lors de l'extinction pour empêcher le démarrage des réactions hydrauliques. Si non la chaux sera disposée en pâte et non pas en poudre.

### II.2.2.2.3. Caractéristiques importantes des chaux

En ce qui concerne le traitement des sols à la chaux, trois caractéristiques de ce liant sont importantes :

- **La teneur en CaO**

- Le CaO peut être :
- **disponible** : c'est-à-dire non combiné, sous forme de CaO pour la chaux vive et sous forme  $\text{Ca(OH)}_2$  pour la chaux éteinte;
- **combiné** : sous forme de carbonate (son importance est appréciée par la teneur en  $\text{CO}_2$  de la chaux), de silicates et d'aluminates (la somme du CaO libre et du CaO combiné représente le CaO total). Sous forme combinée, le CaO n'est pas réactif et ne présente donc pas d'avantages pour le traitement

- **La finesse de mouture**

Elle conditionne l'homogénéité du mélange sol-chaux, garantissant l'hydratation complète de la chaux. Elle intervient également dans les conditions de stockage et de transport.

- **La réactivité**

D'une chaux vive est évaluée par sa vitesse d'hydratation et le dégagement de chaleur provoqué par cette réaction chimique.

Plusieurs facteurs influencent la réactivité d'une chaux vive, les principaux étant le mode de cuisson de la pierre calcaire originelle, sa pureté et le broyage de la chaux.

### II.2.2.2.4 Utilisation de la chaux

La chaux vive ou éteinte a plusieurs utilisations :

- **Utilisation divers dans le bâtiment**

- Béton de chaux ;
- Mortiers :(montage de pierre et de la maçonnerie, de carrelages...).
- Élément d'isolation (phonique et thermique).
- Enduits de finition avec des sables
- La protection du bois : Les poutres en bois (non peintes) peuvent recevoir un lait de chaux vive
- Comme ajout pour améliorer le sol





**Figure. II. 12 : Différentes utilisations de la chaux dans le bâtiment**

- **La chaux dans les techniques routières**
  - **Assèchement** : La chaux est épanchée sur les sols humides afin de diminuer leur teneur en eau et faciliter ainsi le travail des engins de terrassement.
  - **La stabilisation des terres** : La chaux mélangée aux sols argileux, se combine chimiquement avec ces derniers. L'argile passe alors d'une consistance plastique à une consistance grenue, stable et très peu sensible à l'eau



**Figure. II. 13 : Utilisation de la chaux dans le domaine routier**

- **Diminuer l'acidité** : La chaux est utilisée sur les sols acides, naturellement argileux ou sableux, ou encore devenus acides du fait de l'emploi excessif d'engrais chimiques ou organiques.

- **Absorber l'humidité** : La chaux vive capte l'humidité de l'air pour se transformer en chaux éteinte. 10 Kg de chaux vive exposés à l'air capteront 2 litres d'eau.

### II.3. Réactions chaux - sol argileux

L'interaction entre le sol et la chaux dépend, entre autres, du pH du sol, de la quantité du carbone organique contenu dans le sol, des mouvements d'infiltration, et de la teneur du sol en calcaire, en gypse et en ammonium

Les types de réactions pouvant se produire sont : l'échange cationique, la floculation, la carbonatation et la réaction pouzzolanique

- **Echange cationique** : Lorsque la chaux est ajoutée aux sols argileux, en présence de l'eau, l'échange cationique commence à avoir lieu immédiatement après le mélange. En effet, la dissolution de la chaux dans un sol argileux hydraté libère des cations du calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et des hydroxyles  $(\text{OH})^-$ . Les cations de calcium sont instantanément absorbés et intercalés dans l'espace inter-foliaire de l'argile (structure **TOT**) et remplacent les différents cations inter-foliaires existants. Cet échange induit des forces attractives entre les feuillets d'argile. [23]. Cela mène à un changement de la structure des feuillets argileux et entraîne des modifications immédiates des propriétés des sols traités. Cette réaction instantanée se poursuit avec l'addition de la chaux jusqu'à la saturation complète des argiles en calcium. La quantité de calcium (et donc de chaux) nécessaire pour aboutir la saturation parfaite est fonction de la nature Des argiles et du cation existant dans l'espace inter-foliaire.
- **Floculation - Agglomération** : En conséquence de l'échange cationique, l'intercalation des cations de calcium entre les feuilles argileux modifie la densité de la charge électrique superficielle dans les particules d'argiles [24]. La charge négative portée en surface des particules d'argiles et l'intensité des forces de répulsion sont réduites ; ceci conduit les particules d'argiles à se rapprocher les unes aux autres pour former des floes [25]. Les floes formés sont insensibles au lavage [26] mais deviennent plus stables avec le temps. Cette floculation - agglomération change la texture de l'argile et améliore la consistance des sols argileux traités.

- **Réaction pouzzolanique** : Une fois que l'affinité de sol est satisfaite par les cations  $\text{Ca}^{2+}$ , une autre réaction, appelée réaction pouzzolanique, se déclenche entre la chaux et les couches tétraédrique et octaédrique des feuillets argileux et le calcium, en particulier sur les bords des particules d'argile. A noter que les cations de calcium fixés dans l'espace inter-foliaire de la fraction argileuse ne participent pas à la réaction pouzzolanique [27] En effet, la dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations  $\text{Ca}^{2+}$  et anions  $\text{OH}^-$ ) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées. En conséquence, elles libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments ; hydrate de silicate Calcique (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) et hydrate alumino-silicate calcique (CASH) [28]. Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol et en cristallisant, agissent comme des liens entre les particules du sol. Cette réaction consomme donc les argiles et aboutit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Les différentes argiles (kaolinite, illite et smectite) ne réagissent ni avec la même cinétique ni de la même « manière » avec la chaux [30]. Cette réaction est conditionnée par la saturation initiale de la solution (eau de mélange) en chaux [29]. Un test basé sur la mesure du pH permet d'évaluer la teneur en chaux nécessaire pour que ces réactions puissent avoir lieu. Le seuil de pH correspondant à la saturation de solution en chaux est environ 12,4 [30]. La solubilité de l'aluminate octaédrique et du silicate tétraédrique des minéraux argileux est très élevée à cette valeur. La quantité de chaux permettant d'obtenir cette valeur de pH est connue sous le nom de « lime fixation point ». De plus, la quantité de chaux ajoutée au traitement doit être adaptée à la teneur des argiles dans le sol. Cette réaction pouzzolanique a une cinétique lente qui nécessite, à température Ordinaire, plusieurs mois avant que ses effets puissent être appréciés [25]. Cependant, la cinétique dépend de plusieurs facteurs dont la température de maturation et la teneur en eau des sols traités. En dessous de  $5^\circ\text{C}$ , la cinétique est ralentie alors qu'elle s'accélère avec l'augmentation de la température [26]. Une humidité relativement importante favorise la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniforme dans une surface plus ou moins étendue

autours des gains de chaux [27]. La quantité de chaux permettant d'obtenir une amélioration optimale des propriétés hydromécaniques et une durabilité des propriétés recherchées avec le temps est appelée lime stabilisation optimale [27]

- **Carbonatation** : La carbonatation (formation de la calcite) de la chaux est une conséquence de la réaction produite entre la chaux et le CO<sub>2</sub> de l'air. Cette réaction pourrait avoir lieu pendant la maturation Des sols traités. Cependant, elle n'est pas recherchée lors du traitement des sols. Dans le cas du développement de cette réaction, les cristaux de calcite ainsi formés ont une propriété liante très Médiocre et perturbent la stabilisation des sols car leur développement inhibe la réaction pouzzolanique [26] Ainsi, cette réaction provoque une réduction de la résistance finale à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique. Bien que la calcite formée puisse renforcer légèrement le sol pendant la première période, cette réaction ne peut pas être considérée comme une amélioration à long terme [31].

#### II.4. Conclusion

Les liants hydrauliques ont su trouver leur place dans le domaine de la construction. Ces derniers forment une pâte qui fait prise au contact de l'eau et durcit lors de la phase d'hydratation. Les deux principaux liants hydrauliques sont le ciment, la chaux

# **chapitre 03**

## **l'effet pouzzolanique**

### III.1. Introduction

L'industrie cimentaire consomme une grande énergie et par conséquent, produit une quantité importante de gaz carbonique à effet de serre. Ce gaz résulte de la combustion des hydrocarbures et de la décarbonatation du  $\text{CaCO}_3$ , contenu dans la matière première, lors de la cuisson du mélange cru pour fabriquer du clinker. Une des solutions alternatives est de substituer partiellement le clinker dans le ciment Portland par des ajouts aluminosilicates dans le but de préserver ou améliorer les performances du ciment. Ces additions minérales doivent présenter une certaine activité chimique dite « pouzzolanique ».

### III.2. Matériaux pouzzolaniques

L'origine du mot « pouzzolane » vient de l'italien. Ce sont les romains qui ont remarqué dès l'antiquité que l'ajout de fines volcaniques prélevées sur les pentes du Vésuve, non loin de Pouzzoles, dans des mortiers de chaux permettait d'augmenter significativement leur résistance mécanique et leur durabilité. Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas de propriétés liantes, mais sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec les hydroxydes alcalins et alcalino-terreux à température ordinaire, pour former des composés possédant des propriétés liantes

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes :

#### III.2.1. Pouzzolanes naturelles

Proviennent des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors du refroidissement après fusion. Elles sont des composés insolubles dans l'eau, qui réagissent à l'état solide avec la chaux en solution grâce à leur structure amorphe ou semi amorphe.

- **Verre volcanique**

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On

mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.



**Figure. III. 1: Verre volcanique**

- **Tufs volcaniques compacts**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydro-thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.



**Figure. III. 2 : Tufs volcaniques**

### III.2.2. Pouzzolanes artificielles

Sont des matières essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi une activation pour leur assurer les propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes artificielles les plus utilisées sont :

- **Cendres volantes**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion d houilles pulvérisées, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique à débiter aux USA en 1937. On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de Calcium (CaO) Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8%, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %.



**Figure. III. 3: Cendres volantes**

- **laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, dans un haut fourneau, et qui est provient de fusion du minerai de fer obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment Les analyses minéralogiques de LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80% à 100 %.





**Figure. III. 4 : laitier granulé de haut fourneau**

- **Argiles calcinées**

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique.

- **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.



**Figure. III. 5 : Fumée de silice**

### III.3. Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution-précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium (chaux) et un matériau pouzzolanique, en général un silico-aluminate.

La réaction pouzzolanique se produit en solution (dissolution / précipitation) entre la silice et l'alumine provenant de la dissolution de la pouzzolane, et hydroxyde de calcium CH issu de hydratation du ciment, en formant des silicates calciques hydratés (C-S-H) et aluminates calciques hydratés (C-A-H) qui précipitent sous forme de gel durcissant en une structure amorphe



#### III.3.1. Mécanismes de la réaction pouzzolanique

L'étude de l'hydratation du mélange ciment Portland – pouzzolane est essentiellement basée sur les réactions d'hydratation des quatre composés principaux du ciment mélangés individuellement avec la pouzzolane.

Ogwa et ses collaborateurs [32] ont proposé un mécanisme pour la réaction C3S-pouzzolane (Figure III.6).

D'après ces auteurs, la réaction des grains de C3S avec l'eau est accélérée par la présence de particules pouzzolaniques qui crée des sites de germination pour les produits de réaction. De plus, la dissolution de C3S est favorisée par la réaction des ions calcium avec la pouzzolane.

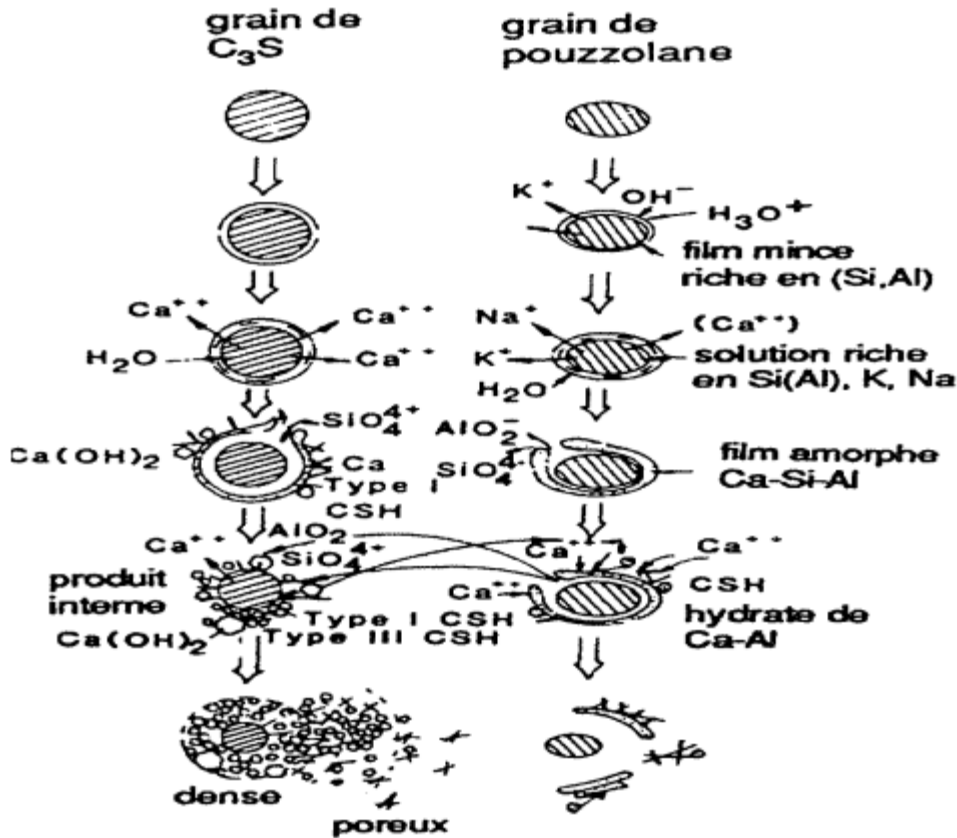


Figure. III. 6 : Représentation schématique de la réaction C3S-pouzzolane

Uchikawa et Uchida [33] ont proposé un mécanisme réactionnel du système C3A-pouzzolane. Ce mécanisme est similaire à celui de la réaction C3S-pouzzolane, qui est essentiellement un processus photochimique faisant appel au processus de diffusion et de dissolution.

L'effet de pouzzolanes sur l'hydratation de C4AF a été étudié par Monoski et ses collaborateurs [34]. Selon la composition de la pouzzolane, l'hydratation de C4AF peut être accélérée ou retardée. Ainsi, les travaux de Garcia Diaz [35] ont permis de mettre en évidence l'existence de deux régimes cinétiques pour la réaction pouzzolanique du métakaolin obtenu par traitement thermique du kaolin :

Un régime à court terme dont la vitesse d'avancement de la réaction (pourcentage de métakaolin réagissant) est une fonction croissante de la surface externe initiale des particules de métakaolin.

Un régime à long terme dont la vitesse d'avancement de la réaction est une fonction décroissante de l'indice d'agglomération (rapport de la surface inter granulaire sur la surface totale)

### III.3.2. Facteurs influant sur la réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciment (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau Pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité [36].

- **La température de maturation** : les études effectuées par (Boardman et al. (2001) ; Raoet Shivananda (2005) ; Lasladj (2009) ; Cabane, 2004) montrent que la température élevée de cure accélère la cinétique des réactions pouzzolaniques. Cependant, au-dessus de 45°C, les produits de la réaction sont dénaturés. La prise est ralentie voire arrêtée lorsque la température est inférieure à environ 5°C (Thompson, 1968 ; Bell, 1996), être prend lorsque la température commence à s'élever à nouveau. AL-Mukhtar et al. (2010) a étudié l'effet de la température sur la cinétique des réactions pouzzolaniques d'un sol argileux expansif traité par la chaux. Il montre que la température de cure entre 20 °C à 50 ° C multiplie la vitesse de réaction pouzzolanique par 6
- **La nature minéralogique de la fraction argileuse** : les différents types d'argile ne réagissent pas de même cinétique avec la chaux.[37] En effet, la réactivité chimique des argiles est mesurée par la quantité d'hydrates (C-S-H et C-A-H) solubles par l'acide, la montmorillonite subit des réactions plus vite que l'illite et la kaolinite.
- **Etat hydrique du sol** : une teneur en eau élevée favorise la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniformes dans une surface plus ou moins étendue autour des gains de chaux [27] (figure III.7)

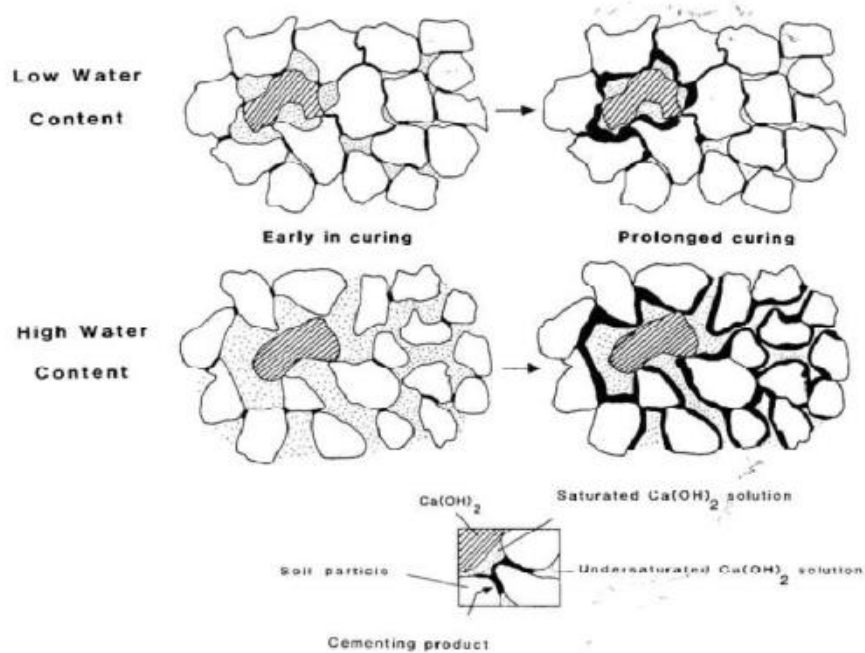


Figure. III. 7: Schéma du mécanisme de réaction chaux-argile [27]

#### III.4. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- Sa composition chimique vérifiée :  $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$  (ASTM C 618)
- Son indice d'activité I est :  $0,67 < I < 1$ .
- Sa teneur en verre  $> 34\%$ 
  - ✓ **L'indice d'activité** : l'indice d'activité pouzzolanique c'est un rapport entre la valeur de la contrainte de résistance à la compression d'un mortier contient des proportions de pouzzolane naturelle de 28 jours et un mortier témoin de qualités ordinaire du même âge.
  - ✓ **La teneur en verre** : La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour cela, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice ( $SiO_2$ )-Chaux ( $CaO$ )). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques cette différence doit être au moins supérieure ou égale à 34% pour que les pouzzolanes soient acides et contiennent une phase vitreuse, donc capable de fixer la chaux libérée par le ciment.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques** : La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.
- **Propriétés physiques de remplissage** En plus de leur effet pouzzolaniques, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité

### III.5. Activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique c'est l'aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaire et en un temps raisonnable. Cette propriété se constate à des degrés variables pour des matériaux riches en silice libre, qu'ils soient d'origine naturelles (gaize, diatomites, cendres volcaniques...) ou artificielles (Cendres volantes, fumée de silice, argile calcinée...).

L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts:

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

Les différents matériaux pouzzolanique décrits ci-dessus possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant des propriétés liantes.

#### III.5.1. Estimation de l'activité pouzzolanique

L'estimation de l'activité pouzzolaniques de l'ajout est déterminée par plusieurs méthodes connues. Citons quelques-unes :

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques.
- Essais mécaniques et analyses chimiques.
- Evaluation la pouzzolanicité d'un mélange argile calcinée/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

### III.6. Comportement de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

**a. A l'état frais**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplée à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation. Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

**b. A l'état durci**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces

**III.7. Différentes utilisations de la pouzzolane**

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants :

**1) Applications routières**

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel)

Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée.

**2) Dans l'industrie**

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane)



## **chapitre 04**

# **influence des liants hydraulique sur les sols argileux**

# Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

## IV.1 Introduction

De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols argileux

## IV.2. Influence de la chaux sur le solfin

### IV.2.1. Influence de la chaux sur la consistance du sol

Les travaux effectués par George et al(1992) ont permis d'observer que lorsqu'un sol est traité avec la chaux il y a une diminution notable de l'indice de plasticité.

De plus, la limite de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité (Tableau IV.1). Sols utilisés sont d'Edimbourg, Royaume-Uni

- Sol A : sol argileux contient 25% d'argile, il est plastique.
- Sol B : sol limoneux contient moins de 10 % d'argile. il est faiblement plastique

**Tableau. IV. 1 : Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg[32]**

	Chaux (%)	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)
Sol A	0	55.0	30.0	25.0
	6	56.1	39.3	16.8
Sol B	0	26.5	19.4	7.1
	9	28.0	24.5	3.5

Dans le tableau IV.1 On observe que l'ajout de 6 % de chaux a augmenté la limite de plasticité de sol A de 30.0 % à 39.3% et diminue indice de plasticité de 25.0 à 16.8

On observe aussi que l'ajout de 9 % de chaux a augmenté la limite de plasticité de sol B de 19.4 % à 24.5% et diminue indice de plasticité de 7.1 à 3.5

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

Les travaux effectués par Ola(1977) montrent que l'indice de plasticité après addition de 10 % de chaux au sol instable a montré une diminution de 17.8 % à 1.3 % (Tableau IV.2)

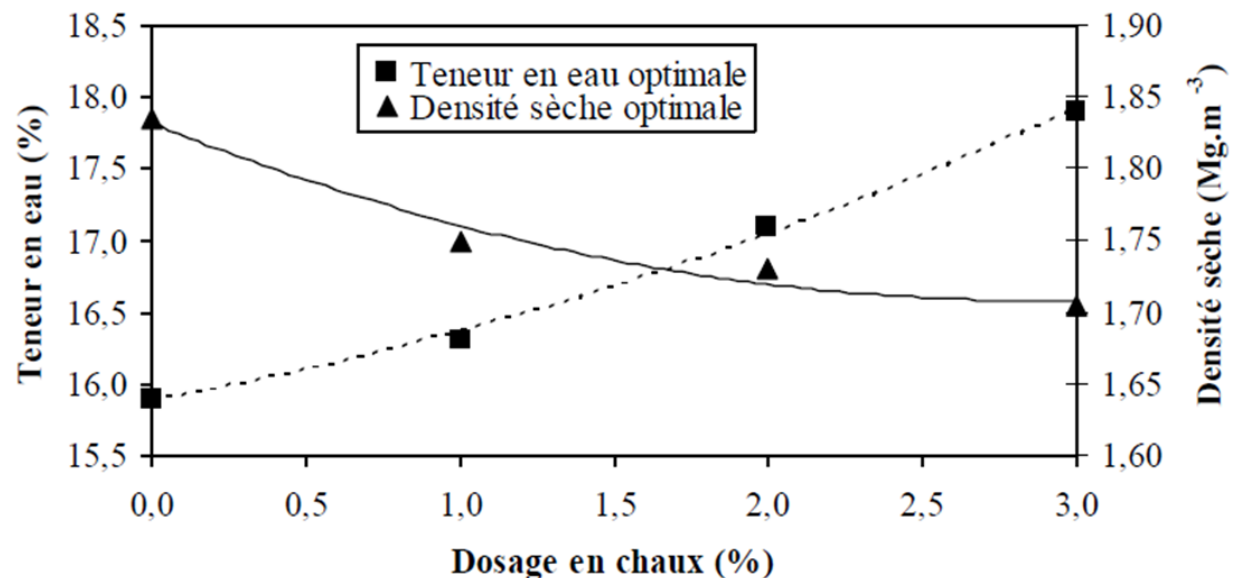
**Tableau. IV. 2 : Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg[33]**

Chaux (%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité(%)	Indice de plasticité(%)
0	36.0	18.2	17.8
2	36.5	22.8	13.7
4	37.2	28.0	9.2
6	38.0	31.8	6.2
8	38.5	36.5	2.0
10	41.5	40.2	1.3

### IV.2. 2. Effet de la chaux sur les caractéristiques de compactage :

Plusieurs chercheurs (Osula, (1996), Khattab et al. 2008, Nguyen (2015), Djelloul R (2018)) ont étudié l'effet de l'addition de la chaux au sol sur les caractéristiques de compactage, à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Osula1996, a montré que les sols traités présentent une densité à l'optimum plus faible que celle des sols naturels, et leur teneur en eau de compactage optimale est décalée vers des teneurs en eau plus fortes (Figure IV.1)

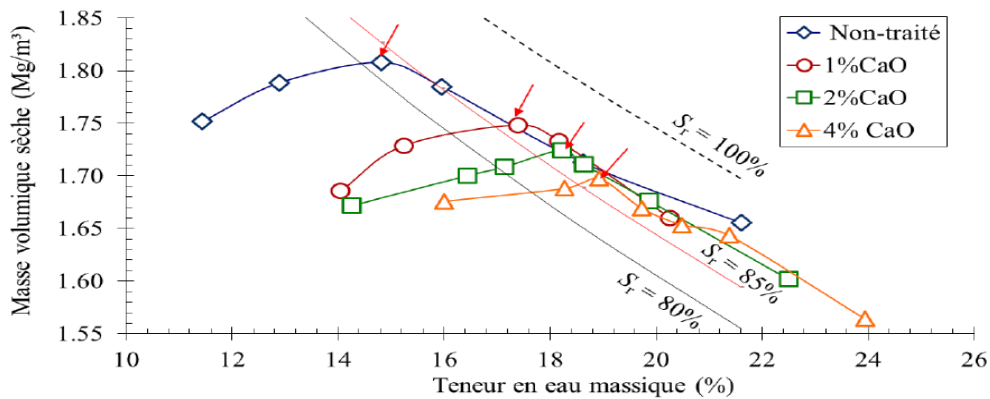


**Figure. IV. 2 Modification des caractéristiques de compactage d'un sol argileux en fonction de la teneur en chaux [34]**

Nguyen(2015) a effectué ses travaux sur l'effet de différents pourcentages de la chaux (1%, 2%,4%) sur les propriétés de compactage du sol fin (limono-argileux)

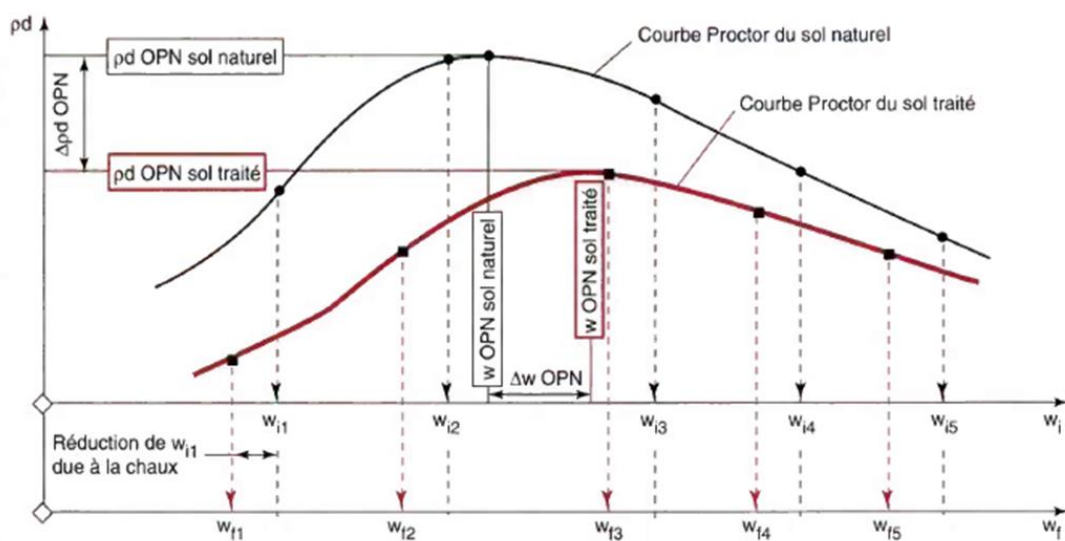
## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

Toutes Les courbes du sol traité sont en dessous et à droite de celles du sol naturel. Cela indique que l'ajout de chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et la réduction de la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche en fonction des pourcentages de chaux. , (figure.VI.2)



**Figure. IV. 3** Courbes Proctor Normal d'un sol limono-argileux non-traité et traité [35]

Les études réalisées dans le GTS (2000) montrent que la courbe « Proctor » du sol traité s'inscrit en dessous et à droite de celle du sol naturel. Cette tendance s'observe quelle que soit l'énergie de compactage appliquée et est d'autant plus marquée que le sol est argileux. Autrement dit, le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau (Figure IV.3)



**Figure. IV. 4** Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2 % de chaux vive [36]

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

Wi: teneur en eau du sol avant le traitement.

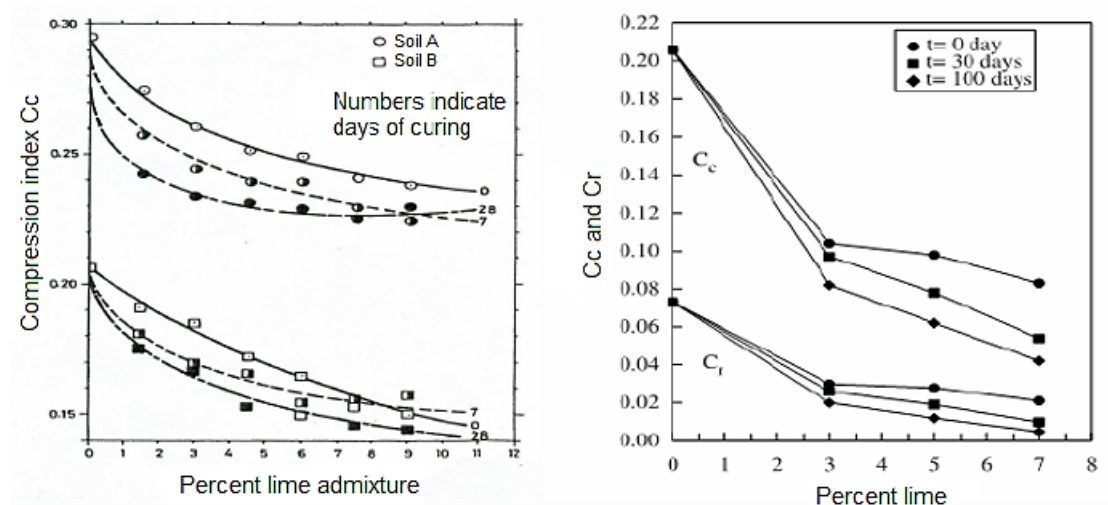
Wf : teneur en eau du sol après le traitement.

### IV.2. 3.Effet de la chaux sur les paramètres de compressibilité et de cisaillement

La plupart des chercheurs (Basma et Tuncer (1990, Rajasekaran et Rao 1997), Khattab S.A.A (2002) ont démontré l'efficacité de la chaux sur la compressibilité des sols dont L'ensemble de ces études converge sur le fait que le gonflement et l'indice de compressibilité diminuent.

Basma et Tuncer (1990) ; Nalbantoglu et Tuncer (2001) ont montré que le sol traité à la chaux présente des effets significatifs. Ou ils ont remarqué une diminution immédiate de l'indice de compressibilité et du gonflement avec la chaux. Ses indices continuent à diminuer avec le temps de maturation

Ils ont également observé que les deux indices décroissent très rapidement lors de l'ajout de la chaux à un sol argileux chypriote



**Figure. IV. 5** Effet de la chaux et du temps de maturation sur l'indice de compressibilité  $C_c$  et l'indice de gonflement  $C_s^*$

Deux sols argileux traité (Jordanie), Basma&Tuncer (1990), et d'un sol argileux provenant de Chypre (Nalbantoglu&Tuncer 2001).

Khattab (2002), a trouvé que l'ajout de 4% de chaux à une argile plastique, permettait de réduire la compressibilité et le gonflement du sol.( une diminution de l'indice de compressibilité d'une valeur de 0.5 pour l'argile non traitée à 0.2 pour l'argile traitée

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

avec 4% de chaux et De même pour l'indice de gonflement qui est passé de 0.18 avant traitement à 0.05 après traitement à la chaux.).

Osula (1991), a étudié l'effet de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols naturelles il a montré que la résistance au cisaillement de ces sols traités augmente par rapport aux sols naturels. La période de cure est un facteur important dans l'évolution de la résistance au cisaillement des échantillons traités. L'augmentation de la cohésion est attribuée à la cimentation des particules tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules (figure IV.5).

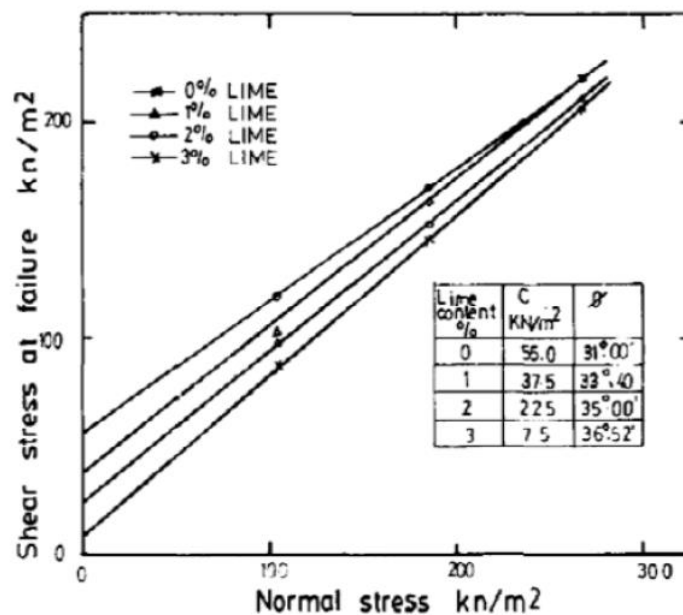


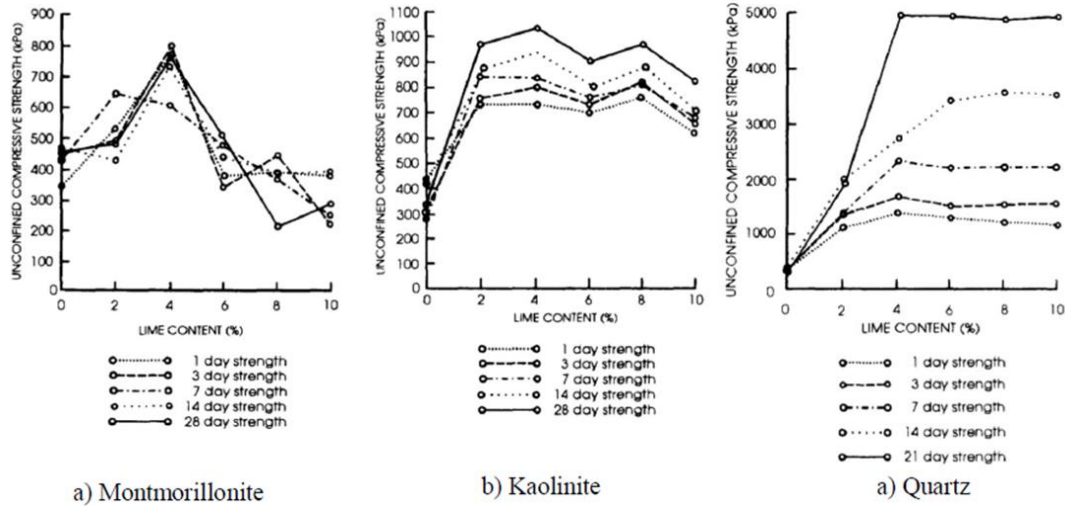
Figure. IV. 6 Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [34]

### IV.2.4. Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour différents temps de cure

L'effet de la chaux sur l'évolution du comportement mécanique notamment la résistance à la compression simple a également été étudiée par différents auteurs (Bell, (1996) ; Little, (1995), Khattab (2002), Nicolas Maubec (2010)). L'ajout de chaux conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple (RC) des sols compactés qui dépend aussi à la quantité de chaux ajoutée et du temps de cure. Plus la quantité de chaux est forte et plus le temps de cure est long, plus la résistance à la compression simple est forte. Cette augmentation est associée à la formation des produits cimentaires (Bell, 1996 ; Little, 1995).

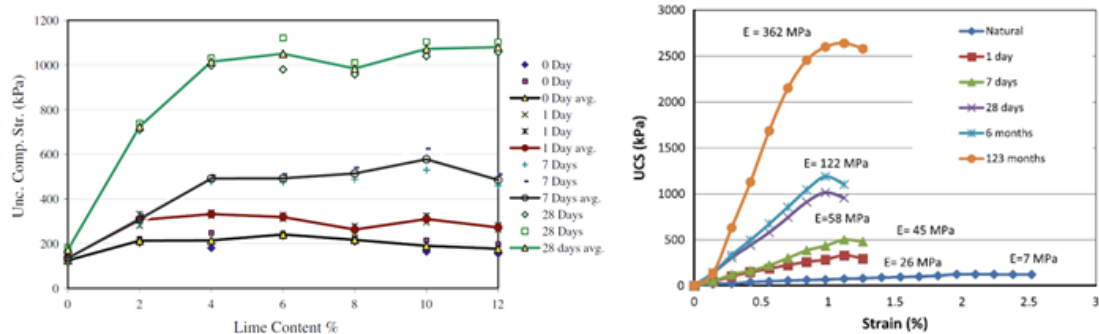
## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

Bell, (1996) a montré dans ses travaux, l'effet de différents pourcentages de la chaux sur la kaolinite, montmorillonite et quartz (figure IV.6) que les résistances atteintes par la montmorillonite sont plus faibles que celles atteintes par la kaolinite. Les plus fortes résistances à la compression sont atteintes pour le quartz traité à la chaux



**Figure. IV. 7** Variation de la résistance en compression simple des trois minéraux [37].

Kavak and Baykal [2012] ont étudié la stabilisation des sols (kaolinite) de chemin de fer au Tchèque par le traitement à la chaux (4,12% chaux). Ils ont montré que l'ajout de chaux a un effet positif, notamment le dosage de 12% dont la caractéristique favorable de la chaux s'est expliquée par le processus de la réaction pouzzolanique au long du temps entre la chaux et les minéraux argileux dans le sol traité. Ils ont observé aussi que l'augmentation de la résistance du mélange, même si 10 ans après le traitement, figure VI.7



**Figure. IV. 8** Essai de compression simple du sol traité à la chaux et leurs modules d'élasticité au cours du temps

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

---

### **IV.3. Dosage et le point de fixation de la chaux pour différents types de sols en fonction de PH**

Dans les matériaux en terre, le choix de l'utilisateur s'orientera vers la chaux vive qui permet de diminuer la teneur en eau et d'améliorer les caractéristiques du sol selon le pH du milieu environnant.

De nombreuses études (Khattab S.A.A, (2002), Djelloul R.(2018)) ont montré que le dosage de la chaux minimal nécessaire et efficace pour la stabilisation était d'environ 2% à 4% ( le point de fixation de chaux : PFC).

Le point de fixation de la chaux (PFC), proposé par Hilt et Davidson (1960), est le paramètre permettant d'estimer le dosage en chaux pour la stabilisation des sols. Il correspond au dosage en chaux au-delà duquel on n'observe plus de changement de limite de plasticité

Bell F. (1996) a indiqué que l'addition optimale de chaux nécessaire pour la modification maximale du sol était généralement comprise entre 1 et 3% de la chaux vive. Il a dit que l'addition de plus de chaux générée aucune amélioration de la maniabilité, mais contribue principalement à une augmentation résistance à travers l'action cimentation de la réaction pouzzolanique.

Dans la même tendance, Basma and tuncer (1991) ont également proposé de 2%-8% de la chaux hydratée. Au-delà de ce point, la chaux est disponible pour augmenter la résistance du sol.

Plusieurs chercheurs (Khattab S.A.A, (2002), Lasledj, A. (2009)) ont présenté le choix du dosage de la chaux en basant sur la mesure de pH. L'augmentation de pH reste en fonction du dosage en chaux.

Khattab S.A.A, (2002) a confirmé dans ses travaux que l'efficacité du traitement est excellente (atteignant parfois plus de 90%) en présence d'un pourcentage optimal de chaux de 4% et dans des conditions de compactage optimales. La quantité supplémentaire de chaux peut modifier très légèrement les propriétés géotechniques. par conséquent, tout traitement efficace de sols plastiques devrait être durable et



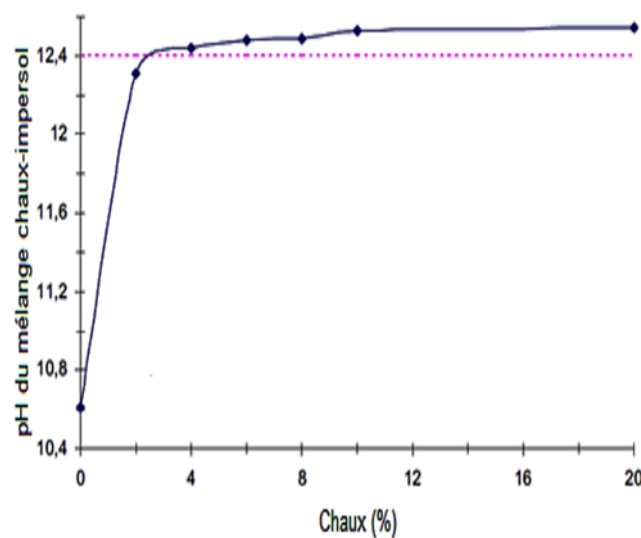
## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

Économique. Tableau. IV. 3 présente l'évolution de la valeur de Ph =8 pour l'argile non traitée à un pH=12.4 après l'addition de 3% de chaux, correspondant au Point de fixation de la chaux.

**Tableau. IV. 3 : Résultats des tests de pH [38]**

<b>La chaux(%)</b>	0	1	2	3	4	7	10
<b>Ph</b>	8.0	11.7	12.3	12.4	12.5	12.55	12.55

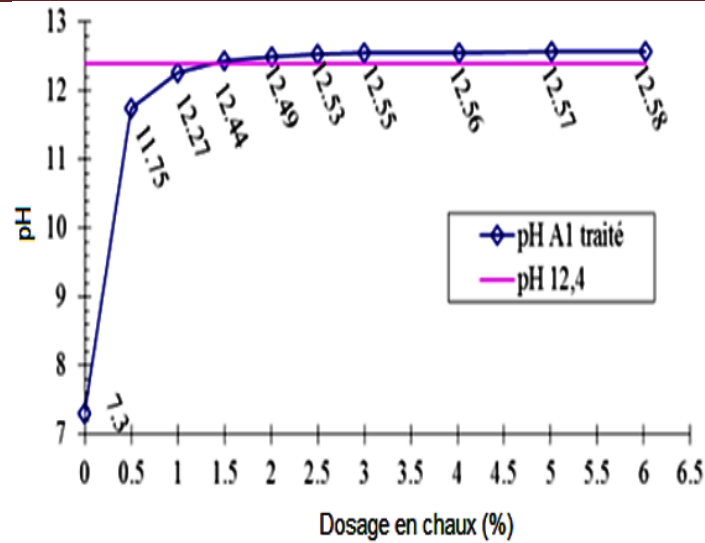
Lasledj, A. (2009) a trouvé que la valeur du ph d'une argile très plastique (Impersol) augmente sensiblement après l'incorporation de 2% chaux d'une valeur de 10.6 pour l'argile non traitée à une valeur de 12.3 et se stabilise autour de 12.4 et 12.5 après l'ajout de chaux allant de 4% à 20% (figure IV.8), ce qui reflète une saturation du mélange en chaux.



**Figure. IV. 9Variation instantanée du pH des mélanges chaux–Impersol**

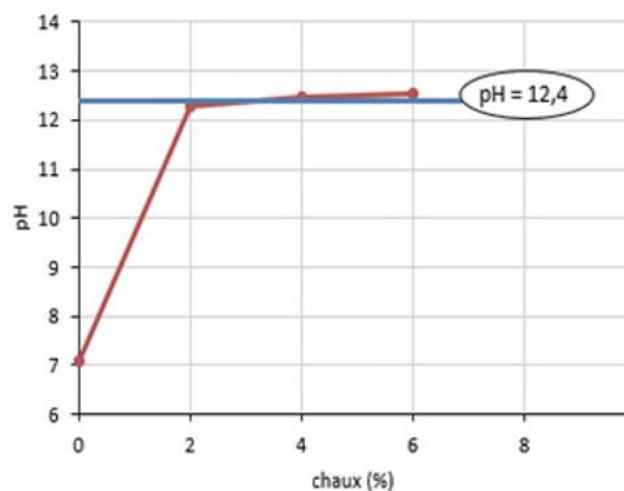
Dans le même principe Nguyen (2015), a étudié l'influence du dosage de la chaux sur le pH d'un sol fin (limono-argileux), où il a trouvé que la valeur du pH augmente après l'incorporation de la chaux, jusqu'à une valeur de pH=12.55 (FigureIV.9)

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux



**Figure. IV. 10** Détermination du point de fixation de la chaux pour le sol limono-argileux [35]

Djelloul R.(2018)) a effectué une étude de variation du Ph avec la chaux sur l' argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière. Leur étude montre que La chaux fait augmenter fortement le pH du mélange aux premiers pourcentages de chaux (0- 3%) (Figure IV.10). À partir de 4%, il a obtenu un palier, le pH augmente très faiblement jusqu'à la valeur du pH de la solution de chaux propre (pH = 12,55). La valeur du pH de 12,4 correspond à 4% de chaux ajoutée. D'après Eades et Grim, cette quantité est suffisante pour activer la réaction pouzzolanique. Ainsi, il semble que la teneur en chaux optimale est de 4%.



**Figure. IV. 11** La variation du pH avec l'ajout de chaux [39]

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

TRAN Van Duy (2013) a confirmé cette cinétique d'augmentation du pH après l'ajout de de chaux à un sol argileux Figure IV.11

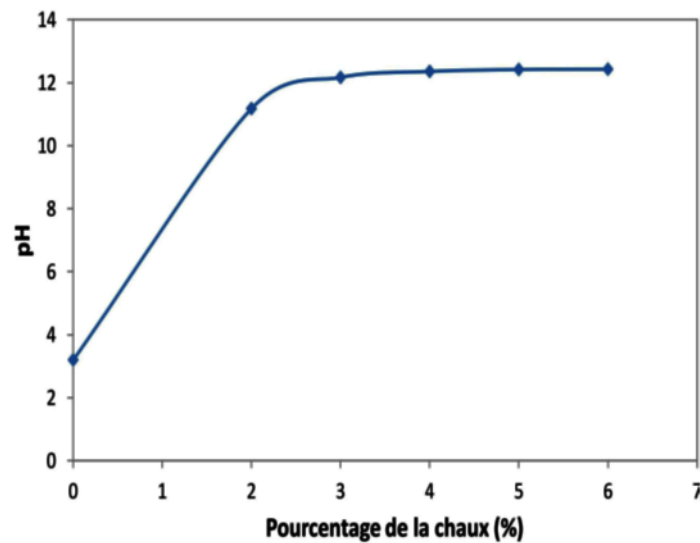


Figure. IV. 12 Évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée [40]

### IV.4. Influence du ciment sur le sol

#### IV.4.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg

Plusieurs chercheurs [Osula 1991, Al Rawas et al. 2005, Basha et al. 2005, Kalkan 2006, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] ont postulé que l'addition du ciment au sol fait diminuer l'indice de plasticité d'une façon remarquable

De plus, Osula (1991) a montré que l'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Pour cela une addition de 3% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité en réduisant l'indice de plasticité de 21.7% à 12.7%. Le même comportement est observé par Basha et al.

## Chapitre IV influence des liants hydrauliques sur les sols argileux

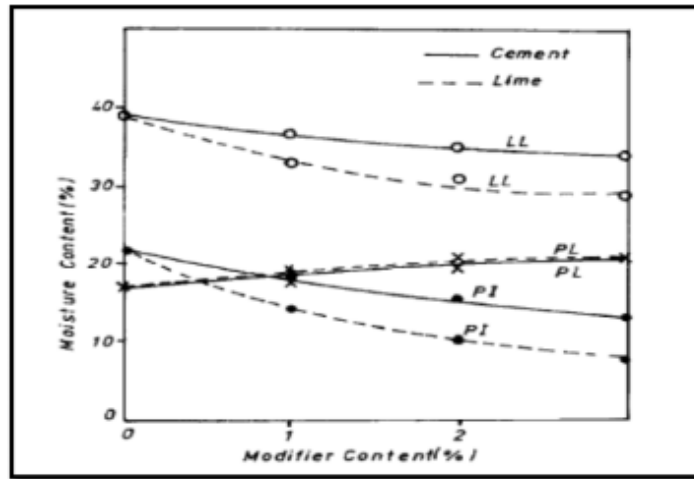


Figure. IV. 13 Effet de la chaux et de ciment sur les limites d'Atterberg [34]

### IV.4.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage

Plusieurs chercheurs [Rahman 1986, Bell 1994, Osula 1996, Gay and Schad 2000, Basha et al. 2003, Sivapullaiah et al. 2003, Basha et al. 2005, Hossain et al. 2006, Hossain et al. 2007, Mu'Azuz 2007, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] se sont penchés sur l'étude de l'effet de l'addition du ciment comme stabilisant aux sols à traiter sur les caractéristiques de compactage de ces sols améliorés. Le même comportement est constaté que pour les sols traités à la chaux. Autrement dit, la réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et l'agglomération des particules d'argile tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour la réaction pouzzolanique à prendre effet. Miller and Azad (2000) ont observé le même comportement. Les auteurs ont constaté une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale pour différentes teneurs du stabilisant.

### IV.5. Conclusion

L'influence des liants hydrauliques (chaux, ciment) sur les sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Les méthodes et d'appareillages ont été mis au point pour connaître l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols par l'ajout des liants

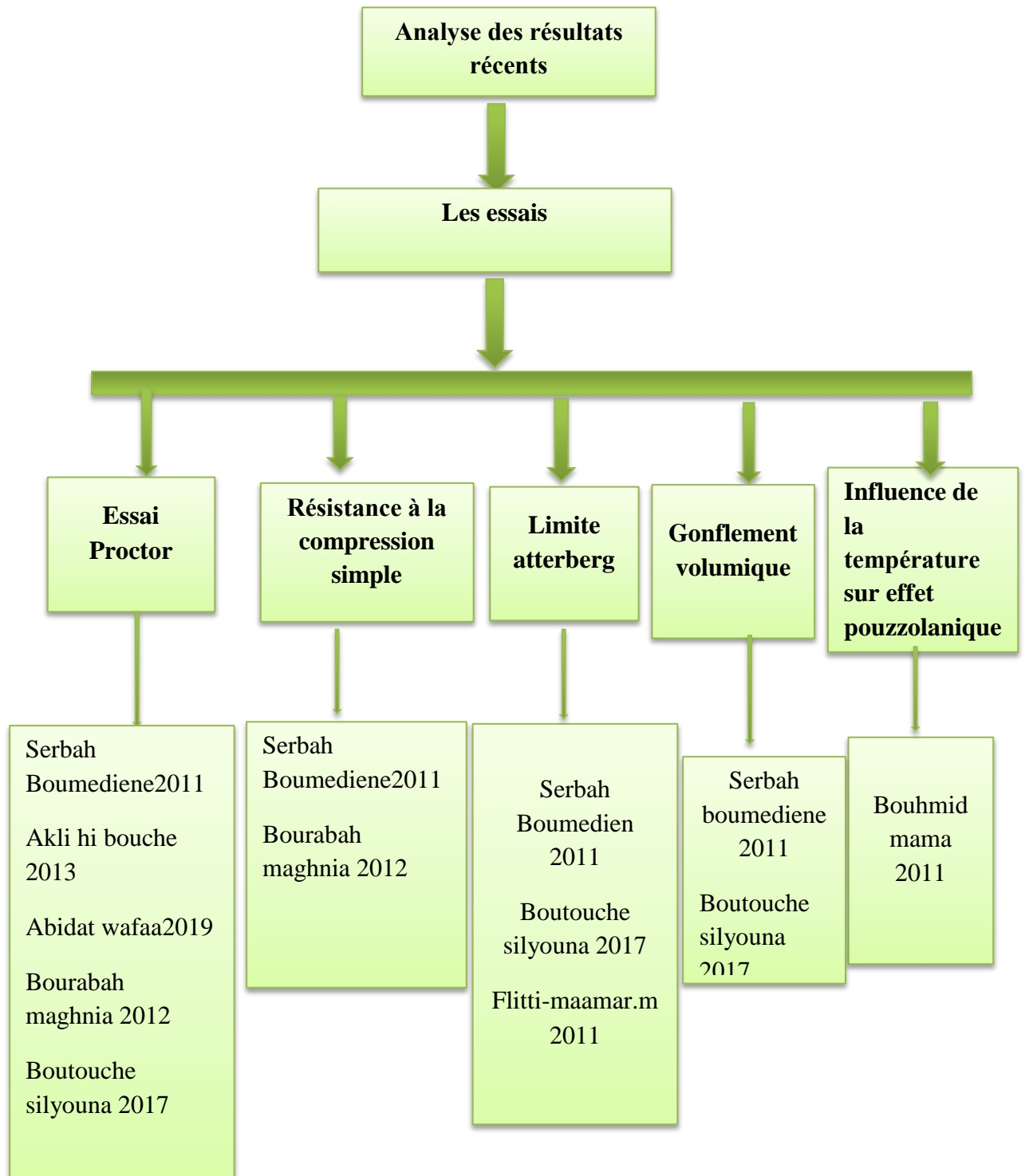
L'utilisation de l'un ou de l'autre liant dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions de l'environnement.

# **chapitre 05**

## **Analyse des resultats recentes**

**V.1.Introduction**

Les résultats d’essais qui ont été réalisés sur les sols argileux avant et après traitement par plusieurs chercheurs, ils sont classés selon l’organigramme présenté ci-dessous



## V.2 Caractérisation mécanique

Dans ce qui suit on va présenter l'effet des différents dosages de chaux et de ciment sur les essais mécanique (essai Proctor modifié, résistance à la compression) obtenue par plusieurs auteurs.

### V.2.1. Essai Proctor modifié

Le tableau (V.1) résume les résultats des essais de densification ( $w_{OPM}$ ,  $\gamma_{dmax}$ ) et portance ( $IPI_{OPM}$ ) obtenue par plusieurs chercheurs sur des sols fins de différentes régions avant et après le traitement par chaux et ciment

**Tableau V. 1 Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur essai Proctor modifié**

REFEENCES	Caractéristique de compactage				Indice portant Immédiat IPI OPM
	Désignation	Type de sol	Teneur en eau $\omega_{opm}(\%)$	Poids volumique sec maximum $\gamma_{dmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	
SERBAH.2011	Etat naturelle	Barrage bakhadda	23	1.97	16.3
	3% chaux	Tiaretargile très plastique	25	1.77	33.75
	6% ciment		20	1.92	36.15
	3% chaux+6% ciment		24	1.82	38.25
Akli hibouche2013	Etat normal	marches les dames	14.5	1.84	/
	2.5 chaux	Belgique limon	17.1	1.76	/
BOURABAH Maghnia 2012	Etat normal	barrage de Cheurfasmasc	23.3	1.55	14
	3%chaux+67% sable	araun limon très plastique	13.35	1.882	34
	6%ciment +64%sable		13.28	1.883	30
Abidat wafa 2019	Etat normale	Machta de layounEl	12.6	2.16	/
	3% de la chaux +3% de sable	tafargile plastique	18.7	2.01	/



BOUTOUCHE SILYOUNA 2017	Etat normal	lotissement Mokademtizi- ouzousols argileux peu plastique	16.3	1.75	13.5
	5%chaux		16.8	1.66	19.38
	5% deciment		17	1.74	17.20

Les variations du Poids volumique sec maximal ( $\gamma_{dmax}$ ), Teneur en eau  $\omega_{opm}(\%)$  et Indice portant Immédiat (IPI OPM) sont représentées dans les figures Suivantes

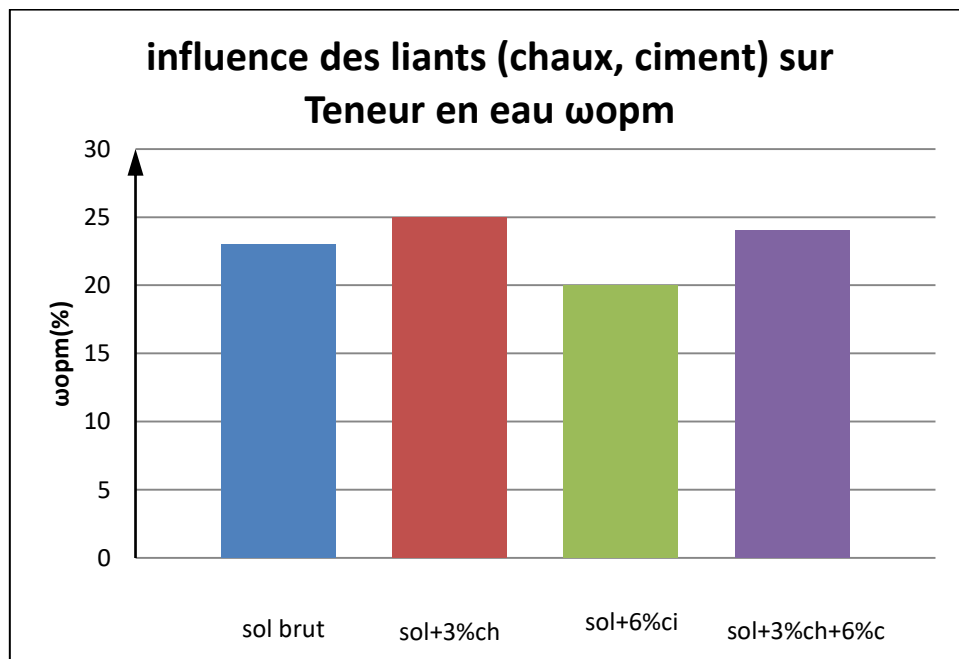


Figure.V. 1influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau  $\omega_{opm}$  [41]

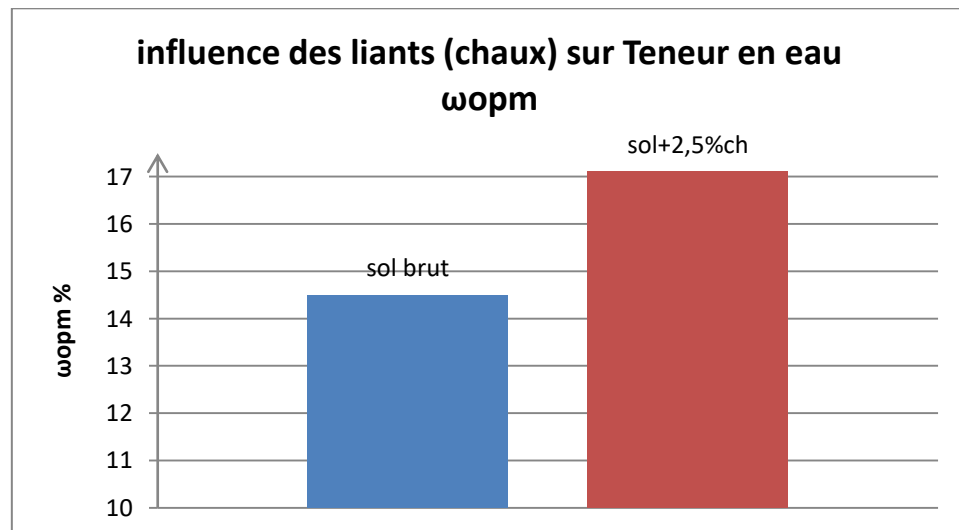


Figure.V. 2influence des liants (chaux) sur Teneur en eau  $\omega_{opm}$  [42]

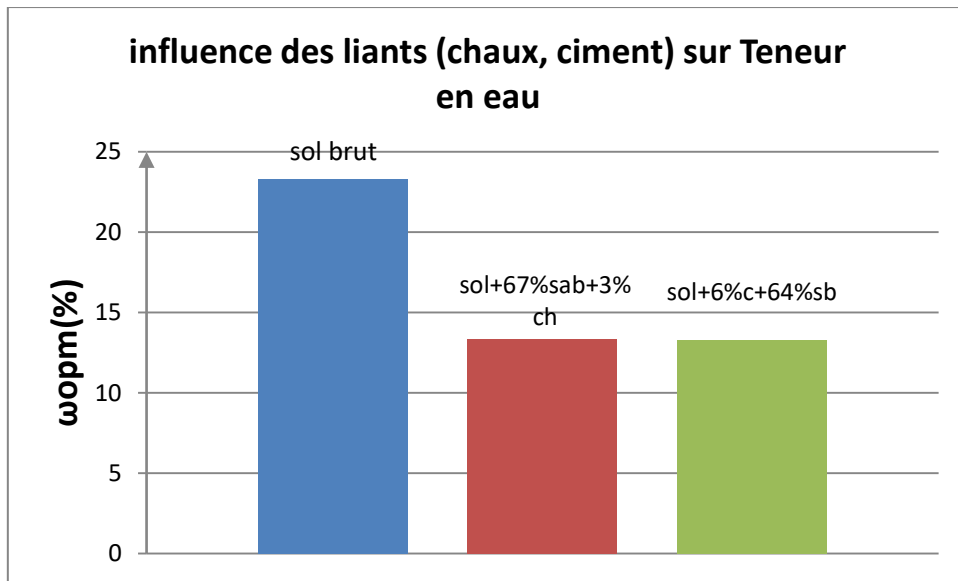


Figure.V. 3influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau  $\omega_{opm}$  [43]

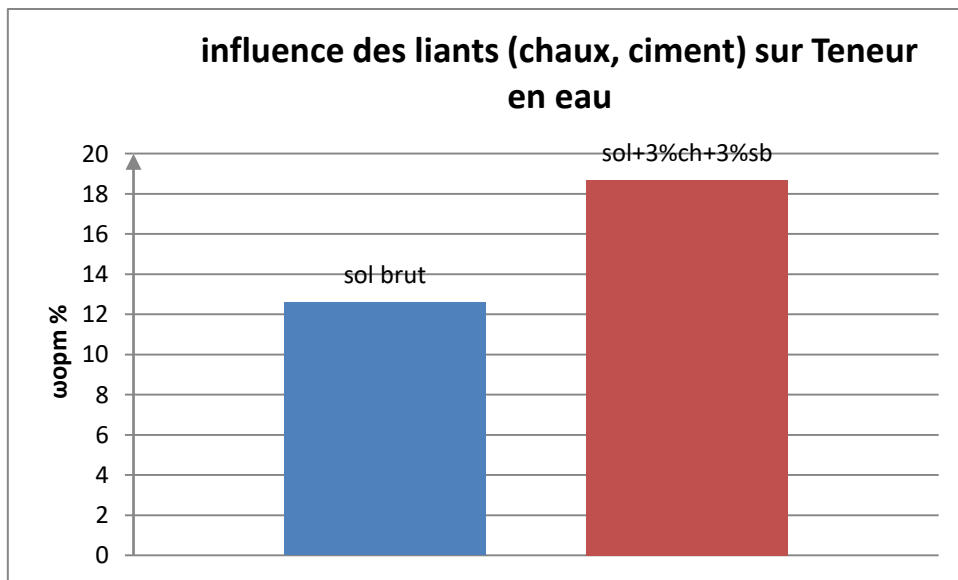


Figure.V. 4influence des liants (chaux) sur Teneur en eau  $\omega_{opm}$  [46]

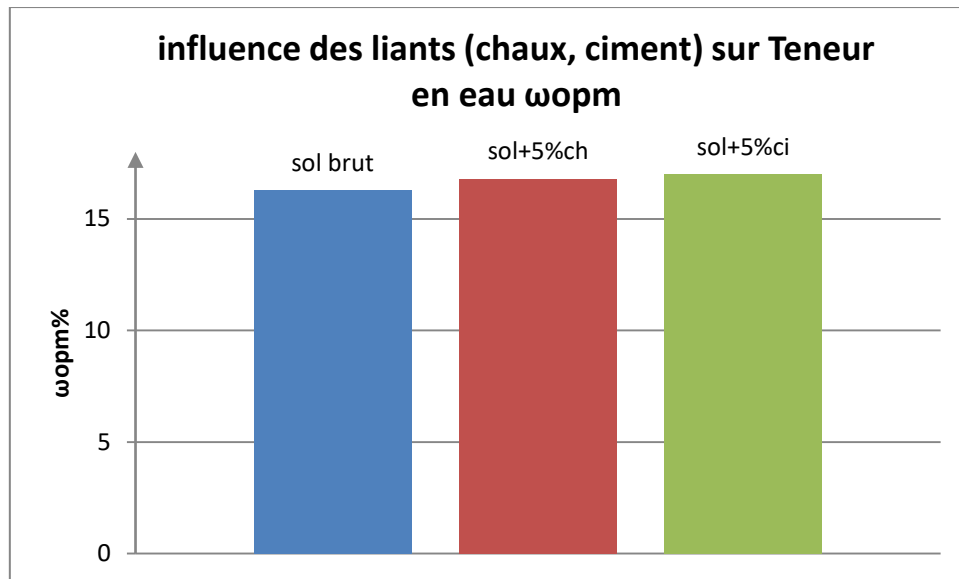


Figure.V. 5influence des liants (chaux, ciment) sur Teneur en eau  $w_{opm}$  [44]

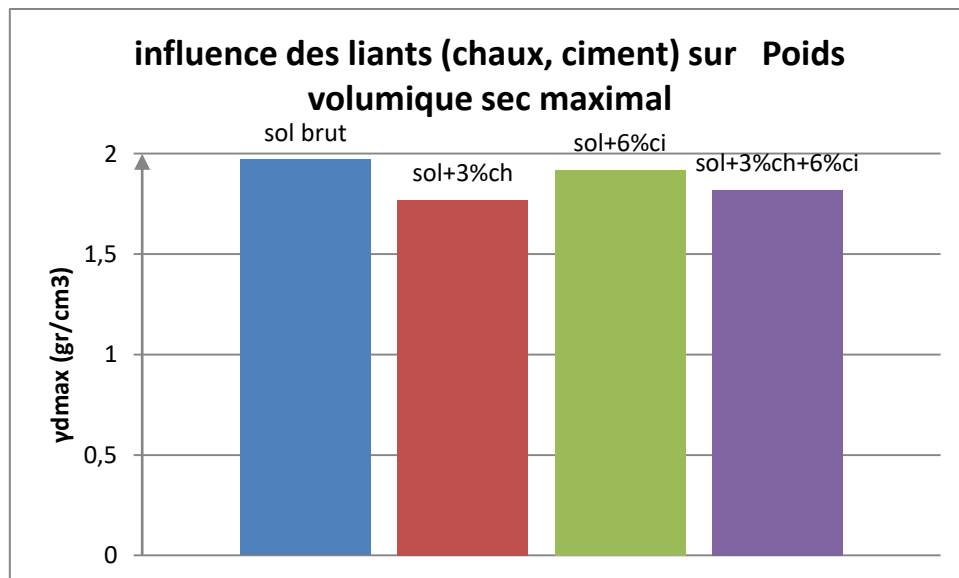


Figure.V. 6influence des liants (chaux, ciment) sur Poids volumique sec maximal  $\gamma_{dmax}$ [41]

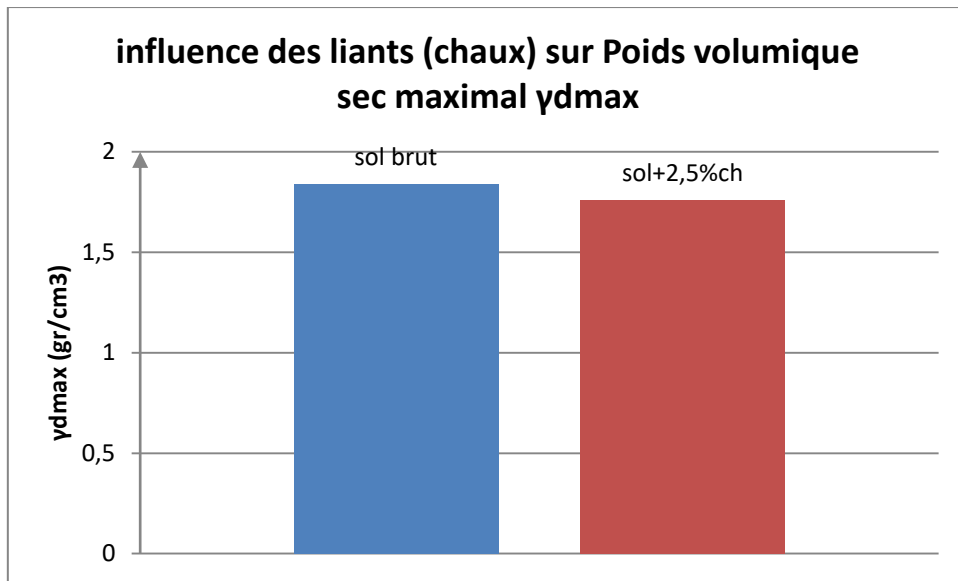


Figure.V. 7 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal  $\gamma_{dmax}$ [42]

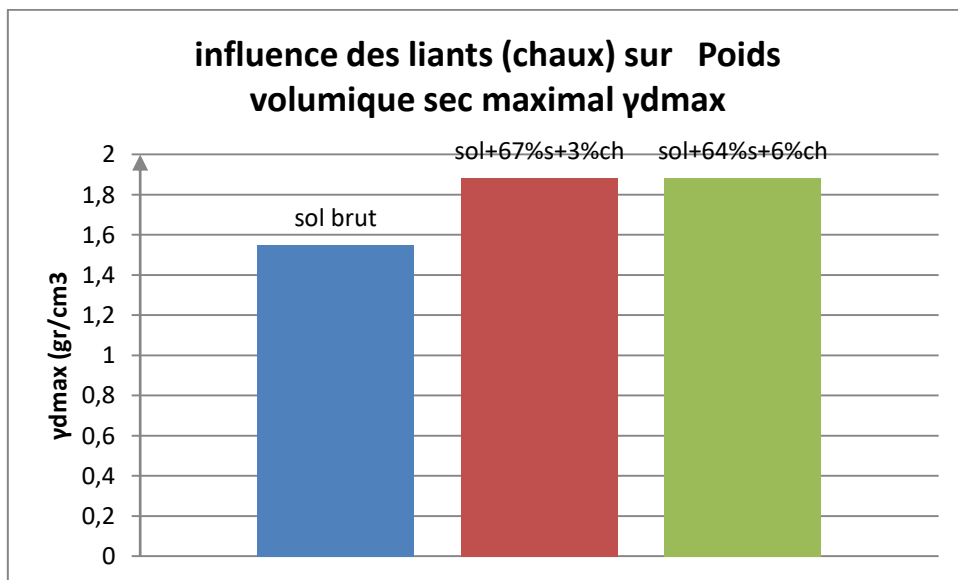


Figure.V. 8 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal  $\gamma_{dmax}$  [43]

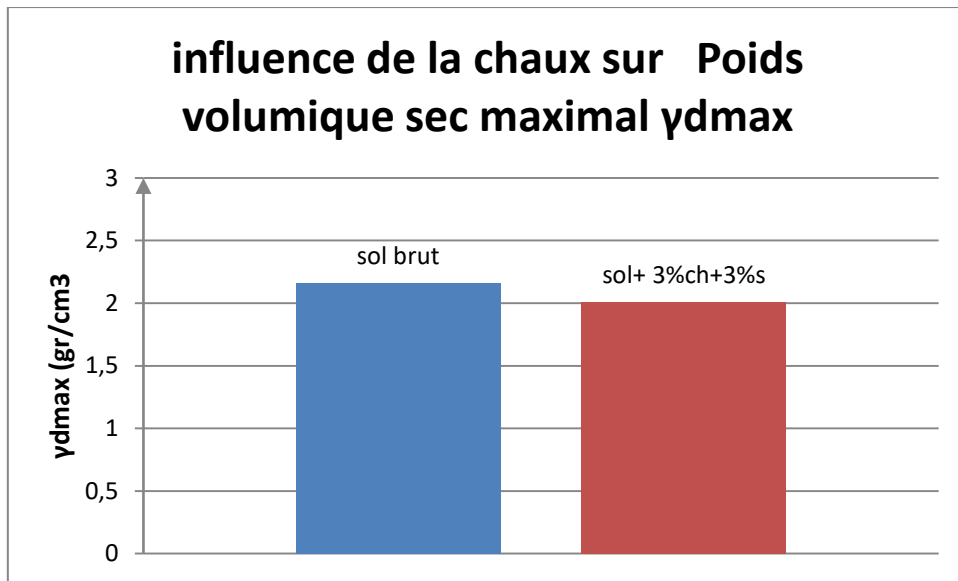


Figure.V. 9 influence des liants (chaux) sur Poids volumique sec maximal  $\gamma_{dmax}$ [46]

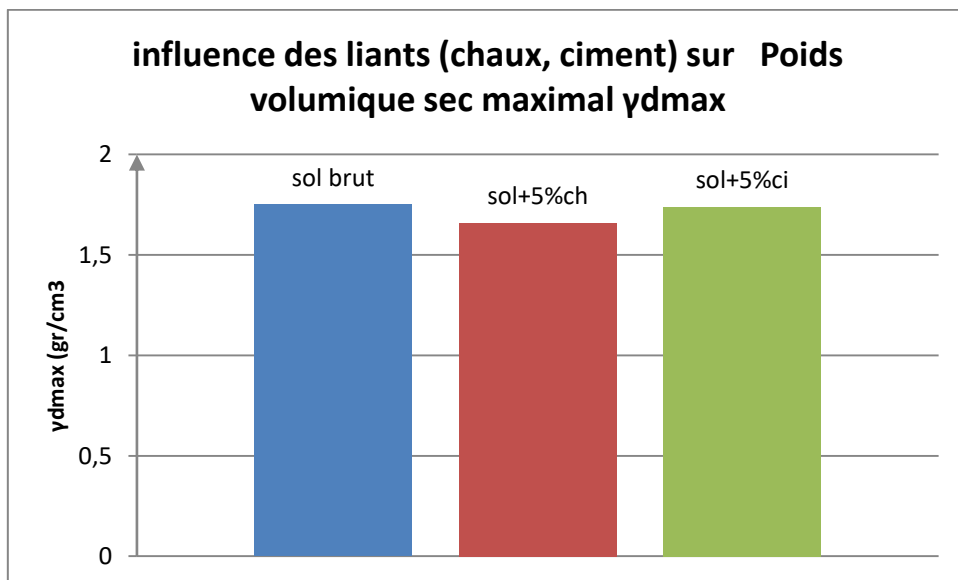


Figure.V. 10 influence des liants (chaux, ciment) sur Poids volumique sec maximal  $\gamma_{dmax}$ [44]

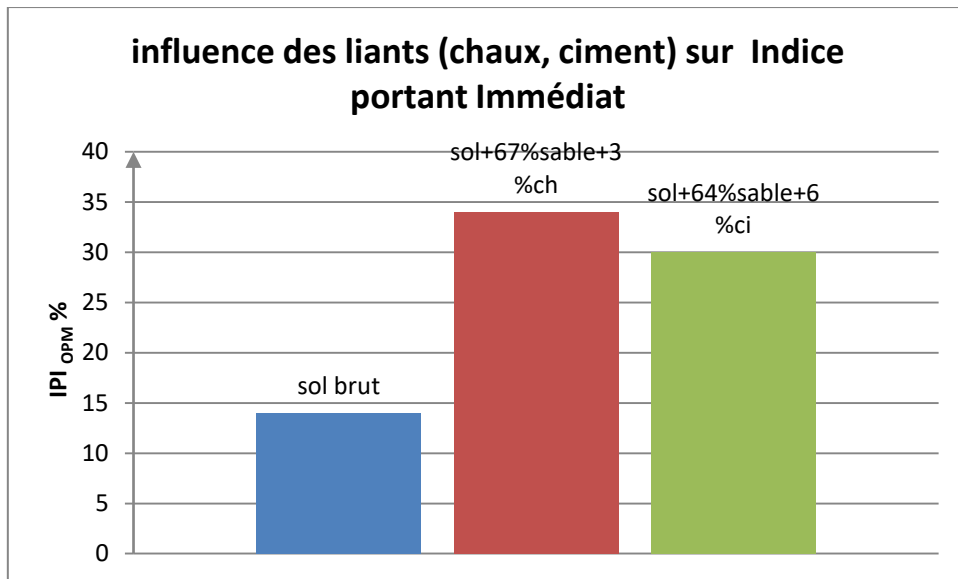


Figure.V. 11 influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat IPI<sub>OPM</sub>[43]

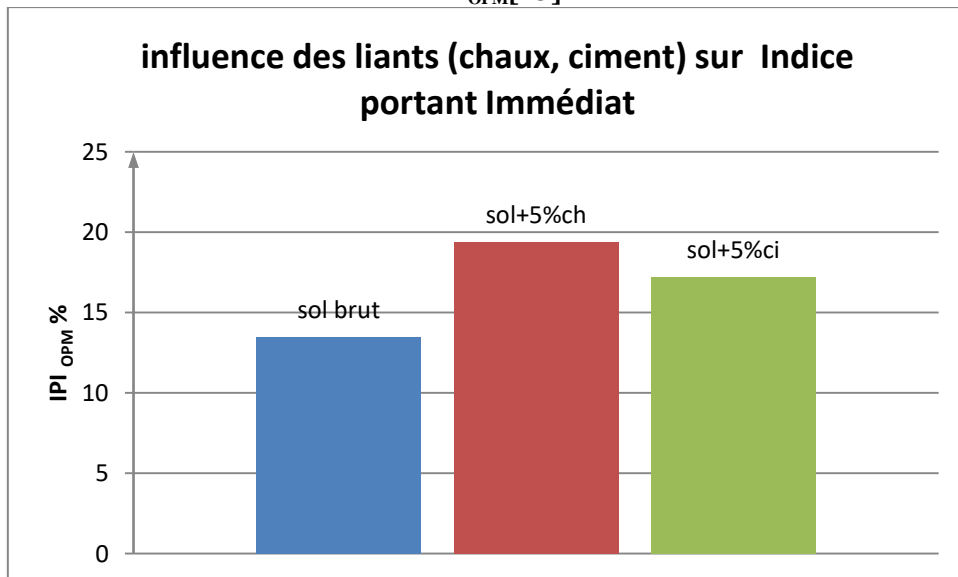


Figure.V. 12 influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat IPI<sub>OPM</sub>[44]

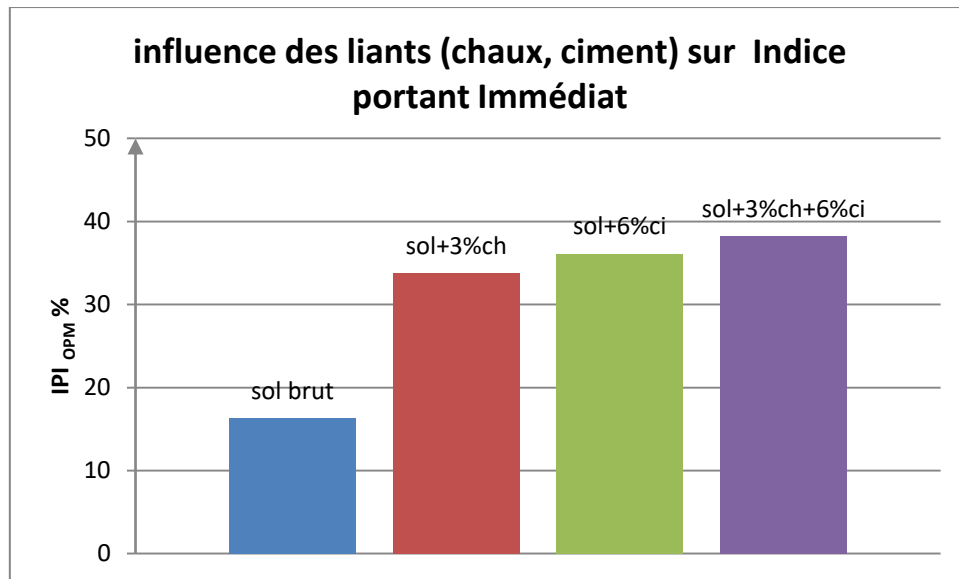


Figure.V. 13influence des liants (chaux, ciment) sur Indice portant Immédiat IPI OPM[41]

✓ **Observation**

- Une diminution de la teneur en eau à l’OPM clairement observé par l’ajout du ciment
- Une diminution du Poids volumique sec maximum
- Une augmentation Indice portant Immédiat IPI OPM.

✓ **Interprétation**

<b>Macro structure</b>	Utilisation de la chaux augment la teneur en eau optimal qui provoque l’agglomération des particules d’argile et pour cela il est permis d’accroître la portance du sol en diminuant les pores
<b>Micro structure</b>	<p>. On explique la diminution de pdOPm par le réarrangement des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. L’ampleur de ces modifications dépend de la quantité de liant ajoutée : plus la quantité de liant ajoutée est importante, plus la teneur en eau optimale est décalée vers les fortes teneurs en eau ( les réactions ,pouzzolanique et l’hydratation</p> <p>Dès le début de l’hydratation, on observe l’apparition de la portlandite dont et CSH qui apparaissent un peu plus tard. Les aluminates et le monosulfoaluminate apparaissent après les CSH</p> <p>les équations suivantes expriment l’hydratation des silicates de calcium et la formation des silicates de calcium hydratés</p> $\text{Ca}_3 \text{SiO}_5 + (3 - x + y) \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaO}_x, \text{SiO}_2, (\text{H}_2\text{O})_y + (3 - x) \text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2 \text{SiO}_5 + (2 - x + y) \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaO}_x, \text{SiO}_2, (\text{H}_2\text{O})_y + (2 - x) \text{Ca}(\text{OH})_2$ <p>Ca(OH)2 : Portlandite</p>

<p>CaOx, SiO<sub>2</sub>, (H<sub>2</sub>O)<sub>y</sub> : Silicate de Calcium Hydraté (C-S-H)</p> <p>La portlandite a une structure de type brucite (Mg (OH)<sub>2</sub>) : feuillets d'octaèdres Ca(OH)<sub>6</sub> reliés par leurs arêtes. La cohésion entre feuillets est assurée par des liaisons hydrogène. Il est clair qu'avec la formation des hydrates, la porosité diminue et continue à diminuer à long terme en tendant vers une valeur minimale</p>
--

### V.2.2. Essais de résistance à la compression

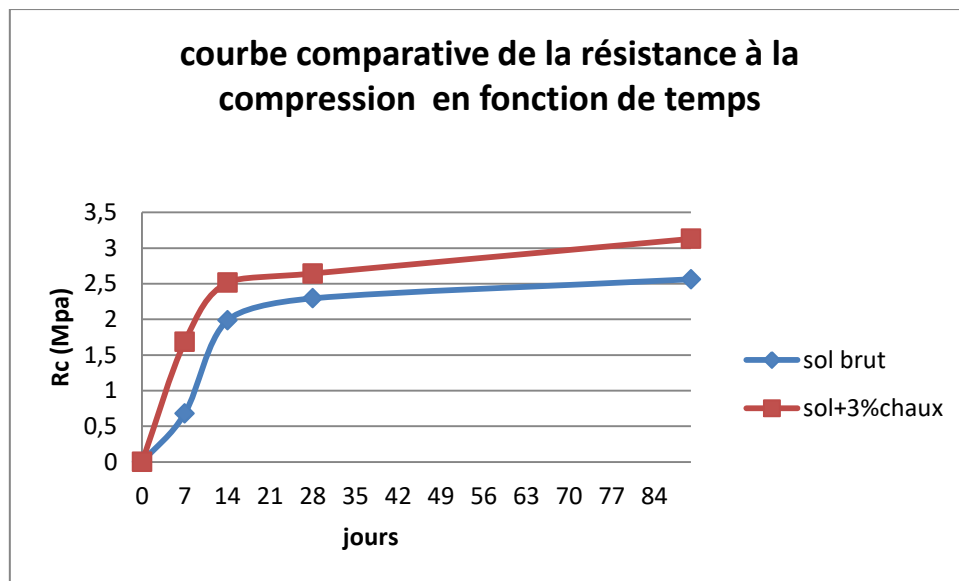
Le tableau (v.2) présente Les résultats de la résistance a compression obtenues par (Serbah.b 2011, Bourabah.m 2012) sur des sols fins de différentes régions avant et après le traitement par la chaux et le ciment.

**Tableau V. 2Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur la résistance à la compression**

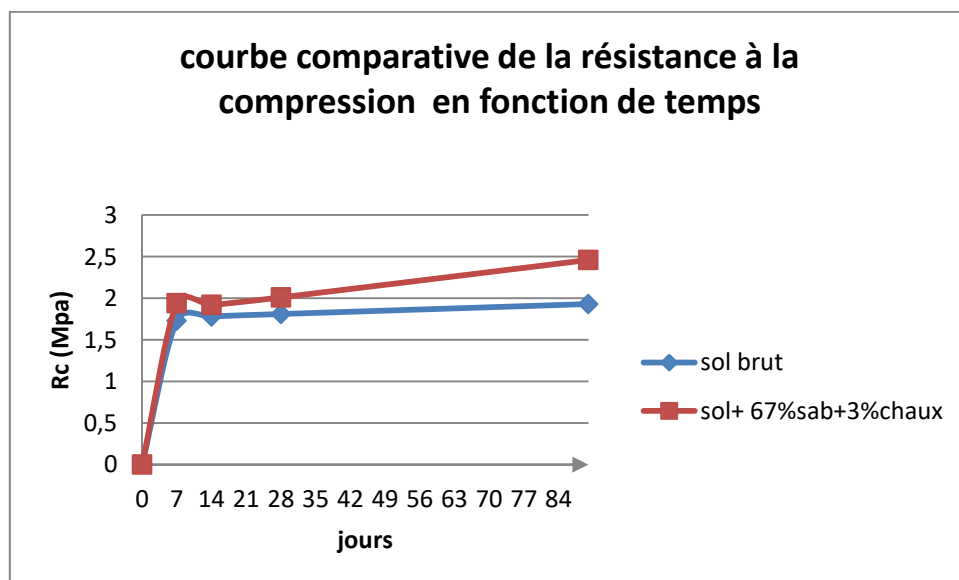
REFEENCES	résistance à la compression					
	Désignation	Type de sols	RC (7jours)	RC (14jours)	RC (28jours)	RC (90jours)
SERBAH.2011	Etat naturelle	Barrage bakhadda Tiaret	0.68	1.986	2.295	2.563
	3% chaux		1.687	2.516	2.644	3.130
	6% ciment		1.565	3.279	3.724	4.128
	3% chaux+6% ciment		1.841	2.838	3.840	4.057
BOURABAH Maghnia 2012	Sol+67% sable	barrage de Cheurfasm ascaraun limon très plastique	1,73	1,78	1,81	1,93
	67% Sable +3% Chaux		1,94	1,92	2,01	2,46

La variation de la résistance à la compression en fonction de temps est représentée dans la figure suivante





**Figure.V. 14** courbe comparative de la résistance à la compression en fonction de temps [41]



**Figure.V. 15** courbe comparative de la résistance à la compression en fonction de temps [43]

✓ **Observation**

Les figures V.14.15 montre une augmentation remarquable de résistance à la Compression après l'ajout de chaux/ciment

✓ **Interprétation**

<b>Macro structure</b>	L'augmentation de la résistance a la compression est justifiée par la réaction chimique (hydratation des liants) durant 90 jours. Cette action permet l'apparition d'espèces insolubles et résistantes permettant la densification et la portance du sol traites.
<b>Micro structure</b>	<p>la diminution de l'acidité du sol traite par l'ajout de la chaux ( ph &gt;7) provoque l'attaque des constituants du sol (silice et alumine) pour former des aluminates et des silicates de calcium hydratés.</p> <p>Les hydrates obtenus sont cristallisés. Ils se présentent .en général sous forme amorphe.ces substances non solubles agissent comme des liants entre les grains du sol(<b>pont entre les particules</b>).</p> <p>Cette réaction, dite "pouzzolanique", se traduit par une augmentation de la résistance à la compression simple.</p> <p><b>Cao</b>(chaux) + <b>H2O</b> (eau) + <b>SiO2</b> (silice) <math>\longrightarrow</math> <b>C-S-H</b> (Silicate de calcium hydraté)</p> <p><b>Cao</b>(chaux) + <b>H2O</b> (eau) + <b>Al2O3</b>(alumine) <math>\longrightarrow</math> <b>C-A-H</b> (Aluminate de calcium hydraté)</p>

**V.3 Caractérisation physique**

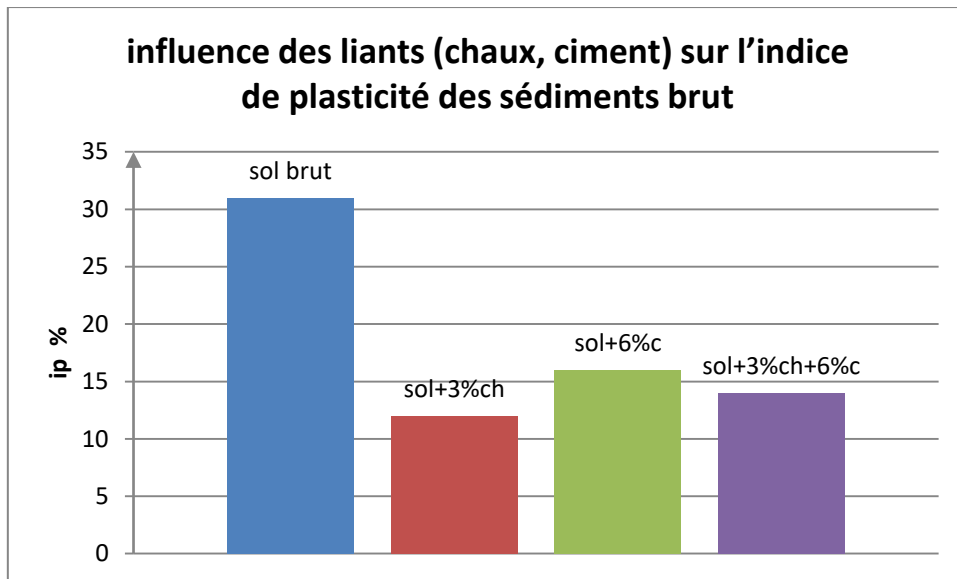
L'effet de chaux et de ciment caractéristiques physique (limite Atterberg, Gonflement volumique GV ont été présente sous forme des tableaux.

**V.3.1.limite Atterberg**

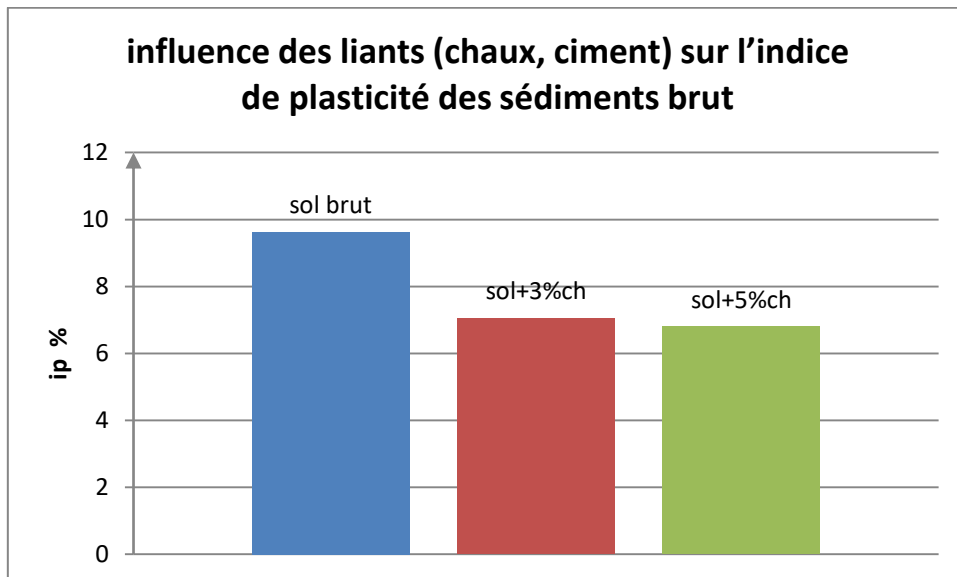
Le tableau ci-dessous montre l'influence de pourcentage de la chaux et ciment sur la plasticité du sol fin étudiés par plusieurs chercheurs.

**Tableau V. 3** Influence du pourcentage de ciment et de la chaux sur la limite atterberg

REFEENCE	Désignation	TypeDesSols	limite Atterberg		
			WL	WP	IP
SERBAH.2011	Etat naturelle	Barrage bakhaddaTiaretArgile très plastique	63	32	31
	3% chaux		64	52	12
	6% ciment		59	43	16
	3% chaux+6% ciment		61	47	14
BOURABAH Maghnia 2012	Etat naturel	barrage de Cheurfasmascaraun limon très plastique	62	36	25
	3% chaux+67% sable		32	23	9
	6% ciment +64% sable		42	33	9
Boutouche silouna2017	Etat naturel	lotissement Mokadentizi- ouzousols argileux peu plastique	42.8	23.97	18.83
	Sol+5 % de chaux		45.4	30.63	14.77
	Sol +10 % de chaux		48	43.33	4.67
FLITTI - MAAMAR Mohamed2011	Sol naturel	Mechaâl El- chahidSidi abed tiaretLimon peu plastique	29.60	19.98	9.62
	3% chaux		35,20	28,15	7,05
	5% chaux		36,90	30,09	6,80



**Figure.V. 16**influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [41]



**Figure.V. 17**influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [45]

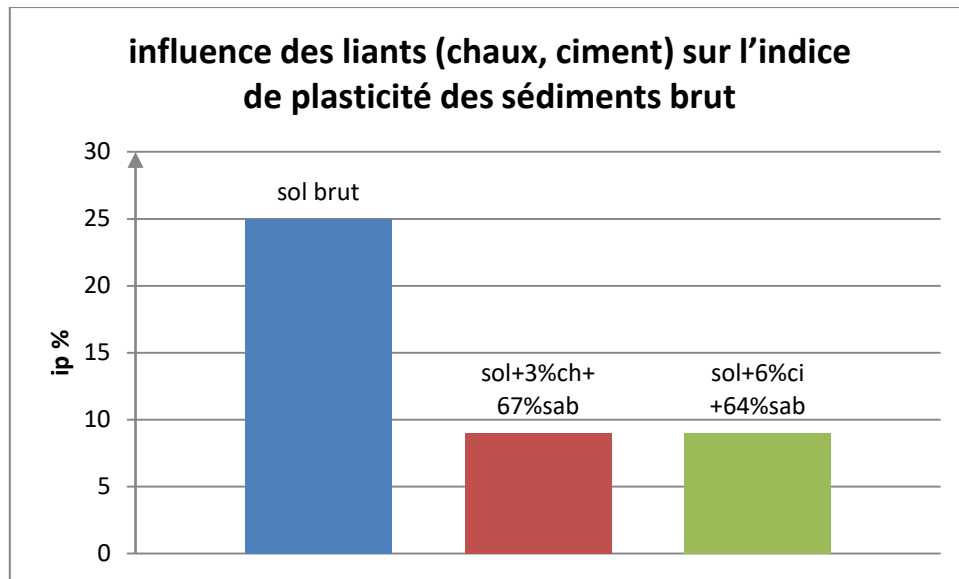


Figure.V. 18 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [43]

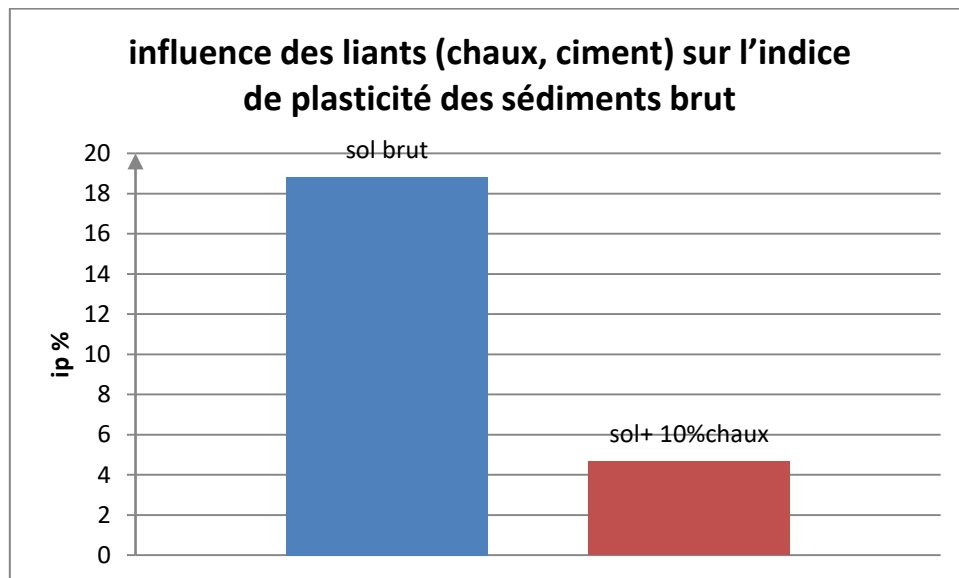


Figure.V. 19 influence des liants (chaux, ciment) sur l'indice de plasticité des sédiments brut [44]

#### ✓ Observation

D'après le tableau (V.3) On remarque que la limite de plasticité a augmenté en ajoutant la chaux et le ciment au sol avec un taux plus grand que celui de l'augmentation de limite de liquidité, ce qui permet de réduire l'indice de plasticité (figures V.16.17.18.19) ce qui signifie que l'argilosité a diminué.

✓ **Interprétation**

**Macrostructure** La plasticité diminue fortement après traitement par les liants hydrauliques, ce qui montre l'influence d'ajouts de liants hydrauliques sur la floculation des particules

Cette floculation se traduit géo techniquement par une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification significative de sa limite de liquidité qui conduira par conséquent à une réduction de son indice de plasticité IP.

**Microstructure** À t = 24 h : C'est le début de la réaction d'échange cationique. La dissolution de la chaux dans un sol argileux hydraté libère des cations de calcium  $Ca^{2+}$  et des hydroxyles  $(OH)^-$ . Les cations sont instantanément adsorbés et intercalés dans l'espace inter-foliaire et remplacent les différents cations inter-foliaires existants. Cet échange induit des forces attractives entre les feuillets d'argile

À t = 48 h : C'est le point de fixation de la chaux

À t = 144 h : Une stabilisation remarquable des limites WL et WP causées par la saturation parfaite des marnes par le  $Ca^{2+}$  existant dans l'espace inter-foliaire

**V.3.2. Détermination du Gonflement volumique GV****Tableau V. 4 effet des liants sur le gonflement volumique**

Référence	Type de sol	Type de mélange	Gv %
Serbah.B 2011	Barrage bakhaddaTiaret Sols argileux très plastique	S1+3% chaux	2,74
		S1+6% Ciment	3,38
		S1+3%c+6% chaux	1,66
Boutouch s2017	lotissement Mokademtizi-ouzousols argileux peu plastique	Sol non traité	2.57
		5% de chaux	0.006
		10% dechaux	0
		5% deciment	0.16

✓ **Interprétation**

On remarque que l'addition de la chaux dans le sol réduit le potentiel de gonflement, jusqu'à une valeur nulle donc la chaux est un produit stabilisant très efficace mieux que le ciment.

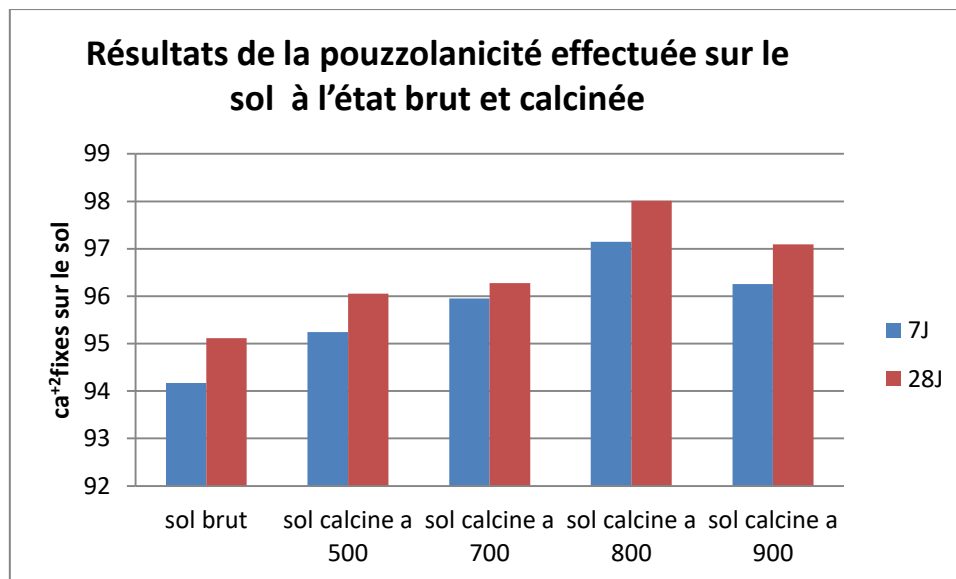
Les argiles gonflantes ont une affinité à l'eau tellement grande que le ciment ne peut pas s'hydrater suffisamment au point que les réactions pouzzolaniques s'achèvent complètement. Si la quantité d'eau est suffisante pour la réaction de prise de ciment, l'utilisation de ce dernier réduit potentiel de gonflement du sol

**V.4. influence de la température sur effet pouzzolanique**

La réactivité pouzzolanique, est indiquée par le pourcentage des ions  $\text{Ca}^{2+}$  de la chaux fixées par la silice et/ou l'alumin de sol ; Les résultats de la pouzzolanicité fait par (Bouhmid .M 2011), à 7 et 28 jours, de sol du barrage bakhada à l'état brut et après calcination à 500, 700, 800 et 900°C sont regroupés dans le Tableau V.5 et représentés par un histogramme dans la Figure V.20

**Tableau V. 5 Effet de températures sur effet pouzzolanique**

REFEENCE	Type d'ajout	Quantité d'ajout (g)	Volume de $\text{Ca(OH)}_2$ (ml)	Indice de réactivité pouzzolanique (%)	
				7J	28J
BOUHMID Mama.2011	sol brut	1	75	94.1721	95.71145
	Sol calciné à 500°C	1	75	95,2451	96,0518
	sol calciné à 700°C	1	75	95,9514	96,2747
	sol calciné à 800°C	1	75	97,1480	98,0111
	Sol calcine à 900 °C	1	75	96,256	97,094



**Figure.V. 20 Résultats de la pouzzolanité effectuée sur le sol à l'état brut et calcinée [47]**

#### ✓ Interprétation

Selon (Figure V.20, Tableau V.5) le sol de barrage à l'état brut ou calcinée présente une forte activité pouzzolanique pour les deux échéances (7 et 28 jours) La consommation de la chaux augmente avec le temps d'étuvage et avec l'augmentation de la température de calcination de 500 à 800°C avant qu'elle chute à 900°C donc la température optimale pour laquelle le sol possède la pouzzolanité la plus élevée est 800°C

Le sol brut quant à il affiche la plus faible réactivité ; la calcination améliore donc la réactivité pouzzolanique du sol



la littérature montre que quand on traite un sol argileux avec la chaux la résistance augment et le module augmente, on voit globalement quel que soit le matériau et les pourcentages de la chaux, les propriétés sont améliorées.

**Tableau V. 6 Traitement des sols à la chaux : Recensement non exhaustif des travaux rapportées dans la littérature depuis une quarantaine d'années**

Référence	Propriétés	Type de Terre	Dosage de chaux	Observation
<b>Izemmouren O. ,2015</b>	Résistance à la compression simple	naturelle+ 30% sable (0/3)	6, 8 et 10%	L'ajout de chaux conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple (RC) des sols compactés de Rc sèche : 2.5 à 10MPa à 24h d'âge et de Rc humide : 1.5 à 7MPa
<b>Ciancio D., 2014</b>	Résistance à la compression simple et la rigidité	Naturelle		L'échantillon traité avec 4% de chaux plus 4 % de PFC représentait le meilleur choix en termes d'amélioration de la résistance et de coût d'application. Le traitement avec 6 % a également été sélectionné puisque l'amélioration de la résistance et la rigidité ont été jugée satisfaisante.
<b>Bui et al., 2014</b>	Résistance à la compression simple, durabilité	Naturelle	2% et 8%	Les échantillons stabilisés avec la chaux montrent une augmentation de Rc sèche : 3.5 à 10 MPa à 28j. - Les échantillons stabilisés montrent aussi une meilleure durabilité.
<b>Bui et al., 2009</b>	Durabilité (érosion de surface)	Naturelle	5%	Les murs traités par 5% de chaux montrent après 20ans aucun signe de changement.
<b>Miguel Francisco Costa Granja da Silva, 2015</b>	Résistance à la compression simple	naturelle+ 15% des agrégats recyclés	4%	La résistance à la compression du mélange (4%ch) est supérieure de 24% à celle la résistance du mélange sans traitement.
<b>Guettala et al. , 2002, 2006.</b>	Durabilité, résistances à la compression et en traction	Naturelle	5, 8 et 12%	Les échantillons traités présentent une meilleure résistance et durabilité (spray test, absorption, cycle de séchage-humidification et test gel-dégel), que les échantillons non traités.
<b>Gallipoli et al., 2018</b>	La résistance, la rigidité et la durabilité	Naturelle	6%	Les propriétés mécaniques des matériaux en terre crue ont été améliorées par l'ajout de 6% de chaux.

<b>Ngowi AB., 1997</b>	La résistance à la compression simple	Naturelle	5% à 15%.	La résistance à la compression est améliorée en fonction de la chaux.
<b>Venkatarama et al. 2002 et 2011</b>	Propriétés mécaniques et hygroscopicité	Naturelle	6% à 14%	Les propriétés mécaniques des matériaux en terre ont été améliorées par l'ajout de 6% à 14% de chaux.
<b>New Zealand. NZS 4297:1998</b>	La rigidité	Naturelle	2% à 6%	Les échantillons traités montrent un amélioration de la rigidité : Module en grande déformation augmente de 120 à 192MPa.
<b>Ramirez et al. 2012</b>	La rigidité, les résistances à la compression et à la flexion	Naturelle	10%	Les échantillons traités avec 10% de la chaux + 10% bagasse de canne à sucre cendre montrent une amélioration des propriétés mécaniques.
<b>Muntohar, A.S., 2011</b>	La résistance à la compression et résistance à la flexion	Naturelle	6–12%	Les échantillons avec le rapport de mélange 1:1 de chaux et cendre de balle de riz (Poids sec) montrent une meilleure résistance à la compression et à la flexion.
<b>Adam (2001), Kerali (2001), Namango (2006), Rigassi (1985), Riza et al. (2010) et Walker (1995)</b>	Les propriétés mécaniques	Naturelle	6 à 12%.	Dans l'ensemble, les sols sont stabilisables en constatant une amélioration des propriétés mécaniques et physiques par traitement à la chaux dosée de 6 à 12 % pour des sols naturels.
<b>Burroughs (2008) et (2010)</b>	La résistance à la compression simple	Naturelle	Différents pourcentages (1.2 à 2.7) et (2% à 6%)	Burroughs a étudié 104 types de sols compactés et stabilisé par la chaux ou ciment dans un totale de 219 mélanges. Il a montré qu'une amélioration de la résistance à la compression simple. Il a aussi considéré que le sol peut être stabilisé si sa résistance à la compression dépasse 2 MPa.
<b>Millogo et al. (2008)</b>	La résistance à la compression simple.	Naturelle	10%	La brique traité avec 10% de chaux montre une augmentation de la résistance à la compression par rapport des briques sans traitements.
<b>Derriche Z. et Lazzali F. (1997)</b>	La résistance à la compression simple	Smectites	4%-8%	Il a montré sur des smectites : l'addition de 8 % de chaux permet d'acquérir une résistance mécanique importante de 9 MPa, elle ne serait que de 1 MPa avec 4 % de chaux

				(rupture à 45 j).
<b>Bekir et al 2012</b>	Les propriétés mécaniques (résistances en compression et cisaillement...)	Naturelle	2.5%-5%	Les échantillons traités par la chaux et de gypse montrent une amélioration des propriétés mécaniques. Les échantillons contenant de la chaux ont une résistance au cisaillement et un module significativement plus élevés que les échantillons sans chaux.
<b>Minke,2006</b>	La résistance à la compression simple	Limon	Différents dosages	- Les échantillons traités montrent une augmentation de la résistance à la compression
<b>Nilo Cesar Consoli et al,2001</b>	La résistance en compression, traction et module sécant	Sol sableux	4%-10%	Les échantillons traités avec la chaux montrent une augmentation des propriétés mécaniques.
<b>MOPT, 1996 et Jiménez Delgado, 2006</b>	La résistance à la compression simple	Naturelle	Faible Moyen Elevé	- La résistance à la compression des échantillons de pisé traités en fonction de dosage augmente de 1.8 à 3.6 MPa - Pour les adobes, la résistance est améliorée de 2.25 à 4.5MPa
<b>Oti et al, 2009 Oti et Kinuthia 2012</b>	La résistance à la compression simple	Naturelle	3%-8%	Les échantillons traités avec la chaux montrent une augmentation de la résistance à la compression
<b>J. Alexandre Bogas et al 2018.</b>	La résistance à la compression et traction. La durabilité (drip test et spray test)	Sol + des agrégats fins recyclés	4%	Les résistances à la compression et traction des BTC ont été amélioré après traitement de chaux mais à long terme. Les résultats ne montrent aucun signe de l'érosion de surface après traitement

# **conclusion générale**

## Conclusion général

---

Les sols argileux en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérés comme des sols instables créant donc un obstacle économique et technique. Ils gonflent et deviennent plastiques en saison pluvial se rétractent avec la sécheresse.

L'influence des liants hydraulique sur les argiles a été étudiée par un grand nombre de chercheurs

Le choix des techniques 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 Plusieurs conclusions ont été tirées de ce dernier chapitre :

- ✓ l'ajout de chaux au sol augmente sa limite de plasticité et diminue son indice de plasticité sans modification significative de la limite de liquidité (wL)  
C'est-à-dire que le sol se transforme de l'état plastique avant le traitement à l'état solide
- ✓ l'ajout de chaux et (ou) de ciment augmente la teneur en eau optimale du sol et diminue son poids volumique sec maximal
- ✓ l'ajout de chaux ou de ciment augmente aussi la portance du sol (IPI) et augmente la résistance a la compression simple
- ✓ La diminution de l'indice de gonflement, minimise le risque de tassement ou variation de volume ce qui est favorable en période de sécheresse ou pluvieuse.
- ✓ la calcination améliore donc la réactivité pouzzolanique du sol : la température optimale pour laquelle le sol possède la pouzzolanicité la plus élevée est 800°C
- ✓ Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques présentant une faible adaptation à la chaux. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux.
- ✓ la cohésion diminue, ce qui permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.

## Conclusion général

---

Donc finalement on peut juger que cette technique de mélanger l'argile avec ciment et/ou la chaux améliore le sol et aide à minimiser les problèmes liés aux sols argileux.

## Références bibliographiques

---

- [1] Jackson & Sherman, 1953 et al, Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés physico chimiques. Virginia Blacksburg
- [2] Ben Hadj-A et al. 1987, Traité céramique et matériaux minéraux, Edition Septima, Paris, France.
- [3] Mitchell, 1993,Fundamentals of soil behaviour, 2ème edition, John Wiley and sons
- [4] Ben Rhaeim et al, 1986, Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation
- [5] Gens et Alonso,1992, A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays,
- [6] Morel et al 1996, Les sols cultivés, 2ème édition, Paris : Technique & documentation
- [7] Grim et al 1968, Clay Mineralogy. McGraw-Hill, New York.
- [8] R. CALVET,2003, Le sol propriétés et fonctions Tome 1 Construction et structure, phénomènes aux nterfaces, DUNOD .
- [9] J.Bonnet , Interactions entre des matériaux argileux et une milieu basique riche en calcium, these de doctorat 2006.
- [10] Bentahar Yassine,Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines,these de doctorat 2018 à luniversité du MAROC .
- [11] Marie CHRETIEN. Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux, Thèse de doctorat 2010.
- [12] Saiyouri et al 1996, Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées
- [13] Halen et al., 1991,Relations pH-adsorption du cuivre, du zinc et du cadmium pour quelques minéraux argileux. Pédologie
- [14] Halitim, 1988, Sols des régions arides d'Algérie. O.P.U., Alger
- [15] Zhou et al 2003,Clay Landfill Liners Subject to Variable Interfacial Redox and pH Conditions-Heavy Metal and Clay Interactions.
- [16] P. Andrienne et al 2003, L'argile, médecine ancestrale de la tradition aux preuves scientifiques
- [17] Mitchell et al 1993, Coupled fluid, electrical and chemical flows in soil, livre
- [18] Fripiat et Gattineau, 1984, Clay-water interactions. Orleans, France

## Références bibliographiques

---

- [19] Hossein nowamooz, Institut national polytechnique de lorraine retrait/gonflement des sols.
- [20] Houssine EJJAAOUANI ,Interactions Des Fondations Et Des Sols these de doctorat . 2008
- [21] DJAANI Mabrouka, Benmansour Samah Farah. 2011,Stabilisation des sols gonflants. Thèse de doctorat 2011
- [22] ZENKHRI Abderrezak , Solutions de construction sur sol potentiellement.these de doctorat 2009
- [23] Arabi et Wild 1989, Frost resistance of lime-stabilized clay soil
- [24] Diamond et al 1965,Mechanisms of soil-lime stabilization. Highway Research Record
- [25] Locat et al : 1990, Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime Canadian Geotechnical Journal.
- [26] McCalister et Petry 1992,Leach Tests on Lime-Treated Clays, Geotechnical Testing Journal 15
- [27] Hill et Davidsan 1960,Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes
- [28] Eades et Grim 1960, A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. Highway Research Record
- [29] Goldberg et Klein 1952,Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide
- [30] George et Al 1995 ,Influence of curing temperature on peak strength
- [31] Ola 1977,Stabilisation of Nigerian Lateritic Soils with Cement, bitumen and lime”, 6th Reg. Conf. on Soil Mech.Found. Eng. South Africa
- [32] Osula 1996,A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology,
- [33] Nuygen et al 2015, Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel
- [34] Gts 2000,Guide technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
- [35] Bell 1996, Stabilisation and treatment of clay soils with lime
- [36] Kattab S.A.A 2002,Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux, Thèse de doctorat Université d'Orléans,



## Références bibliographiques

---

- [37] Dejloul 2018, influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière
- [38] Tran van duy ,Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux thèse de doctorat 2013
- [39] Serbah Boumediene ,étude et valorisation des sédiments de dragage du barrage bakhada Tiaret. Thèse de magister 2011
- [40] Akli HiBOUCHE, sols traités aux liants performances hydro mécaniques thèse de doctorat 2013
- [41] Bourabah Maghnia , comportement mécanique de sols fins thèse de doctorat 2012
- [42] Boutouche Silyouna , stabilisation d'un sol argileux par un traitement à la chaux et au ciment thèse de doctorat 2017
- [43] FLITTI Mohamed El-Amine MAAMAR Mohamed , Traitement des sols avec la chaux thèse de doctorat 2012
- [44] Abidat Wafaa , effet de traitement des sols argileux par la chaux et le sable sur les propriétés de portance thèse de doctorat 2019
- [45] BOUH MID Mama, Elaboration d'un éco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage hydraulique traitée et déchets de brique de construction thèse de magister 2011

# Annexes

## Annexe

### Annexe 1

#### . Limite d'Atterberg (NF P 94-051)

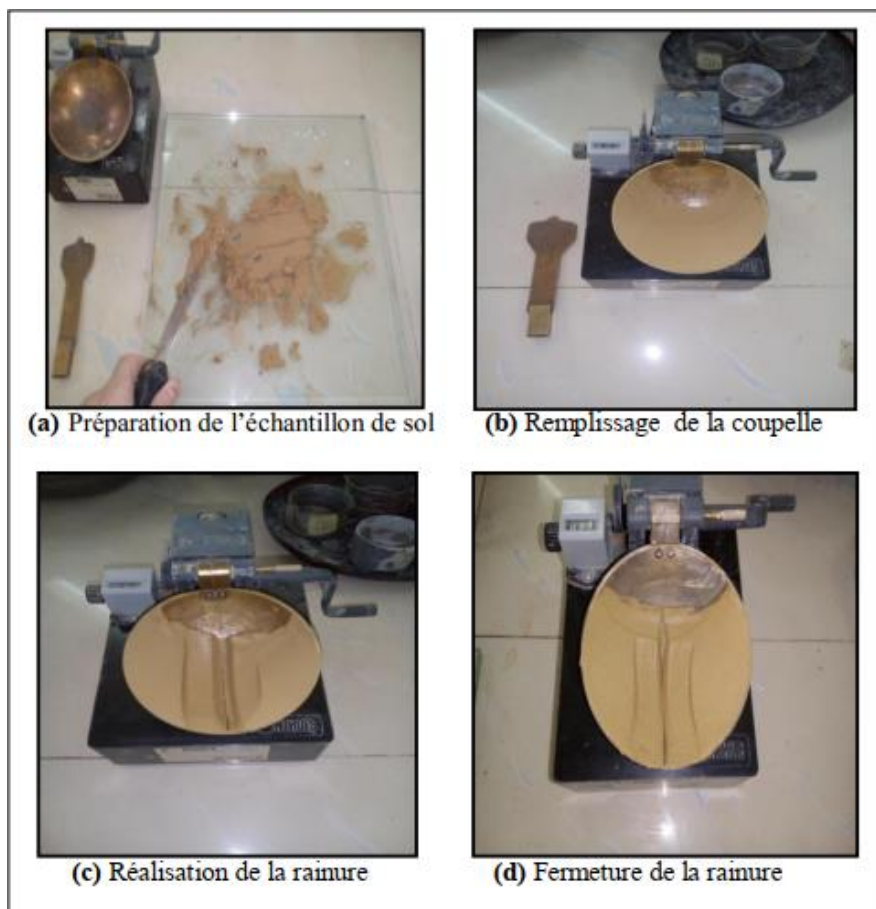
Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité ( $W_L$ ),
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité ( $W_p$ ).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité

L'indice de plasticité (IP) représente la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité, cet indice définit l'étendue du domaine plastique

$$I_p (\%) = W_L - W_p$$



## Annexe

---

**Figure 1.** Détermination de la limite de liquidité



**Figure 2.** Détermination de la limite de plasticité

**Tableau 2.** Classification de sol selon l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Sol non plastique
$5 < IP < 30$	Sol peu plastique
$30 < IP < 50$	Sol plastique
$IP > 50$	Sol très plastique

### Annexe 2

#### Essai Proctor

L'ingénieur américain Proctor a montré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire :

- La teneur en eau optimale.
- La densité sèche maximale correspondante.

L'énergie de compactage est égale à  $\text{Hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches} / \text{volume total du moule}$ .

L'essai Proctor est réalisé selon la norme NF P 94- 093, il a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore à la capacité portante maximale.

L'optimum Proctor Normal ou Modifié (OPN ou OPM) est la teneur en eau pour laquelle le sol atteint, pour une énergie de compactage donnée, une densité maximale

### Annexe 3

#### Gonflement volumique GV

Cet essai consiste à évaluer le gonflement volumique (Gv), comme décrit dans la norme [NF P94-100], Il s'effectue sur des éprouvettes d'élanement

La valeur du gonflement volumique est la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes, elle est mesurée par la variation des volumes de V1, V2, V0 suivant la formule suivante:

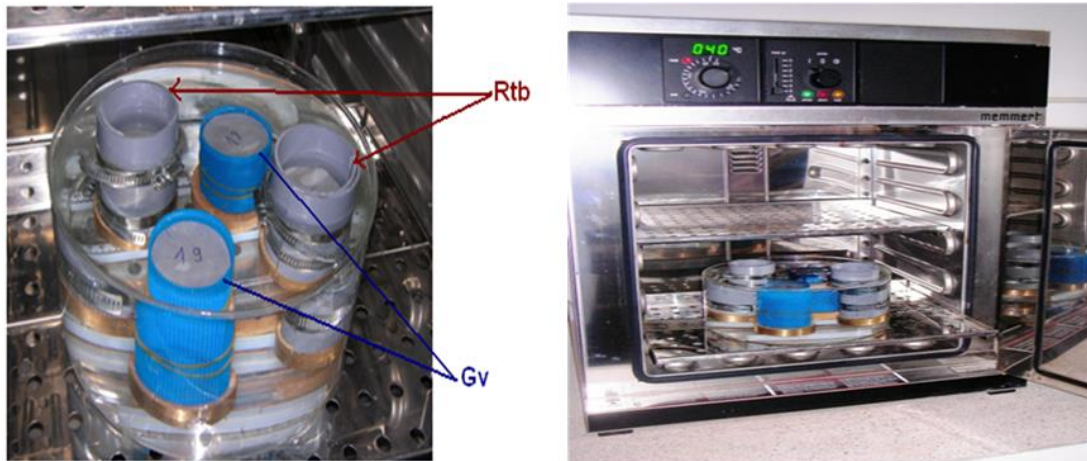
$$G_v = \frac{(V_1 - V_2) - V_0}{V_0} \times 100$$

V0: c'est le volume initial (immédiatement après démoulage) de l'éprouvette. Il est déterminé à partir des dimensions (hauteur et diamètre), à l'aide du pied à coulisse

$$V_0 = \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \right)^2 \times \frac{h_1 + h_2}{2}$$

d : le diamètre des éprouvettes soumises à l'essai (haut, milieu, bas), cm

h : Hauteur des éprouvettes soumises à l'essai, cm



**Photo :** Immersion et conservation des éprouvettes à dispositif thermostatique de 40 °C pour l'essai d'aptitude au traitement des mélanges étudiés

### Annexe 4

#### **Essai de Résistance à la compression ( $R_c$ )**

L'essai de compression simple vise à déterminer la résistance à la compression ( $R_c$ ) d'un matériau compacté et stabilisé

L'essai consiste à appliquer une pression verticale sur une éprouvette cylindrique compactée et conservée pendant une période déterminée et à l'augmenter progressivement jusqu'à la rupture