

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministre de l'enseignement supérieure et de la recherche scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Mémoire**

Présenté

Par M<sup>elle</sup> GHEDDACHE HORA

En vue de l'obtention du diplôme de Master II Académique

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : Géotechnique et Environnement*

**STABILISATION DES SOLS A LA CHAUX  
ET A CHAUD**

*Proposé par :*

*M<sup>r</sup> Ben Azzoug*

*Promotion : 2011/2012*

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens particulièrement à témoigner ma toute gratitude et à exprimer ma considération à monsieur BEN AZZOUG pour avoir bien voulu accepter de m'encadrer, pour avoir mis à ma disposition une documentation riche et pour m'avoir guidé tout au long de ce travail. Je le remercie vivement de sa grande disponibilité.*

*Je remercie les membres du JURY pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je remercie vivement monsieur BOUHRAOUA pour son aide qu'il m'a apportée lors de l'expérimentation au laboratoire de béton du département de génie civil.*

*Je remercie également monsieur BOUKHAROUB, pour sa disponibilité et son aide qu'il m'a apportée au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil. Je tiens également à remercier ma sœur Rebiha pour son soutien précieux.*

*Enfin je ne remercie toute personne qui m'a aidé de près ou de loin pour faire ce modeste travail et tous les gens qui m'ont soutenu et encourager.*

*Je dédie ce travail*

A ma mère

## RESUME

Les argiles sont présentes dans de nombreux contextes, leurs propriétés pouvant être à la fois profitable et /ou dommageable. Il est donc important d'appréhender leur comportement afin de mieux maîtriser leur utilisation. Ces sols présentent des variations de volume influencées par le cycle humidification-dessiccation.

Après avoir présenté les caractéristiques principales des minéraux argileux, nous avons exposé les différents moyens de stabilisation appliqués aux sols.

Dans la partie expérimentale, nous avons examiné l'influence de la teneur en eau et en chaux sur le retrait. La chaux réduit le retrait qui est la cause essentielle de fissuration. La teneur en eau de compactage a une grande importance sur le retrait si on veut le réduire, il faut compacter le sol à des teneurs en eau proche de l'optimum. A faibles teneurs en chaux, la résistance mécanique du béton est améliorée.

Nous avons étudié l'influence de la teneur en eau sur la résistivité électrique du matériau stabilisé pour déduire par analogie son isolation thermique.

Enfin le chauffage des sols a montré son efficacité sur la résistance mécanique et sur son comportement à l'eau.

## MOTS CLES

Argiles – retrait - stabilisation - la chaux –chauffage des sols – résistivité

## **TABLES DES MATIERES**

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>Chapitre I : Généralité sur les argiles</b> .....	4
Introduction.....	4
I.1. Généralité sur les argiles .....	4
I.2. Les minéraux argileux .....	4
I.2.1. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux.....	5
I.2.2. Structure moléculaire des argiles .....	6
I.3. Les principaux types de minéraux argileux .....	6
I.3.1. La kaolinite .....	6
I.3.2. La montmorillonite .....	8
I.3.3. Les illites .....	9
I.4. La marne .....	10
I.4.1. caractéristiques de la marne .....	10
I.5. Méthodes d'identification des minéraux argileux.....	10
I.5.1. Analyse par diffraction aux rayons X .....	10
I.5.2. L'analyse par différentielle thermique .....	11
I.5.3. Analyse par microscope électronique à balayage et à transmission.....	11
I.5.4. Analyse chimique.....	11
I.5.5. Spectrométrie infrarouge.....	11
I.6. Caractéristiques principales des minéraux argileux.....	11
I.6.1. Surface spécifique .....	11
I.6.2. La capacité d'échange cationique (CEC).....	12

I.6.3. La densité de charge spécifique.....	12
I.7. Le retrait des sols argileux .....	12
I.7.1. Généralités .....	12
I.7.2. Etats de l'eau dans le sol .....	13
I.7.2.1. La capillarité .....	14
I.7.2.2. La succion .....	15
I.8.2.3. Succion et teneur en eau du sol.....	17
I.7.2.4. La consistance .....	18
I.7.3. Le phénomène de retrait .....	19
I.8. Conclusion .....	21
<b>Chapitre II : Techniques de stabilisation des sols.....</b>	<b>22</b>
Introduction.....	22
II.1. Béton de terre .....	22
II.2. Le béton de terre stabilisée.....	22
II.3. Définition de la stabilisation .....	22
II.4. Principaux objectifs de la stabilisation .....	23
II.5. Différents procédés de stabilisation .....	23
II.5.1. Stabilisation mécanique.....	24
II.5.1.1. Stabilisation par dessiccation.....	24
II.5.1.2. Stabilisation par compactage (densification) .....	25
II.5.2. La stabilisation physique.....	28
II.5.2.1. Les minéraux.....	28
II.5.2.2. Les fibres.....	28
II.5.3. Stabilisation chimique : ou stabilisation physico-chimique .....	29
II.6. Stabilisation par addition de liants .....	30
II.6.1. Le bitume.....	30

II.6.2. Le ciment .....	31
II.6.3. La chaux.....	32
I.7. Technique de stabilisation à la chaux .....	32
II.7.1. La chaux .....	33
II.7.1.1. La chaux vive .....	34
II.7.1.2. La chaux éteinte .....	35
II.7.1.3. Le cycle de la chaux.....	36
II.7.2. Types de chaux .....	36
II.7.2.1. La chaux aérienne.....	36
II.7.2.2. Les chaux magnésiennes.....	37
II.7.2.3. La chaux hydraulique.....	37
II.7.3.Utilisation de la chaux.....	38
II.7.4. Stabilisation des sols à la chaux .....	38
II.7.4.1. Modification des propriétés du sol.....	38
II.7.4.2.Mécanismes de stabilisation à la chaux .....	39
II.7.4.3. Effet de la chaux sur les sols argileux .....	40
II.7.4.3.1. Sur les limites de consistance.....	40
II.7.4.3.2. Effet de la chaux sur le compactage .....	40
II.7.4.3.3.Effet de la chaux sur la résistance des sols.....	40
II.7.4.3.4.Effet de la chaux sur la texture .....	41
II.8. Conclusion .....	41

## **PARTIE EXPERIMENTALE**

<b>Chapitre III: étude menée et matériaux utilisés.....</b>	<b>42</b>
Introduction.....	42
III.1. Etude menée .....	42
III.2.Matériaux utilisés.....	42

III.2.1. L'analyse granulométrique .....	42
III.2.2. Limites d'Atterberg.....	44
III.2.2.1. Résultats des limites d'Atterberg .....	45
III.2.3. L'analyse chimique et minéralogique.....	47
III.2.3.1. L'analyse chimique.....	47
III.2.3.2. Analyse minéralogique.....	47
III.2.4. L'essai Proctor .....	49
III.2.4.1. Principe de l'essai.....	49
III.2.4.2. Matériel et mode opératoire.....	50
III.2.4.3. Les résultats de l'essai Proctor .....	51
III.3. La chaux.....	52
III.4. Conclusion .....	53
<b>Chapitre IV: Etude du retrait .....</b>	<b>54</b>
Introduction .....	54
IV.1. Principe de l'essai.....	55
IV.2. Etude du retrait des matériaux .....	55
IV.2.1. Effet de la teneur en eau.....	55
IV.2.1.1. Préparation des éprouvettes.....	55
IV.2.1.2. Présentation des résultats.....	56
IV.2.1.2.1. Evolution de la longueur en fonction du temps.....	56
IV.2.1.2.2. Variation de la masse en fonction de la longueur.....	61
IV.2.1.2.3. Variation de l'humidité en fonction du retrait.....	67
IV.2.1.2.4. Comparaison entre les sols .....	73
IV.2.2. Effet du traitement à la chaux (Sols stabilisés) .....	77
IV.2.2.1. Préparation des éprouvettes.....	77
IV.2.2.2. Présentation des résultats .....	77
IV.2.2.2.1. Evolution de la longueur en fonction du temps.....	78

IV.2.2.2.2. Variation de la masse en fonction de la longueur.....	83
IV.2.2.2.3. Confrontation des résultats .....	88
IV.2.2.2.4. Le retrait final en fonction du taux de la chaux .....	88
IV.3. Conclusion .....	90
<b>CHAPITRE V : Effet de la chaux sur la résistance mécanique du béton</b>	
Introduction .....	91
V.1.Généralités sur les méthodes de cure du béton.....	91
V.2.Matériaux utilisés.....	92
V.3. Le matériel utilisé.....	94
V.4.La composition du béton .....	95
V.4.1.Le béton témoin.....	95
V.4.2.Le béton stabilisé à chaux .....	97
V.4. 3.Préparation du béton.....	97
V.4.4.Conservation des éprouvettes .....	97
V.5. Essai en compression .....	98
V.5.1.Interprétation des résultats.....	99
V.6. conclusion.....	101
<b>CHAPITRE VI : Traitement à chaud .....</b>	<b>102</b>
Introduction .....	102
VI.1. Traitement à chaud.....	102
VI.1.2. Principe de l'essai .....	102
VI.1.2. Description et observations.....	103
VI.1.2.1.Argile rouge .....	103
VI.1.2.2. La marne.....	104
VI.1.2.3. L'argile grise .....	105
VI.1.3.Résistance à l'écrasement.....	106

VI.1.3.1. Résistance à l'écrasement à sec (Rsec) .....	106
VI.1.3.2. Résistance à l'écrasement après immersion de 24 heures (Rsat) .....	108
VI.1.3.3. Le coefficient de ramollissement (Kram).....	111
VI.1.3.4. Essai d'absorption.....	112
VI.1.3.5. Comparaison des sols .....	113
VI.2.Etude de la résistivité.....	113
VI.2.1.Définition et analogie électrique .....	113
VI.2.2. Mesure de la résistivité des matériaux au laboratoire.....	114
VI.2.3. La résistivité en fonction de la teneur en eau.....	116
VI.2.4. la résistivité en fonction du dosage en chaux.....	117
VI.3. Conclusion.....	118
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>119</b>
Références bibliographique	
Annexes	

## La liste des figures

**Figure I.1 :** a)Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ; b) feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim, 1959)

**Figure I.2 :** a)octaèdre d'aluminium(ou de magnésium) (d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959)

**Figure I.3 :** a) Schéma de la structure de la kaolinite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)) ; b) Vue isométrique de la structure atomique de la atomique de la kaolinite. D'après Grim, 1959

**Figure I.4:** Photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976)

**Figure I.5 :** Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).)

**Figure I.6 :** Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976)

**Figure I.7:** Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. D'après Grim, 1959

**Figure I.8:** Schéma de la structure de l'illite (d'après Lambe (1953),cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).)

**Figure I.9:** photographie d'une illite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976)

**Figure I.10:** Phénomène d'ascension capillaire

**Figure I.11:** relation entre le potentiel de succion et le degré de saturation

**Figure I.12 :** Courbe de rétention d'eau de différents sols (d'après Dysli, 1991)

**Figure I.13:** Limite d'Atterberg, teneur en eau naturelle

**Figure II.1 :** Courbe de compactage

**Figure II.2 :** Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor

**Figure II.3 :** Influence de la granulométrie sur l'optimum Proctor

**Figure II.4 :** Transformation du calcaire en chaux vive

**Figure II.5 :** La chaux éteinte en poudre

**Figure II.6 :** Le cycle de la chaux

**Figure III.1:** Courbe granulométrique des sols

**Figure III.2 :** Appareil de Casagrande

**Figure III.3 :** Diagramme de plasticité (d'après Casagrande, 1948, et Howard, 1977)

**Figure III.4:** Limite de liquidité des sols

**Figure III.5:** Equipement de l'essai Proctor normal

**Figure III.6 :** Compactage des couches

**Figure III.7:** Essai Proctor normal des différents sols

**Figure IV.1 :** Matériels utilisés pour l'étude du retrait

**Figure IV.2:** Dispositif expérimentale de mesure du retrait

**Figure IV.3 :** Variation de la longueur en fonction du temps R10

**Figure IV.4:** Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16

**Figure IV.5:** Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16, R20

**Figure IV.6:** Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16, R20, R25

**Figure VI.7:** Variation de la longueur en fonction du temps M10

**Figure IV.8 :** Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16

**Figure IV.9:** Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16, M24

**Figure IV.10:** Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16, M24, M30

**Figure IV.11 :** Variation de la longueur en fonction du temps G4

**Figure IV.12:** Variation de la longueur en fonction du temps de G4 et G8

**Figure IV.13:** Variation de la longueur en fonction du temps de G4, G8 et G10

**Figure IV.14:** Variation de la longueur en fonction du temps de G4, G8, G10 et G12

**Figure IV.15:** Variation de la masse en fonction de la longueur R10

**Figure IV.16:** Variation de la masse en fonction de la longueur R10 et R16

**Figure IV.17:** Variation de la masse en fonction de la longueur R10, R16 et R20

**Figure IV.18:** Variation de la masse en fonction de la longueur R10, R16, R20 et R 25

**Figure IV.19:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10

- Figure IV.20:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16
- Figure IV.21:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16, M24
- Figure IV.22:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16, M24, M30
- Figure IV.23:** Variation de la masse en fonction de la longueur G4
- Figure IV.24:** Variation de la masse en fonction de la longueur G4, G8
- Figure IV.25:** Variation de la masse en fonction de la longueur G4, G8, G10
- Figure IV.26:** Variation de la masse en fonction de la longueur G4, G8, G10, G12
- Figure IV.27:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10
- Figure IV.28:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16
- Figure IV.29:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16 et R20
- Figure IV.30:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16, R20 et R25
- Figure IV.31:** Variation de l'humidité en fonction du retrait M10
- Figure IV.32:** Variation de l'humidité en fonction du retrait M10 et M16
- Figure IV.33:** Variation de l'humidité en fonction du retrait M10, M16 et M24
- Figure IV.34:** Variation de l'humidité en fonction du retrait M10, M16, M24 et M30
- Figure IV.35:** Variation de l'humidité en fonction du retrait G4
- Figure IV.36:** Variation de l'humidité en fonction du retrait G4 et G8
- Figure IV.37:** Variation de l'humidité en fonction du retrait G4, G8 et G10
- Figure IV.38:** Variation de l'humidité en fonction du retrait G4, G8, G10 et G12
- Figure IV.39:** Comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de R10, M10 et G10
- Figure IV.40:** comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de R16 et M16
- Figure IV.41:** comparaison de la variation de la masse en fonction de la longueur de R10 et M10
- Figure IV.43:** comparaison de la variation de la masse en fonction de la longueur de R10, M10, G10
- Figure IV.43:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction du retrait de R10 et M10

**Figure IV.44:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction du retrait de R10, M10 et G10

**Figure IV.45 :** comparaison entre les retraits finaux de l'argile rouge et la marne à 16% d'eau.

**Figure IV.46:** Variation de la longueur en fonction du temps RS 2

**Figure IV.47:** Variation de la longueur en fonction du temps RS 2, RS 4

**Figure IV.48:** Variation de la longueur en fonction du temps RS 2, RS 4, RS 8

**Figure IV.49 :** Variation de la longueur en fonction du temps RS 2, RS 4, RS 8, RS 16

**Figure IV.50:** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2

**Figure IV.51 :** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4

**Figure IV.52:** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4, MS 8

**Figure IV.53:** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4, MS 8, MS 16

**Figure IV.54:** Variation de la longueur en fonction du temps GS 2

**Figure IV.55:** Variation de la longueur en fonction du temps GS 2, GS 4

**Figure IV.56:** Variation de la longueur en fonction du temps GS 2, GS 4, GS 8

**Figure IV.57:** variation de la masse en fonction de la longueur RS 2

**Figure IV.58:** variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4

**Figure IV.59:** variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4, RS 8

**Figure IV.60:** variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4, RS 8, RS 16

**Figure IV.62:** variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4

**Figure IV.63:** variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4, MS 8

**Figure IV.64:** variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4, MS 8, MS 16

**Figure IV.65:** variation de la masse en fonction de la longueur GS 2

**Figure IV.66:** variation de la masse en fonction de la longueur GS 2, GS 4

**Figure IV.67:** variation de la masse en fonction de la longueur GS 2, GS 4, GS 8

**Figure IV.68 :** a, b et c : Limites d'Atterberg

**Figure V.1 :** Courbe granulométriques

**Figure V.2:** Malaxeur

**Figure V.3 :** Table vibrante

**Figure V.4:** Moule cylindrique 16\*32

**Figure V.5:** Machine à compression (presse digitale)

**Figure V.6 :** abaque de Dreux

**Figure V.7:** Eprouvette entre les deux plateaux de la presse

**Figure V.8:** Résistance à la compression du béton conservé dans l'air

**Figure V.9 :** Résistance à la compression du béton conservé dans un milieu humide

**Figure V.10 :** Résistance à la compression du béton conservé dans l'eau

**Figure : V.11 :** Résistance à la compression du béton en fonction de la chaux dans différents milieux de conservation

**Figure VI.1 :** Four à haute température

**Figure VI.2 :** Argile rouge cuite à différentes températures

**Figure VI.3 :** Argile rouge cuite immergée

**Figure VI.4 :** Marne cuite à la sortie du four

**Figure VI.5 :** Marne cuite à immergée

**Figure VI.6 :** Argile grise cuite à différentes températures

**Figure VI.7:** Argile grise cuite, immergée

**Figure VI.8 :** Essai d'écrasement

**Figure VI.9 :** Résistance à l'écrasement de l'argile rouge cuite à l'état sec

**Figure VI.10 :** Résistance à l'écrasement de la marne cuite à l'état sec

**Figure VI.11 :** Résistance à l'écrasement à l'état sec de l'argile grise cuite

**Figure VI.12 :** Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile rouge (R<sub>sat</sub>)

**Figure VI.13 :** Résistance à l'écrasement après immersion de la marne (R<sub>sat</sub>)

**Figure VI.14 :** Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile grise

**Figure VI.15:** Argile grise cuite à 700°C, immergée

**Figure VI.16:** Essai d'absorption au laboratoire

**Figure VI.17 :** Dispositif expérimental de mesure de la résistivité électrique

**Figure VI.18:** Variation de la résistivité des trois sols en fonction de la teneur en eau

**Figure VI.19:** Variation de la résistivité des trois sols en fonction du dosage en chaux

## La liste des tableaux

**Tableau [1]** : quelques données sur les minéraux argileux (Mitchell, J.K, fundamental of soil behavior)

**Tableau [2]** : Moyens de stabilisation des terres remaniées.

**Tableau [3]**: Résultats de l'analyse granulométrique des sols

**Tableau [4]**: Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg

**Tableau [5]**: Indice de plasticité

**Tableau [6]**: Détermination de la limite de liquidité

**Tableau [7]**: Détermination de la limite de plasticité

**Tableau [8]**: Détermination de la limite de plasticité

**Tableau [9]**: Résultats de l'analyse chimique

**Tableau [10]**: Résultats de l'analyse minéralogique

**Tableau [11]** : Essai Proctor ; compactage du matériau dans le moule

**Tableau [12]** : Résultats de l'essai Proctor du sol de Oued Aissi

**Tableau [13]** : Résultats de l'essai Proctor du sol de L'Habitat

**Tableau [14]** : Résultats de l'essai Proctor du sol de Takhoukht

**Tableau [15]** : Caractéristiques de la chaux

**Tableau [16]** : Limites de retrait effectives de l'argile rouge

**Tableau [17]**: Limites de retrait effective la marne

**Tableau [18]** : Limites de retrait de l'argile grise

**Tableau [19]** : Pourcentage de réduction de retrait de l'argile rouge

**Tableau [20]** : Pourcentage de réduction de retrait de la marne

**Tableau [21]** : Pourcentage de réduction de retrait de l'argile grise

**Tableau [22]** : Analyse granulométrique du sable

**Tableau [23]** : analyse granulométrique du gravier 3/8

**Tableau [24]** : analyse granulométrique du gravier 8/16

**Tableau [25]** : analyse granulométrique du gravier 16/25

**Tableau [26]** : Composition chimique du ciment CPA

**Tableau [27]** : Composition pour une gâchée

**Tableau [28]** : Composition du béton stabilisé

**Tableau [29]** : Résultats de l'essai en compression du béton

**Tableau [30]** : Résistance à l'écrasement à l'état sec

**Tableau [31]** : Résistance à l'écrasement à l'état sec de la marne

**Tableau [32]** : Résistance à l'écrasement à l'état sec de l'argile grise

**Tableau [33]** : Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile rouge

**Tableau [34]** : Résistance à l'écrasement après immersion de la marne

**Tableau [35]** : Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile grise

**Tableau [36]** : Coefficient de ramollissement des sols

**Tableau [37]** : Coefficient d'absorption des sols

**Tableau [38]** : Variation de la résistivité de l'argile rouge en fonction de la teneur en eau

**Tableau [39]** : Variation de la résistivité de la marne en fonction de la teneur en eau

**Tableau [40]** : Variation de la résistivité de l'argile grise en fonction de la teneur en eau

**Tableau [41]** : Variation de la résistivité de l'argile rouge en fonction de la teneur en chaux

**Tableau [42]** : Variation de la résistivité de la marne en fonction de la teneur en chaux

**Tableau [43]** : Variation de la résistivité de l'argile grise en fonction de la teneur en chaux

## NOTATIONS

$P_c$  : Pression capillaire

$u_a$  : Pression de l'air

$u_w$  : pression de l'eau

$h_c$  : hauteur d'ascension capillaire

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau

$w_L$  : La limite de liquidité

$w_P$  : La limite de plasticité

$w_S$  : La limite de retrait

$S_r$  : Degré de saturation

$P_F$  : Potentiel de succion

$\rho_d$  : densité sèche du sol

$\sigma$  : contrainte totale dans le sol

$\sigma'$  : contrainte effective

$w_{re}$  : limite de retrait effective

$\rho$  : La conductivité électrique

$u$  : La différence du potentiel entre les deux points

$I$  : L'intensité du courant électrique qui traverse l'échantillon

$W_m$  : coefficient d'absorption

$K_{ram}$  : coefficient du ramollissement

$f_c$  : résistance à la compression du béton

## **INTRODUCTION GENERALE**

Il faut souligner l'influence prépondérante de l'eau sur les sols. L'eau a un effet direct sur le comportement de la plus part des sols, en particulier sur celui des sols à grains fins ; elle est aussi un facteur important dans la plus part des problèmes géotechniques. A titre d'exemple, la capillarité, le gonflement et l'action du gel.

D'une certaine manière, les problèmes liés au tassement des structures et à l'instabilité des talus sont aussi attribuables à la présence d'eau. Selon HOLTZ les ruptures de barrages et de digues causées par l'érosion interne ont entraîné plus de pertes de vies que tous les autres types de ruptures d'ouvrages de génie civil combinés. Aux Etats Unis seulement, les dommages associés aux sols gonflants entraînent à eux seuls des pertes matérielles plus importantes que les dommages causés par les inondations, les ouragans, les tornades et les tremblements de terre.

### **Problématique**

Parmi les phénomènes physiques non maîtrisés dans le domaine de la mécanique des sols, citons celui du retrait. Plusieurs études lui ont été consacrées afin de le maîtriser, néanmoins sa complexité n'a pas encore permis d'atteindre, jusqu'à présent des solutions rationnelles. Il est un facteur important dans la plus part des problèmes géotechniques.

Le retrait se produit dans :

- La partie supérieure des dépôts de sol ; La réduction de volume de sol et les pressions qui en découlent seront variables sous les ouvrages ce qui entraînera des mouvements différentiels. Lorsqu'il ya retrait, le sol s'affaisse, des fissures apparaissent, généralement en surface et créent des plans de faiblesse dans le sol, ce qui se traduit souvent par une diminution de la capacité portante du sol portant des charges. Un affaissement considérable et surtout irrégulier causera évidemment des dommages importants aux ouvrages construit sur le dépôt.
- Les matériaux d'enveloppe ; qui peuvent jouer le rôle de porteur limité et former l'enveloppe de la construction. Compte tenu des dommages importants et des nuisances que peut engendrer la fissuration à l'aspect et à l'esthétique du matériau, le retrait a une influence directe sur le comportement mécanique du matériau, puisque c'est lui qui gère la fissuration de ce dernier et donc affecte sa durabilité ; des fissures peuvent apparaitre lorsque la résistance à la traction relativement faible du matériau est dépassée. Ce problème de fissuration nous conduit à étudier le problème complexe du mécanisme du retrait du matériau et l'influence d'une solution stabilisante pour réduire à défaut de l'empêcher. C'est donc ce deuxième point qui sera développé et consacré au retrait comme premier axe de travail rapporté dans ce mémoire.

## **Objectif de ce travail**

L'objectif visé par ce travail est d'étudier :

- **Le retrait** : il est nécessaire d'analyser ce phénomène dans le but de mettre en relief les causes essentielles du retrait qui lui-même la cause essentielle de la fissuration. En évitant le départ brutal de l'eau du matériau et en maîtrisant le phénomène d'évaporation, on peut réduire considérablement le retrait et obtenir un matériau de bonne qualité.
- **Le traitement thermique des sols** : le chauffage des sols est un traitement très efficace pour les sols fins car la stabilisation à la chaleur améliore la résistance mécanique et la tenue à l'eau.
- **Influence de la stabilisation à la chaux** sur le retrait des sols fins et sur la résistance mécanique du béton.

## **Organisation du mémoire**

Ce mémoire est structuré en deux parties complémentaires :

La première partie constitue la synthèse bibliographique, qui se compose de deux chapitres :

Le premier chapitre intitulé « généralités sur les argiles » est consacré à la présentation des principaux types de minéraux argileux, leurs méthodes d'identification et le retrait des argiles. La reconnaissance des minéraux argileux par la méthode des diffractions des rayons X est la plus indiquée.

Le deuxième chapitre ; « Techniques de stabilisation des sols » présente une synthèse bibliographique sur la stabilisation et les divers stabilisants à incorporer au sol pour répondre aux exigences de qualités que doit avoir un matériau moderne.

La deuxième partie présente le travail expérimental réalisé dans le cadre de cette thèse, il est composé de quatre chapitres :

Le troisième chapitre qui s'intitule « Etude menée et matériaux utilisés » est consacré à la présentation des matériaux utilisés et les différents essais d'identification des sols à savoir ; l'analyse granulométrique, limites d'Atterberg et l'analyse chimique et minéralogique. La classification des sols a révélé que les sols étudiés sont des sols fins. Il s'agit de deux argiles et une marne.

Le quatrième chapitre : « Etude du retrait » décrit le mode opératoire de la mesure du retrait. Deux méthodes d'évaluation des limites de retrait sont présentées. Dans ce paragraphe nous avons étudié l'influence de la teneur en eau et en chaux sur le retrait. L'expérience a montré que la nature minéralogique du sol a une grande influence sur le retrait.

Le cinquième chapitre qui traite « l'effet e la chaux sur la résistance mécanique du béton », dans lequel on a étudié l'influence de l'ajout de faible quantité de chaux et le milieu de conservation sur la résistance mécanique.

Trois milieux de conservation ont été expérimentés. Dans le premier les échantillons ont été conservés à l'air ambiant en été par temps chaud ; dans le deuxième les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant sept jours ensuite elles sont retirées et continuent leur durcissement à l'air libre jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour. Dans le troisième mode de conservation les éprouvettes sont introduites dans des sachets en plastique légèrement humidifié et elles sont conservées pendant sept jours ensuite elles sont retirées et continuent leur durcissement à l'aire libre.

Le sixième chapitre « traitement à chaud des sols », la stabilisation par la chaleur améliore la résistance mécanique à sec et la tenue à la l'eau, les valeurs élevées du coefficient de ramollissement montrent l'efficacité du traitement.

Dans le but d'étudier l'influence de la stabilisation à la chaux et de la compacité sur l'isolation thermique du matériau nous avons examiné la résistivité électrique du matériau stabilisé en fonction de la teneur en eau et en chaux. Les propriétés thermiques du matériau étudié peuvent être déduites par analogie au phénomène électrique.

# CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES ARGILES

## Introduction

De manière générale, le sol est un milieu complexe, formé de sable, de limon, d'argile, s'il n'est pas très profond, de matière organique. Dans la grande majorité des cas, il s'agit d'un milieu fortement hiérarchisé dont les échelles structurales vont du nanomètre au millimètre, sinon plus.

La fraction fine des sols se compose de sable fin, de limon et d'argile, l'analyse du comportement des sols argileux révèle des propriétés qui font des argiles des sols très complexes, dont la définition ne se rapporte pas exclusivement à sa granulométrie, mais elle est liée à la nature chimique, la structure minéralogique et son interaction avec l'eau.

## I.1. Généralités

Les sols argileux proviennent de roches argileuses qui nous entourent de toutes les parts, puisque elles constituent environ 80% de l'ensemble des roches sédimentaires. Malgré leur abondance, les roches argileuses demeurent les roches les moins étudiées de l'écorce terrestre. Le terme argile est réservé à une roche meuble plastique constituée par plus de 80% de minéraux argileux.

En génie civil, le mot argile désigne les sols contenant une quantité de particules d'argile suffisante pour leur conférer cohérence et plasticité. Il peut également s'appliquer aux particules d'argiles elles même, c'est-à-dire aux particules microscopiques qui portent le nom de minéraux argileux. [1]

Beaucoup de définitions ont été proposées pour caractériser les argiles, mais elles se ramènent toujours à celle proposée par A.Lapparent: « il s'agit d'un corps minéral caractérisé spécifiquement par la nature, le nombre et l'arrangement mutuel des atomes dont sa molécule physique se compose. » [3].

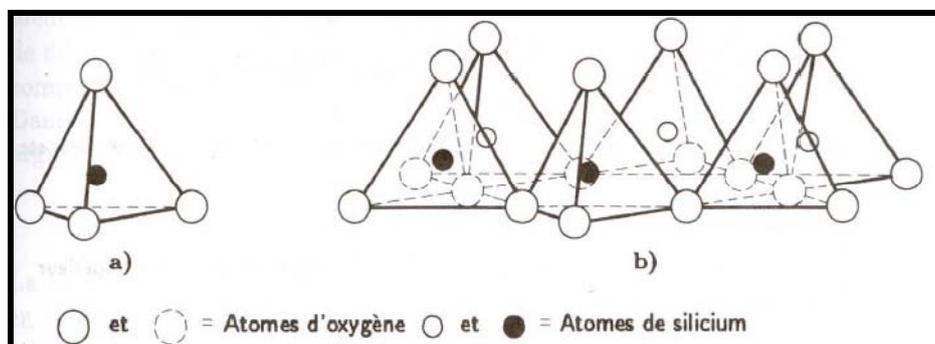
## I.2. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,002 mm, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates (G.W. Brindley et G. Pedro). Ce sont pour la plus part des, silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopique, qui portent le nom de feuillets. [3]

### I.2.1. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux [1]

Les feuillets sont l'unité de base des minéraux argileux, ils ont une apparence similaire à celle d'une lame ou d'une feuille extrêmement mince, Ils sont constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures fondamentales à environ 0,5 nm ( $5 \times 10^{-7}$  mm). Il existe deux structures fondamentales : La structure fondamentale tétraédrique et la structure fondamentale octaédrique.

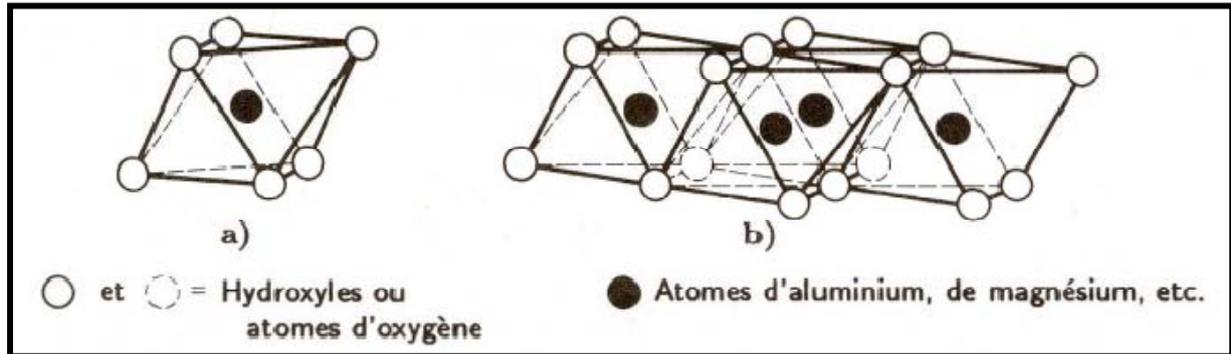
La structure fondamentale tétraédrique est composée de quatre atomes d'oxygène (O) formant un tétraèdre avec en son centre un atome de silicium ( $\text{SiO}_4$ ). Un feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques.



**Figure I.1** : a)Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ; b) feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim, 1959).

La structure fondamentale octaédrique est une combinaison de six atomes d'oxygène (O) ou molécule d'hydroxyle (OH), placés au sommet d'un octaèdre qui renferme un atome métallique l'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg). Chacun de ces deux atomes peut être remplacé par un atome métallique de fer (Fe), de titane (Ti), de nickel (Ni), de chrome (Cr) ou de lithium (Li).

Un feuillet octaédrique se forme par l'arrangement de structures fondamentales octaédriques. Lorsque les deux tiers des atomes métalliques sont des atomes d'aluminium, la structure octaédrique porte le nom de gibbsite. Si ce sont pour la plupart des atomes de magnésium, la structure portera le nom de brucite.



**Figure I.2 :** a) octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959).

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plus part de ces atomes ont approximativement la même taille, les structures fondamentales conservent sensiblement la même forme ; c'est pourquoi on parle de substitutions isomorphe.

### I.2.2. Structure moléculaire des argiles [2]

Les minéraux argileux sont tous constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace interfoliaire.

La structure formée en liant une couche tétraédrique à une couche octaédrique est appelée feuillet 1 :1 dont l'épaisseur est d'environ 0,7 nm. En liant une couche tétraédrique de chaque côté d'une couche octaédrique, on forme un feuillet 2 :1, dont l'épaisseur est d'environ 0,9 nm.

Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent la structure rigide du feuillet élémentaire; des liaisons moins fortes mais essentielles assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former la particule d'argile.

Le type de feuillet, son épaisseur, sa charge et la nature des espèces interfoliaires sont à la base de la classification des argiles. Chaque famille présente des caractéristiques structurales morphologiques et colloïdales spécifiques. Les minéraux argileux les plus fréquents sont les kaolinites, les montmorillonites, les illites.

### I.3. Les principaux types de minéraux argileux

#### I.3.1. La kaolinite $[Si_2 Al_2 O_5(OH)_4]$ [5]

[1] C'est une argile blanchâtre, son feuillet est de type 1:1, elle est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique (silice) et un feuillet octaédrique (aluminium). Les particules de kaolinite contiennent habituellement entre 70 et plus de 100 couches élémentaires, ce qui se traduit par une épaisseur variant entre 50 et 100 nm et qui peut même, dans certains cas, atteindre 2000 nm.

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de Van der Waals. Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltrer difficilement entre les couches, qui peuvent alors s'empiler pour former des minéraux argileux très stables et relativement épais. C'est pourquoi la kaolinite a une surface spécifique inférieure à celle de la plus part des minéraux argileux.

L'halloysite est un minéral argileux dont la structure et les propriétés se rapprochent de celles de la kaolinite.

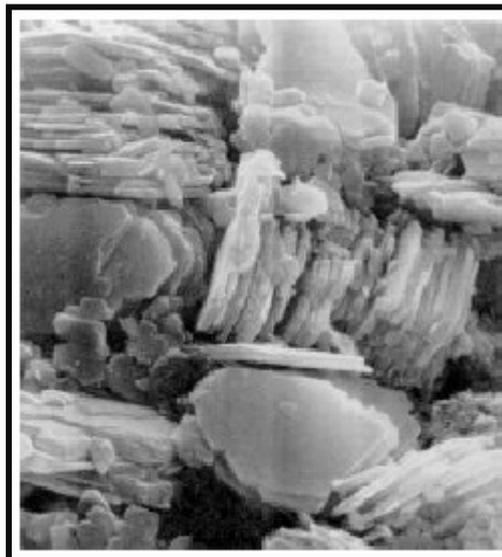
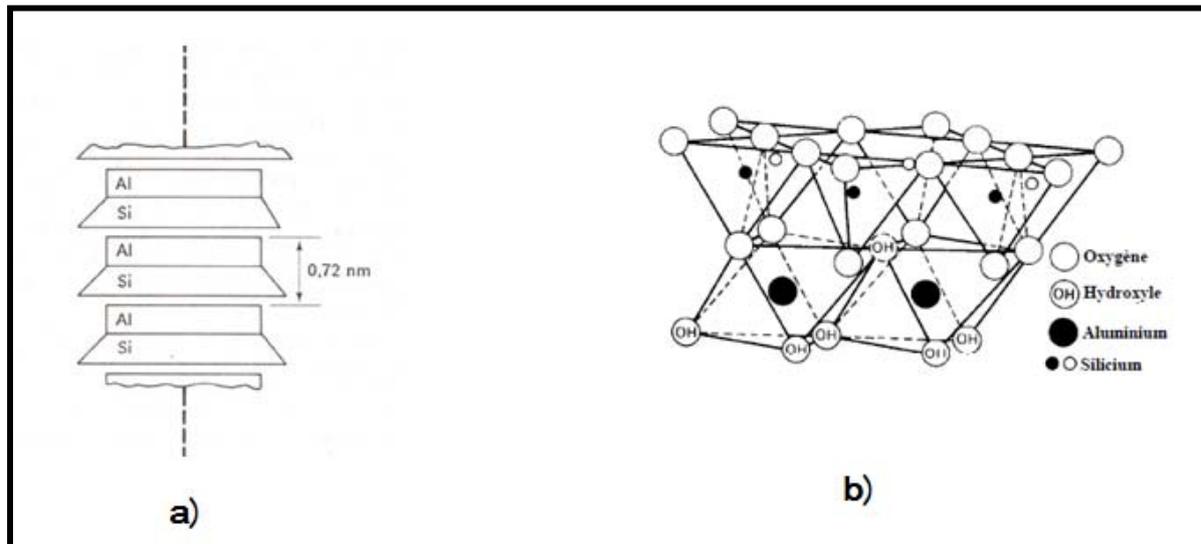
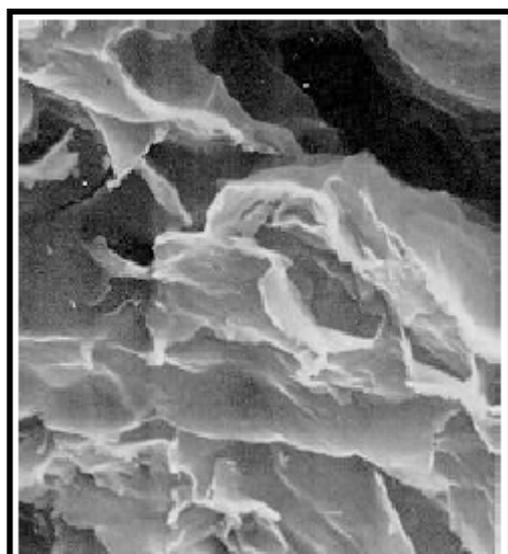
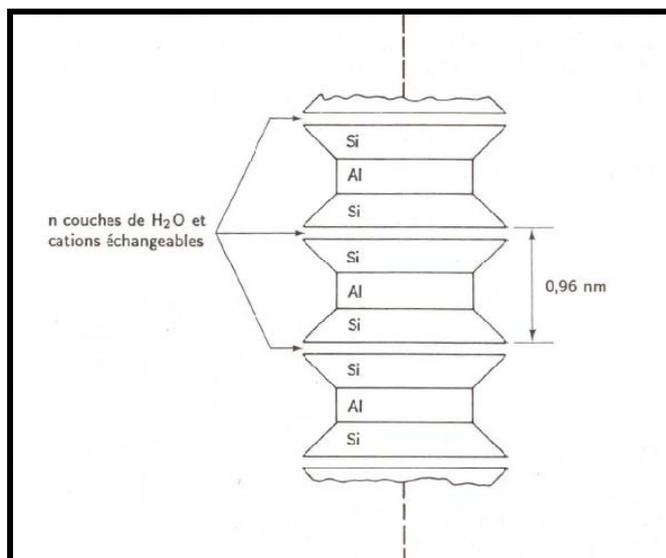


Figure I.4: photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976) [5]

**I.3.2. La montmorillonite  $[\text{Si}_4\text{Al}_{(2-x)}\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}]$  [5]**

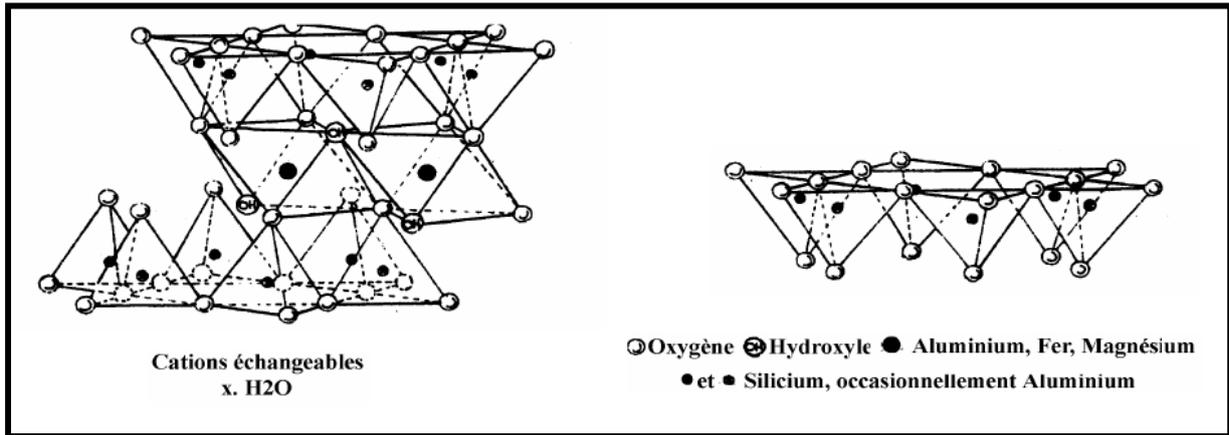
[1] C'est un minéral abondant. Elle est formée de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite), c'est un feuillet 2 :1. Elle porte parfois le nom de smectite. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurant les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer. Les particules de montmorillonite comptent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur variant de 1 à 10 nm ; elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux.

La bentonite, un minéral argileux dont les propriétés sont similaires à celles de la montmorillonite, La vermiculite aussi est un minéral argileux qui appartient au même groupe que la montmorillonite.



**Figure I.5 :** Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)). [5]

**Figure I.6:** Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976). [5]

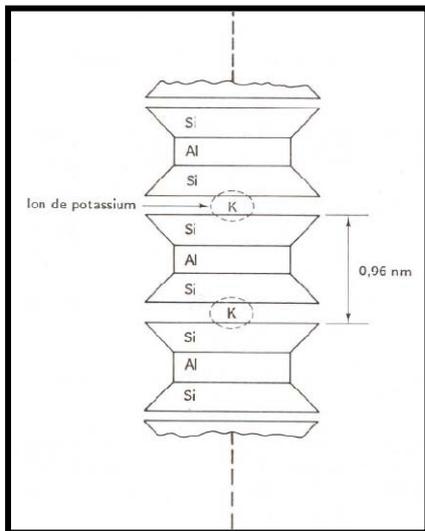


**Figure I.7:** Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. D’après Grim, 1959 [7]

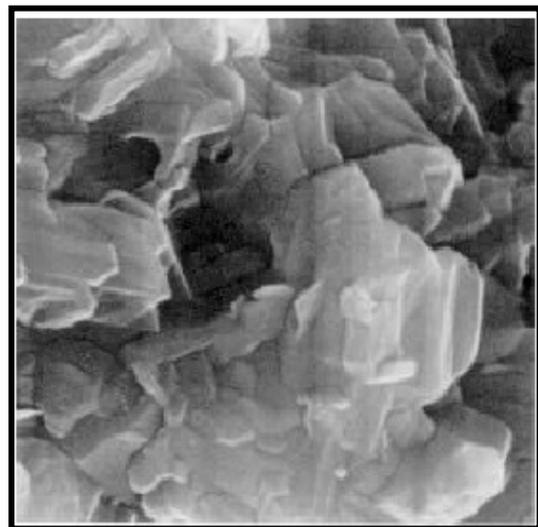
**I.3.3. Les illites**  $[Si_{(4-x)}Al_xAl_2O_{10}(OH)_2xK]$  [5]

[1] L’illite a été par le professeur R.E.Grim. On la considère comme un des minéraux argileux les plus abondants sur la terre. Elle est formée d’un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques, feuillet 2 :1. Les liens qui unissent les couches élémentaires, ils sont assurés par des atomes de potassium(K). Bien qu’étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite, ils demeurent inférieurs aux liens d’hydrogène de la kaolinite. L’épaisseur typique de l’illite se situe donc entre celles de la montmorillonite et de la kaolinite, c’est-à-dire à environ 30 nm, bien qu’elle puisse varier de 10 à 200 nm. [1]

La chlorite est un minéral argileux assez abondant dont le comportement s’apparente à celui de l’illite.



**Figure I.8:** Schéma de la structure de l’illite (d’après Lambe (1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991)).



**Figure I.9:** photographie d’une illite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976) [5]

#### **I.4. La marne [4]**

Dans la nature, et dans un très grand nombre de cas, les minéraux argileux sont associés d'autres minéraux, ce qui donne naissance à de nouvelles roches argileuses, parmi elles on cite les marnes.

En pétrographie, on définit les marnes comme étant des roches composées d'un mélange de carbonates et de 30 à 70 % d'argiles. Suivant le pourcentage d'argile contenue dans la roche, on parle de marne argileuse, de marne, de calcaire marneux, et de calcaire.

En géotechnique, les ingénieurs confrontés aux problèmes du comportement des marnes en Génie Civil (fondation d'ouvrages) et en travaux publics (couches de chaussées), et dont les préoccupations sont d'ordre pratique, ont introduit pour ces matériaux des éléments d'appréciation tenant compte de leur comportement sous des sollicitations d'ordre dynamique ou physico-chimique (altérabilité), d'où la notion de roches évolutives en plus des critères pétrographique classique.

Donc on donne à la marne la définition suivante :

Une marne est une roche plus ou moins carbonatée, cohérente et à cassure terne à l'état sec, pouvant devenir plastique en présence d'eau et contenant de 10 à 90% d'argile.

##### **I.4.1. Caractéristiques de la marne [4]**

Les marnes apparaissent constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse.

Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argiles montmorillonitiques ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques mauvaises. Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de textures. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement d'un sol.

Le comportement du matériau dépend des proportions des composants, de la texture initiale et de la fraction argileuse.

#### **I.5. Méthodes d'identification des minéraux argileux [5]**

L'identification des minéraux argileux nécessite le recours à un ensemble de moyens expérimentaux, chacun d'eux permettant de cerner tels ou tels paramètres spécifiques des minéraux.

##### **I.5.1. Analyse par diffraction aux rayons X**

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes. Les matériaux qui présentent une structure cristalline diffractent les rayons X. Des minéraux dont les structures sont différentes présentent des spectres de diffraction des rayons X différents. En réalité, on a d'abord identifié les divers minéraux en se basant sur les différences qui caractérisent ces spectres. Les spectres de la plupart des minéraux ont été

publiés et il est relativement simple de comparer les spectres de diffraction de minéraux inconnus avec ceux des matériaux connus. Cette différenciation ne peut toutefois pas être appliquée aux sols suivants : les mélanges de minéraux, et les sols qui contiennent des matières organiques. Puisqu'il est impossible de procéder à une analyse quantitative détaillée, on ne peut se faire qu'une idée très approximative de la nature et de la quantité des minéraux qui sont présents dans ces sols.

### **I.5.2. L'analyse par différentielle thermique**

C'est une technique qui consiste à chauffer continuellement un échantillon de sol inconnu en présence d'une substance inerte de référence, dans un four électrique, à une température d'environ cent degré Celsius. La structure particulière des minéraux argileux déterminera des variations thermiques à des températures bien définies pour des minéraux donnés; les variations enregistrées peuvent ensuite être comparées avec celles des minéraux connus.

### **I.5.3. Analyse par microscope électronique à balayage et à transmission**

Ce procédé présente cependant des difficultés sur le plan de l'interprétation et ne permet pas d'obtenir des données quantitatives.

### **I.5.4. Analyse chimique**

Sur les matériaux calcaires très purs, l'analyse chimique peut se faire par attaque de l'échantillon à l'acide diluée (HCl 1/20). Pour les sols non calcaires l'attaque sera effectuée par fusion alcaline à température élevée (Voinovich, 1970).

### **I.5.5. Spectrométrie infrarouge**

La méthode apporte des informations qualitatives sur l'identification des espèces, l'évolution de la structure lors d'un traitement approprié et l'étude des hydrates. La préparation des échantillons s'effectue selon les techniques adaptées à l'étude des poudres. Chaque espèce argileuse peut être identifiée par son spectre d'absorption caractéristique.

## **I.6. Caractéristiques principales des minéraux argileux**

### **I.6.1. Surface spécifique [7]**

La dimension d'une particule est exprimée par de nombreux auteurs par le concept de surface spécifique (Bolt, 1956 ; Komornik & David, 1969 ; Giroud et Bottéro, 1972, ...). Ce concept est défini comme étant le rapport entre la surface de l'ensemble des grains solides constituant l'échantillon et son poids.

$$S_s = \frac{S}{P}$$

Etant donné que les argiles sont composées de particule fines (diamètre < 2µm), leur surface spécifique est donc très élevée.

Type de minéraux	Surface spécifique	Diamètre (µm)	Epaisseur du feuillet
Kaolinite	10-20	0,3-3	0,7
Montmorillonite	800	0,1-2	1
Illite	80-100	0,1-2	1

**Tableau [1] :** quelques données sur les minéraux argileux (Mitchell, J.K, fundamental of soil behavior) [8]

### I.6.2. La capacité d'échange cationique (CEC)

Les minéraux argileux ont la propriété d'interagir avec les cations ou les anions. L'échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l'unité structurale. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium ( $Ca^{++}$ ), le magnésium ( $Mg^{++}$ ), l'hydrogène ( $H^+$ ), le potassium ( $K^+$ ), le nitrate ( $NH^+$ ) et le sodium ( $Na^+$ ).

La Mesure de la capacité d'une argile à échanger des cations est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales (I. Lefevbre et A. Lajudie).

### I.6.3. La densité de charge spécifique [6]

La densité de charge spécifique est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\frac{CEC}{S}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques ( $Al^{3+}$  pour  $Si^{4+}$  dans la couche tétraédrique ;  $Mg^{2+}$  ou  $Fe^{2+}$  pour  $Al^{3+}$  dans la couche octaédrique), une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux.

L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. Aussi, plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement.

## I.7. Le retrait des argiles

### I.7.1. Généralités

Les déformations volumiques des sols fins sont, généralement attribuées à deux phénomènes. Elles sont dues, d'une part à la variation de la teneur en eau qui se traduit par l'interaction entre l'eau et le solide aux échelles microscopique et macroscopique, et d'autre part à la modification de l'état de contrainte dans ces sols en présence d'eau. On verra plus tard que ces interactions sont, généralement, liées entre elles et que les variations de volume de ces sols peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Rappelons que ces déformations sont propres aux sols argileux.

Un chargement dans l'environnement hydrique du sol conduit à une modification des pressions interstitielles régnant en son sein et la variation du niveau de la nappe phréatique modifie le champ de pression interstitielle aussi bien au dessous qu'au dessus du niveau de la nappe.

L'eau a un effet direct sur le comportement des sols en général et particulièrement sur le comportement des sols à grains fins. Elle est aussi, un facteur important dans la plupart des problèmes géotechniques, c'est pourquoi nous devons, avant d'aborder le phénomène du retrait, faire un rappel sur quelques notions traitant l'état de l'eau dans le sol.

### **I.7.2. Etats de l'eau dans le sol**

Les sols sont constitués d'un empilement de particules de formes diverses, séparées par des espaces vides appelés interstices ou pores et que les deux phases liquide et gazeuse occupent cet espace dans des proportions définies par le degré de saturation. La taille des pores elles même très variable et certains sont isolés, tandis que les autres forment un réseau de vides communiquant. En présence d'eau et d'air, les pores seront le lieu de phénomènes de capillarité, qui dépendent principalement de la taille des vides et du degré de saturation.

En raison de l'affinité des particules argileuses avec les molécules d'eau, dans les sols argileux, l'eau située à proximité des surfaces des particules possèdent des propriétés mécaniques particulières.

Dans les sols saturés, l'eau remplit tous les vides entre les particules. En dehors de l'eau qui entre dans la composition des minéraux (eau de constitution), on distingue l'eau liée, qui est attachée à la surface des particules solides par des forces d'interaction moléculaires de nature, essentiellement, électrique et l'eau libre ou gravifique qui peut se déplacer entre les particules sous l'effet des forces de pesanteur ou des gradients de pression.

L'eau liée est attachée aux particules de la fraction la plus fine des sols, qui sont en quasi-totalité de nature argileuse. Ces particules portent à leur surface des charges électriques négatives. L'interaction électrique entre l'eau et les particules argileuses décroît rapidement quand s'éloigne de la particule. Les premières couches de molécules d'eau (eau adsorbée ou hygroscopique) sont fortement liées et ne se déplacent pratiquement pas par rapport à la particule. La couche d'eau adsorbée est la couche des molécules d'eau liée de façon presque rigide à la particule. L'eau pelliculaire est celle qui entoure la couche d'eau adsorbée.

L'eau libre est celle qui est en dehors du champ d'attraction des particules et peut, donc, se déplacer sous l'effet de la gravité ou des gradients de pression.

L'importance dans le sol de l'eau liée dépend de la surface des particules sur laquelle les molécules d'eau peuvent s'adsorber. Cette surface, que l'on peut aussi définir comme surface totale des pores rapportée à un volume unité de matériau, est appelée surface spécifique.

Dans les sols non saturés coexiste trois phases et l'on observe, en général, que l'eau mouille la surface des particules tandis que l'air est situé plutôt au milieu des pores. Il existe plusieurs modes de remplissage des vides suivant le degré de saturation du sol.

- Sol presque saturé : la phase liquide est continue et l'eau peut circuler sous l'influence de la pesanteur. La phase gazeuse est discontinue et ne se déplace pas de façon autonome, les sols sont presque saturés pour des degrés de saturation supérieurs à 85%.
- Sol à la saturation d'équilibre : la phase liquide est encore continue mais l'eau ne peut plus se déplacer sous la seule influence de la pesanteur. La phase gazeuse est aussi continue mais, en général, ne circule pas.
- Sol faiblement saturé : l'eau entoure les particules et occupe des volumes discontinus à leurs points de contact (on parle d'eau pendulaire). La phase liquide est toujours continue par l'intermédiaire des pellicules d'eau adsorbée mais ne se déplace que très lentement. La phase gazeuse est continue mais généralement immobile. L'évaporation de l'eau à l'intérieur des pores du sol, bien que très lente, peut devenir un phénomène important.

Le passage de l'état presque saturé à l'état de saturation d'équilibre peut se produire par un simple écoulement gravitaire de l'eau. Pour passer à l'état faiblement saturé, il faut l'intervention d'un autre phénomène : évaporation ou aspiration de l'eau. Si la teneur en eau continue de diminuer, on ne conserve plus dans le sol que l'eau liée. En fin, il faut savoir que les interactions entre les différentes phases sont contrôlées par leurs tensions superficielles.

#### **I.7.2.1. La capillarité**

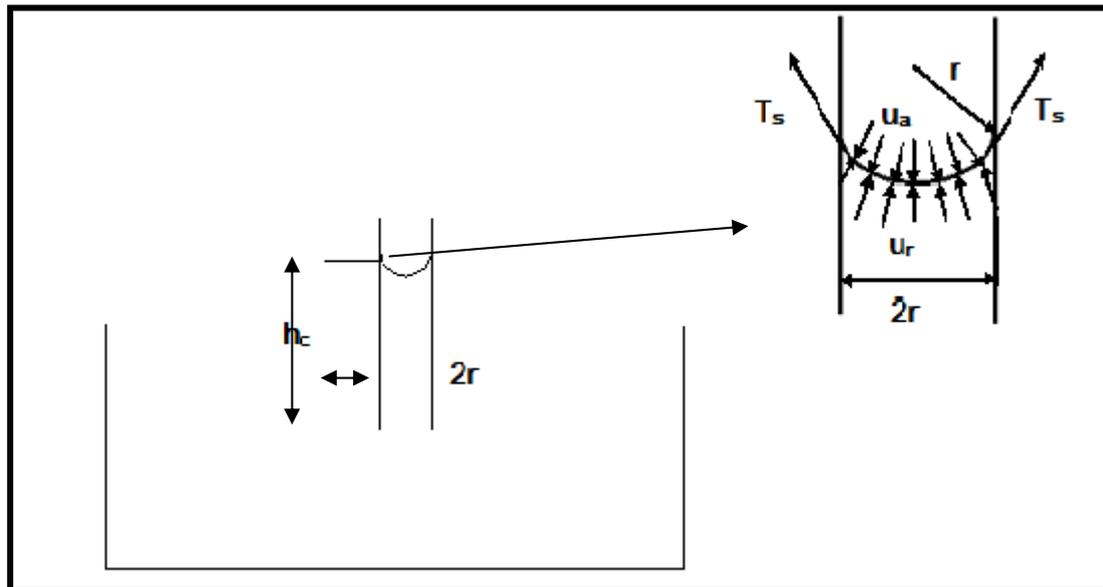
Le phénomène de capillarité découle d'une propriété des fluides appelée « tension superficielle » qui se développe à l'interface de matériaux différents. A l'intérieur d'un volume de sol, ce phénomène se produit lorsque l'eau, les grains et l'air entrent en contact.

Essentiellement, la tension superficielle résulte des forces d'attraction inégales entre les molécules qui se trouvent à l'interface des minéraux en présence.

Pour visualiser l'effet de la capillarité entre les grains des sols, on peut se représenter les vides d'un sol en les comparant à des vides capillaires. Ainsi, les forces d'adhésion qui, s'exercent entre les parois de verres d'un tube et l'eau contenue dans le tube, vont forcer l'eau à remonter et à former un ménisque entre l'eau et les parois du tube.

La hauteur d'ascension sera inversement proportionnelle au diamètre du tube ; plus le diamètre est petit plus la hauteur d'ascension sera grande.

Le ménisque, ainsi, formé est concave vers le haut et l'eau comme accrochée aux parois du tube.



**Figurea I.10:** Phénomène d'ascension capillaire

L'ascension dans le tube capillaire est régie par la loi de « Jurin », qui exprime simplement que la tension superficielle  $T_s$  équilibre le poids de l'eau dans le tube.

Pour un tube de rayon  $r$ , il convient ainsi :

$$P_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r}$$

La hauteur d'ascension capillaire est donnée par la relation suivante :

$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{r \gamma_w}$$

c'est cette capillarité ou plus exactement la pression capillaire qui a pour effet de lier les grains de sol entre eux (plus cette tension est grande plus l'attraction entre les grains est importante) : ce qui se explique, d'ailleurs, pourquoi certains talus de sables peuvent tenir à la verticale ; il s'agit en fait, d'une cohésion apparente créée par l'humidité qui entoure chaque grain.

### I.7.2.2. La succion

La différence entre les pressions de l'air et de l'eau est appelée pression capillaire. En géotechnique, on l'appelle, aussi, succion. La mesure de la saturation des vides d'un échantillon situé à la hauteur «  $h_c$  » au dessus de la surface liquide conduit aux résultats de la figure I.11. L'unité normale de la succion est le pascal (Pa). Toute fois, compte tenue de l'amplitude très grande des variations de la succion, une échelle logarithmique est utilisée. On définit le potentiel de succion par :  $pF = \lg (h_c)$ , exprimée en centimètre.

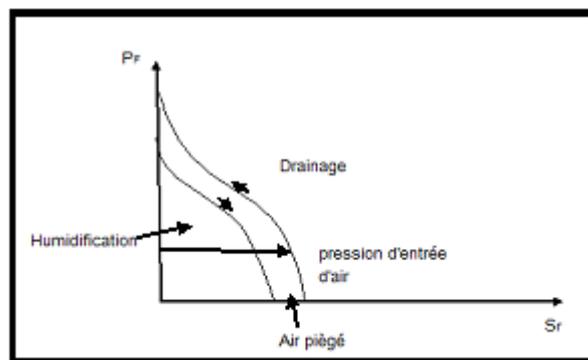
La relation entre la succion (ou le potentiel de succion  $pF$ ) et la saturation du sol dépend du rayon de courbure moyen des surfaces de contact et des conditions de mouillage de la surface

des particules : elle sera donc différente selon la nature des minéraux, la taille des particules, la taille et la géométrie des pores, et aussi la composition de l'eau et du gaz interstitiels.

La figure I.11 montre l'allure de la relation entre le potentiel de succion  $pF$  et le degré de saturation  $S_r$ . si l'on part d'un état de saturation total du sol et que l'on diminue progressivement la pression de l'eau, on suit la branche ascendante de la courbe (courbe de drainage), jusqu'à une certaine valeur de la succion, appelée « pression d'entrée d'air », l'air ne peut pénétrer dans les pores du sol. Ensuite, la teneur en eau diminue progressivement et tend vers une asymptote correspondant à un degré de saturation nul, puisque l'eau liée aux particules est comptée comme partie de la phase solide. Toutefois, il reste une petite quantité d'eau dans le sol et l'on définit parfois une valeur minimale du degré de saturation (teneur en eau irréductible).

La figure I.11 comporte une seconde courbe (courbe d'humidification), qui correspond à la même relation  $pF(S_r)$ , lorsque l'on humidifie le sol à partir d'un état très sec au lieu de le sécher à partir d'un état saturé. La courbe d'humidification part de la même asymptote et atteint l'axe horizontal à une valeur de degré de saturation inférieur à 100%. La différence correspond au volume de l'air piégé dans les pores du sol. Elle peut se réduire au cours du temps, par écoulement et dissolution de l'air dans l'eau.

La différence entre les courbes de drainage et d'humidification s'explique par la forme différente des interfaces eau-air à l'intérieur des pores suivant le sens du mouvement de l'eau, par les effets de seuil entre les pores et par le piégeage d'une partie de l'air.



**Figure I.11:** relation entre le potentiel de succion et le degré de saturation

Il est important de remarquer qu'un état de contraintes donné du sol (teneur en eau, gonflement, retrait, etc...) dépend du chemin de contrainte utilisé pour y parvenir. En effet, on constate phénomène d'hystérésis sur la courbe (succion- degré d'humidité) selon que l'on travaille en drainage ( $pF$  croissant) ou en imbibition ( $pF$  décroissant).

On retient que la valeur de la succion à une teneur donnée dépend du chemin parcouru pour arriver à cette teneur en eau, du fait du phénomène d'hystérésis.

De nombreux auteurs se sont penchés sur le problème de l'hystérésis et ont essayé d'en donner des explications.

Le non uniformité des formes géométriques des pores individuels, (qui sont, généralement, des vides de forme irrégulières, interconnectés par des passages plus petits), est l'une des explications du phénomène d'hystérésis. Ce phénomène peut être, également, relié à l'effet d'angle de contact entre l'eau et la paroi solide du pore qui est plus grand pour un ménisque qui avance pour un ménisque qui recule. Cet effet peut se produire, aussi, à cause de la rugosité de la surface, de la présence ou de la distribution d'impuretés adsorbées à la surface du solide, et du fait du mécanisme d'adsorption et de désorption des molécules liquides au cours du déplacement de l'interface.

La teneur en eau en drainage pour une succion donnée est supérieure à la teneur en eau en imbibition. Il semble qu'en imbibition (humidification), sur toute l'énergie correspondant à un niveau de succion, une partie est dépensée en déformation et une autre partie est dépensée de façon irréversible (par exemple en chaleur de mouillage des solides).malheureusement, bien que plusieurs auteurs se soient penchés sur ce problème, l'hystérésis est un phénomène encore très mal connu et mériterait des études plus approfondies.

### I.7.2.3. Succion et teneur en eau du sol

Dans un sol en équilibre avec une nappe d'eau libre à la même cote, la pression hydrostatique et la succion sont nulles. En appliquant une faible succion et en la faisant croitre progressivement, on arrive à une valeur critique pour laquelle le pore le plus grand commence à se vider. Cette valeur de succion est appelée « succion d'entrée d'air ». en continuant d'augmenter la succion, la quantité d'eau drainée croit et des pores de plus en plus petits se vident. On obtient ainsi la courbe caractéristique de la teneur en eau du sol, encore appelée courbe de rétention d'eau figure I.12.

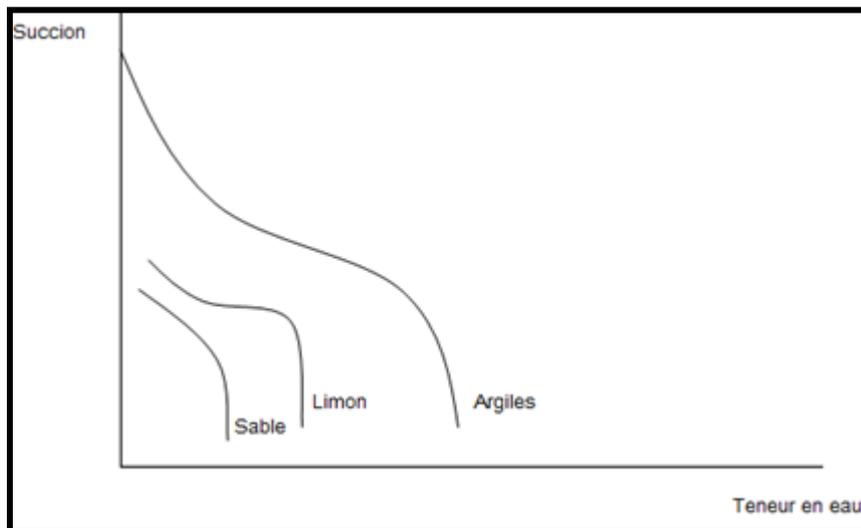


Figure I.12 : Courbe de rétention d'eau de différents sols (d'après Dysli, 1991)

La figure I.12 montre les courbes de rétention d'eau en dessiccation pour un sable, un limon et une argile. On constate que les variations de la succion sont plus importantes pour l'argile.

Ceci explique la grande différence des succions nécessaires pour désaturer le sol, quand on passe des sols fins aux sables.

#### I.7.2.4. La consistance [1]

La consistance est définie comme un état de fermeté, elle est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents. Elle a une grande influence sur la résistance aux déformations. Selon la quantité d'eau interstitielle que contiennent les pores d'un sol et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées autour de ces grains, sa consistance peut varier dans de larges limites. On distingue quatre états de consistance :

L'état solide : Lorsque le sol à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbées sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il y ait rupture.

L'état semi-solide : Un sol à l'état semi-solide a une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoique encore minces, sépare légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures.

L'état plastique : Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. C'est un sol qu'on peut façonner à la main.

L'état liquide : Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre.

#### ❖ Les limites d'Atterberg

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg. Ces limites sont les suivantes :

- ✚ La limite de liquidité  $w_L$  : C'est la teneur eau à partir de laquelle une argile donnée cesse d'avoir un comportement de solide et commence à s'écouler sous son poids propre comme un liquide. Elle sépare l'état liquide de l'état plastique.
- ✚ La limite de plasticité  $w_p$  : C'est la teneur en eau à partir de laquelle, une argile donnée cesse d'être plastique, c'est-à-dire aisément déformable sans fissuration, et devient fragile et sensible à la fissuration dès les petites déformations. Elle sépare l'état plastique de l'état semi-solide.
- ✚ La limite de retrait  $w_s$  : C'est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.

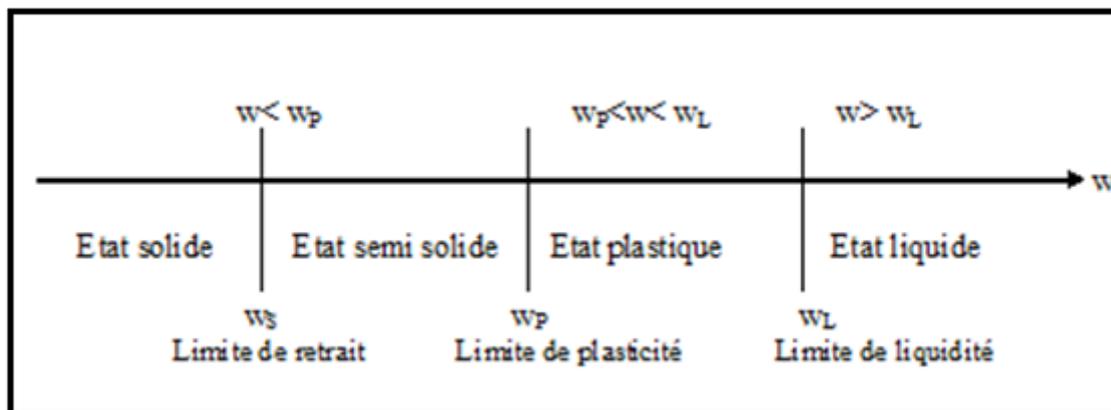


Figure I.13: Limite d'Atterberg, teneur en eau naturelle

La mesure de ces deux teneurs en eau,  $w_L$ , et  $w_P$ , s'effectue sur des échantillons remaniés, puisqu'il faut isoler, puis reconstituer la fraction argileuse, et leurs valeurs sont propres à un mode opératoire donné et normalisé. Ces valeurs sont de réels indicateurs du comportement des sols argileux naturels en fonction de leur teneur en eau. Par exemple, un sol argileux qui, in situ, présenterait en permanence ou cycliquement une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, aurait un comportement mécanique extrêmement médiocre.

Plus est grande la différence entre  $w_L$  et  $w_P$  et plus grande l'aptitude de l'argile à acquérir de l'eau et donc plus étendu son domaine de comportement plastique. On désigne par  $I_P$  l'étendue du domaine plastique, tel que :  $I_P = w_L - w_P$ .

La différence entre une argile saturée et une argile non saturée est fondamentale, car les lois mécaniques qui régissent ces deux états ne sont pas les mêmes. Les sensibilités aux variations de volume sont très différentes, selon que, l'argile est déjà saturée ou non, lors de la variation de sa teneur en eau.

Les trois teneurs en eau  $w_L$ ,  $w_P$  et  $w_S$  (Limites d'Atterberg) sont considérées comme des paramètres d'identification fondamentaux.

### I.7.3. Le phénomène de retrait

Le retrait consiste en une diminution du volume du sol due à l'évaporation de l'eau présente dans ces pores. Au cours de la dessiccation, l'augmentation de la succion provoque le départ d'eau située entre les empilements élémentaires, ce qui a pour effet une diminution de la distance interfoliaire. Ce phénomène se poursuit et l'état d'hydratation de l'espace interfoliaire change, l'eau interfoliaire tend à s'éliminer. Le nombre de feuillets par empilement croît. Le départ d'eau progressif provoque ainsi une réduction de volume de la particule argileuse par diminution de la distance interfoliaire. Cette réduction de volume des particules argileuses produit une contraction macroscopique du matériau ; c'est le phénomène de retrait. Cette contraction du matériau s'interrompt à partir d'un certain seuil de succion, la teneur en eau correspondante étend la limite de retrait, il y a de plus, au cours du séchage, un développement de la macroporosité due à la contraction des agrégats.

Sur un autre plan, lorsqu'un échantillon est asséché (dessiccation), des ménisques se forment autour de ses grains. Il en résulte une augmentation des contraintes intergranulaires (effectives) et le sol diminue de volume. Au fur et à mesure que le retrait progresse, les ménisques deviennent de plus en plus petits et les tensions capillaires augmentent, ce qui se traduit par une diminution de volume. Il finit par atteindre un point où son volume cesse de diminuer, tant dis que son degré de saturation est encore voisin de 100%.

On désigne la teneur en eau à laquelle se produit ce phénomène comme la limite de retrait  $w_r$ . Cette limite constitue l'une des limites d'Atterberg.

A cette teneur en eau précise, les ménisques capillaires commencent à pénétrer la surface du sol dont la couleur passe du brillant au mat (la réflexion de la lumière ambiante est différente).

Les sols à la limite de retrait auront un indice des vides très faible à cause d'une tension capillaire très élevée ; cette indice des vides sera donc inférieur à celui qu'on pourrait obtenir par compactage, par exemple.

Dans un sol non saturé, la contrainte effective  $\sigma'$  est liée à la contrainte totale  $\sigma$ , la pression de gaz (en générale de l'air)  $u_a$  et la pression de l'eau  $u_w$  qui règnent dans les interstices entre les particules par la relation :

$$\sigma = F(\sigma - u_a) + G(u_a - u_w) \quad (1)$$

qui devient  $\sigma = (\sigma - u_w)$ , lorsque le sol est saturé. (2)

Les différentes pressions de l'air ou de l'eau sont comptées par rapport à la pression atmosphérique ambiante.

La relation (1) montre que, si la contrainte totale  $\sigma$  et la pression de l'air  $u_a$  restent constantes et que la pression  $u_w$  diminue à la suite d'un abaissement du niveau de la nappe phréatique, le terme de succion  $G(u_a - u_w)$  croît, entraînant une augmentation de la contrainte effective, ce qui aura par effet de comprimer le sol et provoquera un retrait qui évoluera jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse.

Par des effets capillaires, les sols situés au dessus du niveau phréatique, niveau défini tel que  $(u_a - u_w) = 0$ , restent saturés sur une hauteur importante pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètre dans les sols argileux et avec une pression interstitielle de l'eau  $u_w$  négative.

Dans ces sols, tout départ partiel d'eau conduisant à une diminution de la teneur se traduit par une augmentation de la succion.

Si l'on se réfère à la pression atmosphérique, cette augmentation de succion est équivalente à la diminution de la pression interstitielle  $u_w$  et, par conséquent, à une augmentation de la contrainte effective et les effets sur les variations de volume seront les mêmes que précédemment et se manifesteront par une diminution de volume du sol ou retrait et donc par un tassement en surface, également. Tant que le sol reste saturé, cette diminution de volume équivaut sensiblement au volume de l'eau extraite.

Une augmentation de succion d'un sol peut être provoquée par les phénomènes conduisant à une diminution de la teneur en eau de ce sol, telle que une dessiccation due à la sécheresse (évaporation de surface, baisse de niveau de la nappe phréatique, succion de l'eau du sol par les végétaux, etc).

Dans le cas de la dessiccation, l'augmentation de la succion est généralement concentrée dans la partie superficielle du sol et conduit à un retrait qui peut même provoquer des fissures.

### **I.8. Conclusion**

L'analyse générale de la structure des argiles illustre la complexité de leur comportement. De nombreux comportement des argiles ont été éclaircis ces dernières années. Toutefois, bien des phénomènes sont toujours en cours d'étude, tels que les variations de volume, qui sont d'une complexité élevées et dont les conséquences sont des pathologies d'ouvrages et des dommages dans les structures.

# CHAPITRE II : TECHNIQUES DE STABILISATION DES SOLS

## INTRODUCTION

La stabilisation est pratiquée de longue date. On a pu envisager l'application de la stabilisation à la réalisation de pistes, de routes, pistes d'envol pour avion etc....

Le problème que pose l'utilisation traditionnelle de la terre, est donc un problème de durabilité. C'est ce qui explique en grande partie l'abandon de ce matériau primitif malgré son excellent avantage de d'isolation thermique. Alors le recours à la stabilisation pour améliorer les caractéristiques de la terre est le moyen qui attire l'attention des spécialistes.

### II.1. Béton de terre

On appelle béton de terre, un mélange dosé de graviers, de sable et de limon lié par de l'argile.

### II.2. Le béton de terre stabilisée

On appelle béton de terre stabilisée le mélange d'un béton de terre à granulométrie étudiée à un agent stabilisant (ciment, chaux,..). Certains auteurs préfèrent, employer le terme « géo-béton » ou « sol ciment » afin de montrer qu'il s'agit de matériau nouveau doté de nouvelles caractéristiques mécaniques et qui permettent la réalisation d'habitation suffisamment esthétique et durable.

En géotechnique routière, d'autres auteurs comme VANDER et VERDEYEN, utilisent d'autres vocables fréquemment employés lors des réalisations routières. On appelle :

- Mortier d'argile ou d'une façon plus générale, mortier de sol : un sol complexe contenant du limon, de l'argile, ou d'autres sols et ne laissant aucun résidu sur le tamis de 0,5mm.
- Béton d'argile ou d'une façon plus générale, béton de sol: un mélange de gravier et de mortier d'argile ou de sol ne laissant aucun résidu sur le tamis de 25mm.

### II.3. Définition de la stabilisation

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière. [9]

Ou encore, on appelle stabilisation des sols, l'ensemble des procédés permettant d'améliorer leurs caractéristiques. [10]

#### II.4. Principaux objectifs de la stabilisation [9]

La stabilisation répond à un certains nombre d'objectifs qui sont:

- ❖ réduire le volume des vides entre les particules solides (porosité).
- ❖ colmater les vides qui ne peuvent être supprimé (perméabilité).
- ❖ créer des liens ou améliorer ou améliorer les liaisons existantes entre les particules (résistance mécaniques).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques: augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement;
- Obtenir une meilleure cohésion ;
- Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau ;
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser ;
- Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait. Il est entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible.

#### II.5. Différents procédés de stabilisation

Un procédé de stabilisation peut être défini comme une méthode physique, physico-chimique, ou chimique permettant à un sol, à une terre, de mieux satisfaire aux exigences qu'impose son utilisation dans un ouvrage. [10]

Pour résoudre un problème de stabilisation, il sera donc nécessaire de connaître :

- ✚ Les propriétés de la terre à traiter
- ✚ Les améliorations souhaitées
- ✚ Les produits, matériaux, ou procédés utilisables
- ✚ Les diverses technologie de mise en œuvre
- ✚ Les exigences de réalisation de l'ouvrage ; tels que coûts et délais.

Les différents procédés de stabilisation sont décrits dans le tableau qui suit d'après Hugo Houben et hubert Guillaud . [9]

Stabilisant	Nature	Procédé	Moyens	Principe	
Sans apport de stabilisant		Mécanique	Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires	
Avec apport de stabilisant	Stabilisants inertes	Minéraux	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement	
		Fibres			
	Stabilisation physico-chimique	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement
				Liaisonner	Former de liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile
		Hydrauphobants		Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux
				Hydrofuger	Éliminer au maximum l'absorption et l'adsorption d'eau

Tableau [2] : Moyens de stabilisation des terres remaniées

### II.5.1. Stabilisation mécanique

C'est une stabilisation sans apport de stabilisant. Dans la stabilisation de terre remaniée, le sol doit être extrait en lieu pour être mis en œuvre en un autre lieu. La construction en terre (digues, pistes, routes, bâtiments) nécessitant la plus part du temps l'utilisation de terres remaniées est donc concernée par ce mode de stabilisation.

La stabilisation mécanique comprend deux méthodes :

#### II.5.1.1. Stabilisation par dessiccation

C'est une technique très ancienne, qui consiste à mouler la terre avec une teneur en eau élevée, sans compactage et à laisser les briques séchés au soleil. Elle a pour effet l'augmentation de la cohésion du matériau. Il est souhaitable de limiter les dimensions des éléments pour réduire les risques nuisibles de fissuration et de retrait.

### II.5.1.2. Stabilisation par compactage (densification)

Le compactage est la méthode de stabilisation la plus ancienne et la plus importante. Il consiste en une réduction de volume pratiquement instantanée du sol dû à la réduction des vides remplis d'air. Il n'y a aucune expulsion d'eau. Il peut entraîner aussi bien une modification de la teneur en eau qu'une modification de la granulométrie. Le compactage à lui seul peut souvent résoudre un problème particulier de sol, en outre il entre pour une part essentielle dans nombre d'autres méthodes de stabilisation.

Les objectifs atteints lors du compactage sont essentiellement les suivants :

- ✚ Limiter sinon supprimer les vides (rapprochement des grains en modifiant leur arrangement) ;
- ✚ Augmenter l'imperméabilité du sol compacté ;
- ✚ Améliorer les caractéristiques du sol.

Le compactage est influencé par certains paramètres, Proctor (1933) démontre que le compactage est fonction de la masse volumique du sol, de la teneur en eau, de l'énergie de compactage, de la méthode de compactage utilisée et enfin du type de sol (granularité, présence des minéraux argileux).

- **Méthodes de compactage**

Les modes de compactage sont nombreux, les plus importants peuvent être dynamique, statique et par vibration ou toute association de ces actions. Les procédés statiques sont en général plus efficaces pour les sols riches en éléments fins, alors que pour les sols nantis en éléments grossiers la vibration est la plus efficace. C'est ainsi que les presses sont tout à fait adaptées à la confection des briques d'argile, alors que le béton frais riche en gravier se densifie bien à l'aide d'aiguilles vibrantes.

Melbouci (1991) a étudié ces différents modes de compactage sur les résistances d'une argile limoneuse et a souligné les points suivants :

- L'analyse des modes de compactage montre que le compactage dynamique améliore considérablement les propriétés physiques de béton de terre stabilisé ;
- Alors que pour le vibro-compactage n'apporte pas de gains de résistance par apport au compactage statique et que la vibration n'améliore pratiquement pas la densité sèche. [11]

- **La teneur en eau**

Quand on compacte un sol à une énergie constante, la masse volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) augmente avec la teneur en eau ( $\omega$ ) jusqu'à une valeur maximale. Au delà de cette valeur, l'accroissement de la teneur en eau réduit la masse volumique du sol sec. [1]

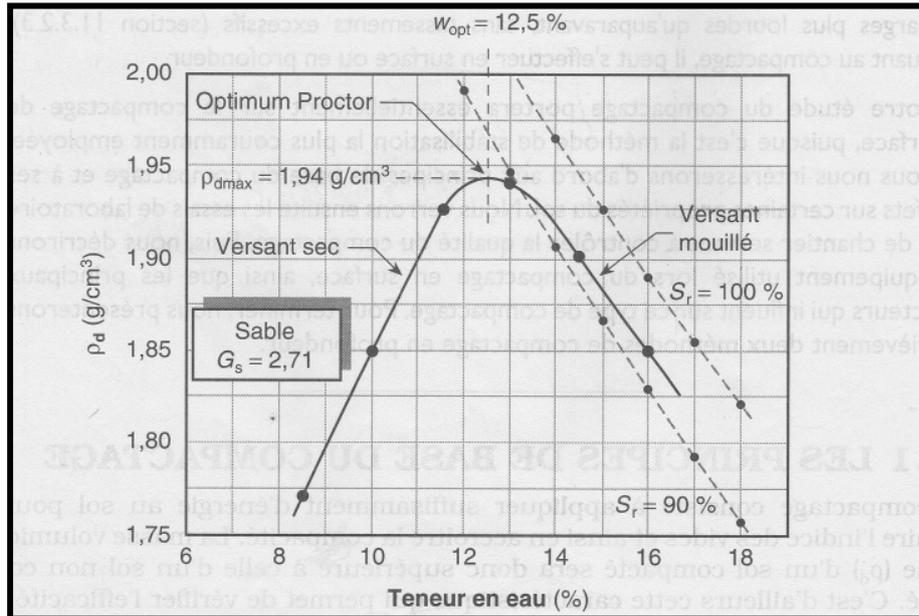


Figure II.1 : Courbe de compactage

- L'énergie de compactage

L'énergie de compactage est l'énergie mécanique transmise à un volume de sol pour y réduire l'indice des vides. Elle est appliquée par l'une des méthodes citées précédemment.

Pour toutes les méthodes de compactage, la résistance de sols traités croît avec l'énergie de compactage pour toute teneur en eau. A chaque niveau d'énergie de compactage correspond, en principe, une teneur en eau optimale (densité sèche maximale) qui diminue à fur et à mesure que l'énergie croît.

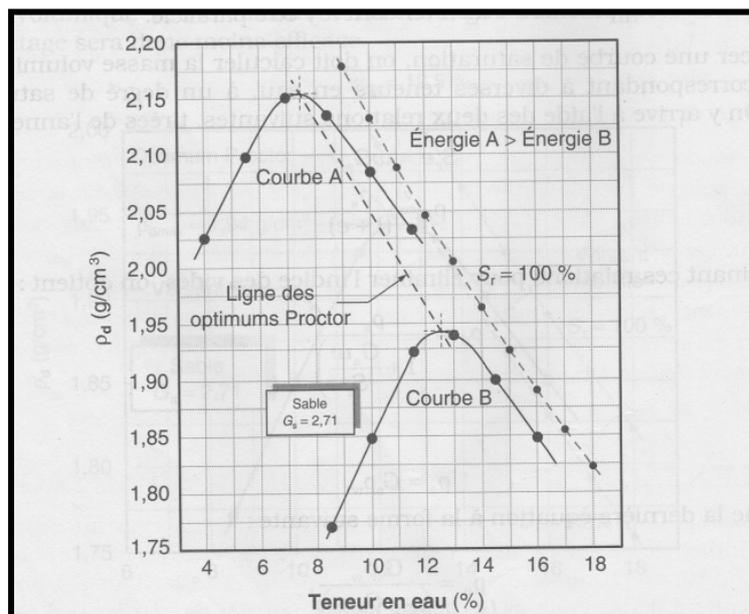
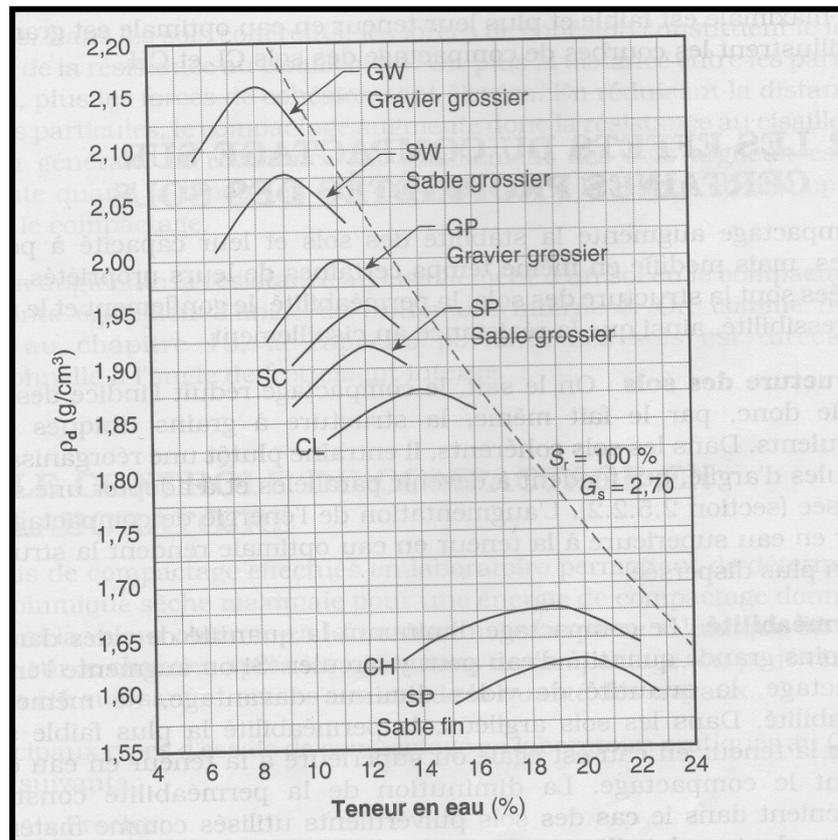


Figure II.2 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor

• **La granulométrie**

La granulométrie d'un sol influe sur la valeur de l'optimum Proctor. De façon générale, on constate que, plus les particules d'un sol, sont grosses, plus sa masse volumique sèche maximale est élevée et plus sa teneur en eau optimale est faible. Dans le cas des sables fins à granulométrie serrée, l'inefficacité du compactage est telle qu'il est difficile d'établir une relation entre la masse volumique du sol sec et la teneur en eau. Quand aux sols cohérents, plus ils sont plastiques, plus la masse volumique sèche maximale est faible et plus leur teneur en eau est optimale est grande.



**Figure II.3 :** Influence de la granulométrie sur l'optimum Proctor

En même temps le compactage a des effets sur les propriétés physiques suivantes :

- La masse volumique du matériau sec ;
- La structure du sol ;
- La résistance au cisaillement et les déformations.
- La compressibilité ;
- La perméabilité du sol.

Enfin, le compactage en réduisant la porosité du matériau, en améliore les caractéristiques physiques et mécaniques. Mais on doit noter que s'il est le seul procédé de stabilisation utilisé, les améliorations obtenues ne seront pas, pour les matériaux fins irréversibles. Toute construction en terre se dégrade à long terme sous l'action de l'eau ce qui oblige à les protéger et

montre l'intérêt des produits qui, ajoutés à la terre, réduisent sa sensibilité à l'eau : les stabilisants.

### **II.5.2. La stabilisation physique**

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées en intervenant sur la texture du mélange constitué de fraction de grains différents.

Il s'agit d'une stabilisation avec apport de stabilisants chimiquement inertes. Ces stabilisants agissent essentiellement sur la composition granulométrique du matériau, donc sur les propriétés mécaniques. Généralement, ils sont plus ou moins stables, leur friction interne est forte à l'état sec ils n'ont aucune cohésion ni plasticité interne.

Ces stabilisants ajoutés à des sols réduisent les effets néfastes du retrait. On peut évoquer :

#### **II.5.2.1. Les minéraux**

Les sables et graviers dont le rôle favorable est bien connu et est particulièrement bien exploité dans les pisés

#### **II.5.2.2. Les fibres [9]**

Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou à l'état plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait.

Les fibres peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres stabilisants, avec le ciment, avec la chaux ou le bitume.

On utilise trois variétés de fibres lors de la stabilisation :

1. Les fibres végétales : Pailles de toutes espèces : orge, seigle, blé, froments, escourgeons, lavande et balle de céréales telles que riz et orge, etc .....
2. Les fibres animales : poils et crins du bétail.
3. Les fibres synthétiques : cellophane, aciers, fibres de verre.

Les fibres végétales ou animales sont très efficaces peu chère et que l'on utilise dans la confection des briques.

Le rôle des fibres est d' :

- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions due au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.

- Alléger le matériau. Le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.
- Augmenter la résistance à la traction ; sans doute le plus grand intérêt des fibres.

Pour les sols argileux un bon compactage est absolument nécessaire et l'adjonction de stabilisants inertes permet toujours d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques acceptables. Cependant ils ne réduisent guère la sensibilité à l'eau ; sous l'action de laquelle une dégradation du matériau est généralement très rapide. Alors dans ces conditions on a recours à la stabilisation physico-chimique.

### II.5.3. Stabilisation chimique : ou stabilisation physico-chimique

Cette technique à sans cesse progresser depuis que sont mieux connues les forces d'interactions entre les particules de sol et l'eau.

Stabilisation chimique est une stabilisation avec apport de stabilisant. A la terre, on ajoute un matériau ou un produit chimique qui modifie les propriétés, soit du fait d'une réaction physico-chimique entre les particules et les particules et le matériau (ou le produit) soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. La réaction physico-chimique peut entraîner la formation d'un nouveau matériau : composé pouzzolanique issu d'une réaction entre l'argile chaux par exemple.

Lors d'une stabilisation physico-chimique, les améliorations constatées sur le sol traité sont dues à plusieurs mécanismes dont les principaux sont la capacité d'échange cationique, la floculation, le rapprochement des grains, la carbonatation et la formation d'un ciment. Chacun de ces mécanismes joue un rôle, le principal étant toutefois celui de la formation d'un ciment composé principalement de silicate de calcium hydraté ou/et d'aluminate de calcium hydraté (Le Roux, 1969) ; (Vinuat, 1980)

Pour les sols argileux quand ils sont stabilisés mécaniquement (par compactage), physiquement par apport de stabilisants inertes et que la sensibilité à l'eau persiste on tente alors la stabilisation soit avec un liant ou avec un hydrophobant, mais l'action de ces produits, toujours complexe est mal connue.

Les stabilisants physico-chimiques sont :

1. Les hydrophobants
2. Les liants

L'action de ces stabilisants peut se développer de deux façons différentes :

- Ils peuvent, soit rendre superficiellement le béton hydrofuge ou étanche,
- Soit de réagir avec les composantes de la terre et former à l'intérieur de la masse de béton une armature rigide qui s'oppose aux variations de volume,
- Le liant aura à confier au béton de terre stabilisé la résistance et la durabilité.

## II.6. Stabilisation par addition de liants

Les liants sont des produits qui agissent sur les sols de façon purement mécanique en leur apportant soit un supplément de cohésion, par suite de leur durcissement ou de leur viscosité propre, soit une insensibilisation à l'eau.

### II.6.1. Le bitume

Le bitume désigne un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Pour être utilisable le bitume doit être chauffé ou mélangé à des solvants, donnant alors des bitumes fluidifiés ou des cut-back, ou dispersé dans de l'eau en émulsion. Les deux dernières préparations sont celles qui sont employées en stabilisation.

L'emploi du bitume comme stabilisant est très ancien. L'historien grec Hérodote évoque son emploi à Babylone au V<sup>e</sup> siècle avant notre ère pour la confection du mortier de pose de briques crues moulées.

La stabilisation d'une terre au bitume porte sur les particules fines (argiles et limons) qui sont les éléments instables en présence d'eau. Ainsi la stabilisation de la partie argileuse suffit à stabiliser l'ensemble de la terre.

Le bitume fluidifié ou en émulsion se présente sous la forme de globules microscopiques en suspension dans un solvant ou l'eau. Après mélange du liquide au sol, le solvant s'évapore, les globules de bitume s'étire en films très fins, forment un revêtement solide adhérent à la surface des particules de sol qu'il enrobe, ainsi, il réduit la sensibilité à l'eau et augmente légèrement la résistance à la compression humide : une fois sec, le matériau aura pratiquement les mêmes caractéristiques mécaniques que le sol non traité. Cependant, les particules d'argile ne peuvent plus absorber d'eau (ni perdre leurs cohésion), le sol est donc plus résistant à l'eau.

La présence, dans la terre, de matières organiques et sulfates gêne l'efficacité de la stabilisation au bitume car leur adhérence aux particules nuit à l'adhérence du bitume. Les matières organiques acides (terre de forêts) sont très néfastes. Les matières organiques neutres et alcalines des régions arides et semi-arides ne sont pas particulièrement nuisibles. Les sels minéraux sont aussi très néfastes.

Les effets du bitume se résument en ce qui suit :

Le bitume provoque une baisse de la densité et accroît la teneur en eau optimale en liquide (eau+bitume).

La résistance à la compression ; à l'état sec elle augmente avec la proportion de bitume jusqu'à un certain seuil au delà duquel elle chute dangereusement car le bitume en excès joue le rôle de lubrifiant, une fois l'enrobage idéal réalisé. A l'état humide la résistance croît régulièrement avec la quantité de bitume, indépendamment de la résistance à sec.

Absorption : elle est fonction de la teneur en eau durant le malaxage et devient très faible à partir d'un certain seuil qu'il convient de déterminer. Après un séchage de quelques jours, l'absorption d'eau reste stationnaire dans le temps.

Gonflement : il est fonction de la teneur en liquide au malaxage. Plus le malaxage est effectué à l'état liquide, moins on observe le gonflement.

Ce matériau nécessite un moyen de chauffage onéreux. Il a pour effet de relier entre elles les particules du matériau terre par une fine couche empêchant ainsi tout contact entre l'eau et les particules argileuses. Cet ajout diminue la résistance mécanique du matériau terre. La couleur sombre qu'il confère aux blocs traités porte atteinte à leur esthétique.

### II.6.2. Le ciment

Le ciment portland est l'un des agents stabilisants les plus employés, les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915, ce procédé est défini par Vander [9] de la manière suivante : « la prise et le durcissement du ciment incorporé à un béton de sol, lui confèrent la cohésion nécessaire pour assurer la stabilité. La présence du ciment diminue aussi le pouvoir de gonflement des plus fines particules. Les sols ainsi traités sont appelés « SOL CIMENT ».

Tous les ciments normalisés conviennent en principe pour la stabilisation des sols, la préférence est donnée néanmoins aux ciments de classe faibles car une grande résistance n'est pas nécessaire Venuat (1980) et Doat, 1979. Vilenkina (1956) propose d'employer des ciments CLK ou CPA de classe supérieure à 30 ; Bezrouk (1956) conseil l'utilisation de ciment riche en  $C_3S$  et  $C_2S$  de classe supérieure à 30. Il a trouvé que la résistance des différents types de sols croît avec la finesse de mouture de ciments. D'autres auteurs Doat et al, (1981) préconisent cependant un type de ciment selon la nature du sol :

- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en  $C_3S$  et  $C_2S$  qui donne beaucoup de portlandite,  $Ca(OH)_2$  en s'hydratant. Verdeyen (1971) conseil le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30% ( $I_p < 25\%$ ) ;
- Sol susceptible de contenir des eaux agressives : emploi de préférence de ciment riche en  $C_3A$  ou à forte teneur en laitier. Enfin Craterre propose un traitement au ciment pour certaines catégories de sol définis par la limite d'Atterberg et rejette le ciment à trop forte teneur en constituants secondaires. En ce qui concerne les teneurs en ciment, les propriétés du matériau stabilisé sont meilleures pour des teneurs plus fortes.

[9] Presque toutes les terres sont stabilisables au ciment. Certains critères d'orientation permettent de voir quels sont les sols susceptibles d'être économiquement stabilisés au ciment. Ils sont principalement basés sur l'examen des caractéristiques granulométriques et les limites d'Atterberg. L'équivalent de sable et les caractéristiques chimiques complètent ces données.

Ces critères ont été rassemblés par le centre de recherches routières de Belgique dans la recommandation CRR-R22/60. [13]. Ces critères sont les suivants :

1°/ la granulométrie

2°/ la limite de liquidité  $WL < 40\%$  et l'indice de plasticité  $0 \leq I_p \leq 18$  ;

3°/ équivalent de sable ES doit être compris entre 0 et 50 ;

4°/ caractéristique chimiques :

\*la présence des sulfates dans le sol ou dans l'eau de gâchage doit être évitée, car les rend impropre à la constitution d'un sol ciment à cause de leur effet expansif, lorsqu'ils se combinent avec le ciment.

\*les matières organiques retardent et contrarient la prise de ciment.

Lorsque la teneur en matière organique est supérieure à 2%, sa stabilisation n'est en règle générale, pas économique.

\*on peut stabiliser une grande variété de terrains, depuis les sablonneux jusqu'à ceux qui sont franchement argileux.

Le rôle du ciment dans le sol stabilisé, est double. D'une part ; il produit un effet liant, donnant de la cohésion aux terrains granulaires qui n'ont pas ; d'autre part ; il abandonne de la chaux, qui modifie les propriétés de l'argile en diminuant sa plasticité.

### **II.6.3. La chaux**

Il ya quelques années, on a commencé à utiliser la chaux au lieu du ciment pour la stabilisation des sols, surtout de ceux constitués par des argiles fortes (très plastiques).

L'action de la chaux sur les argiles n'est pas encore bien définie. Il semble qu'elles agissent sur les bases de permutation en abaissant l'indice de plasticité et en formant, en outre, une espèce de ciment naturel, composé de silicates alumino-calcique complexes. On ne possède pas dans ce domaine une longue expérience comme dans les cas précédant. L'étude de ce type de stabilisation présente un grand intérêt, vue le bas pris de la chaux. Cette technique sera développée dans le chapitre qui suit.

### **II.7. Technique de stabilisation à la chaux**

L'emploi de la chaux comme stabilisant de sol remonte aux premiers Romains qui l'on utilisée pour la construction de leurs routes, et spécialement de la voie Appienne. Cette route depuis sa construction d'excellents service et sert encore au trafic. Aux Etats-Unis, l'emploi de la chaux comme matériau de construction de route remonte seulement à 1920. Depuis la seconde guerre mondiale, l'emploi de la chaux comme agent de traitement du sol s'est considérablement accru.

Les sols traités doivent contenir une partie argileuse non négligeable puisque c'est sur elle que la chaux réagit. Selon la nature des minéraux argileux présents dans le sol (Kaolinite, illite, montmorillonite,...), les résultats obtenus varient sensiblement. Bien que la présence dans le sol de matières organiques réduise les effets de la stabilisation par la chaux, il est possible en augmentant les proportions de la chaux de traiter de façon satisfaisante des sols contenant jusqu'à 20% de matières organiques ; c'est le procédé de stabilisation, qui s'accommode le mieux, de la présence, toujours nocive, de matière organique dans les terres traitées.

Avant d'aborder la stabilisation des sols par ajout de la chaux, il est nécessaire de parler de la chaux d'une manière générale.

### II.7.1. La chaux

Le terme « chaux » désigne les produits issus de la calcination du calcaire. Ou autrement dit, il désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium ( $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$ ) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium  $\text{Ca(OH)}_2$  et  $\text{Mg(OH)}_2$ . [15]

Le calcaire est extraits des carrières ou d'autres gisements (calcaire maritime), ces blocs sont concassés, puis criblés de façon à acquérir un calibre de pierres compatible avec le type de four utilisé. La cuisson du calcaire est appelée calcination, elle permet d'obtenir la chaux vive. [14]

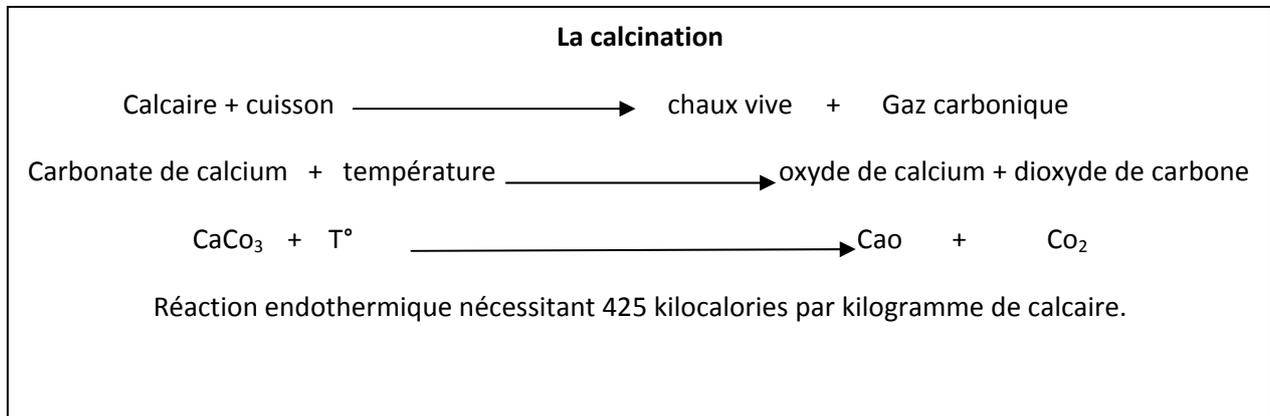
Pour passer de la chaux vive à la chaux éteinte on procède à l'extinction, qui est une réaction dangereuse par la chaleur dégagée et les projections qu'elle produit. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume «le foisonnement» (elle résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux). L'extinction est obtenue par adjonction d'eau et peut s'effectuer selon diverses méthodes ; extinction spontanée, l'arrosage manuel, l'extinction par immersion et l'extinction par fusion, dite extinction ordinaire, consiste à mettre la quantité d'eau utile, pour obtenir une bouillie épaisse (chaux en patte). Cette méthode implique une bonne maîtrise de la quantité d'eau car il faut éviter de brûler (le manque d'eau se traduit par la présence de grumeaux et produit une chaux mal éteinte) ou de noyer (l'excès d'eau va produire un lait de chaux inutilisable qui devra attendre plusieurs mois que la chaux sédimente) la chaux. [14]

La méthode utilisée dans les procédés industriels modernes produit de la chaux éteinte sous forme de poudre. Les granulats de chaux vive sont broyés et passent dans un hydrateur (vis sans fin aspergée d'eau). L'eau introduite permet l'hydratation de la chaux vive, mais elle aide également à l'évacuation de la chaleur dégagée lors de la réaction. Les particules qui n'ont pas réagi (impuretés, surcuits, incuits) sont éliminées. La chaux éteinte pulvérulente est tamisée, conditionnée en sac ou en vrac. [14]

Pour les chaux hydrauliques, l'extinction de la chaux vive est s'effectue à une température supérieure à  $120^\circ\text{C}$ , afin d'éviter l'hydratation des silicates et des aluminates. On conserve alors les propriétés hydrauliques. Ainsi le résultat de l'extinction entraîne deux types de chaux éteintes : en poudre et en pate. [14]

### II.7.1.1. La chaux vive

La chaux vive désigne le matériau brut obtenu à la sortie du four. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique). [14]



Cette réaction s'effectue à une température entre 750 et 950°C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45% due à la perte en gaz carbonique. La chaux vive correspond à la forme la plus dangereuse du matériau ; avide d'eau, elle brûle tous corps organiques en captant son eau.

Après cuisson la chaux vive garde le même aspect physique que le calcaire utilisé, mais sa couleur est plus blanche et sa masse volumique apparente devient plus faible.

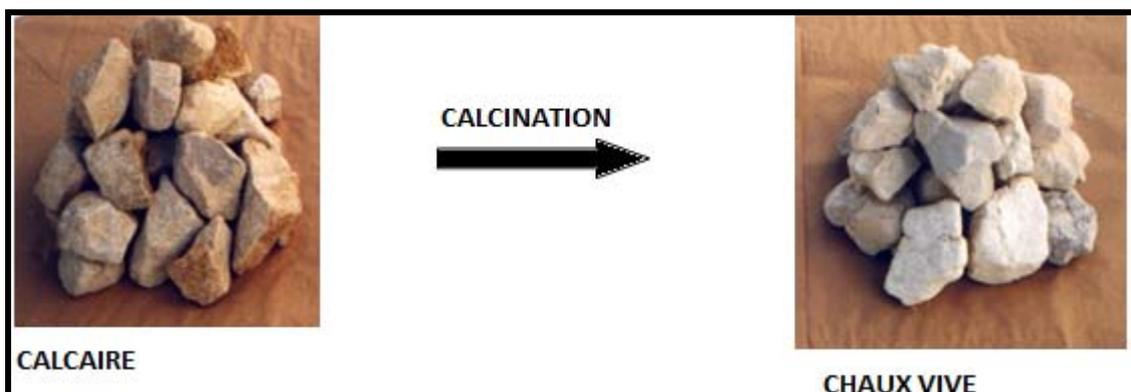
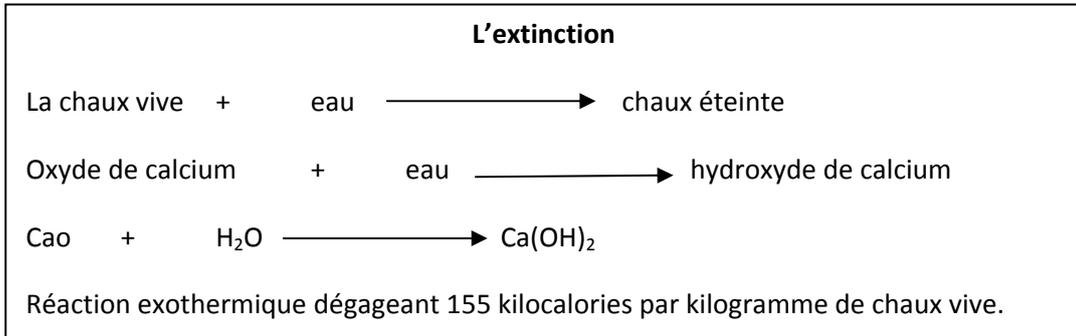


Figure II.4 : Transformation du calcaire en chaux vive

### II.7.1.2 La chaux éteinte

La chaux vive devient éteinte lors de l'opération d'extinction ou d'hydratation, en ajoutant de l'eau.



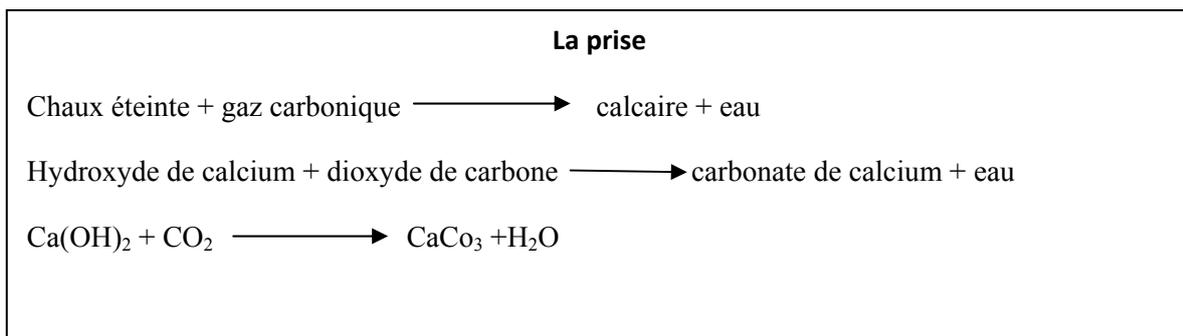
La forme obtenue après extinction dépend de la quantité d'eau :

- En quantité limitée, contrôlée : l'extinction produit une chaux en poudre ;
- avec un excès d'eau : l'extinction produit une chaux en pâte.



Figure II.5 : La chaux éteinte en poudre

La chaux ainsi éteinte est celle utilisée en construction. Mélangé à l'eau de gâchage, aux agrégats elle sert à la réalisation des mortiers. Lors de la mise en œuvre du mortier, la chaux aérienne va effectuer sa prise milieu humide : la vapeur d'eau qui a une affinité avec le gaz carbonique forme l'acide carbonique ; la chaux fixe alors le gaz carbonique contenu cet acide et se transforme en calcaire.



### 7.1.3. Le cycle de la chaux

Les étapes de fabrication de chaux, depuis l'extraction du calcaire jusqu'à ce que la chaux éteinte fasse sa prise forme un cycle qui se résume dans le schéma qui suit :

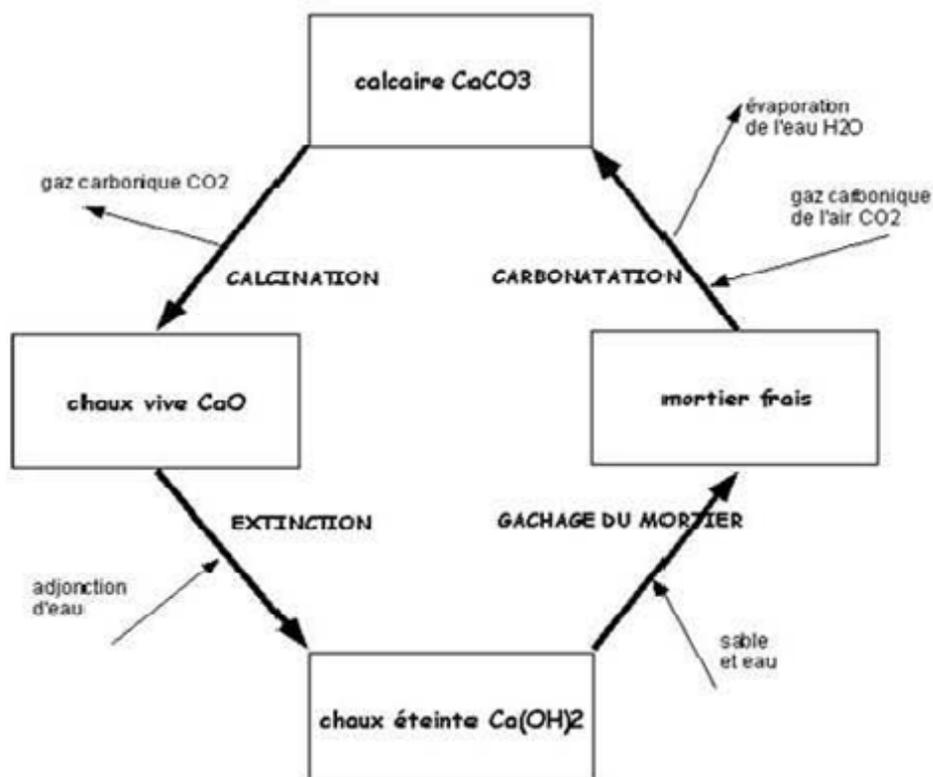


Figure II.6 : Le cycle de la chaux

### II.7.2. Types de chaux

Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux ;

- La chaux aérienne provenant d'un calcaire pur ;
- La chaux magnésienne, provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium ;
- La chaux hydraulique, provenant d'un calcaire argileux.

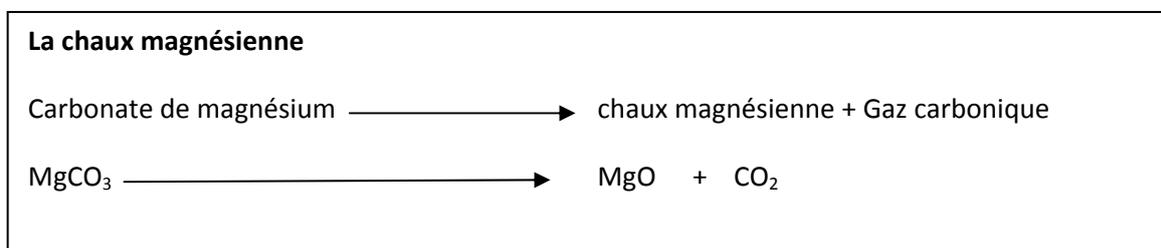
#### II.7.2.1. La chaux aérienne

Produite à base de calcaire pur ou quasiment pur (contenant moins de 5% d'argile), constituée principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium, qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air (carbonatation). Celle-ci est (carbonatation) lente compte tenu de la faible quantité de gaz carbonique contenu dans l'air, elle peut durer des années. Une fois durcie, la chaux aérienne résiste bien à l'eau bien que

restant légèrement soluble à celle-ci. Autrefois on l'appelait chaux grasse (de par sa texture), fleur de chaux, chaux hydratée. La chaux aérienne se subdivise en chaux calcique constituée presque exclusivement d'oxyde de calcium et d'hydroxyde de calcium et en chaux dolomitique qui contient également de l'oxyde de magnésium et de l'hydroxyde de magnésium). Elle peut être soit vives, soit hydratées.

### II.7.2.2. Les chaux magnésiennes

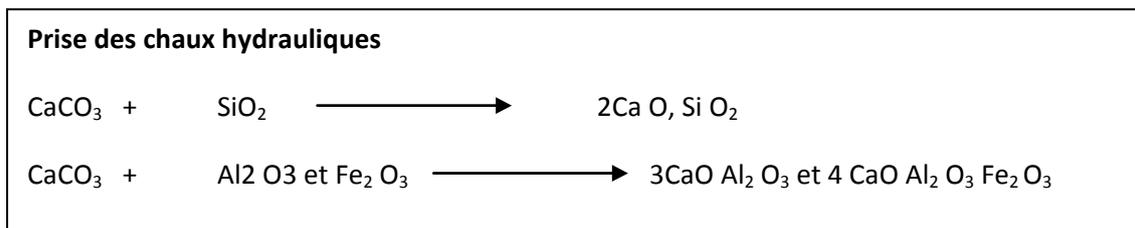
Dans certains calcaires dits dolomitiques, le carbonate de calcium est associé au carbonate de magnésium. Cette variante de la roche calcaire forme de la chaux magnésienne, lors de sa cuisson à une température inférieure à 900°C, dans les conditions habituelles requises pour l'obtention d'une chaux aérienne.



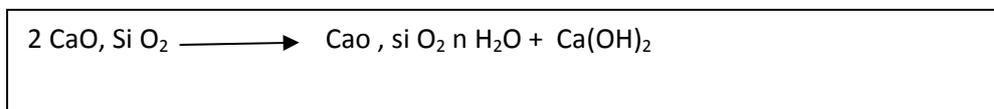
### II.7.2.3. La chaux hydraulique

Les calcaires purs sont rares. Ils sont plus souvent mélangés à des marnes et des argiles riches en éléments et des argiles riches en éléments chimiques comme le fer, l'aluminium et surtout la silice. Entre 800 et 1500°C, le calcium du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, mais aussi des aluminates et des ferro-aluminates de calcium.

La cuisson donne :



Par contact avec l'eau, ces corps vont former des hydrates insolubles qui confèrent au liant un caractère hydraulique. Les proportions d'alumine et de fer sont très faibles. Le phénomène de prise hydraulique est donc essentiellement dû à la réaction :



### II.7.3. Utilisation de la chaux

La chaux entre dans un grand nombre d'utilisation, depuis des applications artisanales jusqu'à des processus industriels très évolués.

Elle intervient dans l'agriculture, La chimie, Le traitement des eaux, les sucreries, Industrie de la savonnerie, Industrie papetière, les tanneries, la sidérurgie et surtout dans La construction.

Dans le domaine de la construction la chaux est utilisée pour la fabrication de briques silico-calcaire en mélangeant la chaux avec du sable siliceux, compacté et étuvé. Elle est également utilisée dans la confection des bétons cellulaires (à base de mortier de sable, de chaux/ou ciment). La chaux possède des caractéristiques techniques et esthétiques qui se combinent pour faire d'elle le matériau choisi pour la restauration, pour reprendre et compléter l'ancien, tout autant que pour garantir un ancrage dans la tradition constructive.

Et depuis fort longtemps, elle à été employée pour stabiliser les routes et chemins. Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques du sol.

### II.7.4. Stabilisation des sols à la chaux

#### II.7.4.1. Modification des propriétés du sol [21]

Les observations sur les sols traités ont permit de noter les modifications suivantes dans leurs caractéristiques :

- a. **Modification de la teneur en eau** l'hydratation de la chaux vive est une réaction immédiate et fortement exothermique, ce qui a pour effet d'élever la température du mélange. Une partie de cette chaleur va contribuer à l'évaporation d'une quantité d'eau du sol un autre phénomène intervient simultanément c'est l'aération du sol lors du malaxage. L'expérience a montré que pour 1% de chaux la teneur en eau du mélange diminue de 0,6 à 0,8% (Annales LCPC, 1972).
- b. **Modification des propriétés géotechniques** elle se fait en deux étapes, l'une immédiate et l'autre lente, elle dépend de l'importance de la fraction argileuse contenue dans le sol et de sa nature.

#### b.1. Modifications immédiates

Additivement à l'échange de cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par  $\text{Ca}^{++}$ , et la floculation des particules argileuses provoquée par les forces électriques mises en jeu par l'échange les caractéristiques suivantes :

- ✚ La limite de plasticité,
- ✚ L'indice de plasticité,
- ✚ Le CBR,
- ✚ L'allure de la courbe Proctor,
- ✚ Les caractéristiques optimales,

Se trouvent modifiées par l'ajout de chaux. Ces modifications sont obtenues par des dosages faibles en chaux, elles se traduisent par la formation de grumeaux non collants dans la masse du sol.

## b.2. modifications à long terme

A long terme l'argile et la chaux vont agir l'une sur l'autre en donnant naissance à de nouvelles espèces minérales qui constituent des ciments de qualités diverses, liant entre elles les particules inertes du sol. Ces ciments sont responsables de l'augmentation de la résistance mécanique du sol (Holtz, 1969).

### II.7.4.2. Mécanismes de stabilisation à la chaux [9]

Les théories de stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base :

- a. **Absorption d'eau** : En présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur : environ 300kcal/kg de chaux vive.
- b. **Echange cationique** : Lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations : les ions de calcium se substituent aux cations échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre.
- c. **Floculation et agglomération** : Du fait de l'échange de cations et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre flocculent et s'agglomèrent ; il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.
- d. **Carbonatation** : La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.
- e. **Réaction pouzzolanique** : c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entre eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective.

### **II.7.4.3. Effet de la chaux sur les sols argileux**

#### **II.7.4.3.1. Sur les limites de consistance**

L'addition de la chaux aux sols plastiques réduit l'indice de plasticité ( $I_p$ ). Une hausse immédiate de la limite de plasticité est constatée lors de l'addition de la chaux, la limite de liquidité est aussi influencée. Les effets séparés de l'addition de la chaux aux sols argileux sur les limites de consistance, sont liés d'habitude à une forte réduction de l'indice de plasticité.

D'après Davidson et Handy (1960) les ions de calcium provenant de la chaux sont à l'origine de la réduction de la plasticité des sols cohésifs, les rendant ainsi friables et faciles à compacter. La quantité de chaux recommandée pour cela est comprise entre 1 et 3%, tout dépend du type et du pourcentage des minéraux présents.

#### **II.7.4.3.2. Effet de la chaux sur le compactage**

Le compactage des sols stabilisés par ajout de chaux est plus facile que celui des sols stabilisés par ciment. La courbe Proctor change de forme, car la teneur en eau optimale augmente légèrement, par contre la densité sèche maximale diminue. La forme de la courbe sera aplatie et ceci pour le même effort de compactage. Ces changements sont fonction de la quantité de chaux ajouté.

Andrews et O'flaherty (1968) ont montré que la diminution de la densité sèche ne dépend pas seulement du dosage en chaux mais aussi du taux de minéraux argileux présents dans le sol.

#### **II.7.4.3.3. Effet de la chaux sur la résistance des sols**

De nombreuses recherches sont parvenues à montrer que le traitement des sols à la chaux améliore les caractéristiques mécaniques des sols.

Thompson et Harty (1973) ont conclu que la réactivité du sol avec la chaux n'est pas proportionnelle aux taux d'argile présent dans le sol, ce qui indique que la quantité absolue de silicates et d'aluminates provoquant la réaction pouzzolanique est relativement faible. La résistance du mélange sol-chaux est affectée par de sévères facteurs tels que, le type de sol, le type et le dosage de chaux, la teneur en eau initiale ainsi que l'intervalle de temps mis entre le malaxage et le compactage. La montmorillonite développe une grande résistance suite à ce traitement.

D'après El-Rawi (1981), pour un pourcentage élevé de chaux le mélange atteint une résistance maximale, mais la relation reste non linéaire et l'excès de chaux réduit cette résistance. Pour une teneur en eau au-delà de l'optimum, la résistance à la compression non confinée baisse considérablement et dépasse parfois 30%. Le temps de cure est aussi un facteur très important affectant la résistance des sols argileux stabilisés à la chaux.

D'après Laguros et al (1956), les températures élevées accélèrent la prise et augmente la résistance du sol.

Saby et Parker (1979) sont parvenus à montrer que le mélange sol-chaux compacté à une teneur en eau au-delà de l'optimum atteint, après une brève durée, une résistance plus élevée que ceux compactés à une teneur en eau en deçà de l'optimum.

#### **II.7.4.3.4.Effet de la chaux sur la texture**

Choquette et al (1987) ont traité des échantillons de sols naturels, par apport de 4% de chaux vive, à une teneur en eau proche de la limite de liquidité. Ils ont testé par la suite les caractéristiques de porosité de ces matériaux, la taille et la distribution des pores. Les résultats d'essais ont montré qu'au départ il y avait deux types de pores ; intra-agrégat et inter-agrégat. Après trois jours les pores inter-agrégats ont disparu, alors que le nombre des pores intra-agrégat a augmenté. Ils ont conclu que la stabilisation à la chaux affecte la taille et la distribution des pores des argiles expansives. Le volume total des pores varie peu et de façon irrégulière. Ce phénomène peut être justifié par la formation de micro pores, par la division des gros pores dû à la formation de nouveaux minéraux et de leurs cristallisation et ceci sans modifier le volume totale des pores.

## **II.8. CONCLUSION**

Dans la conception des matériaux de construction à partir de la stabilisation des sols remaniés, le choix du stabilisant et le procédé de stabilisation sont déterminants.

- ❖ La stabilisation mécanique convient comme traitement à n'importe quels sols; pour peu que le moyen de densification soit adapté à la nature du sol (compactage statique pour les sols cohérents et par vibration pour les sols pulvérulents).
- ❖ La stabilisation physico-chimique apportera essentiellement une insensibilisation à l'eau pour les matériaux argileux.

# CHAPITRE III : ETUDE MENEES ET MATERIAUX UTILISES

## INTRODUCTION

Pour mener cette étude on a prélevé trois échantillons de sols, de trois régions de la grande Kabyle. Une argile rouge d'Oued Aissi, une marne de l'Habitat (Tizi Ouzou Chef lieu de wilaya) et une argile grise provenant de Takhoukht.

### III.1. Etude menée

L'étude porte sur les essais suivants :

- Essais d'identification et caractérisation des sols, ils portent sur le matériau brut. Se sont des essais préliminaires de laboratoire qui sont indispensables pour caractériser la terre utilisée.
- Le traitement à la chaux dans laquelle on fait :
  - Etude du retrait des sols en fonction de la teneur en eau et en fonction du dosage en chaux.
  - Etude de l'effet de la chaux sur la résistance mécanique du béton.
- Traitement des sols à chaud, où on étudie leur résistance à l'écrasement et leur résistivité électrique en fonction de la teneur en eau et du dosage en chaux.

### II.2. Matériaux utilisés

Avant de commencer toute étude, la connaissance des caractéristiques du sol utilisé s'impose. Pour cela nous procédons aux essais d'identification des matériaux. Pour chacun de nos sols on effectuera :

- L'analyse granulométrique ;
- Les limites de consistances ;
- L'analyse chimique et l'analyse minéralogique ;
- L'essai Proctor.

#### III.2.1. L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Les résultats de l'analyse se présentent graphiquement sous la forme d'une courbe granulométrique, cette courbe est un élément essentiel, mais non suffisant, de la connaissance d'un sol. Elle se détermine par tamisage des grains supérieurs à 0,08 mm et par sédimentométrie pour le résidu.

Les résultats de l'analyse par tamisage sont présentés dans le tableau [3] et par la courbe III.1.

Ouverture des tamis (mm)	Tamisât(%)		
	Le sol de Oued Aissi	Le sol de l'Habitat	Le sol de Takhoukht
5	100	100	100
3,15	98,32	100	95,17
2	95,49	97,16	88,83
1	90,19	91,01	80,61
0,4	85,9	83,51	74,11
0,2	78,75	73,07	63,79
0,1	70,38	64,31	53,02

Tableau [3]: Résultats de l'analyse granulométrique des sols

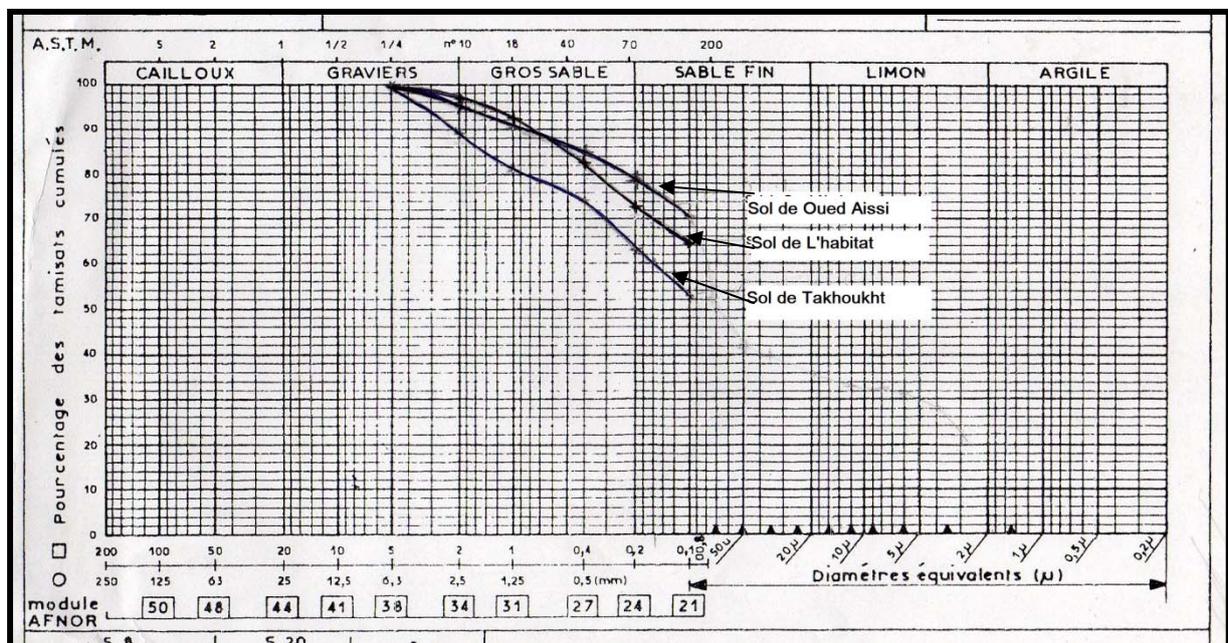


Figure III.1: Courbe granulométrique des sols

On déduit de cette analyse que :

Le sol de Oued Aissi : Il contient 4,68% de gravier, 21,25% de gros sable et il contient 78,75 d'éléments fin.

Le sol de l'Habitat : Il contient 2,84% de gravier, 24,09% de gros sable et 73,07 d'éléments fins.

Le sol de Takhoukht : Il contient 11,17% de gravier, 25,04% de gros gravier et 63,79% d'éléments fins.

Les trois sols contiennent plus de 50% d'éléments fins. Le sol de Oued Aissi et celui de l'Habitat ont une granulométrie qui se rapproche, alors que le sol de Takhokht possède une fraction importante de gros éléments.

#### IV.2.2. Limites d'Atterberg

##### ➤ Limite de liquidité

La limite de liquidité se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est constitué d'une coupelle dans laquelle on met la terre et d'une came mue par une manivelle qui soulève la coupelle et la laisse brusquement retomber sur un socle rigide. Avec une spatule on étale de la terre dans la coupelle, puis avec l'outil à rainure on creuse au milieu de la coupelle un sillon dans la pâte. On soumet alors la coupelle à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1 cm. La limite de liquidité est exprimée par la teneur en eau pour laquelle les deux moitiés séparées par le sillon se referment sur une longueur de 1cm en 25 coups. [10]

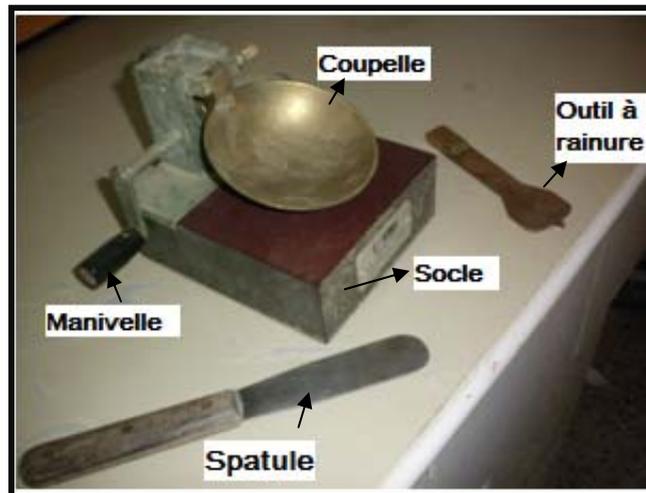


Figure III.2 : Appareil de Casagrande

##### ➤ Limite de plasticité

On la mesure en formant une boulette de terre qu'on roule sur une plaque plane de verre ou de marbre avec la paume de la main. La terre est à la limite de plasticité lorsque le rouleau pour un diamètre de 3mm se désagrège en petits morceaux de 1 à 2 cm de longueur. [10]

On classe les sables, les limons et les argiles en fonction des limites d'Atterberg selon les tableaux suivants :

	Limite de liquidité $w_L$	Indice de plasticité $I_p$
Sable	$w_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < w_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$w_L > 30$	$I_p > 15$

Tableau [4]: Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg

Degré se plasticité	Indice de plasticité $I_p$
Non plastique	0-5
Peu plastique	5-15
Plastique	15-40
Très plastique	>40

Tableau [5]: indice de plasticité

On se sert aussi, pour classer les sols fins à partir des limites d’Atterberg, du diagramme de plasticité proposé par Casagrande en 1932. [1]

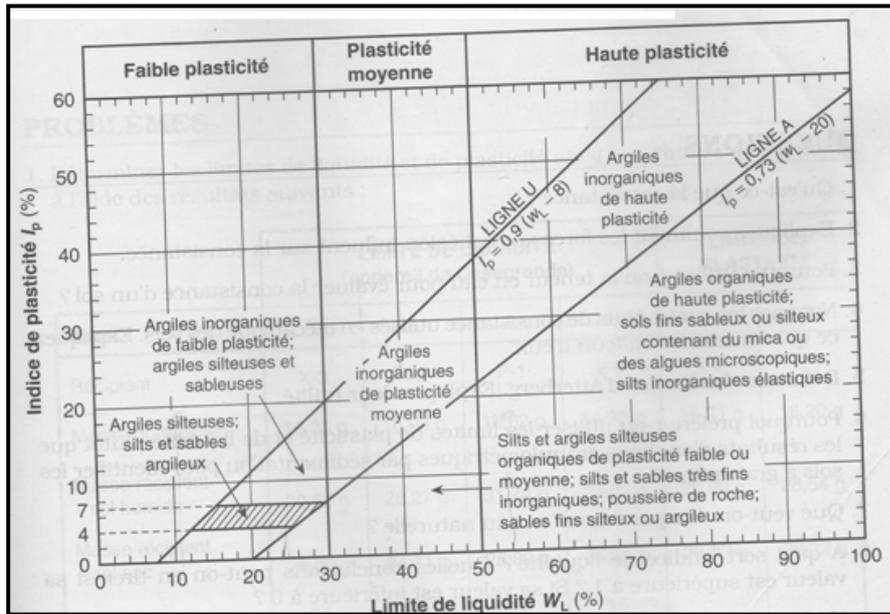


Figure III. 3 : Diagramme de plasticité (d’après Casagrande, 1948, et Howard, 1977)

#### IV.2.2.1. Résultats des limites d’Atterberg

➤ La limite de liquidité

Le sol de Oued Aissi			Le sol de l’Habitat			Le sol de Takhoukht		
N° de l’essai	Nombre de coups	Teneur en eau (%)	N° de l’essai	Nombre de coups	Teneur en eau (%)	N° de l’essai	Nombre de coups	Teneur en eau (%)
1	16	40,7	1	15	42,82	1	17	27,8
2	21	38,8	2	21	41,5	2	20	25,95
3	33	34,5	3	28	38,6	3	26	22,4
4	35	32,5	4	34	37,35	4	34	21
<b>w<sub>L</sub>=37%</b>			<b>w<sub>L</sub>=40%</b>			<b>w<sub>L</sub>= 24,25%</b>		

Tableau [6]: Détermination de la limite de liquidité

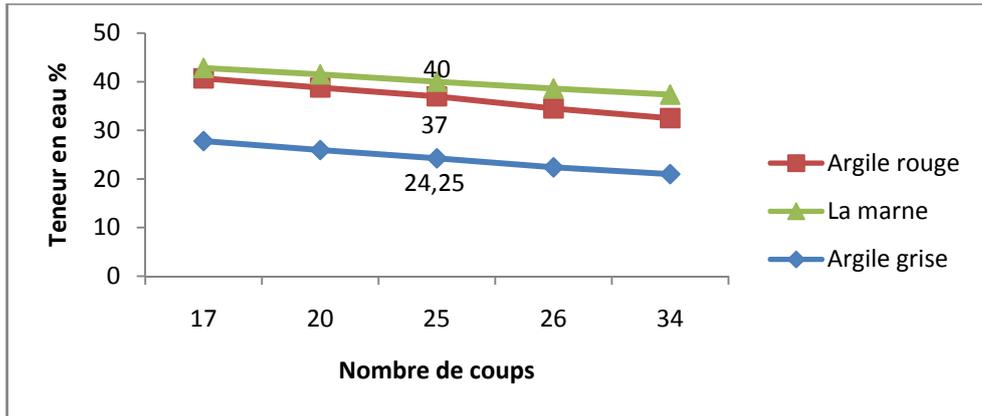


Figure III.4: Limite de liquidité des sols

➤ La limite de plasticité

Le sol de Oued Aissi		Le sol de l'Habitat		Le sol de Takhokht	
N° de l'essai	Teneur en eau (%)	N° de l'essai	Teneur en eau (%)	N° de l'essai	Teneur en eau (%)
1	19,04	1	16,43	1	11,11
2	18,5	2	15,9	2	10,25
3	17,03	3	15,38	3	11
<b>w<sub>p</sub>= 18,19 %</b>		<b>w<sub>p</sub>=15,9 %</b>		<b>w<sub>p</sub>=10,78 %</b>	

Tableau [7]: Détermination de la limite de plasticité

➤ Indice de plasticité

Type de sol	I <sub>p</sub> (%)
Le sol de Oued Aissi	18,81
Le sol de l'Habitat	24,1
Le sol de Thakhokht	13,72

Tableau [8]: Détermination de la limite de plasticité

Les limites d'Atterberg nous donnent la classification suivante :

On se basant sur les tableaux [4] et [5], et le diagramme de plasticité de Casagrande (figure III.4) on à :

-Le sol de Oued Aissi : C'est une argile inorganique de plasticité moyenne.

-Le sol de l'Habitat: C'est une argile inorganique de plasticité moyenne.

-Le sol de takhoukht: C'est une argile silteuse et sableuse de faible plasticité.

Le domaine de plasticité du sol de Oued Aissi est plus large que les deux autres car son indice de plasticité est plus grand, alors que le sol de takhoukht a un domaine de plasticité faible, ce qu'on peut expliquer par la quantité importante des grosses particules qu'il contient (11,17% de gravier et 25,04% de gros sable).

### III.2.3. L'analyse chimique et minéralogique

#### III.2.3.1. L'analyse chimique

L'analyse chimique est une méthode d'identification d'un sol qui nous permet de déterminer la quantité de :

- Residu insoluble ;
- Sulfates ;
- Carbonates;
- L'eau de constitution;
- Des chlorures.

Code de l'échantillon	Composition chimique										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF
Argile rouge	54.46	23.21	7.24	0.44	2.055	0.03	4.29	1.33	0.14	1.19	5.59
Argile grise	68.72	14.29	6.43	0.044	0.80	0.01	2.24	0.80	0.11	1.02	5.14
La marne	45.40	10.61	5.25	16.14	1.98	0.06	2.05	0.52	0.12	0.57	17.31

Tableau [9]: Résultats de l'analyse chimique

#### III.2.3.2. Analyse minéralogique

Les trois échantillons de sols ont été analysés par Spectromie de diffraction X afin de déterminer la nature des constituants minéraux.

La composition minéralogique estimative (semi quantitative) à été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle figure dans le tableau suivant :

Minéraux présents	Formules	Code échantillons		
		Teneur en eau		
		Argile rouge	Argile grise	La marne
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20.2	49.0	34.0
Dolomie	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	01.0	01.0	11.0
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	-	-	21.0
Kaolinite	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	18.0	17.0	08.0
Chlorite	Al <sub>4</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Si <sub>3</sub>	08.8	02.0	-
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	29.0	13.0	17.0
Feldspaths (Na, Ca)	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	11.0	07.0	04.0
Rutile	TiO <sub>2</sub>	01.0	01.0	-
Feldspaths K	K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	05.0	04.0	-
Autres : Minéraux ferrugineux	Fond RX	07.0	06.0	05.0

**Tableau [10]:** Résultats de l'analyse minéralogique

La teneur en CaCO<sub>3</sub> nous conduit à faire la classification ci-dessous [17] :

- 0 à 10% de CaCO<sub>3</sub>  $\Longrightarrow$  Argile
- 10 à 30% de CaCO<sub>3</sub>  $\Longrightarrow$  Argile marneuse
- 30 à 70% de CaCO<sub>3</sub>  $\Longrightarrow$  Marne
- 70 à 90% de CaCO<sub>3</sub>  $\Longrightarrow$  Calcaire marneux
- 90 à 100% de CaCO<sub>3</sub>  $\Longrightarrow$  Calcaire

D'après le pourcentage de CaCO<sub>3</sub> trouvé pour chaque sol et le pourcentage en minéraux argileux on a :

- Le sol de Oued Aissi : c'est une argile composée de quartz et d'une fraction argileuse (muscovite, kaolinite, feldspaths et chlorite) de 43 à 71%.
- Le sol de l'Habitat : C'est une marne composée essentiellement de carbonates (calcaire, dolomie) à 30% de quartz et de minéraux argileux (muscovite, kaolinite, feldspaths) à un taux de 29% ainsi qu'une faible teneur en chlorite.
- Le sol de Takhokht : C'est une argile composée d'une fraction importante de quartz et d'une fraction argileuse (muscovite, kaolinite, feldspaths et chlorite) de 43 à 71%.

### III.2.4. L'essai Proctor

Cet essai est très important dans tout ce travail, car toutes les étapes qui vont suivre reposent sur lui. Avant d'étudier le retrait, la résistivité, la résistance à la compression les échantillons seront confectionnés par compactage au moule Proctor.

#### III. 2.4.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé à l'aide d'une dame normalisée, selon l'échantillon de sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche.

Il existe deux types d'essai de compactage : [16]

- L'essai Proctor normal ;
- L'essai Proctor modifié.

	Essai Proctor normal (Moule Proctor)	Essai Proctor modifié (Moule C.B.R)
Masse de la dame	2,48 Kg	4,535Kg
Hauteur de chute	305 mm	457 mm
Nombre de couche pour le remplissage du moule	3	5
Nombre de coups par couche	25	55
Diamètre du moule	101,6 mm	152 mm

**Tableau [11] :** Essai Proctor ; compactage du matériau dans le moule

Le choix du moule dépend de la grosseur D des plus gros grains du sol :

-Si  $D \leq 5\text{mm}$  (et seulement dans ce cas), le moule Proctor normal est autorisé, mais le moule C.B.R est conseillé ;

-Si  $5 < D \leq 20\text{ mm}$ , utiliser le moule C.B.R ;

-Si  $D > 20\text{ mm}$ , tamiser le matériau à 20mm, et peser le refus :

-si le refus  $\leq 25\%$ , l'essai se fait dans le moule C.B.R, mais sans y intégrer le refus (échantillon écrété à 20mm),

-si refus  $> 25\%$ , l'essai Proctor ne peut pas être fait.

Le sol sur lequel nous travaillons est tamisés à 5mm, alors on le compacte en utilisant le moule Proctor normal.

### III.2.4.2. Matériel et mode opératoire

- Le moule Proctor normal, utilisable pour les sols fins, est un tube métallique que l'on peut fixer sur une plaque de base. Les dimensions du moule Proctor sont :

$\Phi=101,6\text{mm}$ , hauteur (h)=117mm.

- La dame Proctor c'est un tube cylindrique, avec un mouton actionné par une poignée. Les dimensions de la dame Proctor normal sont :

$\Phi=51\text{mm}$ , poids (P)=2,49kg, hauteur de chute= 305mm.



Figure III.5: Equipement de l'essai Proctor normal

- On met la première couche de sol dans le moule, en utilisant la dame on compacte le sol par 25 coups, distribué comme illustré dans la figure III.6.



Figure III.6 : Compactage des couches

III.2.4.3. Les résultats de l'essai Proctor

➤ Le sol de Oued Aissi : L'argile rouge

Teneur en eau (%)	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Volume du moule (m <sup>3</sup> )	Poids volumique sec (γ <sub>d</sub> ) (KN/m <sup>3</sup> )
10	1622,29	1464,9		15,4509018
12	1704,3	1513,2		15,96034174
14	1839,5	1608,6		16,96656471
16	1950,6	1676,7		17,68484337
18	1962,2	1657,5	9485,56*10 <sup>-6</sup>	17,48233309
20	1924,3	1595,4		16,82733889
22	1863,7	1523,2		16,06581584
24	1826,7	1465,4		15,45617551
26	1832,5	1454,1		15,33698977
28	1760	1374,4		14,49636114

Tableau [12] : Résultats de l'essai Proctor du sol de Oued Aissi

➤ Le sol de l'Habitat : Marne

Teneur en eau (%)	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Volume du moule (m <sup>3</sup> )	Poids volumique sec (γ <sub>d</sub> ) (KN/m <sup>3</sup> )
10	1673,4	1515		15,97932708
12	1699,8	1516,3		15,99303871
14	1735,1	1517		16,0004219
16	1824,4	1576,9		16,63221179
18	1860,8	1569,8	9485,56	16,55732518
22	1872,5	1531,6		16,15441409
24	1862,8	1495,5		15,77365257
27	1809,2	1425,5		15,03533383
29	1803,9	1404,5		14,8138382
31	1799,3	1372,1		14,4721021
32	1766	1335,8		14,08923109

Tableau [13] : Résultats de l'essai Proctor du sol de L'Habitat

➤ Le sol de Takhokht : Argile grise

Teneur en eau (%)	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Volume du moule (m <sup>3</sup> )	Poids volumique sec (γ <sub>d</sub> ) (KN/m <sup>3</sup> )
4	2038,1	1953,8		20,60753085
6	2129,5	2005,6		21,15388672
8	2228,1	2062,7		21,75614387
10	2191,9	1994,6	9485,56	21,0378652
12	2163,9	1939,7		20,45881236
14	2156,5	1905,2		20,0949267
16	2183,2	1891,4		19,94937243

Tableau [14] : Résultats de l'essai Proctor du sol de Takhokht

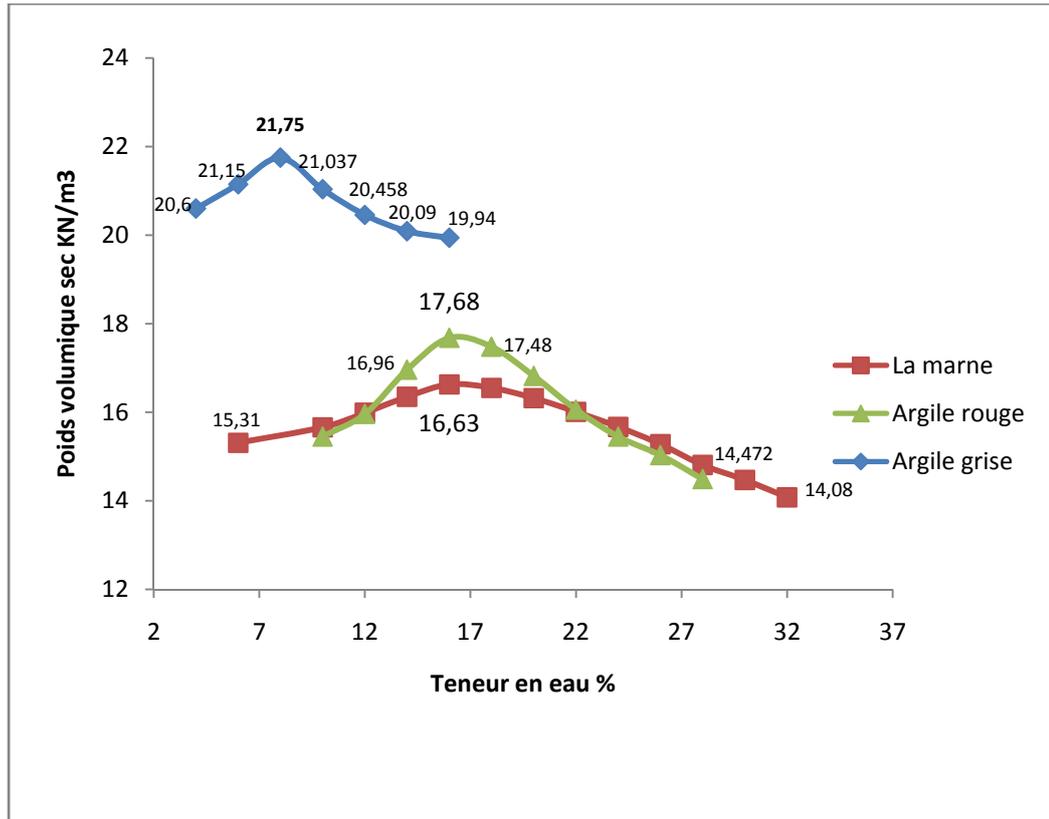


Figure III.7: Essai Proctor normal des différents sols

-Le sol de Takhokht contient plus de grosses particules, et son domaine de plasticité est inférieur aux deux autres sols ce qui fait que son volumique sec est plus grande et sa teneur en eau optimale est inférieur aux leurs. Alors que le sol de l'Habitat et celui de Oued Aissi Présente une même teneur en eau optimale et des poids volumiques secs approximatifs.

Le versant mouillé de la courbe Proctor montre la différence entre les deux sols, la saturation du sol de Oued Aissi s'effectue à une teneur en eau inférieure à celle du sol de l'Habitat.

### III.3. la chaux

La chaux utilisée est une chaux vive provenant de Saida. C'est un oxyde de calcium obtenu par cuisson des roches calcaires à une température de 1000°C. La chaux vive présente l'avantage de dégager de la chaleur lors de son hydratation et celle-ci se trouve employée, puisqu'elle active le durcissement de la chaux. Les éléments fabriqués à base de chaux vive moulue ont une résistance, une densité et une imperméabilité à l'eau plus élevées. Les caractéristiques physico-chimiques de la chaux vive utilisée sont données dans le tableau suivant :

Propriétés	Valeur
Proportion des grains non éteints	10%
Proportion des matières actives (CaO+MgO)	70%
Passant au tamis de 0,1 mm	80 %

Tableau [15] : caractéristiques de la chaux

### III.4. Conclusion

Les sols étudiés sont des sols fins ;

Le sol extrait de :

- Oued Aissi est une argile inorganique de moyenne plasticité ;
- L'Habitat est une marne
- Le sol de Takhokht est une argile silteuse et sableuse inorganique de faible plasticité

Les sols présentent des couleurs différentes, alors pour ce qui suit on désignera le sol extrait de Oued Aissi par « l'argile rouge », et celui de Takhokht par « argile grise » en référence à leurs couleurs, alors que celui de l'Habitat est « la marne ».

Le choix de la chaux pour stabiliser ces sols est logique car ils contiennent des fractions argileuses importantes.

# CHAPITRE IV : ETUDE DU RETRAIT

## INTRODUCTION

En l'absence de toute charge, le béton de terre stabilisée se déforme spontanément. Ces déformations sont dues à l'humidité du milieu de conservation. Si le béton est conservé à l'air non saturé d'humidité, on observe une diminution des dimensions initiales, c'est le retrait. Dans le cas contraire, l'air est saturé d'humidité, on observe une absorption d'eau qui se traduit par l'augmentation de volume : c'est le gonflement.

Ce chapitre ne s'intéressera qu'au phénomène de retrait dont la principale cause est le départ d'eau qui est important surtout au jeune âge, puis on tentera une stabilisation des variations de volumes en renforçant le squelette inerte par la chaux.

Pour bien cerner le phénomène du retrait on a mené une étude portant sur les éprouvettes suivantes :

- Eprouvettes confectionnées à base du matériau brut (sol non stabilisé) en variant les teneurs en eau de façonnage, pour étudier l'effet de la teneur en eau sur le retrait.
- Eprouvettes confectionnées à base du sol stabilisé, à une teneur en eau de saturation, par différentes teneurs de stabilisant (la chaux), pour tester l'effet du traitement à la chaux sur le retrait.

### VI.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer quotidiennement des mesures du raccourcissement de hauteur des éprouvettes et d'en déduire les variations, en utilisant un comparateur gradué au mm et au 100<sup>ème</sup> de mm (Figure IV.1), on prendra également les mesures de pesée par une balance.



Figure IV.1 : Matériels utilisés pour l'étude du retrait

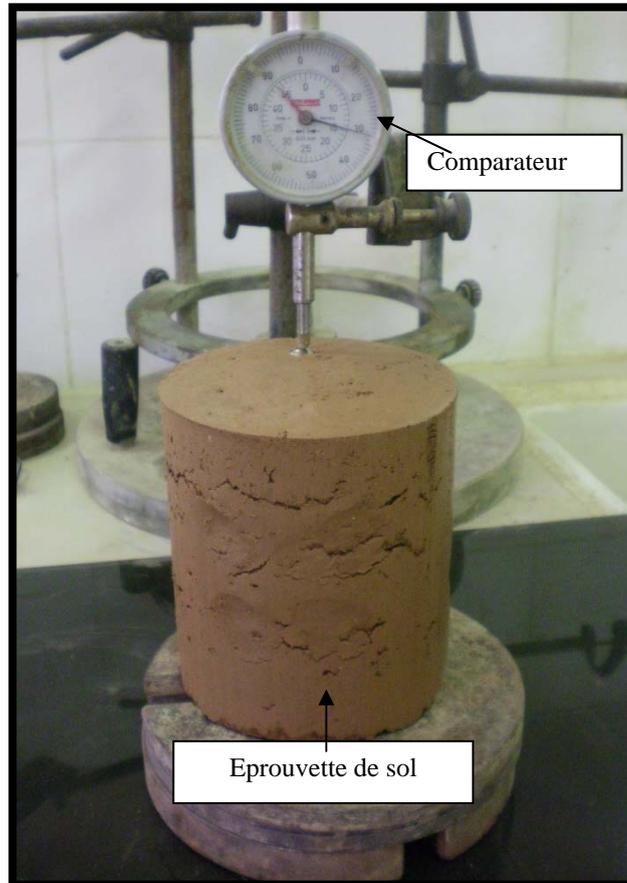


Figure IV.2: Dispositif expérimental de mesure du retrait

## IV.2. Etude du retrait des matériaux

### IV.2.1. Effet de la teneur en eau

#### IV.2.1.1. Préparation des éprouvettes

Pour chaque type de sol (argile rouge, marne et argile grise) on fabrique des éprouvettes à des teneurs en eau différentes, teneur en eau située sur le versant sec de courbe Proctor, teneur en eau optimale, teneur en eau située sur le versant mouillé de la courbe Proctor et enfin une à la teneur en eau de saturation. Les éprouvettes sont faites à l'aide du moule Proctor normal en compactant le sol dynamiquement. Au moment du démoulage les éprouvettes humides ont les dimensions du moule Proctor, un diamètre de 101,6mm et une hauteur de 117 mm. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire.

Pendant la dessiccation du matériau l'eau s'évapore peu à peu de la surface extérieure de l'échantillon, tandis que l'eau présente au noyau se déplace vers la périphérie de l'échantillon.

Pour tester l'influence de la teneur en eau de fabrication sur le retrait, nous avons effectué des mesures des pesées et de retrait chaque 24 heures. A la fin les éprouvettes sont passées à l'étuve pour accélérer le retrait.

### IV.2.1.2. Présentation des résultats

#### Nomenclature:

- ✓ R10: Argile rouge à 10% d'eau
- ✓ R16: Argile rouge à 16% d'eau
- ✓ R20: Argile rouge à 20% d'eau
- ✓ R25: Argile rouge à 25% d'eau
- ✓ M10 : Marne à 10% d'eau
- ✓ M16: Marne à 16% d'eau
- ✓ M24: Marne à 24% d'eau
- ✓ M30: Marne à 30% d'eau
- ✓ G4: Argile grise à 4% d'eau
- ✓ G8: Argile grise à 8% d'eau
- ✓ G10: Argile grise à 10% d'eau
- ✓ G12: Argile grise à 12% d'eau

#### IV.2.1.2.1. Evolution de la longueur en fonction du temps

Les figures qui suivent représentent la variation de la longueur en fonction du temps des trois sols étudiés, et elles montrent que :

-Les diagrammes de variation de longueur en fonction du temps sont d'abord très concaves, puis se redressent progressivement avec le temps et leur concavité est d'autant plus forte que la teneur en eau de façonnage est élevée.

-Plus la teneur en eau de fabrication est importante, plus la diminution de la longueur est importante. Les grandes variations de longueur sont observées durant les premiers jours qui suivent la fabrication des éprouvettes.

-L'amplitude du raccourcissement de l'éprouvette est proportionnelle à la teneur en eau de façonnage.

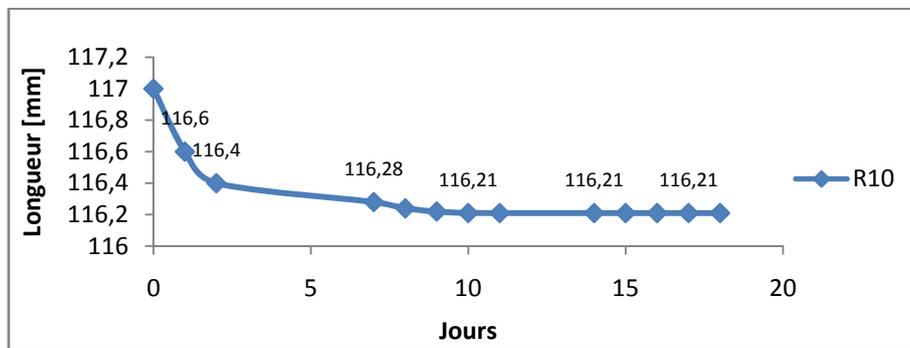
Quand l'échantillon se dessèche, le volume d'eau diminue, les éprouvettes changent de volume et les courbes de variation de la longueur en fonction du temps présentent deux phases : dans la première la variation de la longueur est appréciable, les grains se rapprochent les uns des autres, l'échantillon est toujours saturé et la longueur de l'éprouvette diminue considérablement, c'est-à-dire le raccourcissement observé est très fort. Dans la deuxième phase les grains sont en contact et ne peuvent plus se rapprocher. Le raccourcissement est ralenti et finit par se stabiliser au bout d'une dizaine de jours. Le raccourcissement de longueur se poursuit dans le temps très lentement.

➤ **Argile rouge**

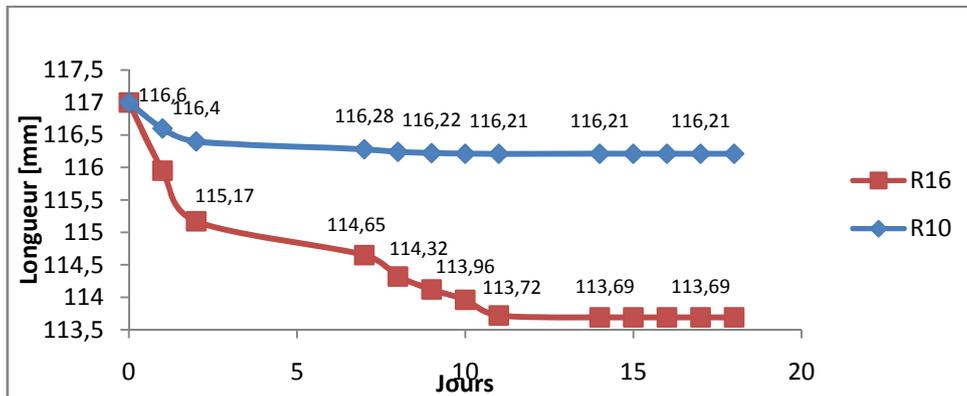
En compactant le sol avec 10% d'eau, le raccourcissement de la longueur du sol n'est pas important (figure IV.3). En augmentant la teneur en eau à 16%, on constate que le raccourcissement de la longueur de R16 est plus important que celui de R10 (Figure IV.4) et en la portant à 20%, la variation de la longueur de R20 excède celle de R10 et R16, la courbe de R10 tend à s'aplatir (figure IV.5).

Sur la figure IV.6, le sol compacté avec 25% d'eau a un raccourcissement excessif. La courbe de R25 est concave devant celles de R10, R16 et R20.

La stabilisation de la longueur se produit à partir du 11<sup>ème</sup> jour pour R10, du 12<sup>ème</sup> jour pour R20 et du 13<sup>ème</sup> jour pour R25.



**Figure IV.3 :** Variation de la longueur en fonction du temps R10



**Figure IV.4:** Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16

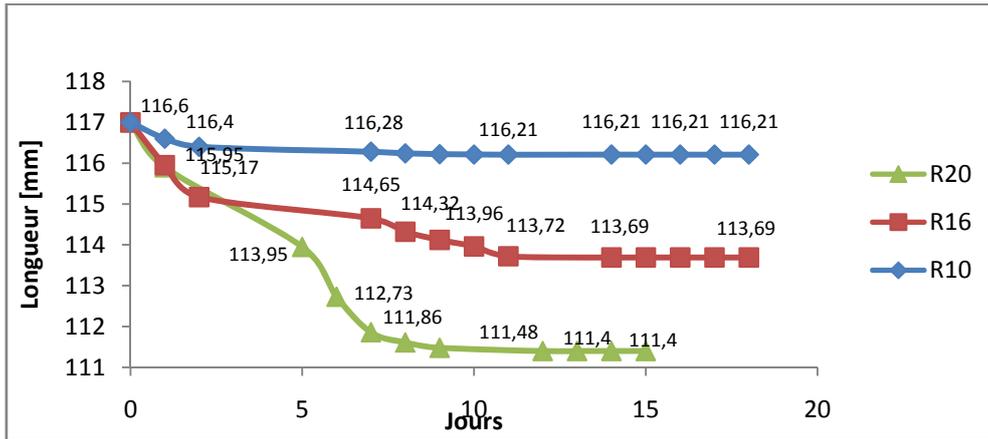


Figure IV.5: Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16, R20

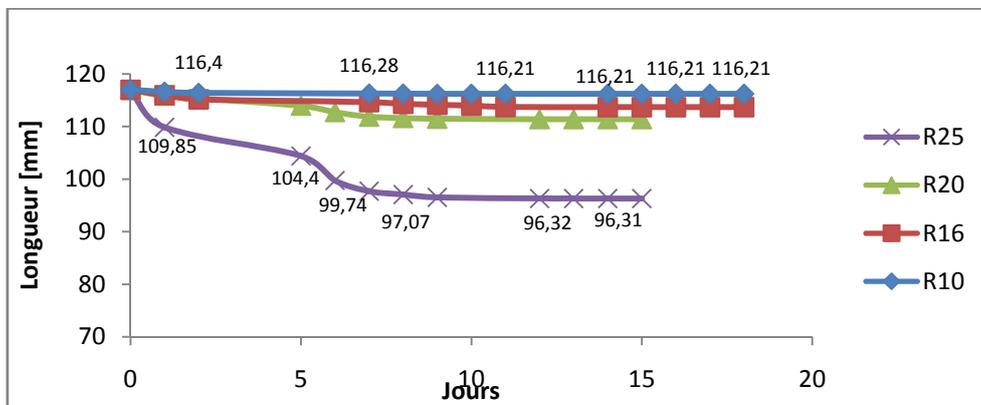


Figure IV.6: Variation de la longueur en fonction du temps R10, R16, R20, R25

➤ **La marne**

- ✓ Le sol confectionné avec 10% d'eau, présente un raccourcissement très faible (figure IV.7).
- ✓ M10 et M16 : Le raccourcissement de M16 est plus important que celui de M10 (figure IV.8).
- ✓ Figure IV.9 : La courbe de M10 et M16 s'aplatissent devant celle de M24, ce qui veut dire que leurs raccourcissement est négligeable par rapport à M24.
- ✓ Sur la figure IV.10 on observe que les courbes de M10 et M16 sont plate devant celles de M24 et M30 qui sont concaves.

La longueur ne varie plus à partir du 10<sup>ème</sup> jour pour M10, M16, M24 et à partir du 11<sup>ème</sup> jour pour M30.

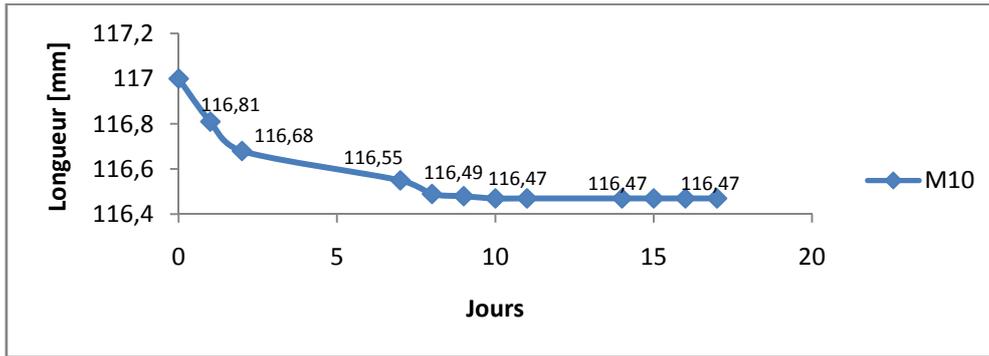


Figure IV.7: Variation de la longueur en fonction du temps M10

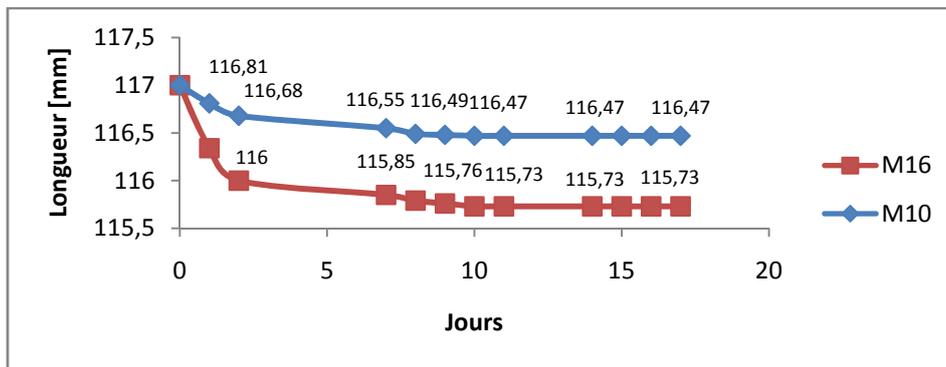


Figure IV.8 : Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16

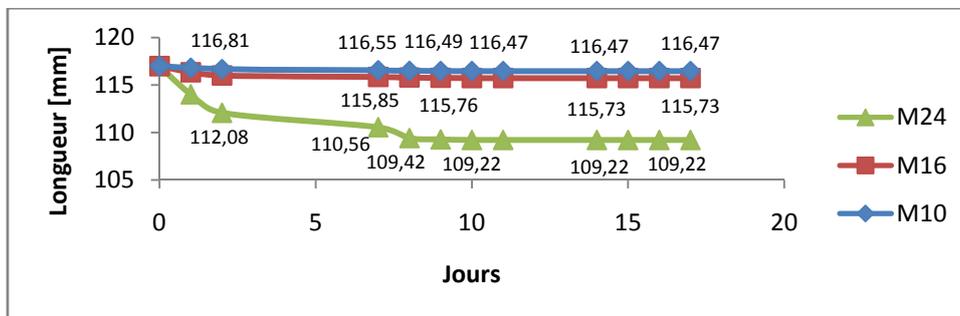
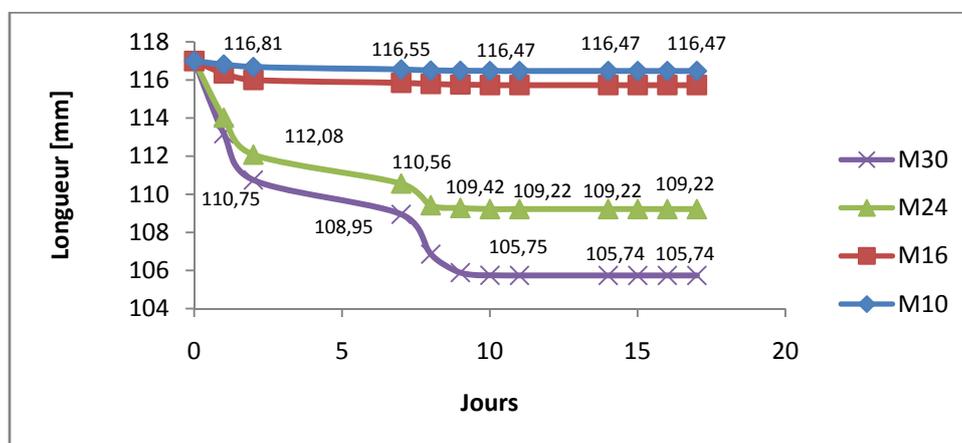


Figure IV.9: Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16, M24

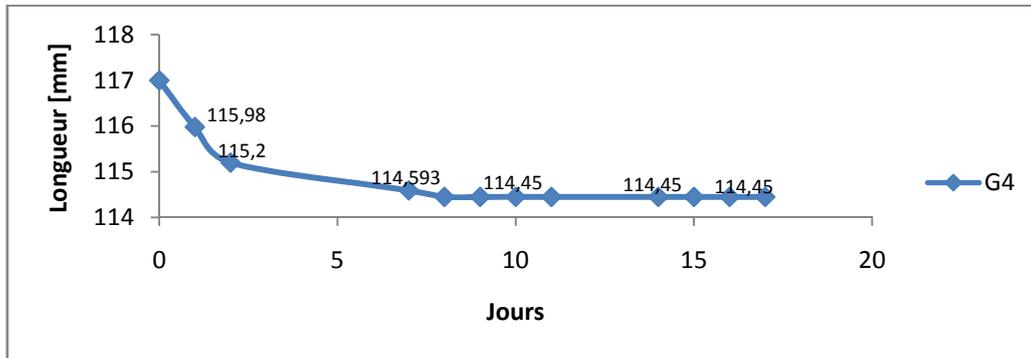


**Figure IV.10:** Variation de la longueur en fonction du temps M10, M16, M24, M30

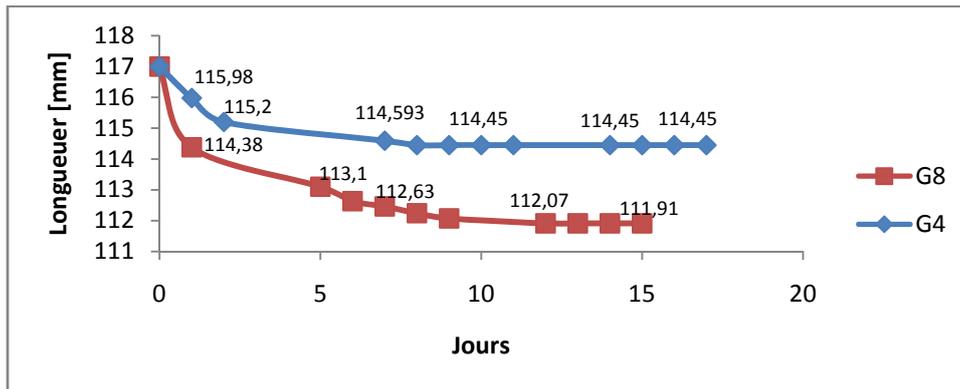
➤ **L'argile grise**

- ✓ Sur la figure IV.11 on observe un raccourcissement non négligeable du sol du sol dans les 3 premiers jours.
- ✓ A la figure suivante (IV.12), le raccourcissement de G8 dépasse celui de G4.
- ✓ La courbe de G10 est plus concave que celle de G8 qui est plus concave que G4 (figure IV.13).
- ✓ Sur la figure IV.14 on observe deux zones de courbes, les courbes G4, G8 et G10 sont plates comparées à celle de G12, ce qui veut dire que le raccourcissement de G4, G8 et G10 est faible devant celui de G12.

La longueur ne varie plus à partir du 8<sup>ème</sup> jour pour G4, du 1<sup>2ème</sup> jour pour G8, du 12<sup>ème</sup> jour pour G10 et du 13<sup>ème</sup> jour pour R25.



**Figure IV.11 :** Variation de la longueur en fonction du temps de G4



**Figure IV.12:** Variation de la longueur en fonction du temps de G4 et G8

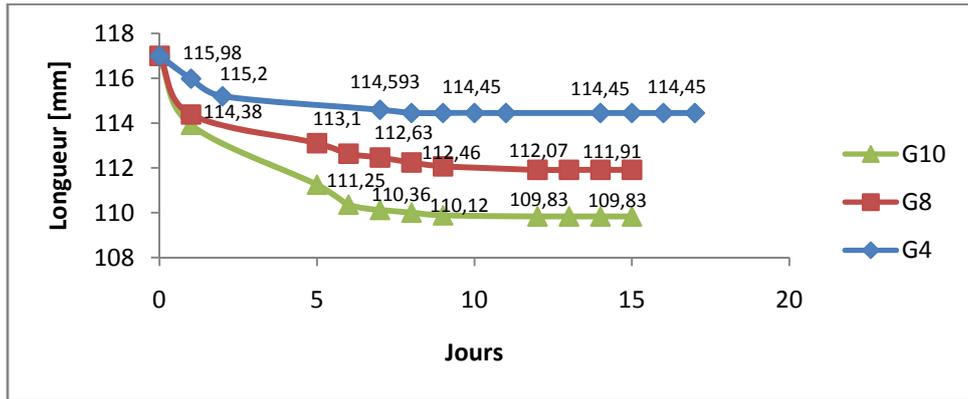


Figure IV.13: Variation de la longueur en fonction du temps de G4, G8 et G10

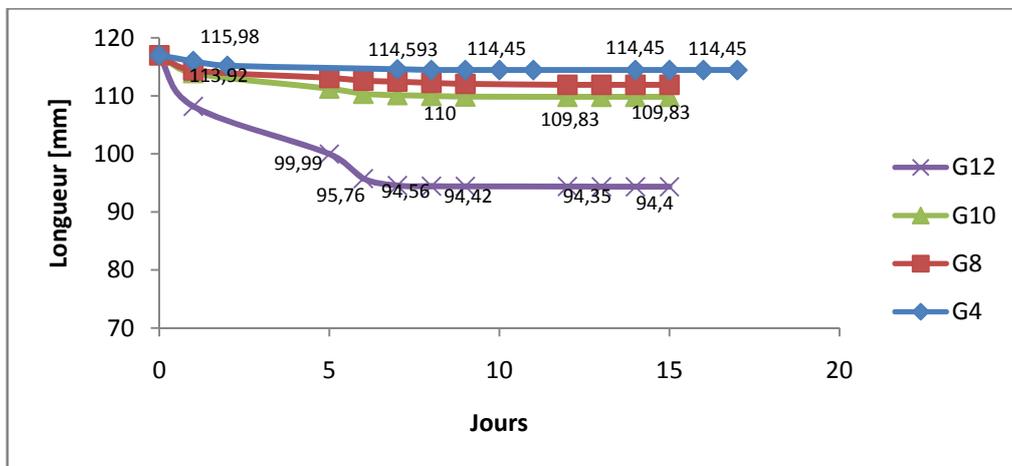


Figure IV.14: Variation de la longueur en fonction du temps de G4, G8, G10 et G12

### VI.2.1.2.2. Variation de la masse en fonction de la longueur

Lorsque l'éprouvette saturée se dessèche on observe sur les figures représentant la variation de la masse en fonction de la longueur trois zones très différentes :

**Zone de forte humidité :** cette zone est caractérisée par une portion de droite rectiligne et inclinée représentant la phase pendant laquelle la diminution de la masse est proportionnelle à la diminution de la longueur. Plus la perte de masse est importante plus le raccourcissement de la longueur est important. Le départ de l'eau s'accompagne d'un rapprochement des particules. Ces particules s'enchevêtrent jusqu'à ce qu'elles soient en contact et ne peuvent plus se déplacer. Ce rapprochement des particules entraîne du même coup une diminution dimensionnelle. Le sol est toujours saturé et sa longueur diminue. Sur la courbe, il est facile de repérer le point où la courbe n'est plus rectiligne. Ce point correspond à la teneur en eau où l'échantillon n'est plus saturé et pour laquelle le retrait cesse ou évolue de façon négligeable. Cette teneur en eau est appelée limite de retrait. Les mêmes figures montrent que la longueur du segment incliné, qui représente un palier de plasticité, est d'autant plus longue que la teneur en eau de fabrication est élevée.

**Zone intermédiaire :** la masse diminue et le retrait est nul ou négligeable.

**Zone de retrait nul :** dans l'autre portion de droite, parallèle à l'axe vertical portant la masse, on constate que dans cette phase, la masse de l'éprouvette diminue et la longueur reste constante. Les grains sont en contact et ne peuvent plus se rapprocher. L'élimination de l'eau ne fait plus varier la longueur mais désature l'échantillon. La longueur de l'éprouvette reste constante tandis que la masse continue de diminuer. Dans cette phase le raccourcissement de la longueur est stabilisé mais le départ de l'eau continu.

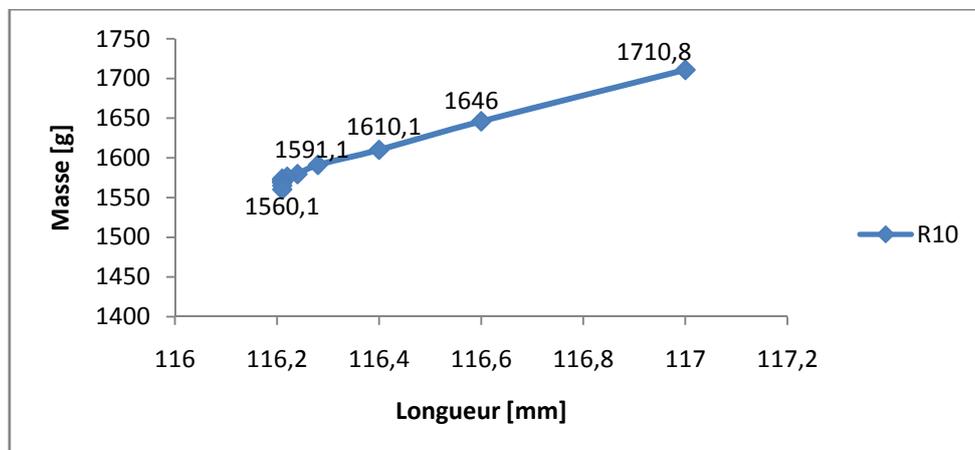
-L'indice de plasticité qui est dans ce cas la longueur du segment rectiligne est proportionnel à la teneur en eau de façonnage donc le palier de plasticité dépend de la teneur en eau.

➤ **L'argile rouge**

- ✓ Sur la figure IV.16, on constate que la zone de forte humidité de R16 est plus importante que celle de R10, ce qui signifie que son indice de plasticité est plus grand.
- ✓ Sur la figure IV.17 nous observons que l'indice de plasticité de R20 est supérieur à celui de R16, et celui de R10.
- ✓ Sur la figure IV.18 on observe que les indices de plasticité de R10, R16 et R20 correspondant aux longueurs des segments de droite de la zone de forte humidité des sols, sont négligeables devant l'indice de R25 qui est excessivement large.

-L'indice de plasticité de l'argile rouge croît en augmentant la teneur en eau du sol.

- Les segments de droite correspondent aux retraits normaux des matériaux, leurs pentes augmentent avec la croissance de la masse volumique sèche du matériau et diminuent avec sa décroissance. La pente du segment de R25 est moins importante que les autres sols.



**Figure IV.15:** Variation de la masse en fonction de la longueur R10

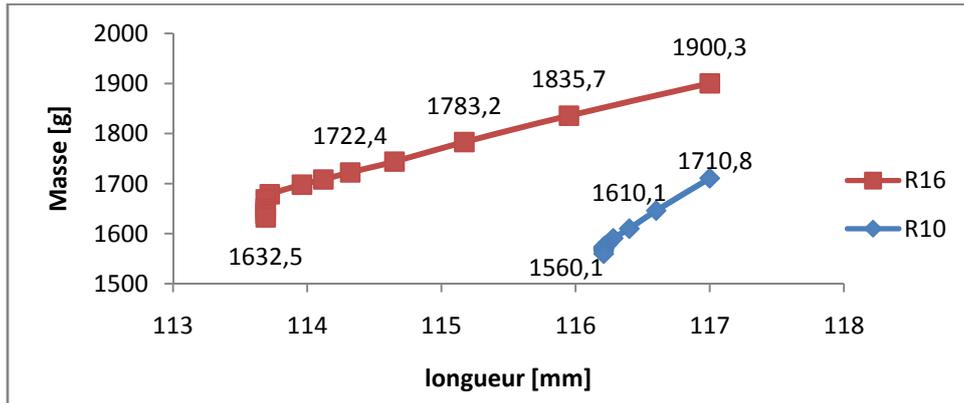


Figure IV.16: Variation de la masse en fonction de la longueur R10 et R16

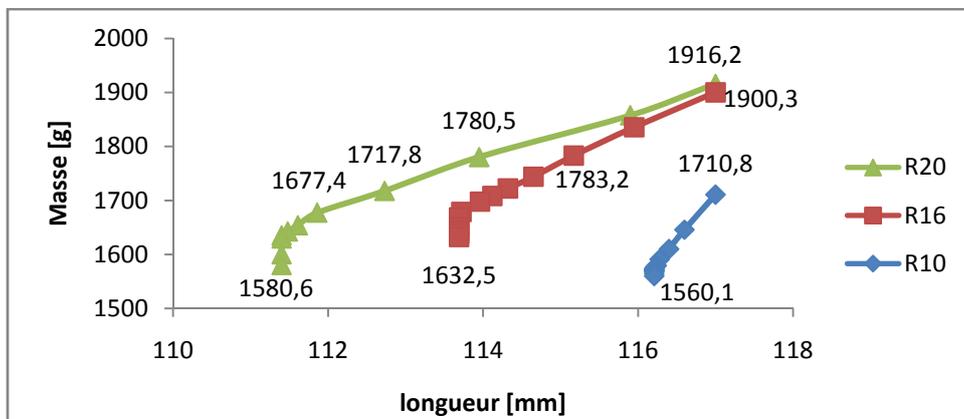


Figure IV.17: Variation de la masse en fonction de la longueur R10, R16 et R20

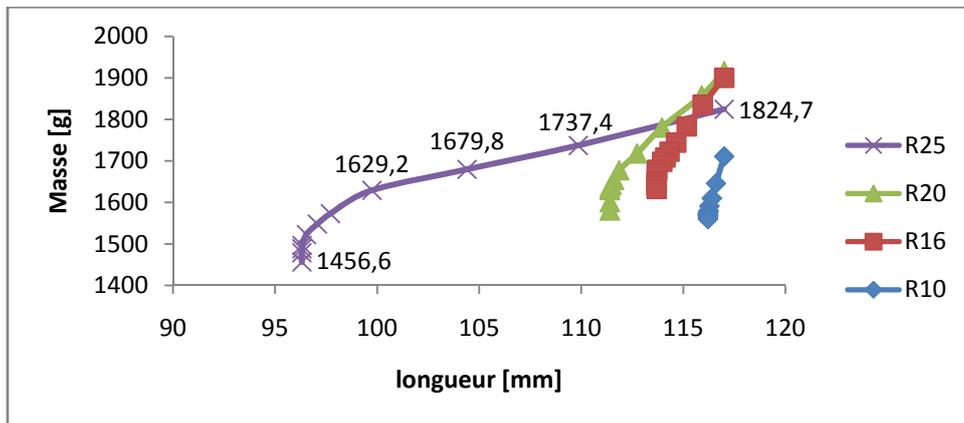


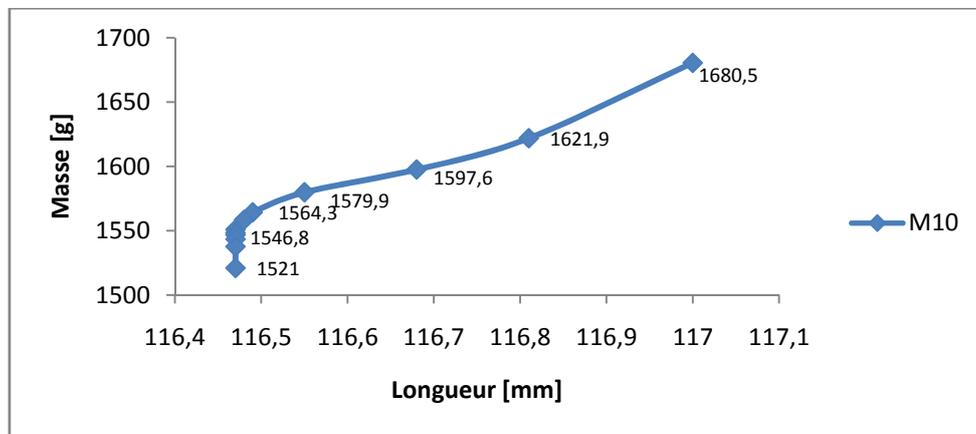
Figure IV.18: Variation de la masse en fonction de la longueur R10, R16, R20 et R 25

➤ **La marne**

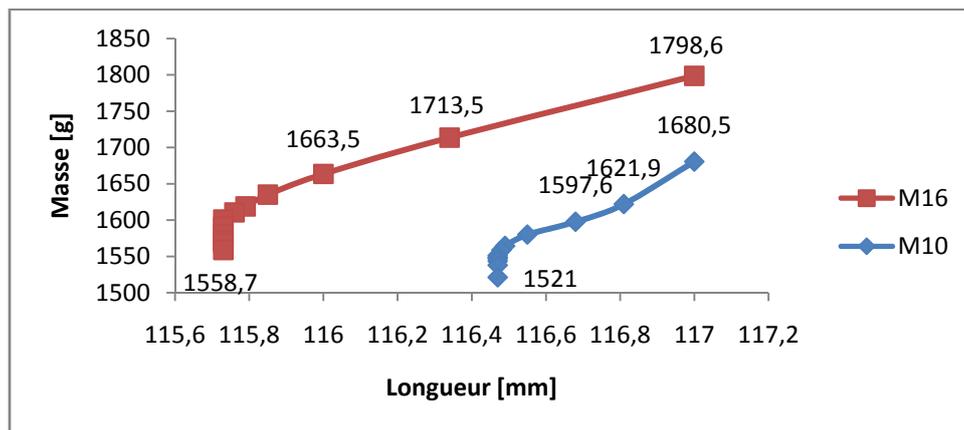
- ✓ La longueur du segment de droite, qui correspond à l'indice de plasticité, de M10 est inférieure à celle de M16 (figure IV.20).
- ✓ De la figure IV.21, on a l'indice de plasticité de M24 qui dépasse largement celui de M10 et M16.
- ✓ Figure IV.22 : les indices de plasticité de M10 et M16 sont négligeables devant celui de M24 qui à son tour est inférieur à celui de M30.

-L'indice de plasticité de la marne croît en augmentant la teneur en eau du sol.

-La pente des segments de droite croît avec l'augmentation de la masse volumique sèche de la marne, et décroît avec sa diminution. Ce qui est observé à la figure IV.22, la pente de M30 est moins importante que celle de M24, et elle est négligeable devant celle de M10 et M16.



**Figure IV.19:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10



**Figure IV.20:** Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16

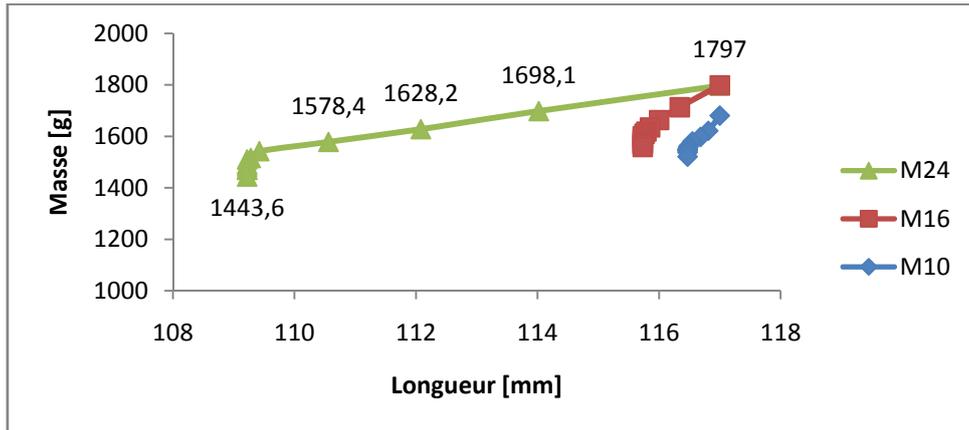


Figure IV.21: Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16, M24

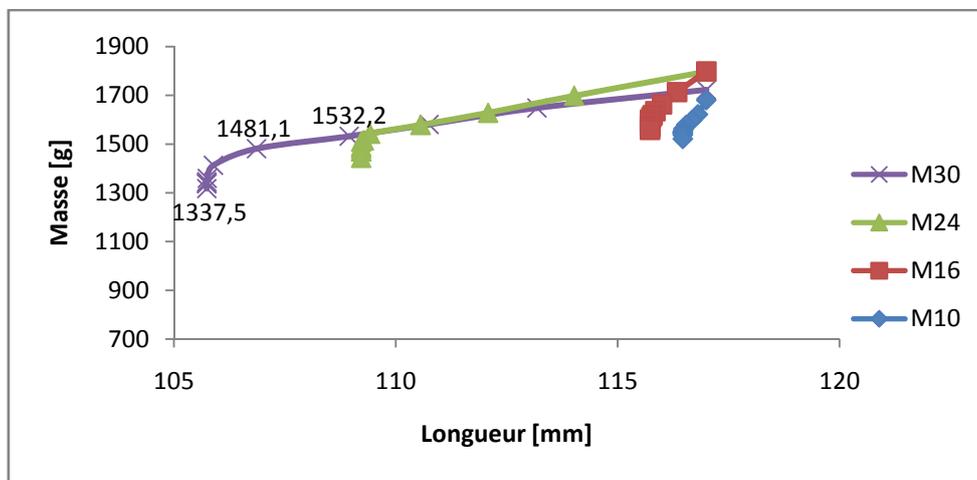


Figure IV.22: Variation de la masse en fonction de la longueur M10, M16, M24, M30

➤ **L'argile grise**

- ✓ L'étendue de la zone de forte humidité est important (figure IV.23).
- ✓ La longueur du segment de droite de G4 est inférieure à celui de G8, ce qui est de même pour l'indice de plasticité (figure IV.24).
- ✓ Figure IV.25 : l'indice de plasticité de G10 est supérieur à celui de G8. G4 présente un indice de plasticité négligeable.
- ✓ L'indice de plasticité de G12 est largement supérieur à celui des autres sols (figure IV.26).

-La pente des segments de droite augmente avec l'accroissement de la masse volumique sèche du sol, et diminue avec sa décroissance.

-L'indice de plasticité correspondant à la longueur du segment de droite croît en augmentant la teneur en eau de façonnage, ce qui veut dire que le domaine de plasticité du sol augmente.

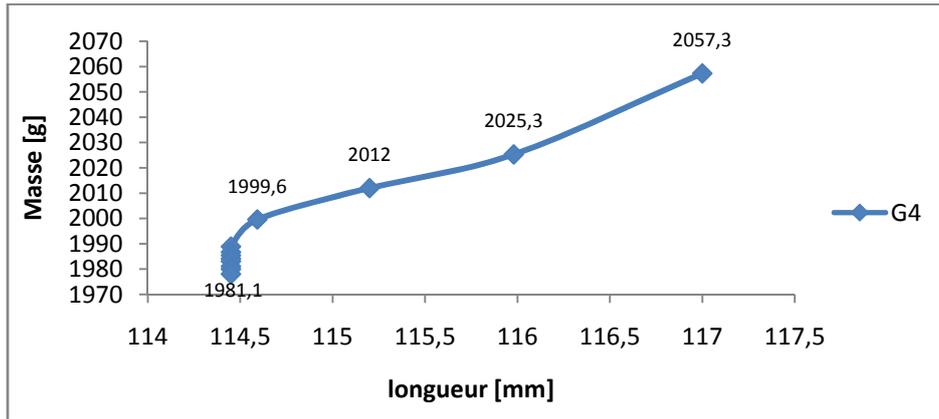


Figure IV.23: Variation de la masse en fonction de la longueur G4

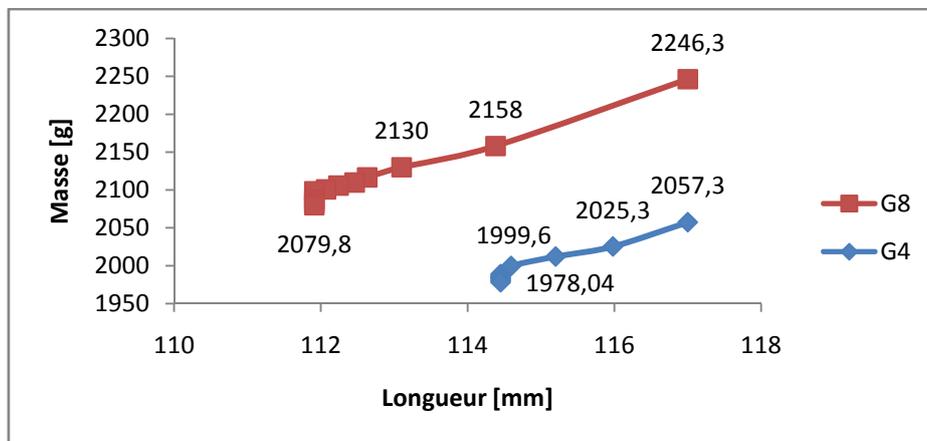


Figure IV.24: Variation de la masse en fonction de la longueur G4 et G8

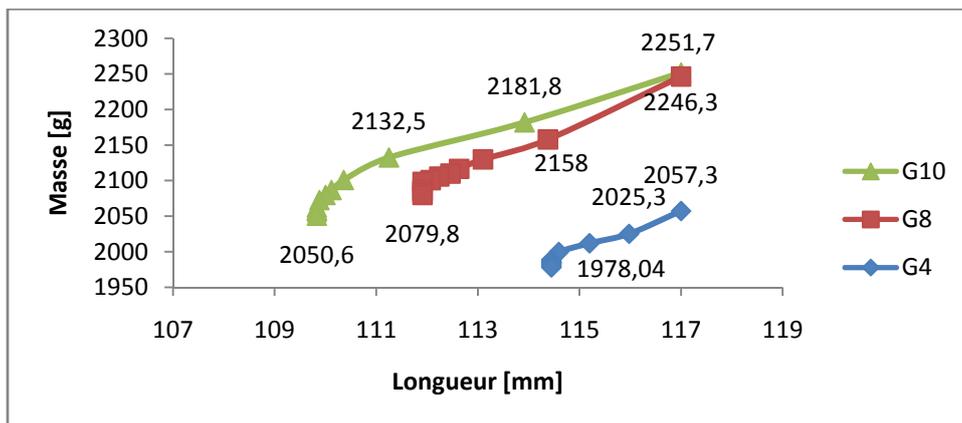


Figure IV.25: Variation de la masse en fonction de la longueur G4, G8 et G10

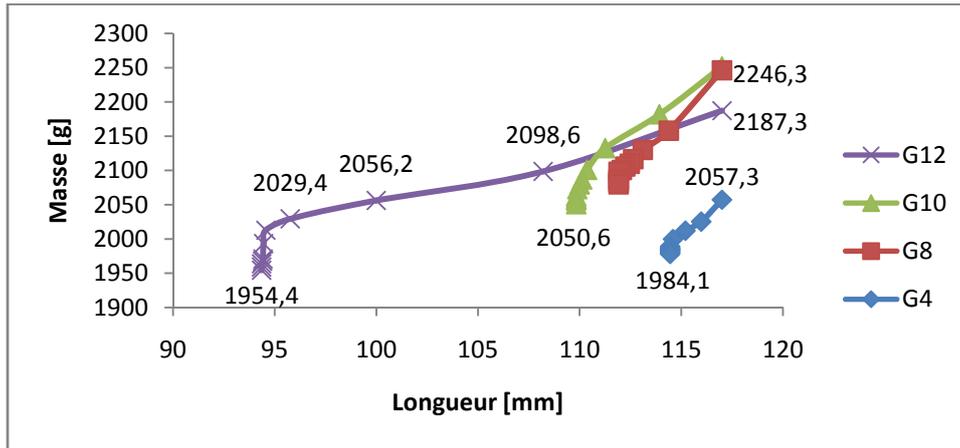


Figure IV.26: Variation de la masse en fonction de la longueur G4, G8, G10 et G12

### VI.2.1.2. 3. Variation de l'humidité en fonction du retrait

Sur les courbes qui représentent la variation de l'humidité en fonction du retrait apparaissent clairement les deux principales phases du retrait : retrait normal et l'absence de retrait.

**Retrait normal :** le retrait est proportionnel à la teneur en eau de saturation. Plus le pourcentage d'eau contenue dans le sol est élevé au moment du façonnage, plus le retrait de séchage est important. Le retrait varie linéairement en fonction de l'humidité. Cette humidité correspond à une teneur en eau de saturation car quand le volume de l'éprouvette varie, cette dernière reste toujours saturée tant que cette teneur en eau est supérieure à la limite du retrait.

**Absence du retrait :** le retrait nul est facile à remarquer sur l'axe des teneurs en eau car l'élimination de l'eau ne fait plus varier la longueur de l'échantillon mais le désature, donc cette zone correspond à l'absence du retrait.

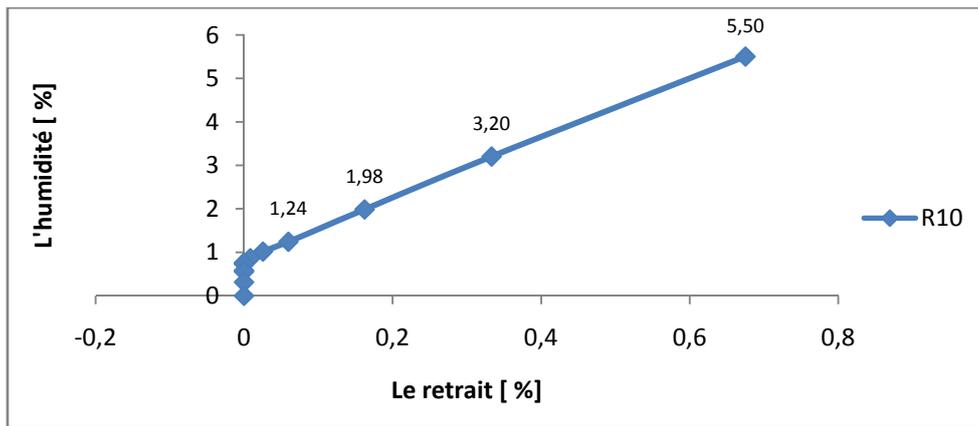
**La limite du retrait :** l'intersection de la droite représentant le retrait normal avec l'axe portant l'humidité (absence du retrait) donne la limite du retrait effective.

L'objectif visé par le tracé de la courbe humidité en fonction du retrait est le même que celui du tracé de la courbe de la masse en fonction de la longueur. Les deux courbes nous informent sur la limite du retrait. Alors le retrait peut être étudié par les deux méthodes, mais il est plus aisé de tracer la courbe de variation de la masse en fonction de la longueur où nous utilisons les mesures tirées directement des essais de laboratoire, que celle de l'humidité en fonction du retrait où nous devons passer par une série de calcul pour l'obtenir.

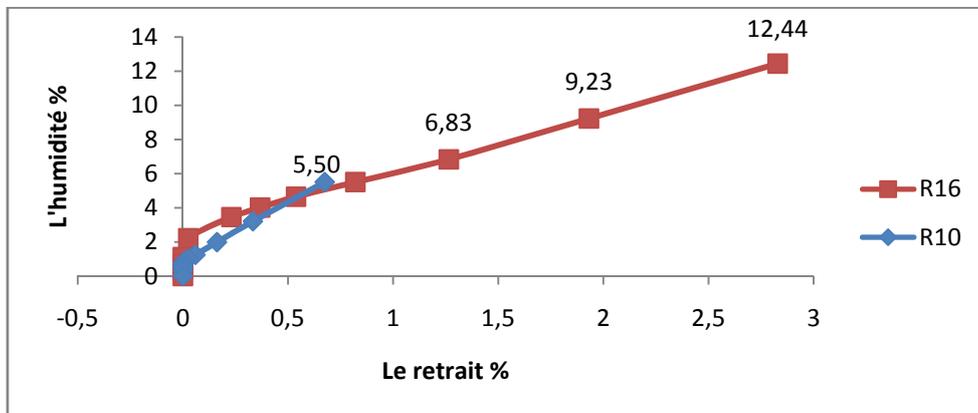
➤ **L'argile rouge**

- ✓ La zone de retrait normal de R10 est négligeable devant celle de R16 et sa zone de retrait nul aussi (figure IV.28).
- ✓ La zone de retrait normale de R20 est plus importante que celle de R16, celle de R10 est imperceptible devant celle de R20 (figure IV.29).
- ✓ La figure IV.30 montre que le sol R25 a la zone de retrait normal la plus importante.

-L'étendue de la zone de retrait normal dépend de l'humidité initiale du sol.



**Figure IV.27:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10



**Figure IV.28:** Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16

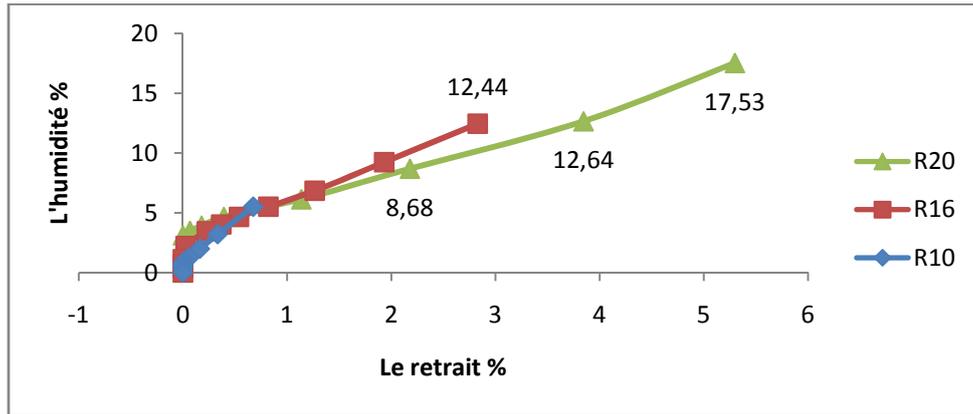


Figure IV.29: Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16 et R20

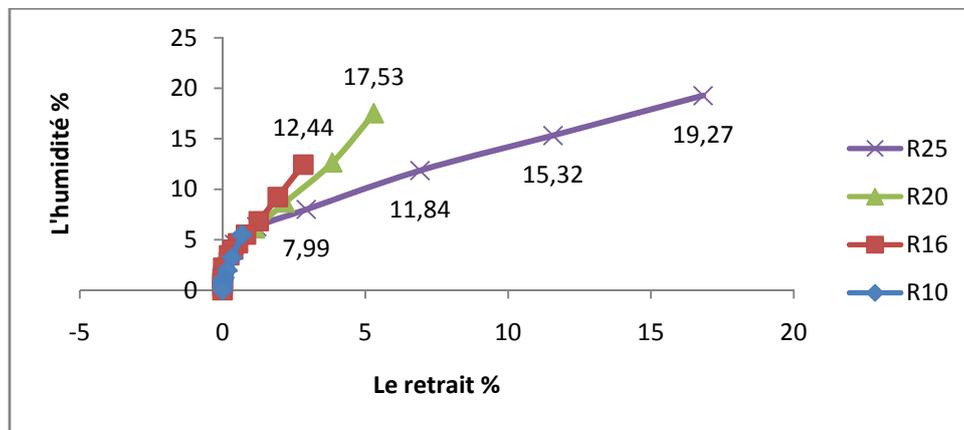


Figure IV.30: Variation de l'humidité en fonction du retrait R10, R16, R20 et R25

-Des courbes précédemment présentées on tire la limite du retrait effective de l'argile rouge. Cette limite augmente avec la croissance de la teneur en eau de façonnage des éprouvettes.

Echantillon	R10	R16	R20	R25
Limite de retrait effective $w_{re}(\%)$	0,8	2,69	3,24	5,62

Tableau [16] : Limites de retrait effectives de l'argile rouge

➤ **La marne**

- ✓ Figure IV.32: La zone de retrait normal de M16 est plus importante que celle de M10,
- ✓ Figure IV.33 : La zone de retrait normal de M24 est plus importante que celle de M10 et M16.
- ✓ Sur la figure IV.34, nous observons que la zone de retrait normal de M30 est plus large que celle de M24, mais les courbes de M10 et M16 sont négligeables devant les premières.

-La zone de retrait normal de la marne s'élargit avec l'augmentation de la teneur en eau du sol.

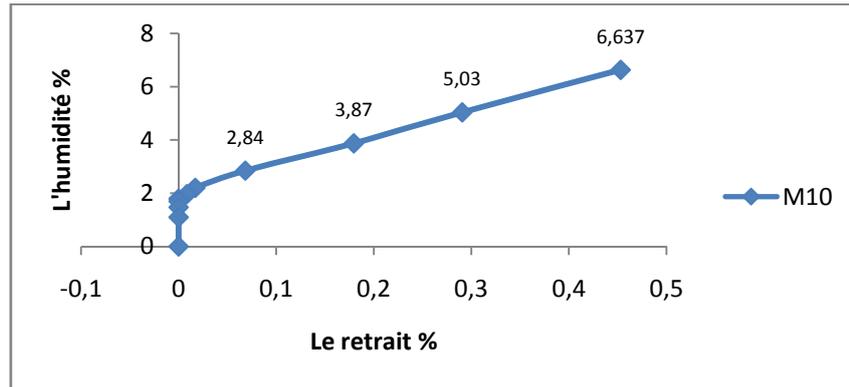


Figure IV.31: Variation de l'humidité en fonction du retrait M10

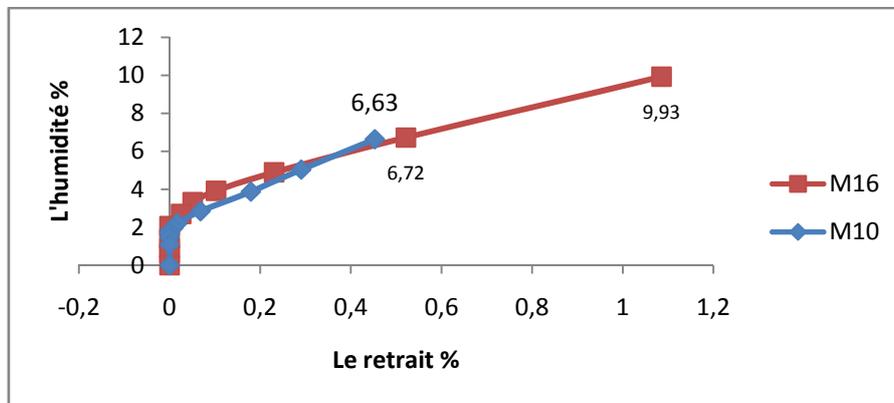


Figure IV.32: Variation de l'humidité en fonction du retrait M10 et M16

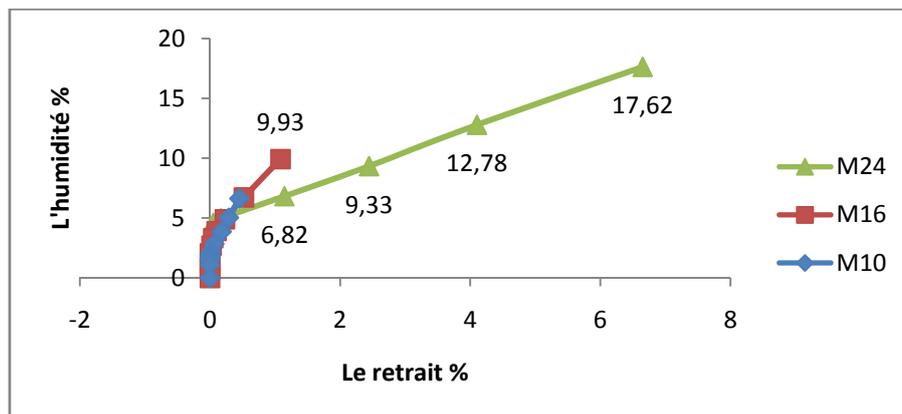
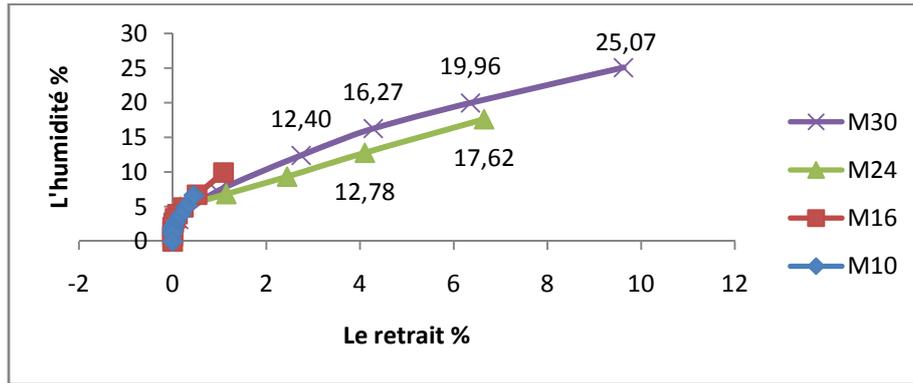


Figure IV.33: Variation de l'humidité en fonction du retrait M10, M16 et M24



**Figure IV.34:** Variation de l'humidité en fonction du retrait M10, M16, M24 et M30

-La limite du retrait effective de la marne augmente avec la croissance de la teneur en eau de façonnage des éprouvettes de sol.

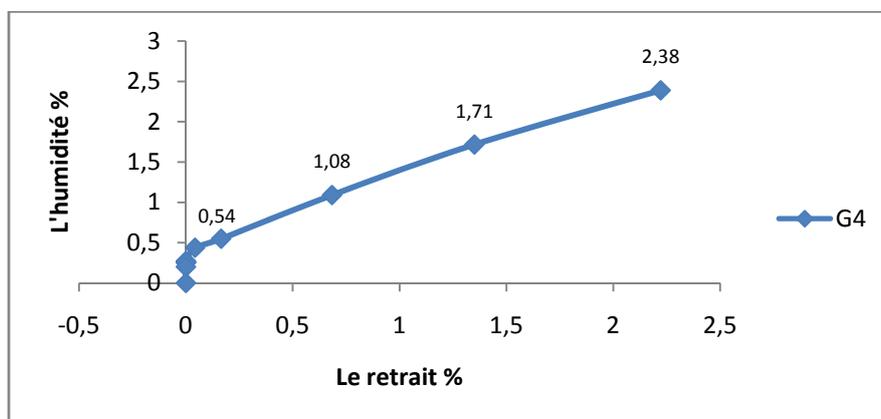
Echantillon	M10	M16	M24	M30
Limite de retrait effective $w_{re}$ (%)	1,95	3,26	4,56	6,5

**Tableau [17]:** Limites de retrait effectives de la marne

➤ **L'argile grise**

- ✓ Sur la figure IV.35 nous observons une zone de retrait normale large devant celle de retrait nulle.
- ✓ A la figure suivante (IV.36), la droite qui représente le retrait normale de G8 est plus longue que celle de G4.
- ✓ Figure IV.37 : le retrait normal de G10 dépasse celui de G8 qui, à son tour, dépasse le retrait normal de G4.
- ✓ A la figure IV.38 nous constatons que le retrait normal de G12 est largement supérieur aux autres sols.

-La zone de retrait normal s'élargie avec l'augmentation de la teneur en eau.



**Figure IV.35:** Variations de l'humidité en fonction du retrait G4

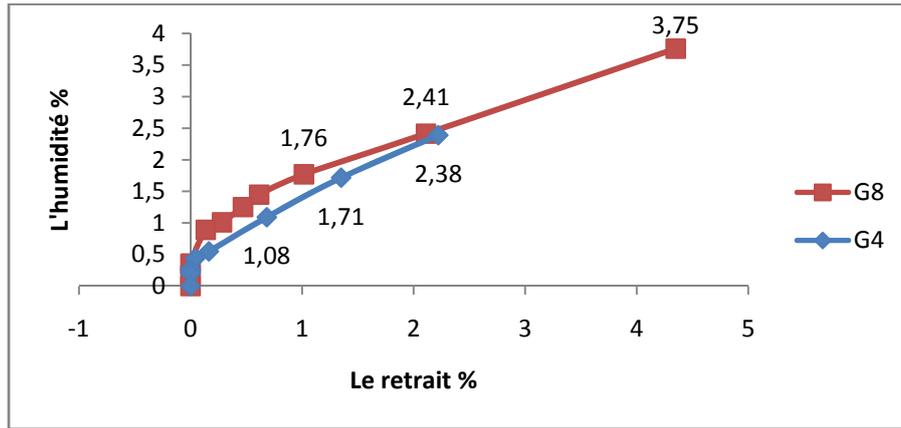


Figure IV.36: Variation de l'humidité en fonction du retrait G4 et G8

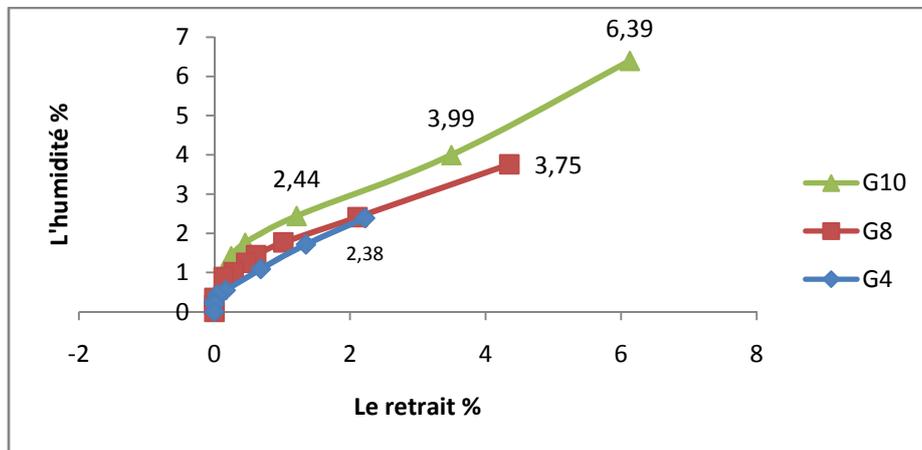


Figure IV.37: Variation de l'humidité en fonction du retrait G4, G8 et G10

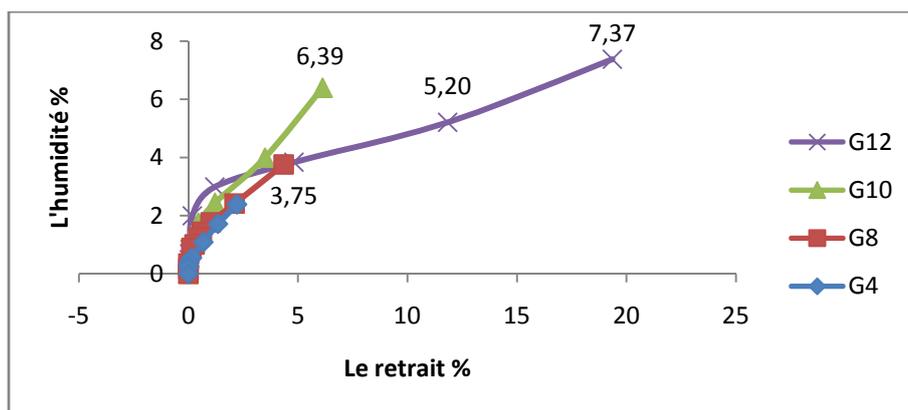


Figure IV.38: Variation de l'humidité en fonction du retrait G4, G8, G10 et G12

-La limite de retrait effective de l'argile grise croît avec l'augmentation de la teneur en eau de façonnage.

Echantillon	G4	G8	G10	G12
Limite de retrait effective $w_{re}$ (%)	0,42	0,88	1,31	2,64

**Tableau [18] :** Limites de retrait effectives de l'argile grise

#### VI.2.1.2.4. Comparaison entre les sols

La comparaison des trois sols est faite à une teneur en eau égale (10%). Nous comparons aussi l'argile rouge et la marne à la teneur en eau optimale, puisque c'est la même (16%).

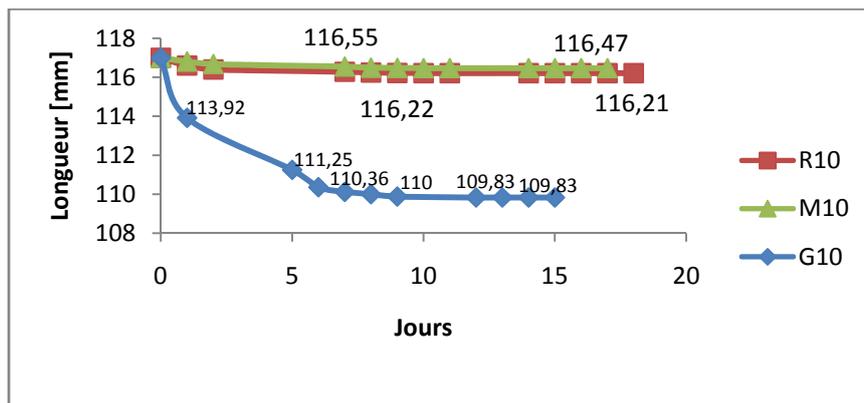
Pour la même teneur en eau l'argile grise présente un retrait plus important que les deux autres sols. L'argile rouge a un retrait plus important que la marne.

La limite de retrait de la marne est supérieure à celle de l'argile grise, et celle de l'argile grise est supérieure à celle de l'argile rouge.

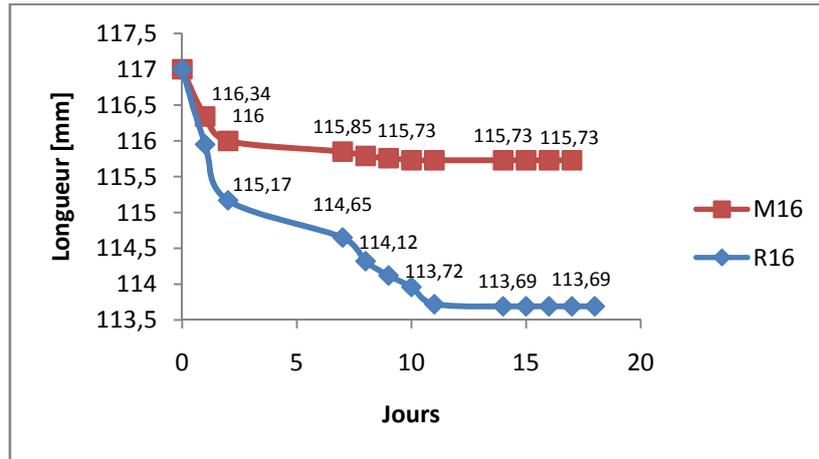
➤ **Variation de la longueur en fonction du temps**

- ✓ Les courbes de raccourcissement de M10 et R10 sont plates devant celle de G10 qui est très concave (figure IV.39), ce qui traduit que la marne et l'argile rouge ont un raccourcissement très faible devant l'argile grise.
- ✓ A 16% d'eau l'argile rouge a un raccourcissement plus important que la marne et il est plus perceptible que dans le cas de 10% d'eau (figure IV.40).

Sur la figure IV.39, on constate que la stabilisation du raccourcissement se produit au 10<sup>ème</sup> jour pour la marne et l'argile rouge, et au 12<sup>ème</sup> jour pour l'argile grise.



**Figure IV.39:** comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de R10, M10 et G10



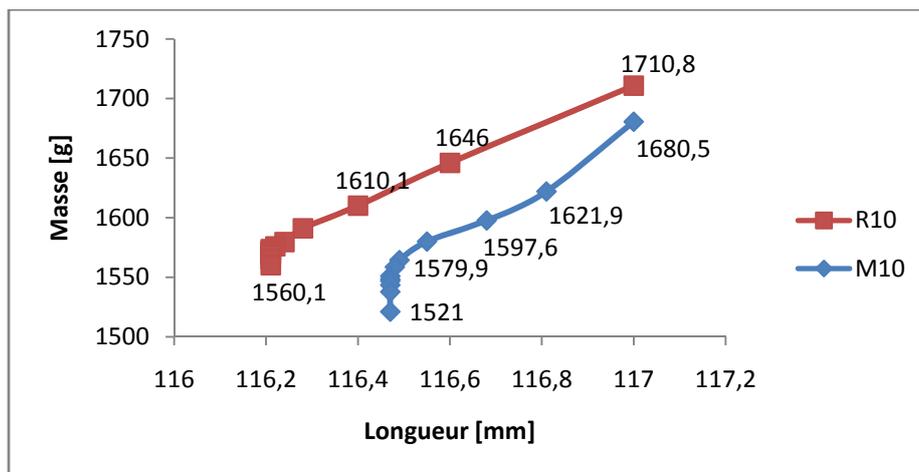
**Figure IV.40:** Comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de R16 et M16

➤ **La variation de la masse en fonction de la longueur**

- ✓ L'indice de plasticité qui est, la longueur du segment rectiligne, est plus grand pour l'argile rouge que pour la marne (figure IV.41). A la teneur en eau de 10% la différence n'est pas importante, mais à 16% d'eau la différence est flagrante (figure IV.42).
- ✓ L'argile grise présente un segment plus long que les deux autres, ce qui veut dire un indice de plasticité plus important (figure IV.43).

Les limites de retrait des sols sont déduites des courbes de variation de la masse en fonction de la longueur on a : à 10% d'eau la limite de retrait de l'argile rouge (0,8%) est inférieure à celle de l'argile grise (1,35%) qui, a son tour est inférieure à celle de la marne (1,95%).

A 16% d'eau, la limite de retrait de l'argile rouge (2,69%) est inférieure à celle de la marne (3,26%).



**Figure IV.41:** Comparaison de la variation de la masse en fonction de la longueur de R10 et M10

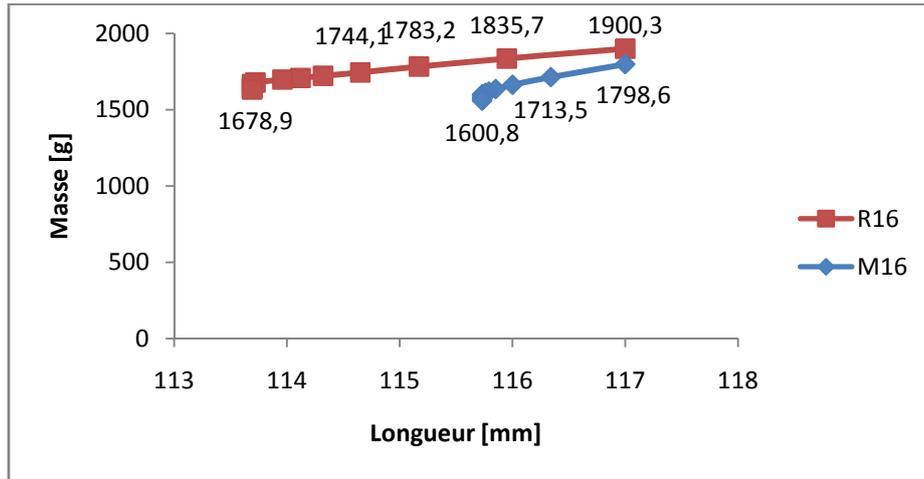


Figure IV.42 : Comparaison de la variation de la masse ne fonction de la longueur de R16 et M16

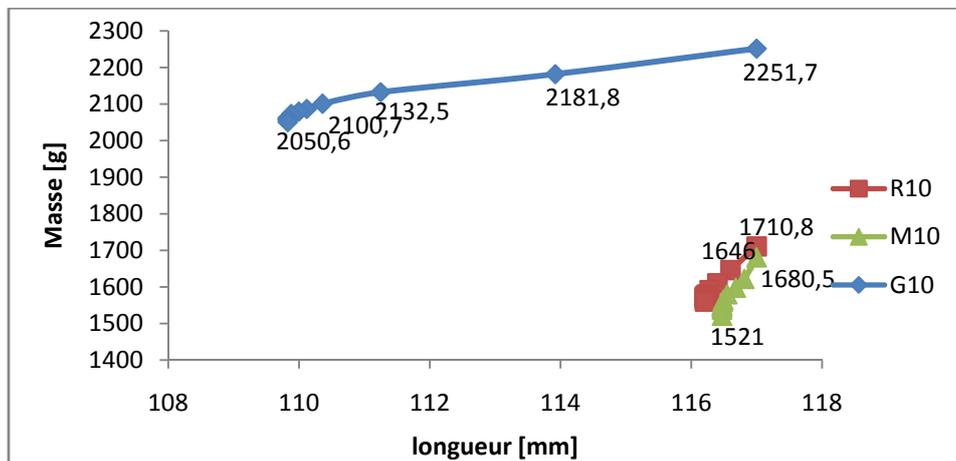


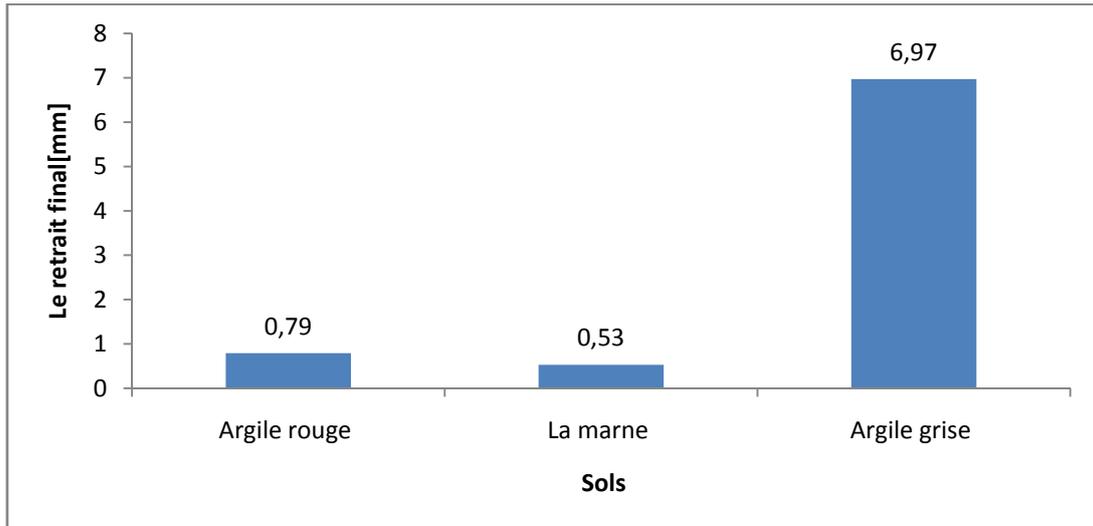
Figure IV.43: comparaison de la variation de la masse en fonction de la longueur de R10, M10, G10

➤ **Comparaison des retraits finaux**

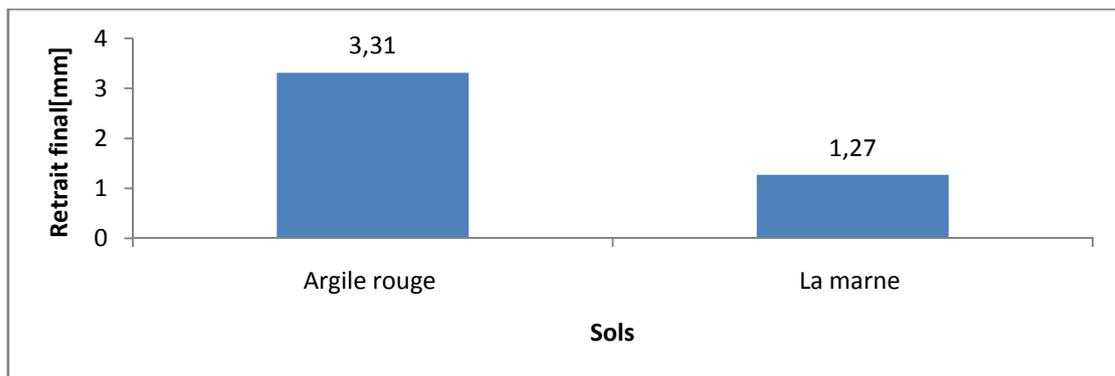
Lorsque les éprouvettes de sols sont passées à l'étuve, on obtient les retraits représentés sur les figures IV.44 et IV.45.

Avec 10% d'eau, l'argile grise présente un retrait qui dépasse largement les deux autres sols (figure IV.44). L'argile rouge présente un retrait faiblement supérieur au retrait de la marne.

A la teneur en eau optimale (figure IV.45) l'argile rouge présente un retrait largement supérieur au retrait de la marne.



**Figure IV.44** : comparaison entre les retraits finaux des sols à 10% d'eau.



**Figure IV.45** : comparaison entre les retraits finaux de l'argile rouge et la marne à 16% d'eau.

## IV.2.2. Effet du traitement à la chaux (Sols stabilisés)

La stabilisation des sols est faite a des teneurs en eau de saturation, 25% pour l'argile rouge, 30% pour la marne et 12% pour l'argile grise. Faute de temps, l'étude ne s'est portée que sur une dizaine de jours pour certaines éprouvettes et un peu moins pour d'autres. Au dernier jour les éprouvettes sont mises à l'étuve pour accélérer le retrait.

### IV.2.2.1. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont préparées de la même façon que le sol non stabilisé, en utilisant le même matériel (moule Proctor normal) et le même mode de compactage (dynamique).

La différence réside dans la teneur en eau de fabrication, et l'ajout d'un stabilisant. Pour chaque échantillon de sol (marne, argile rouge, argile grise) on fabrique des éprouvettes à une teneur en eau de saturation (chaque sol à sa propre teneur en eau de saturation), à la quantité initiale du sol sec on ajoute différents pourcentage de chaux (2%, 4%, 8% et 16%).

Et comme pour le sol non stabilisé, on prendra quotidiennement des mesures de raccourcissement de la hauteur des éprouvettes (en utilisant le même dispositif de mesure figure IV.1) et des mesures de leurs masses.

### IV.2.2.2. Présentation des résultats

#### Nomenclature:

- ✓ RS 2 : argile rouge stabilisée avec 2% de chaux
- ✓ RS 4 : argile rouge stabilisée avec 4% de chaux
- ✓ RS 8 : argile rouge stabilisée avec 8% de chaux
- ✓ RS 16 : argile rouge stabilisée avec 16% de chaux
- ✓ MS 2 : marne stabilisée avec 2% de chaux
- ✓ MS 4: marne stabilisée avec 4% de chaux
- ✓ MS 8: marne stabilisée avec 8%de chaux
- ✓ MS 16: marne stabilisée 16% avec de chaux
- ✓ GS 2: argile grise stabilisée avec de 2% chaux
- ✓ GS 4: argile grise stabilisée avec 4% de chaux
- ✓ GS 8: argile grise stabilisée avec 8% de chaux
- ✓ GS 16: argile grise stabilisée avec 16% de chaux

#### IV.2.2.2.1. Evolution de la longueur en fonction du temps

En présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur [9].

La chaux déshydrate le sol d'une part en fixant l'eau, et cause l'évaporation due à l'échauffement par la réaction exothermique [21].

Les figures qui suivent montrent que :

Plus le dosage en chaux est important, plus la diminution de la longueur est plus faible. L'amplitude du raccourcissement de l'éprouvette est inversement proportionnelle au pourcentage ajouté de la chaux.

Les courbes pour les petites quantités de chaux sont concaves, puis elles tendent à s'aplatir.

##### ➤ L'argile rouge

- ✓ Le raccourcissement de la longueur devient moins important en augmentant la quantité de la chaux.
- ✓ A 2% de chaux le raccourcissement est déjà diminué par rapport à l'éprouvette sans la chaux et qui a la même teneur en eau, mais il reste important.
- ✓ A 8% de chaux le raccourcissement de la longueur de l'éprouvette n'est pas perceptible à l'œil nu. A 16% le raccourcissement diminue mais il est proche de celui de 8% et la courbe est concave puis se redresse.

Pour la stabilisation à 2% de chaux, le raccourcissement de la longueur ne se stabilise pas (faute de temps). Pour 4% la stabilisation se produit à partir du 8<sup>ème</sup> jour, pour 8% au 7<sup>ème</sup> jour et au 6<sup>ème</sup> jour pour le 16%.

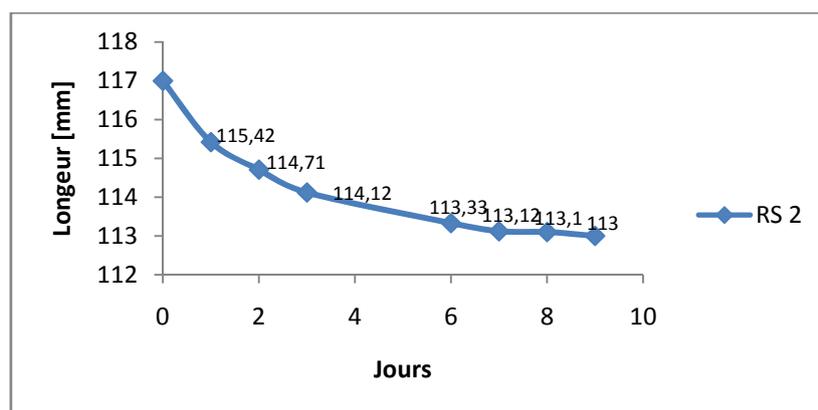


Figure IV.46: Variation de la longueur en fonction du temps RS 2

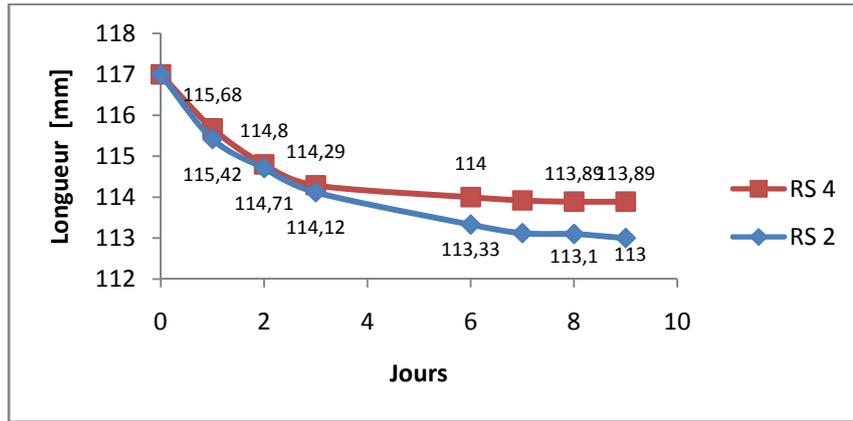


Figure IV.47: Variation de la longueur en fonction du temps RS 2 et RS 4

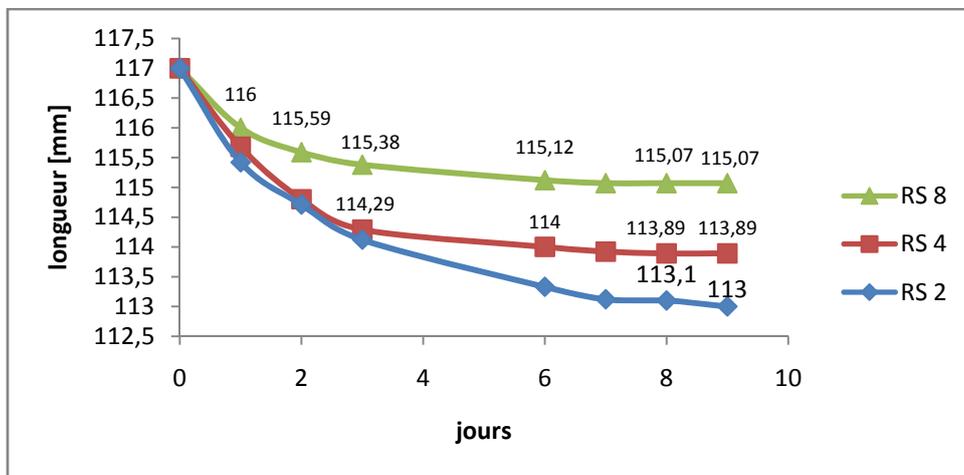


Figure IV.48: Variation de la longueur en fonction du temps RS 2, RS 4 et RS 8

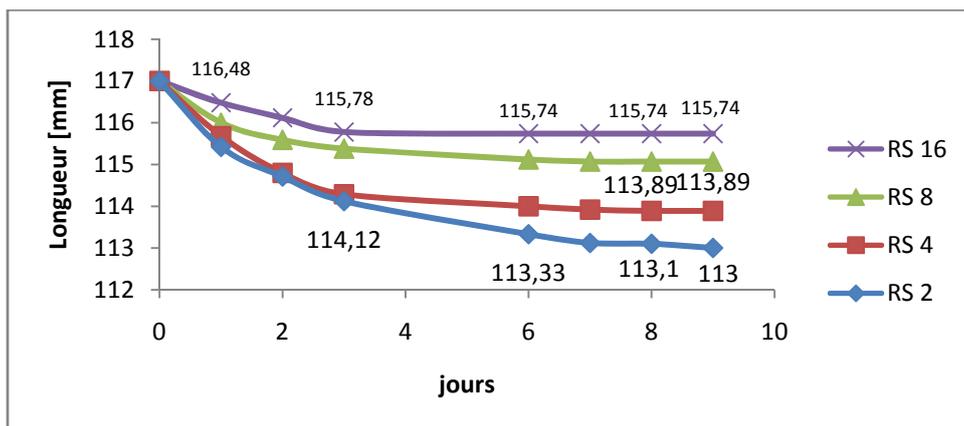
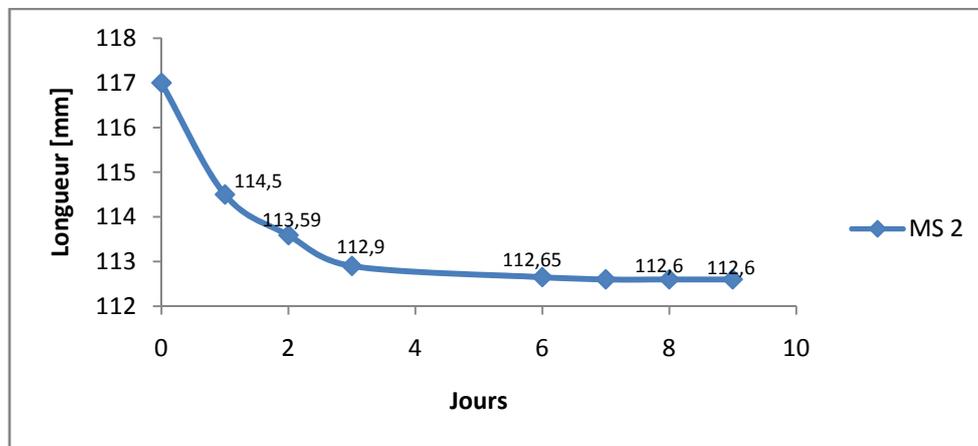


Figure IV.49 : Variation de la longueur en fonction du temps RS 2, RS 4, RS 8 et RS 16

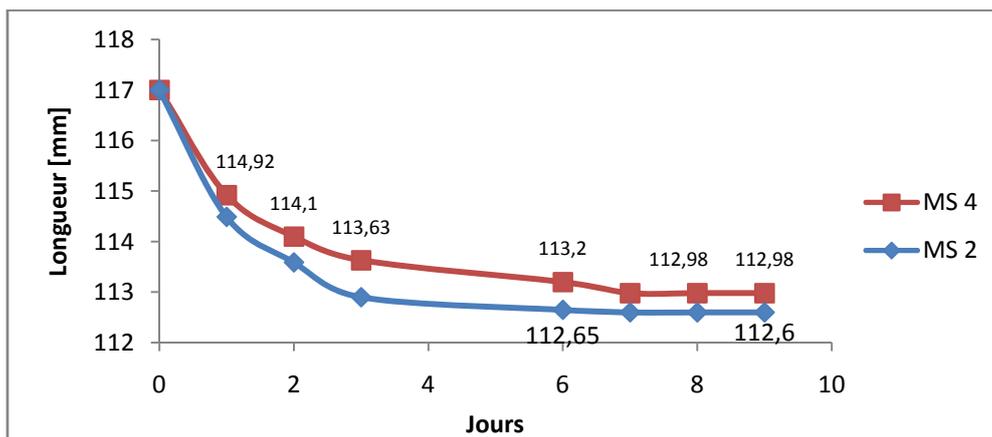
➤ **La marne**

- ✓ Le raccourcissement de la longueur devient moins important en augmentant la quantité de la chaux.
- ✓ A 2% de chaux le raccourcissement est déjà diminué par rapport à l'éprouvette sans la chaux et qui a la même teneur en eau.
- ✓ A 8% de chaux le raccourcissement de la longueur de l'éprouvette n'est pas perceptible à l'œil nu et 16% la longueur de l'éprouvette est très proche de la longueur initiale et sa courbe ne présente plus la concavité des précédente (elle est aplatie).

Le temps nécessaire pour la stabilisation se réduit, on aboutit à une stabilisation au bout de 7 jours pour 2% de chaux et 6 jours pour 16%. A 16% de chaux le raccourcissement de vient imperceptible (116,72mm).



**Figure IV.50:** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2



**Figure IV.51 :** Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4

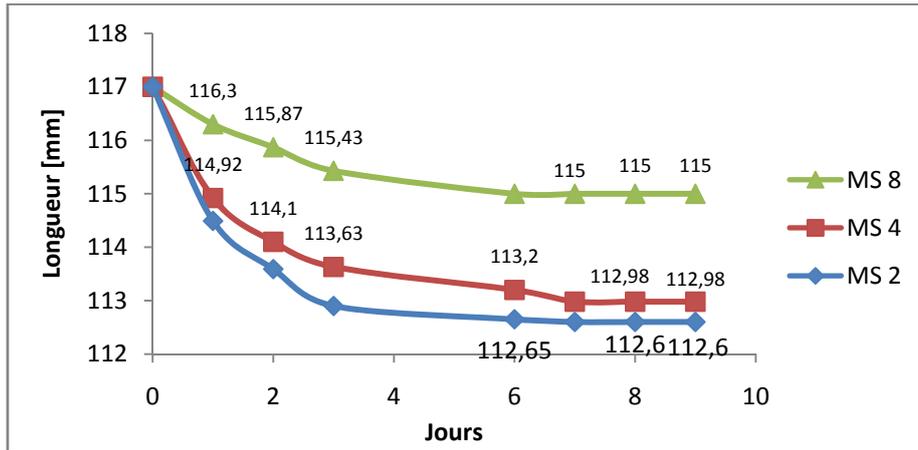


Figure IV.52: Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4, MS 8

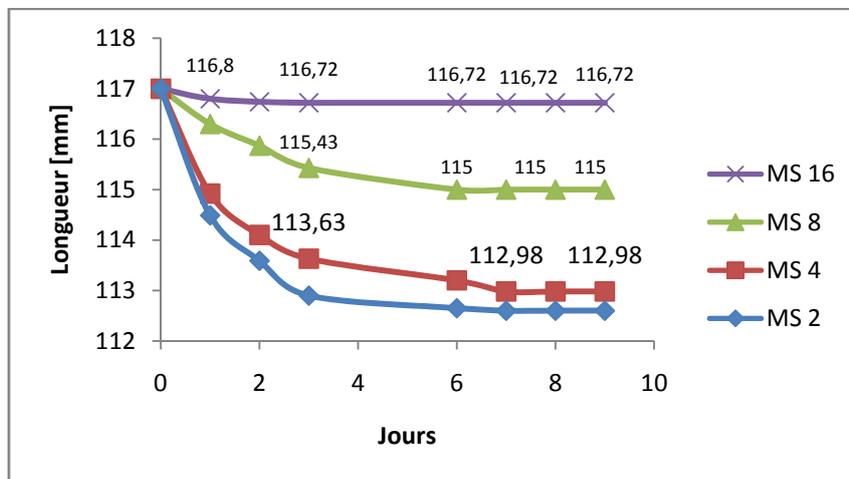


Figure IV.53: Variation de la longueur en fonction du temps MS 2, MS 4, MS 8, MS 16

➤ **L'argile grise**

- ✓ A 4% de chaux la courbe perd sa concavité et la longueur de l'éprouvette est proche de la longueur initiale du moule. A 8% le résultat est meilleur la courbe s'aplatie et le raccourcissement est négligeable.

Le temps nécessaire pour la stabilisation se réduit, on aboutit à une stabilisation au bout de 6 jours pour 8% de chaux. Le raccourcissement à 8% de chaux devient imperceptible.

Remarque : A 16% de chaux l'échantillon s'assèche rapidement, puis il s'effrite ce qui rend la lecture des raccourcissements impossible.

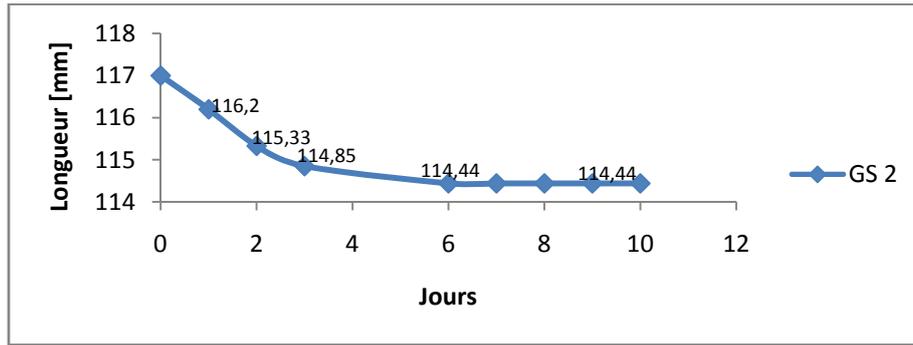


Figure IV.54: Variation de la longueur en fonction du temps GS 2

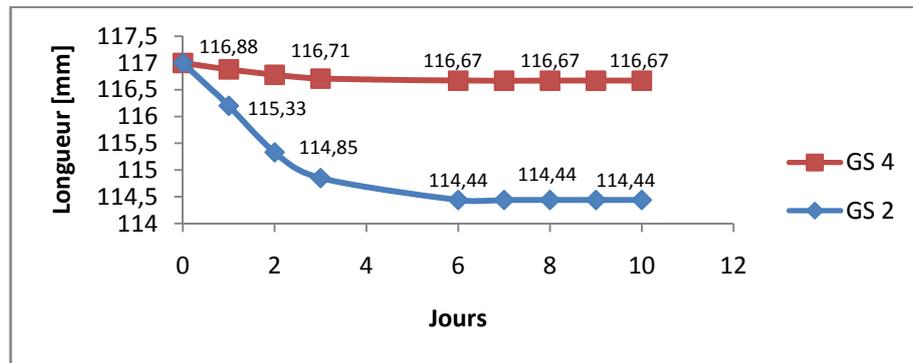


Figure IV.55: Variation de la longueur en fonction du temps GS 2, GS 4

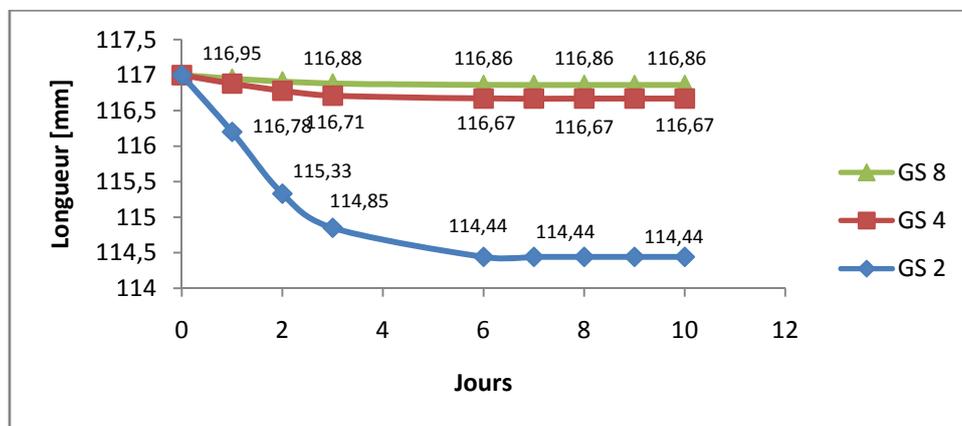


Figure IV.56: Variation de la longueur en fonction du temps GS 2, GS 4, GS 8

#### IV.2.2.2.2. Variation de la masse en fonction de la longueur

L'addition de la chaux aux sols plastiques réduit l'indice de plasticité ( $I_p$ ), et influence la limite de liquidité. D'après Davidson et Handy (1960) les ions de calcium provenant de la chaux sont à l'origine de la réduction de la plasticité des sols cohésifs, les rendant ainsi friables et faciles à compacter [21].

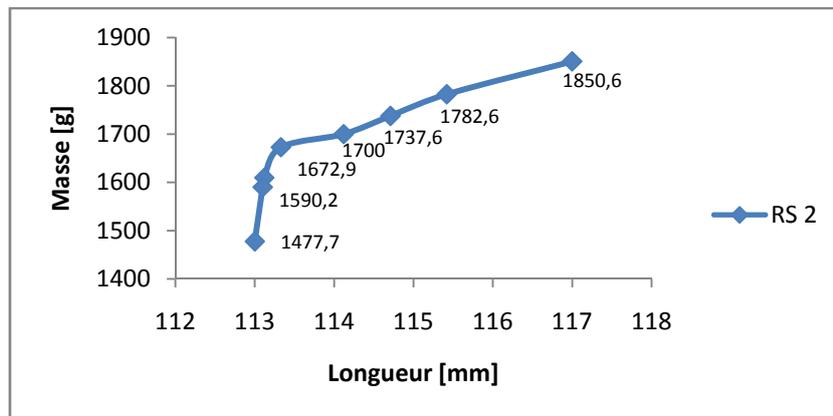
Sur les figures qui suivent nous constatons que

-La longueur du segment, qui représente l'indice de plasticité, diminue en augmentant la quantité de chaux ajoutée.

➤ **L'argile rouge**

- ✓ Figure IV.57 : L'indice de plasticité de RS 2 est grand.
- ✓ Sur la figure suivante (IV.58) on constate que la longueur de la droite représentant l'indice de plasticité de RS 4 est inférieure à celle de RS 2.
- ✓ L'indice de plasticité de RS 8 est inférieur à celui de RS 4 et RS 2 (figure IV.59).
- ✓ La longueur de droite est réduite de façon importante pour RS 16 comparé à celui des sols stabilisés, ce qui est de même pour l'indice de plasticité.

L'indice de plasticité de l'argile rouge diminue en augmentant la quantité de chaux.



**Figure IV.57:** variation de la masse en fonction de la longueur RS 2

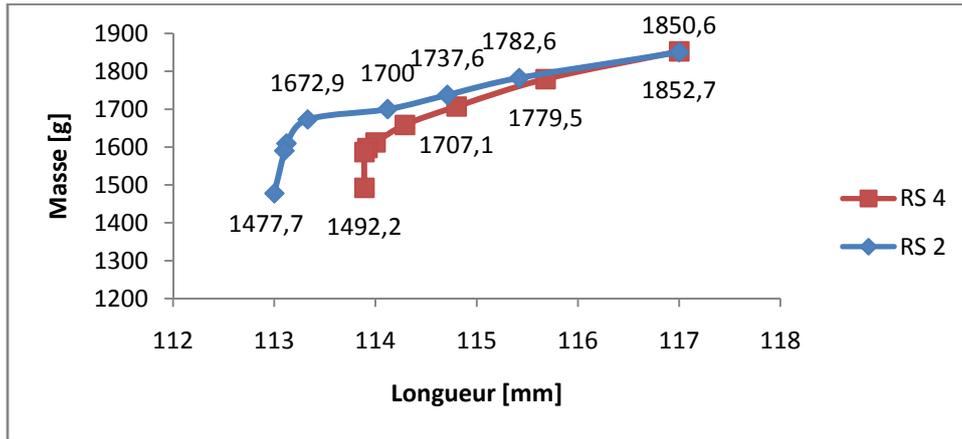


Figure IV.58: variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4

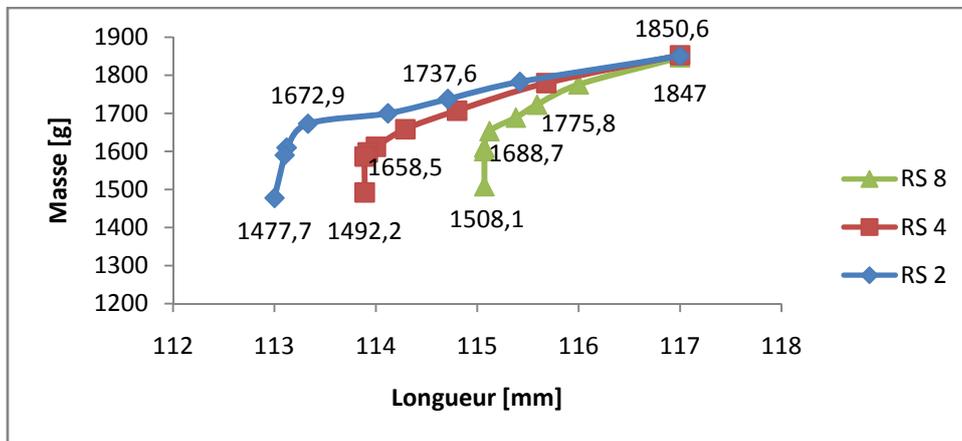


Figure IV.59: variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4, RS 8

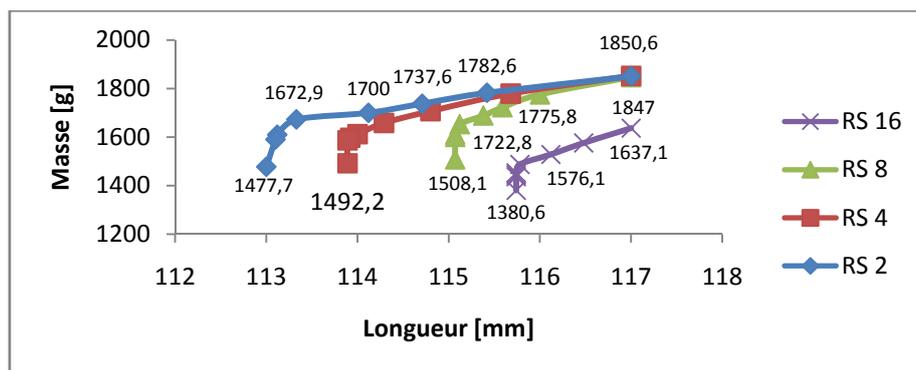
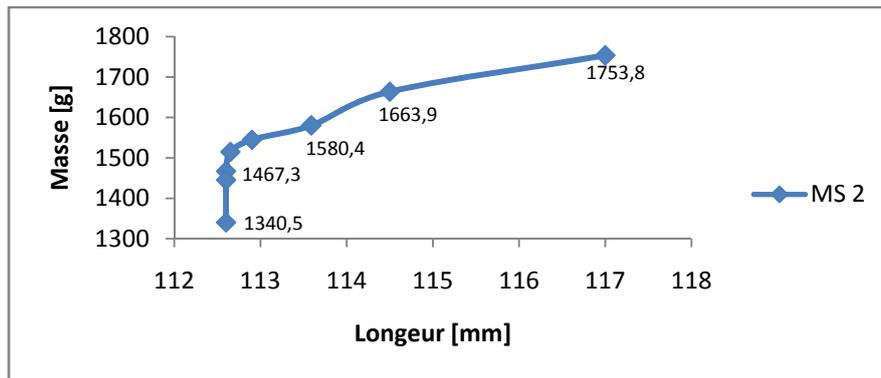


Figure IV.60: variation de la masse en fonction de la longueur RS 2, RS 4, RS 8, RS 16

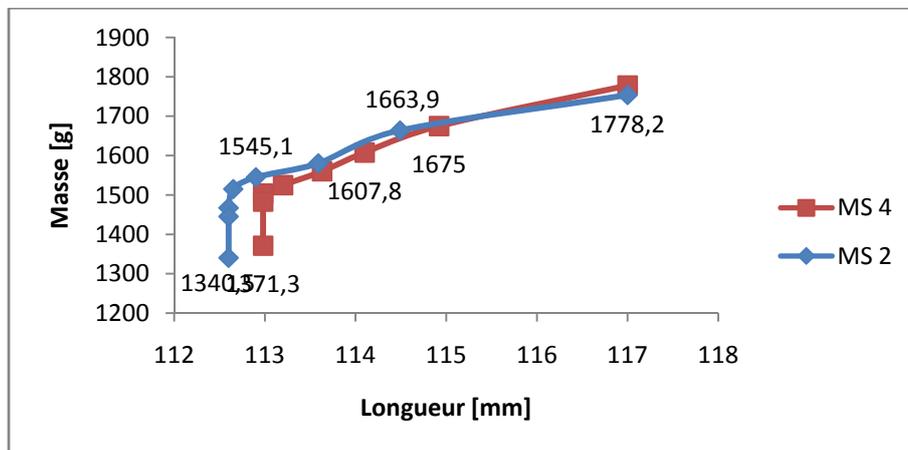
➤ **La marne**

- ✓ Figure IV.61: La droite qui représente l'indice de plasticité est grande.
- ✓ Sur la figure IV.62 on constate que l'indice de plasticité de MS 4 est inférieur à celui de MS 2, mais la différence n'est pas importante.
- ✓ La longueur de la droite représentant l'indice de plasticité de MS 8, est inférieure à celle de MS 4 et MS 2 (figure IV.63).
- ✓ La courbe de MS 16 tend à être parallèle à l'axe qui porte les masses, ce qui signifie que son retrait est réduit de façon importante (figure IV.64).

-l'indice de plasticité de la marne se réduit en augmentant la quantité de la chaux.



**Figure IV.61:** variation de la masse en fonction de la longueur MS 2



**Figure IV.62:** variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4

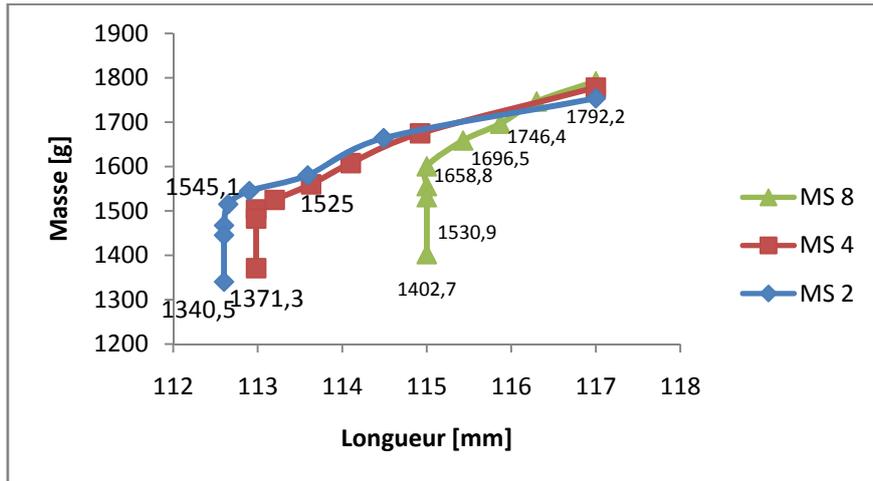


Figure IV.63: variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4, MS 8

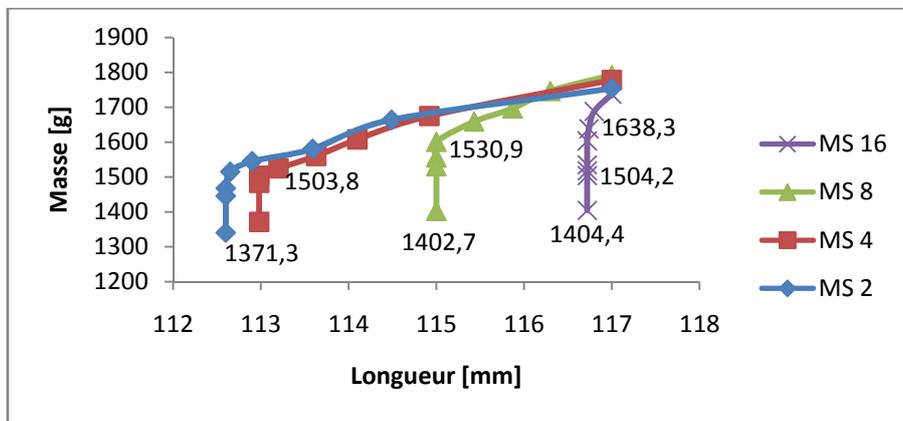


Figure IV.64: variation de la masse en fonction de la longueur MS 2, MS 4, MS 8, MS 16

➤ **L'argile grise**

- ✓ Figure IV.65: La longueur du segment de droite correspondant à l'indice de plasticité est importante.
- ✓ Figure IV.66: l'indice de plasticité de GS 4 est inférieur à celui de GS 2.
- ✓ A la figure qui suit (IV.67) on constate que la courbe de GS 8 est tend à être parallèle à l'axe portant les masses, ce qui veut dire que le retrait est insignifiant.

-l'indice de plasticité de l'argile grise diminue en augmentant la quantité de la chaux.

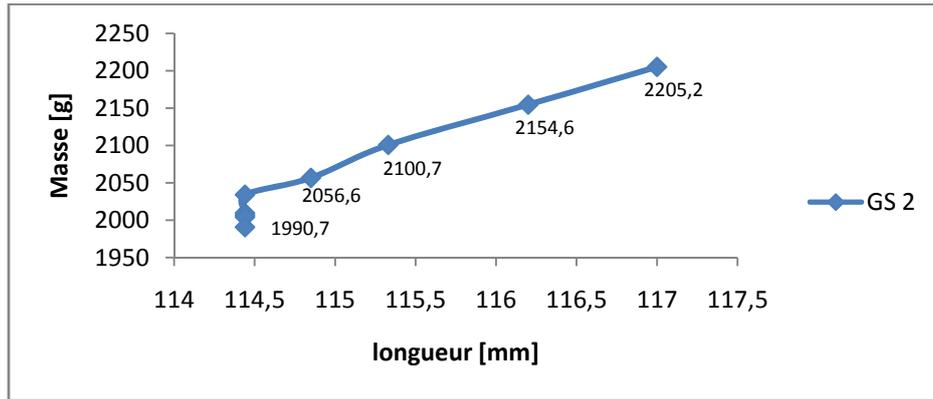


Figure IV.65: variation de la masse en fonction de la longueur GS 2

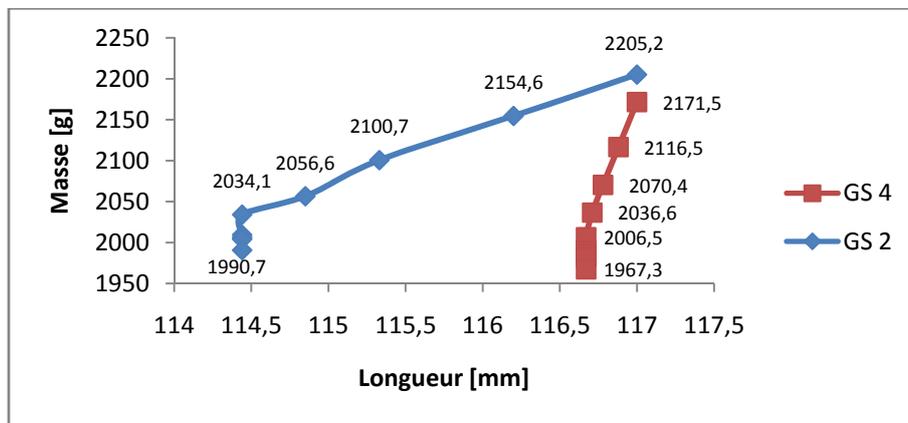


Figure IV.66: variation de la masse en fonction de la longueur GS 2, GS 4

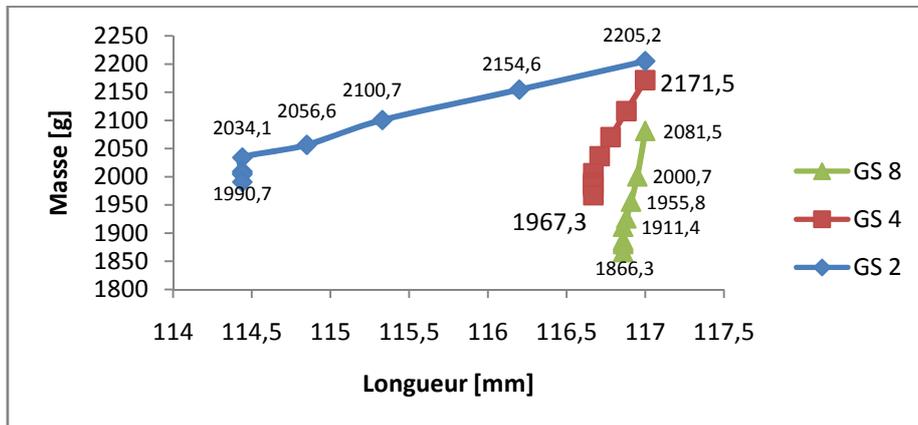


Figure IV.67: variation de la masse en fonction de la longueur GS 2, GS 4, GS 8

### IV.2.2.2.3. Confrontation des résultats

Les courbes de bigot (masse en fonction de la longueur) montre que le segment de droite qui représente l'étendue de plasticité donc l'indice de plasticité (Ip) diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par GHOMARI en étudiant l'influence de la chaux sur la plasticité des argiles en utilisant les limites d'Atterberg.

Ces résultats sont résumés par les 3 courbes suivantes, qui montrent l'augmentation des limites de plasticité et la réduction considérable de l'indice de plasticité.

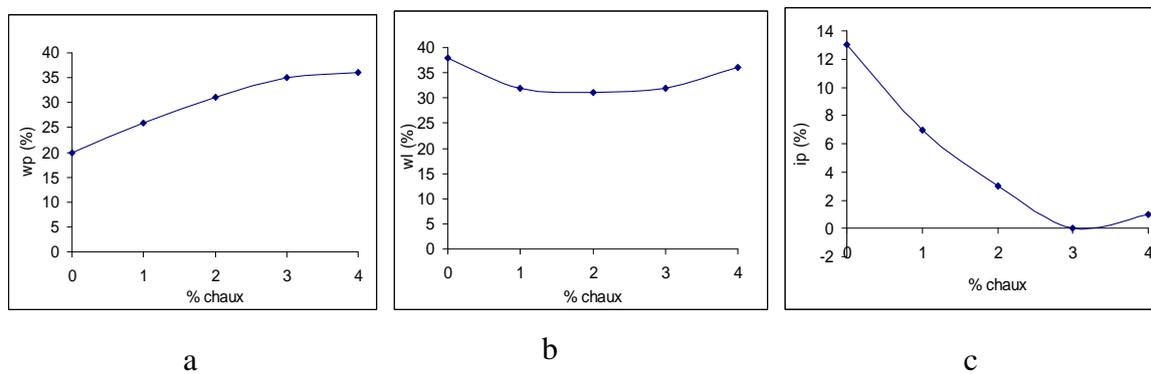


Figure IV.68 : a, b et c : Limites d'Atterberg

### IV.2.2.2.4. Le retrait final en fonction du taux de la chaux

La chaux réduit le retrait de façon importante, on comparant les retraits obtenus en ajoutant de la chaux avec celui du matériau brut, on obtient les tableaux [19], [20] et [21].

On calcule le pourcentage de retrait comme suivant :

$$\% \text{ de retrait} = \frac{\% \text{ de retrait brut} - \% \text{ de retrait stabilisé}}{\% \text{ de retrait brut}} * 100$$

➤ **Argile rouge**

-L'argile rouge avant le traitement à la chaux présente un retrait très important (20,69mm), à 2% de chaux le retrait est ramené à 4%. Donc il est réduit de plus de 80%, ce qui montre que la chaux a un effet considérable sur l'argile. Mais le retrait final même avec 16% il reste mesurable.

% de chaux	0%	2%	4%	8%	16%
Retrait final [mm]	20,69	4	3,11	1,93	1,26
% de réduction de retrait	-	80,66	84,96	90,67	93,91

**Tableau [19] :** Pourcentage de réduction de retrait de l'argile rouge

➤ **La marne**

-La marne non stabilisée présente un retrait moins important que celui de l'argile (11,26 mm). Avec un apport de 16% de chaux le retrait est insignifiant.

% de chaux	0%	2%	4%	8%	16%
Retrait final [mm]	11,26	4,4	4,02	2	0,28
% de réduction de retrait	-	60,92	64,29	82,23	97,51

**Tableau [20] :** Pourcentage de réduction de retrait de la marne

➤ **Argile grise**

-L'argile grise est très sensible au retrait (22,65mm), stabilisée à 8% de chaux la réduction de retrait est très proche de 100%.

% de chaux	0%	2%	4%	8%	16%
Retrait final [mm]	22,65	2,56	0,33	0,14	-
% de réduction de retrait	-	88,69	98,54	99,38	

**Tableau [21] :** Pourcentage de réduction de retrait de l'argile grise

### IV.3. CONCLUSION

Le retrait des sols est accentué par l'augmentation de leur teneur en eau de fabrication.

La structure physique et chimique des sols, détermine leur degré de déformation ; l'argile grise qui est sableuse se déforme plus que l'argile rouge, cette dernière se déforme plus que la marne qui est moins sensible à l'eau.

La stabilisation des sols à la chaux réduit leur retrait. La quantité nécessaire pour réduire le retrait de chacun des sols différent selon leurs caractéristiques physiques et chimiques. L'argile grise nécessite moins de chaux que la marne pour se stabiliser, la marne à son tour consomme moins de chaux que l'argile rouge pour arriver à de meilleurs résultats. Les quantités excessives de chaux détruisent la structure du sol.

Pour améliorer les connaissances sur le phénomène du retrait on s'oriente de plus en plus vers les essais en vraie grandeur : l'étude de la masse en fonction de la longueur. L'essai en vraie grandeur est une nouvelle approche qui permet de :

- Remplacer l'essai de limite de retrait conventionnel où l'emploi du mercure, qui est un produit toxique, est inévitable.
- Tester la fiabilité des stabilisants durant la période de cure puisque cette méthode n'est pas destructive.

# CHAPITRE V: EFFET DE LA CHAUX SUR LA RESISTANCE MECANIQUE DU BETON

## INTRODUCTION

Il est généralement connu que le béton continue de gagner en résistance pendant plusieurs années, tant qu'une humidité suffisante est disponible pour permettre au processus d'hydratation de se faire. Si le béton n'est pas protégé de l'action du soleil et du séchage par les vents, l'humidité en son intérieur diminue, si bien que l'hydratation en son intérieur s'atténue, et par conséquent le gain de résistance est restreint, pour éviter cela, l'évaporation de l'humidité originelle doit être prévenue. [L.LACHEMAT 1995] a défini la cure comme étant la méthode avec laquelle l'évaporation est atténuée.

Les facteurs qui influent sur les propriétés du béton tant à l'état frais que durci sont la température et l'humidité relative ; la résistance à la compression du béton est influencée par l'environnement où il est placé. Les environnements secs et chauds accélèrent le séchage du béton, et par suite, sont de loin préjudiciables que ceux humides et froids. POWERS(1954) et DANSFIELD (1985) ont montré que si l'humidité relative à l'intérieur des pores du béton descend à moins de 80% et plus, l'hydratation cesse.

Dans ce paragraphe on se propose d'étudier l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction du dosage en chaux et du mode de conservation qui simule l'humidité relative de l'environnement.

### V.1.Généralités sur les méthodes de cure du béton

Le manque de cure appropriée augmente le taux de carbonatation, spécialement en climat chaud. Les hautes températures et les faibles humidités relatives sont des facteurs lorsqu'ils sont combinés, tendent à endommager la qualité du béton. Là où ces facteurs prévalent, la température du béton et le taux d'évaporation de l'eau augmente rapidement, les mouvements thermiques et les contraintes deviennent importantes, les réactions chimiques d'hydratation du ciment et l'attaque chimique sont accélérés.

La notion d'humidité relative est importante dans cette étude. Le terme humidité relative est défini comme étant le rapport de la vapeur d'eau disponible à la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la saturation. En accord avec les lois de la nature une augmentation de la température est souvent accompagnée par une réduction de l'humidité relative. Aux humidités relatives les plus petites, s'associe la plus grande capacité de l'air d'absorber l'humidité à partir des sources disponibles dans le béton.

La faible humidité relative conduit à une rapide évaporation de l'eau de gâchage du béton qui à son tour accélère le séchage du béton.

Il ya plusieurs méthodes de cure du béton. Cependant les principales sont toujours les mêmes, assurer la disponibilité de l'eau pour l'hydratation des matériaux de cimentation et maintenir la température à l'intérieur de béton pour avoir les propriétés du béton désirées. Ces méthodes se répartissent essentiellement en deux groupes :

1. L'humidification de la surface externe du béton en utilisant divers moyen pour maintenir l'eau en place. Ceci peut être procuré par arrosage, immersion, ou des matériaux de couverture saturé d'eau.
2. Par la prévention de la perte d'eau excessive du béton au moyen de couvertures protectrices appliquées sur ou en parallèle aux surface de béton.

## V.2. Matériaux utilisés

### a) Agrégats

Le sable utilisé est un sable d'oued provenant de la sablière de oued Aissi.

Le gravier utilisé provient de la carrière de Tizi Ouzou. C'est un gravier concassé.

Les résultats de l'analyse granulométrique des agrégats sont donnés dans les tableaux qui suivent :

Ouverture des tamis (mm)	5	4	3,15	2,5	2	1,6	1,25	1	0,5	0,315	0,2	0,125
Tamisât (%)	100	94,4	88,07	79,09	72,22	62,76	53,6	41,99	23,67	14,71	6,67	2,29

**Tableau [22] : Analyse granulométrique du sable**

Ouverture des tamis (mm)	10	8	6,3	5	4	3,16	2,5	2	1,6	1,25	1
Tamisât (%)	100	98,09	86	74,6	45,15	26,41	10,42	4,49	1,45	0,73	0,61

**Tableau [23] : Analyse granulométrique du gravier 3/8**

Ouverture des tamis (mm)	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2,5	1
Tamisât (%)	98,55	81,45	58,00	34,42	12,26	5,42	3,37	2,11	1,03

**Tableau [24] : Analyse granulométrique du gravier 8/16**

Ouverture des tamis (mm)	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5
Tamisât (%)	100	80,9	28,01	28,01	2,82	0,26	0,07	0,04

Tableau [25] : Analyse granulométrique du gravier 16/25

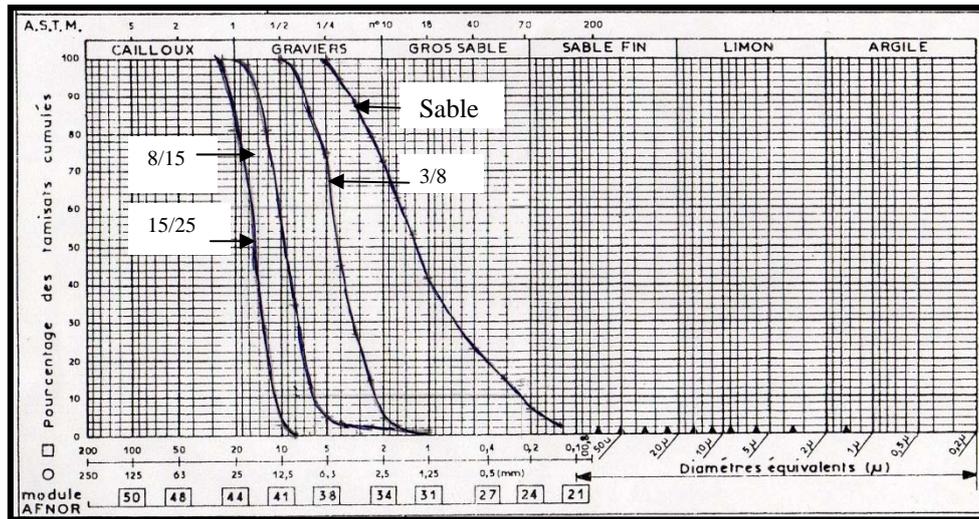


Figure V.1 : Courbe granulométriques

**b) Le ciment**

Le ciment utilisé est un ciment portland de classe 425. Sa composition chimique est la suivante :

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
%	21	5,3	3,3	65,6	1,1	2,7

Tableau [26] : Composition chimique du ciment CPA

**c) L'eau de gâchage**

L'eau de gâchage est une eau potable de robinet propre et ne contenant pas de d'impuretés nuisibles au béton.

**d) La chaux**

La chaux utilisée est une chaux vive, la même que celle utilisée pour la stabilisation des sols (tableau [15]).

### V.3. Le matériel utilisé

La préparation du béton nécessite le matériel suivant :

- Un malaxeur : Pour la préparation du béton, on utilise un malaxeur de volume 75 litre.



**Figure V.2:** Malaxeur

- Une table vibrante de fréquence 50 Hertz pour compacter le béton.



**Figure V.3 :** Table vibrante

- Les moules utilisés pour confectionner les éprouvettes sont cylindriques de dimensions 16\*32 cm, ils sont indéformables étanches et faciles à entretenir et à démouler. Avant leur utilisation, on les graisse pour faciliter le démoulage.

La surface du moule est de : 201cm<sup>2</sup>



Figure V.4: Moule cylindrique 16\*32

- Machine de compression: pour l'écrasement du béton par compression on utilise une presse digitale dont la capacité est de 2000KN.



Figure V.5: Machine à compression (presse digitale)

## V.4.La composition du béton

### V.4.1.Le béton témoin

La composition du béton est déterminée à partir de l'abaque de Dreux (figure V.6) de la détermination rapide de composition volumétrique des bétons d'usage courant. L'abaque donne la composition de la manière suivante :

- On choisit la résistance désirée du béton et sa plasticité ;
- A partir de la résistance on déduit le volume du sable, des granulats, de ciment et d'eau nécessaires.

On a confectionné un béton de résistance 25 MPa et de plasticité 10cm, ce qui donne le dosage suivant pour 1m<sup>3</sup> de béton:

- Ciment : 340kg/m<sup>3</sup>
- Sable : 520 kg/m<sup>3</sup>
- Gravier 750 kg/m<sup>3</sup>
- Eau : 175 litres

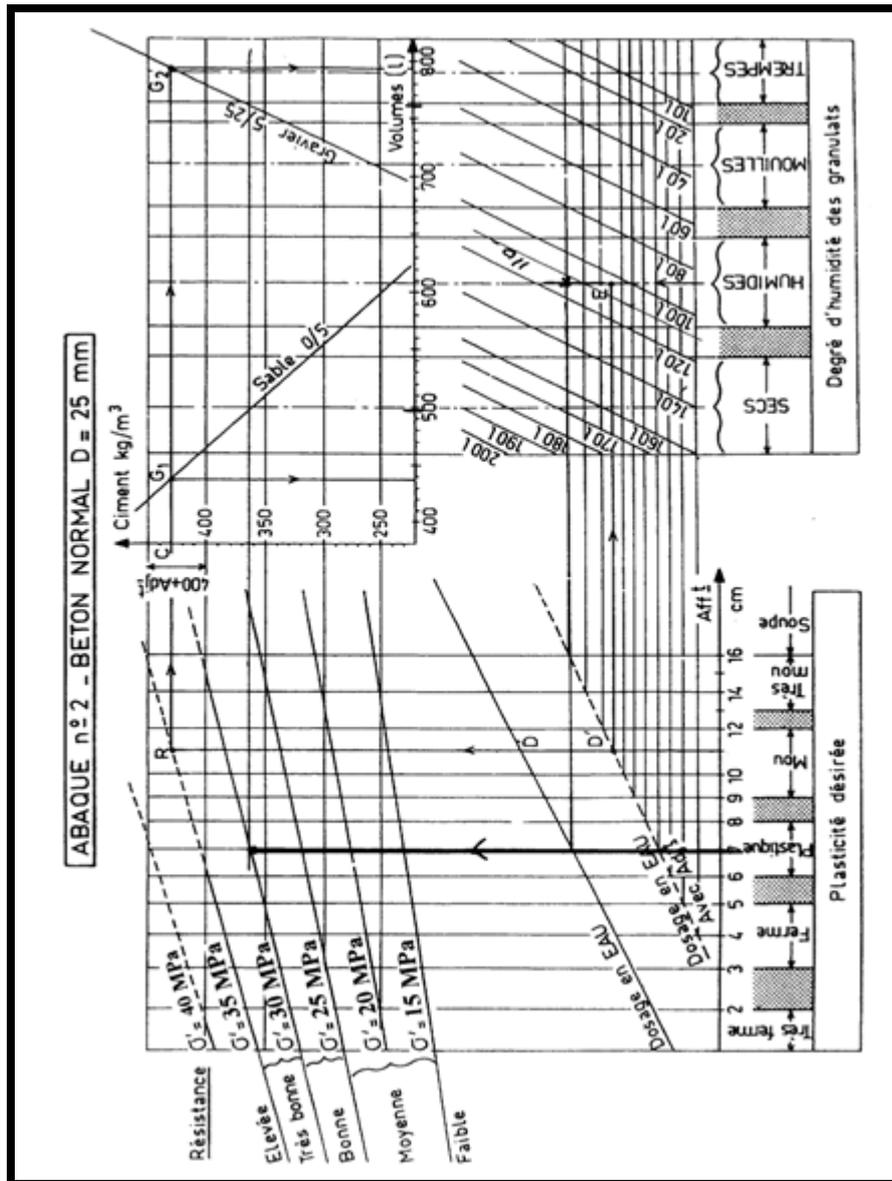


Figure V.6 : abaque de Dreux

Au laboratoire on a coulé des échantillons de dimensions 16cm\*32cm. Le démoulage est effectué vingt quatre heures après le coulage.

Tableau suivant donne la composition en poids d'une gâchée :

composants	Sable	Gravier 3/8	Graviers 8/16	Graviers 16/25	Ciment	Eau
Masse (kg)	16	7,2	7,2	7,2	6,56	3,5

Tableau [27] : Composition pour une gâchée

**V.4.2. Le béton stabilisé à la chaux**

Quatre éprouvettes de 16cm\*32cm ont été confectionnées au laboratoire avec les teneurs en chaux suivantes : 2%, 4%, 8% et 16%.

On ajoute de l'eau à la composition de façon à avoir le rapport eau/liant = 0,53 pour garder le même rapport que le béton témoin.

A la quantité initiale du béton témoin on ajoute des pourcentages de chaux illustrés dans le tableau qui suit :

Composants	% de chaux	Sable	Gravier			Le liant		Eau
			Gravier 3/8	Graviers 8/16	Graviers 16/25	Ciment	La chaux	
Masse (kg)	2%	16	7,2	7,2	7,2	6,56	0,954	4
	4%	7,2	7,2	7,2	7,2	6,56	1,908	4,5
	8%	7,2	7,2	7,2	7,2	6,56	3,816	5,5
	16%	7,2	7,2	7,2	7,2	6,56	7,632	7,53

**Tableau [28] : Composition du béton stabilisé**

**V.4. 3.Préparation du béton**

- On prépare les composants d'une gâchée,
- on verse les agrégats, le liant (ciment ou ciment+chaux) dans le malaxeur puis on les malaxe pour avoir un mélange homogène,
- Une fois homogénéisé on ajoute l'eau et on malaxe pendant 5minutes pour avoir un béton homogène,
- On remplit les moules par ce béton,
- On vibre les moules contenant le béton par la table vibrante pendant 20 secondes (vibration moyenne),
- Le béton est gardé dans les moules pendant 24 heures pour durcir puis on le démoule.

**V.4.4. Conservation des éprouvettes**

On a envisagé trois modes de conservation:

**-Conservation à l'air libre**, en été, dans l'enceinte du laboratoire (état sec, humidité relative faible) pendant 28 jours ensuite on passe à l'écrasement par compression simple.

**-Conservation dans l'eau** (état saturé), échantillons immergés dans l'eau à température ambiante où ils sont maintenus 7 jours. Ils sont retirés pour continuer leur durcissement à l'air jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour où ils sont écrasés.

-**Conservation dans un sac plastique**, légèrement humidifié, à humidité non contrôlée (état intermédiaire).

### V.5. Essai en compression

La résistance à la compression est le plus important des paramètres pour la conception des structures en béton. Les autres paramètres tels que la résistance à la traction, le cisaillement, le module d'élasticité, et la résistance à l'abrasion dépendent de la résistance à la compression. [24]

Pour évaluer la résistance à la compression du béton on le soumet à l'essai de compression, qui est un essai destructif, pratiqué sur des éprouvettes cylindriques (16\*32) ou prismatiques. L'éprouvette (16\*32) est placée verticalement entre les plateaux de la machine à compression (presse digitale). L'effort de compression est appliqué progressivement à une vitesse de mise en charge de 0,5kN /seconde. La rupture se fait en compression simple. La contrainte à pour expression :  $f_c = \frac{P_{max}}{S}$



**Figure V.7:** Eprouvette entre les deux plateaux de la presse

Béton témoin (référence) : $F_{c28}=25,03\text{MPa}$												
2% chaux			4% chaux			8% chaux			16% chaux			
Milieu de conservation			Milieu de conservation			Milieu de conservation			Milieu de conservation			
Air	Sac humide	eau	air	Sac humide	Eau	air	Sac humide	Eau	Air	Sac humide	Eau	
$F_{c28}$ (MPa)	20,4	20,49	25,29	20,29	20,31	24,87	14,1	16,87	18,94	8,398	8,976	9,942

Tableau [29] : Résultats de l'essai en compression du béton

### V.5.1. Interprétation des résultats

#### ➤ Béton conservé à l'air libre

Le béton stabilisé par la chaux et conservé dans l'air présente des résistances à l'écrasement inférieures à celle du béton témoin. En augmentant le dosage en chaux dans le béton, la résistance à la compression diminue et atteint des valeurs médiocres.

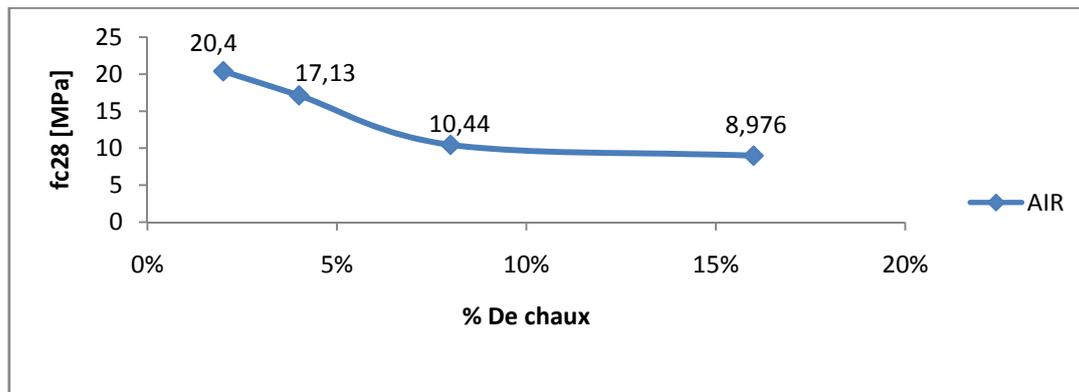


Figure V.8: Résistance à la compression du béton conservé dans l'air

#### ➤ Béton conservé dans un sachet plastique

La résistance du béton conservé dans un sachet humide est inférieure à celle du béton témoin et diminue de plus en plus en augmentant la quantité de la chaux. En comparant les courbes des figures V.8 et V.9 on constate une légère augmentation de résistance quelque soit la teneur en chaux

Donc l'humidité est un facteur favorable à l'augmentation de la résistance.

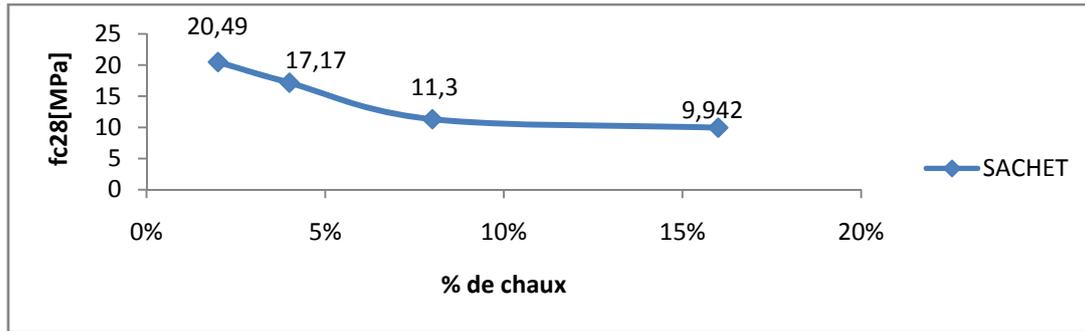


Figure V.9 : Résistance à la compression du béton conservé dans un milieu humide

➤ **Béton conservé dans l'eau**

Le béton stabilisé par 2% de chaux conservé dans l'eau présente une meilleure résistance que le béton témoins, mais à partir de ce dosage la résistance du béton chute.

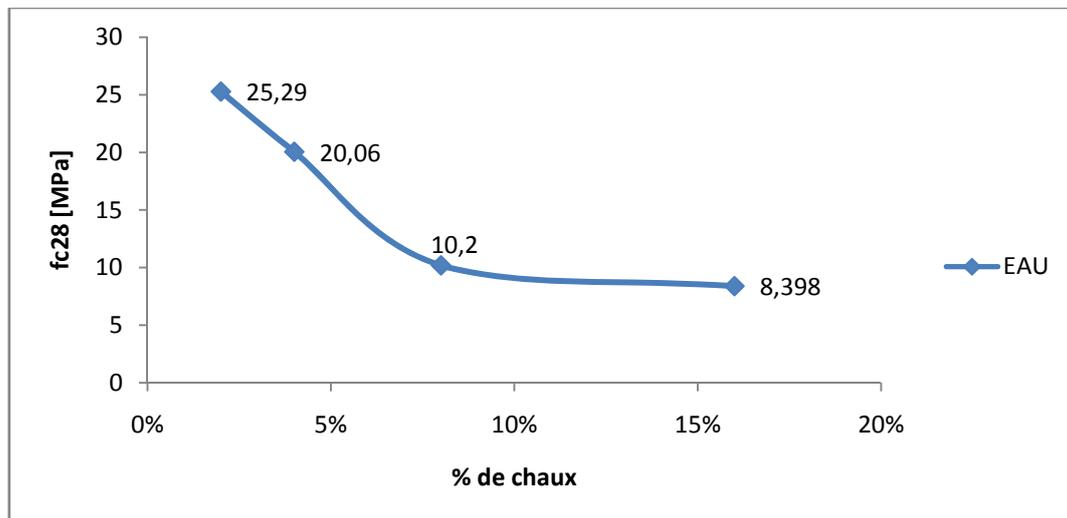
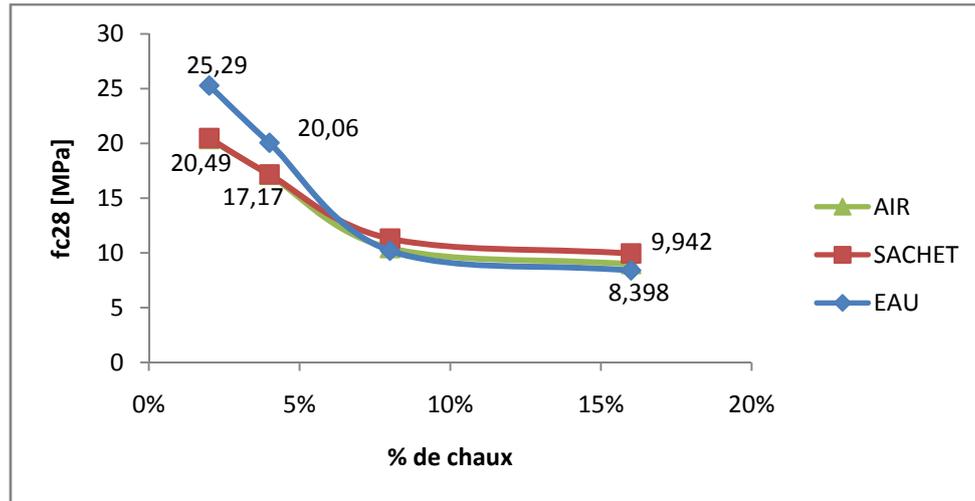


Figure V.10 : Résistance à la compression du béton conservé dans l'eau

D'après la figure [V.11] la résistance mécanique décroît considérablement quand le pourcentage de chaux est inférieur à 5% mais au-delà la résistance ne varie plus quand la teneur en chaux augmente. Il y a un grand intérêt à conserver le béton stabilisé en de faibles teneurs en chaux dans un milieu saturé d'eau, vu l'effet bénéfique sur la résistance mécanique du béton.

Pour des teneurs en chaux faibles l'humidité du milieu de conservation a une grande importance. A 2 % de chaux la résistance est légèrement supérieure à celle de l'échantillon témoin. Il est très souhaitable d'expérimenter des valeurs plus faibles que 2%. Il est fort probable que dans l'intervalle [0,2 %] la résistance soit encore meilleure.



**Figure : V.11** : Résistance à la compression du béton en fonction de la chaux dans différents milieux de conservation

## V.6. CONCLUSION

En forte proportion la chaux influence la résistance mécanique du béton de façon néfaste. Sa résistance en est altérée.

De l'étude il ressort que la conservation du béton dans l'eau donne des résultats satisfaisants. Les autres modes de conservation n'ont pas amélioré la résistance mécanique par rapport à celle du béton témoin.

Ajouter de la chaux au béton ne semble intéressant que dans un faible pourcentage majoré par 2%. Alors c'est dans cet intervalle que des études plus approfondies peuvent être envisagée pour trouver un dosage en chaux qui améliore plus la résistance du béton.

# CHAPITRE VI : TRAITEMENT A CHAUD

## INTRODUCTION

Ce chapitre contient deux parties qui s'intéressent au traitement thermique des sols. La première partie traite la stabilisation des sols à chaud et son effet sur leur résistance à l'écrasement. La deuxième partie est consacrée à l'étude de la conductivité thermique des sols par analogie au phénomène électrique qui est la résistivité électrique des sols dans deux cas : premièrement effet de la teneur en eau ensuite effet de la chaux.

### VI.1. Traitement à chaud

Le traitement thermique des sols n'est pas un moyen de stabilisation nouveau, Des ingénieurs romains l'ont employé pour accroître la résistance et abaisser la compressibilité des sols cohérents.

Plus l'énergie calorifique par unité de masse de sol à traiter est grande, plus l'effet produit est important. Une augmentation de la température même légère peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, en provoquant un écoulement de l'eau interstitielle dû au gradient thermique appliqué, et en diminuant la teneur en eau du fait que le d'évaporation augmente. Une température plus élevée, supérieure à 100°C, chasse l'eau adsorbée par une argile et augmente ainsi sa résistance. Des températures de l'ordre de 400°C à 600°C changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau. A 900°C ou 1100°C, certaines argiles commencent à se transformer en briques [12].

#### VI.1.2. Principe de l'essai

La résistance à l'écrasement à l'état sec est la première qualité exigée du matériau terre, en deuxième lieu sa tenue à l'eau.

L'essai consiste à porter à différentes températures les éprouvettes de béton de terre et de les soumettre à l'essai d'écrasement par compression. Les essais d'écrasement se feront à sec et après immersion des éprouvettes.

L'essai se fera sur des éprouvettes confectionnées à la teneur en eau optimale, 16% pour l'argile rouge, 16% pour la marne et 8% pour l'argile grise. Les éprouvettes du béton de terre sont introduites dans le four à 550°C, à 700°C, à 900°C et 1100°C. Le chauffage est maintenu pendant 4 heures.



Figure VI.1 : Four à haute température

## VI.1.2. Description et observations

### VI.1.2.1. Argile rouge

#### ➤ A la sortie du four

-A la sortie du four, les échantillons d'argile rouge portés à diverses températures, présentent des couleurs différentes les uns des autres (figure VI.2).

-Les dimensions des échantillons du sol ne sont pas les mêmes. Avant passage au four, les échantillons avaient les dimensions du moule Proctor ( $h=117$  mm,  $\Phi=101,6$ ). Après cuisson, les dimensions des échantillons sont réduites.

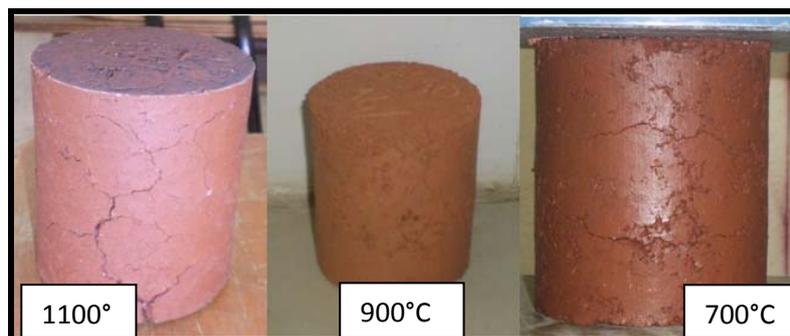
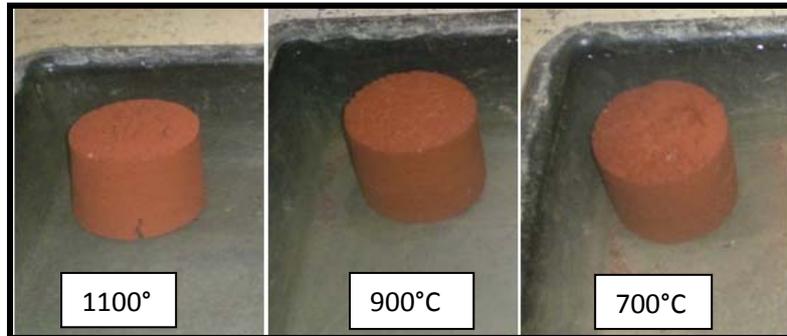


Figure VI.2 : Argile rouge cuite à différentes températures

➤ **Après immersion**

Après immersion, les éprouvettes d'argile rouge absorbent de l'eau alors leur volume augmente.



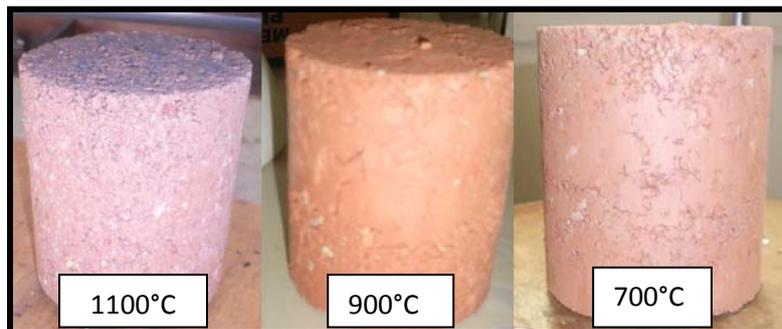
**Figure VI.3 :** Argile rouge cuite immergée

**VI.1.2.2. La marne**

➤ **A la sortie du four**

-Après cuisson de la marne, on constate que pour chaque température correspond une couleur différente du sol (figure VI.4).

-Le volume des éprouvettes à la sortie du four diminue par rapport à leur volume avant la cuisson.

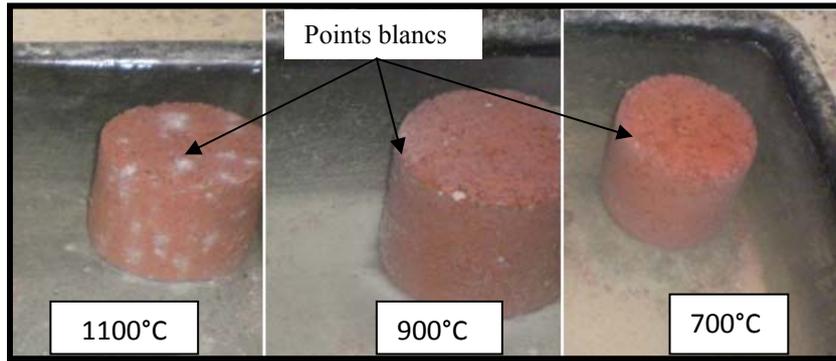


**Figure VI.4 :** Marne cuite à la sortie du four

➤ **Après immersion**

- Quelques minutes après l'immersion des éprouvettes de marne cuite, on constate l'apparition de points blancs à leurs surfaces. Le nombre de points apparus est important pour le sol cuit à 1100°C, puis elle décroît avec la diminution de la température (figure VI.5).

-Les éprouvettes de marne immergées absorbent l'eau et leur volume change.



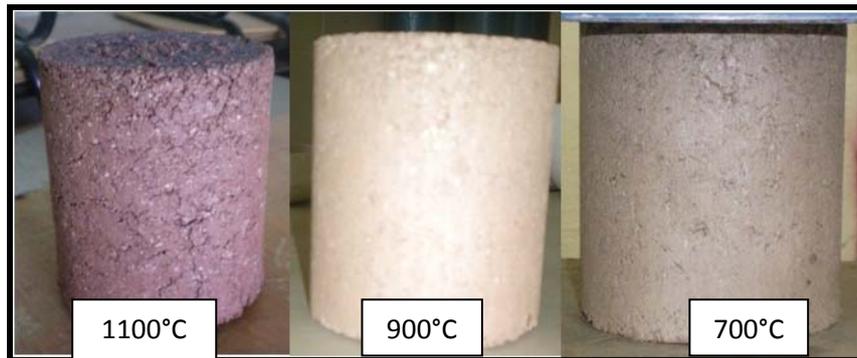
**Figure VI.5 :** Marne cuite à immergée

### VI.1.2.3. L'argile grise

➤ **A la sortie du four**

-Après cuisson de la marne, on constate que pour chaque température correspond une couleur différente du sol (figure VI.6).

- Les dimensions des éprouvettes sont réduite.

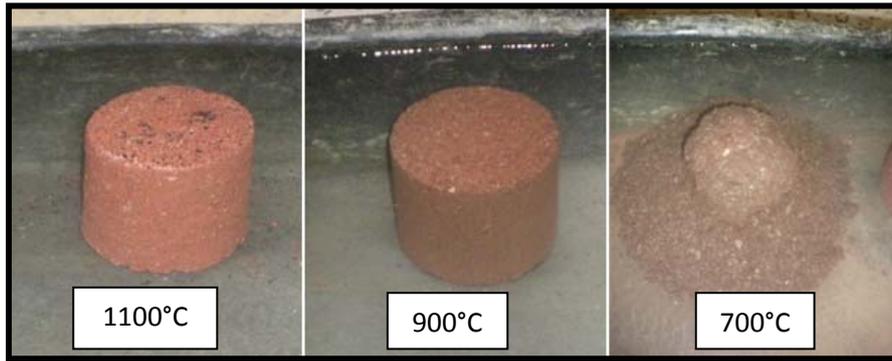


**Figure VI.6 :** Argile grise cuite à différentes températures

➤ **Après immersion**

-Les éprouvettes absorbent l'eau après leur immersion ce qui fait augmenter leur volume.

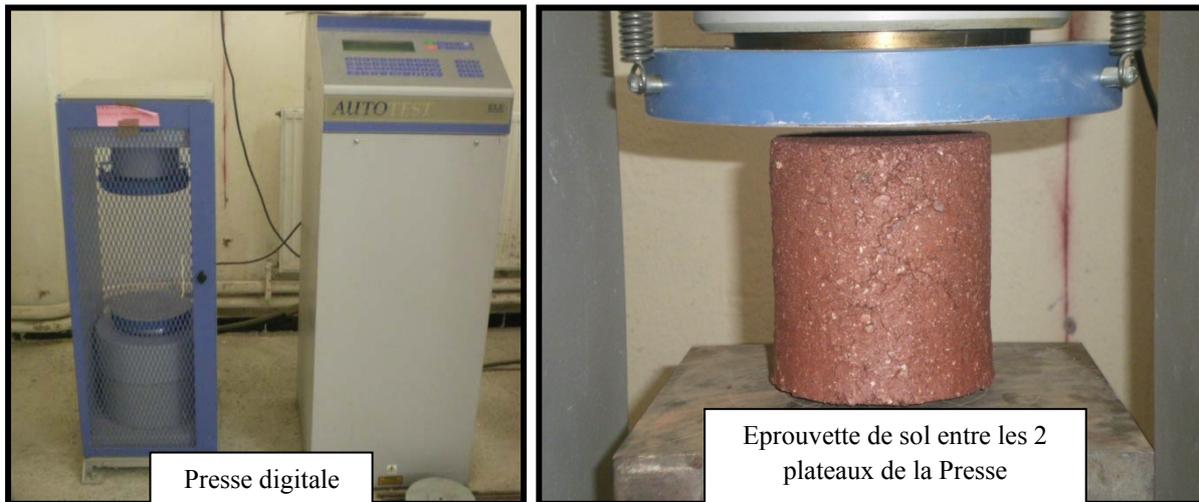
-L'éprouvette cuite à 700°C se désagrège dans l'eau, quelques minutes après son immersion.



**Figure VI.7:** Argile grise cuite, immergée

### VI.1.3.Résistance à l'écrasement

Après cuisson les éprouvettes de sol ont été soumises à l'essai de compression simple, pour caractériser leur résistance à l'écrasement. L'essai appliqué aux éprouvettes, par une presse digitale, est destructif (figure VI.8).



**Figure VI.8 :** Essai d'écrasement

#### VI.1.3.1. Résistance à l'écrasement à sec ( $R_{sec}$ )

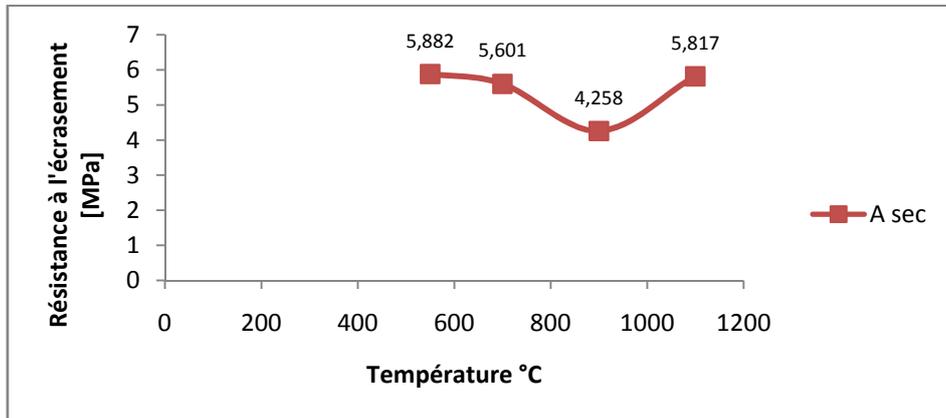
En sortant du four, les éprouvettes sont soumises à l'écrasement par compression simple à l'état sec.

##### ➤ Argile rouge

La résistance à l'écrasement à l'état sec de l'argile rouge diminue lorsque la température de cuisson augmente jusqu'à 900°C puis augmente à 1100°C. Donc la courbe présente un minimum de résistance à 900°C (figure VI.9).

Température °C	550°C	700°C	900°C	1100°C
Résistance à l'écrasement à sec [MPa]	5,882	5,601	4,258	5,817

**Tableau [30] :** Résistance à l'écrasement de l'argile rouge cuite à l'état sec



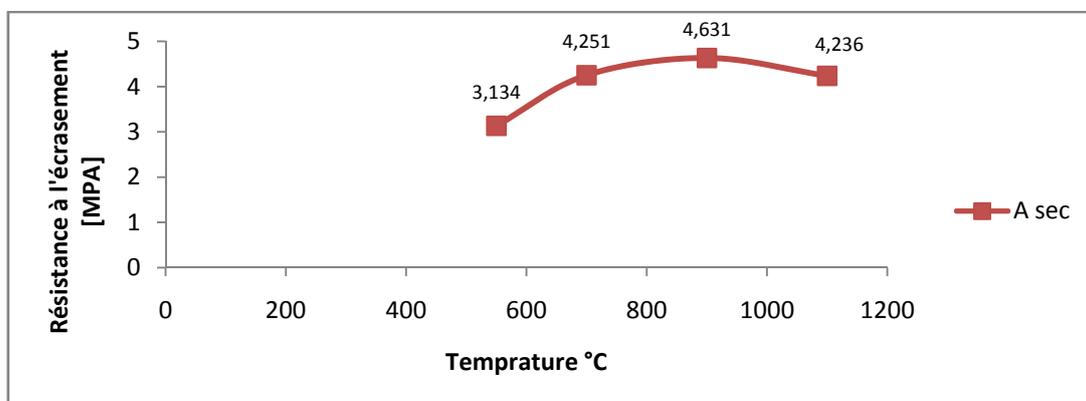
**Figure VI.9 :** Résistance à l'écrasement de l'argile rouge cuite à l'état sec

➤ **La marne**

A l'état sec la résistance de la marne à l'écrasement croît en augmentant la température de cuisson jusqu'à 900°C, puis elle diminue (figure VI.10). Alors la courbe présente un pic à 900°C.

Température °C	550°C	700°C	900°C	1100°
Résistance à l'écrasement à sec [MPa]	3,134	4,251	4,631	4,236

**Tableau [31] :** Résistance à l'écrasement de la marne cuite à l'état sec



**Figure VI.10 :** Résistance à l'écrasement de la marne cuite à l'état sec

➤ **Argile grise**

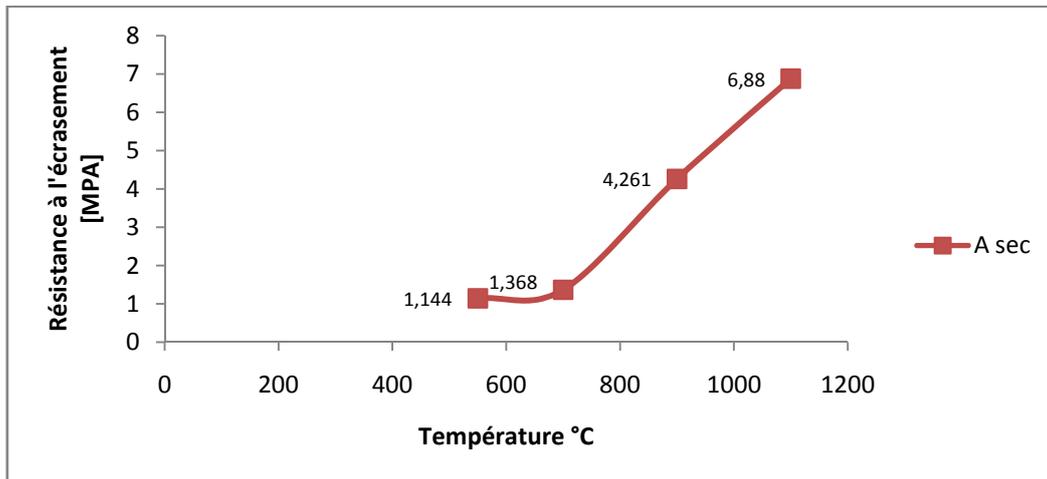
A l'état sec la résistance à l'écrasement de l'argile grise croît avec l'augmentation de la température.

La figure VI .11 montre que pour de faibles températures la variation de résistance est négligeable alors que pour les hautes températures elle est très considérable.

Pour avoir un gain de résistance conséquent, le traitement à des hautes températures est le plus indiqué.

Température °C	550°C	700°C	900°C	1100°C
Résistance à l'écrasement à sec [MPa]	1,144	1,368	4,261	6,88

**Tableau [32] :** Résistance à l'écrasement à l'état sec de l'argile grise cuite



**Figure VI.11 :** Résistance à l'écrasement à l'état sec de l'argile grise cuite

**VI.1.3.2. Résistance à l'écrasement après immersion de 24 heures (R<sub>sat</sub>)**

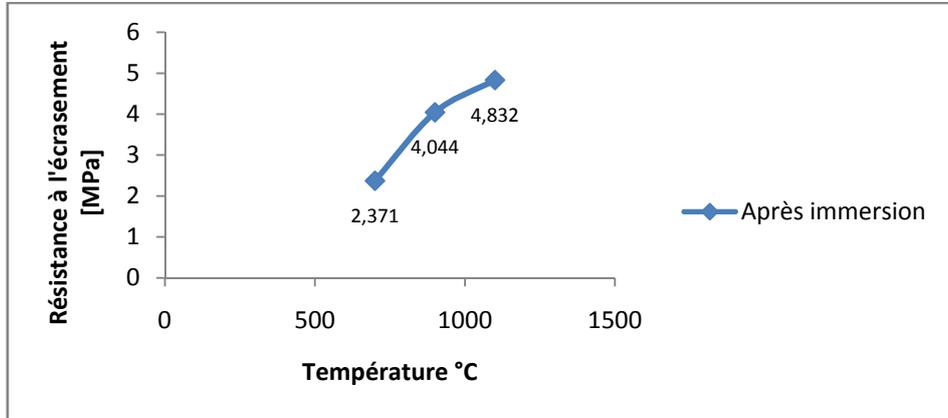
A la sortie du four, les éprouvettes de sol sont immergées dans l'eau pendant 24 heures, puis elles sont écrasées par compression simple.

➤ **Argile rouge**

Après immersion des éprouvettes dans l'eau, la résistance à l'écrasement augmente en même temps que la température de cuisson.

Température °C	700°C	900°C	1100°C
Résistance à l'écrasement après immersion [MPa]	2,371	4,044	4,832

**Tableau [33] :** Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile rouge



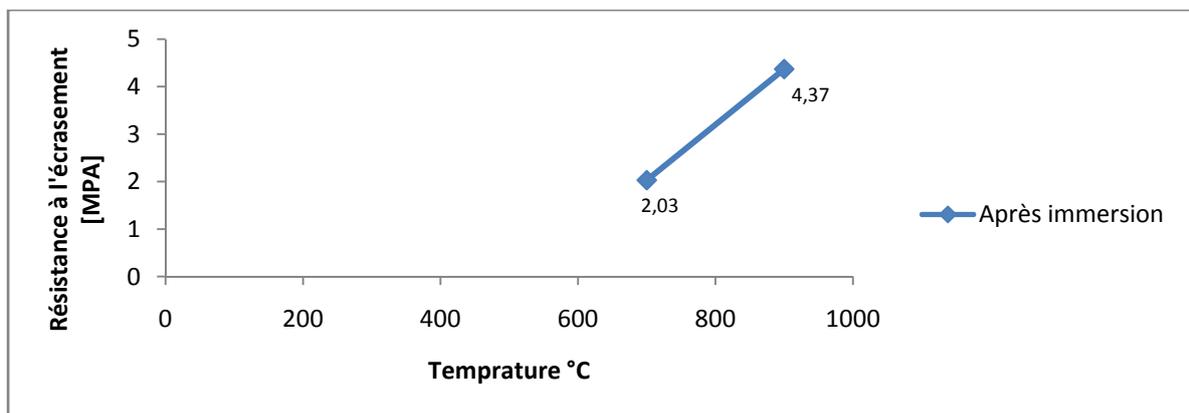
**Figure VI.12 :** Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile rouge (R<sub>sat</sub>)

➤ **La marne**

Après immersion dans l'eau, la résistance de la marne croît avec l'augmentation de la température de cuisson.

Température °C	700°C	900°C
Résistance à l'écrasement après immersion [MPa]	2,03	4,37

**Tableau [34] :** Résistance à l'écrasement après immersion de la marne



**Figure VI.13 :** Résistance à l'écrasement après immersion de la marne (R<sub>sat</sub>)

➤ L'argile grise

Entre 900°C et 1100°C la résistance augmente avec la croissance de la température. A 700°C l'éprouvette se désagrège dans l'eau quelque minute après son immersion (figure VI.).

Température °C	700°C	900°	1100°
Résistance à l'écrasement après immersion [MPa]	-	3,49	5,777

Tableau [35] : Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile grise

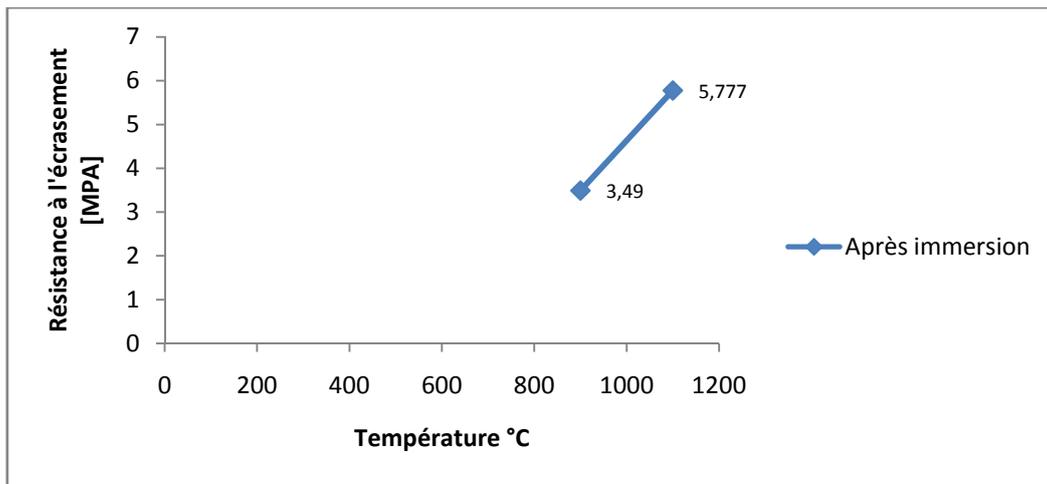


Figure VI.14 : Résistance à l'écrasement après immersion de l'argile grise



Figure VI.15: Argile grise cuite à 700°C, immergée

### VI.1.3.3. Le coefficient de ramollissement (Kram)

Le coefficient de ramollissement (Kram) est le rapport entre la résistance à la compression après immersion (R<sub>sat</sub>) sur la résistance à la compression à sec (R<sub>sec</sub>) du même matériau.

$$Kram = \frac{R_{sat}}{R_{sec}}$$

Les matériaux dont le coefficient de ramollissement est supérieur à 0,8 sont considérés comme résistant à l'eau. Il est interdit d'utiliser les matériaux au coefficient de ramollissement inférieur à 0,8 dans les régions où l'humidité est un facteur constant.

Température °C	Coefficient de ramollissement des sols		
	700°C	900°C	1100°C
Argile rouge	0,42	0,94	0,83
La marne	0,477	0,94	-
Argile grise	0	0,66	0,84

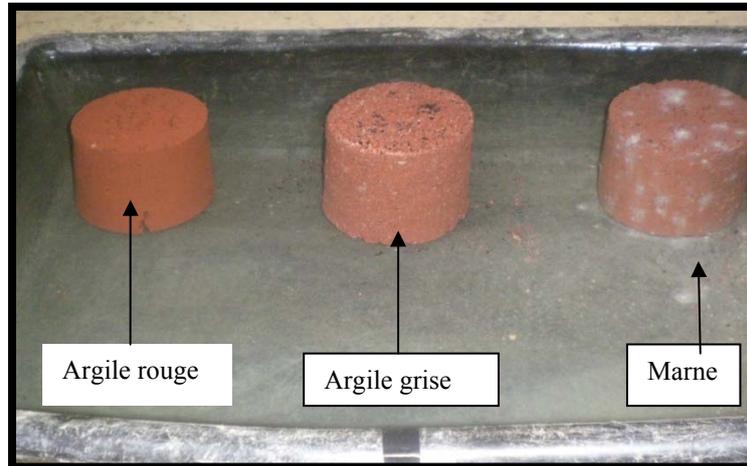
**Tableau [36] :** Coefficient de ramollissement des trois sols

- ✚ L'argile rouge cuite à 900° et 1100°C présente un coefficient de ramollissement supérieur à 0,8 ce qui fait d'elle un matériau résistant à l'action de l'eau. Sa résistance à l'eau atteint le pic à 900°C.
- ✚ La marne cuite à 900°C présente une très bonne résistance à l'eau (Kram= 0,94).
- ✚ L'argile grise présente sa meilleure résistance à l'eau à 1100°C.

#### VI.1.3.4. Essai d'absorption [18]

L'objectif de l'essai d'absorption est d'étudier la capacité d'absorption d'eau des blocs de sol.

Les éprouvettes de sol cuites sont soumises à l'essai d'absorption par immersion (figure VI.16).



**Figure VI.16:** Essai d'absorption au laboratoire

- **Capacité d'absorption de l'eau**

La capacité d'absorption est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau totalement immergé et s'exprime en pourcentage de la masse d'un matériau sec.

L'absorption d'eau se définit, en pourcentage, d'après la formule :

$$W_m = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} * 100$$

où :  $m_2$  : la masse du matériau saturé d'eau

$m_1$  : la masse du matériau sec

$W_m$  : coefficient d'absorption

La capacité d'absorption est toujours inférieure à la porosité réelle (totale) car une partie des pores est fermée, sans communication avec le milieu ambiant et inaccessible à l'eau. La capacité d'absorption de l'eau par les matériaux de construction, varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions. La capacité d'absorption de l'eau est aussi influencée, par la nature de la substance et son pouvoir hydrophile.

Le sol	Coefficient d'absorption $W_m$ (%)		
	700°C	900°C	1100°C
L'argile rouge	17,39	21,12	8,32
La marne	21,13	18,46	19,73
L'argile grise	-	10,43	9,86

**Tableau [37] :** Coefficient d'absorption des sols

La capacité d'absorption d'eau varie en fonction de la nature du sol. Pour l'argile rouge elle admet un optimum d'absorption de 18.46 % à une température de 900°C, la marne admet un minimum de 18.46 % à la même température. Quand à l'argile grise, elle n'a pas supporté l'épreuve de l'eau malgré qu'elle est portée à 700°C car elle s'est totalement désagrégé après immersion.

### VI.1.3.5. Comparaison des sols

Les sols sont compactés à la teneur en eau optimale qui est la même pour l'argile rouge et la marne (16%), pour l'argile grise elle est estimée à 8%.

- ✚ Les trois sols perdent de la résistance après immersion, on conclue que l'eau réduit la résistance des sols.
- ✚ L'argile rouge présente une meilleure résistance à 550°C, la marne à 900°C et l'argile grise atteint son maximum à 1100°C.
- ✚ D'après le coefficient d'absorption, la marne est la plus absorbante à 1100°C, à 900°C l'argile rouge est la plus absorbante, à 700°C l'argile grise se désagrège dans l'eau, alors que la marne est plus absorbante que l'argile rouge.

## VI.2. Etude de la résistivité

La prospection électrique est une méthode géophysique qui nous permet de reconnaître un sol. Les mesures sont rapides et peu coûteuses. Ces prospections sont complétées par des forages. Toute mesure de résistivité d'un sol est en réalité une mesure de sa teneur et de la minéralisation de l'eau qu'il contient. C'est la combinaison de ces facteurs qui individualisent un sol électriquement.

Nous étudierons la variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau et du dosage en chaux des sols.

### VI.2.1. Définition et analogie électrique

La résistivité électrique d'un horizon de sol est égale à l'inverse de sa conductivité électrique, elle est donc définie par la capacité de l'horizon à limiter le passage du courant électrique. La résistivité électrique d'un sol est influencée par plusieurs facteurs répartis entre les variables intrinsèques pérennes telles que la texture, la structure, la porosité et la

carbonatation du sol et les variables d'états diachroniques comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (Michot, 2003). [15]

Un conducteur électrique de résistivité  $P$ , soumis à une tension électrique  $u(x,y,z)$  est le siège d'un courant dont le vecteur densité est donné par la loi d'Ohm généralisée.

$$\vec{i} = -1/\rho \text{ grad } u$$

la correspondance est parfaite avec la loi de Darcy et la loi de Fourier [19]

$$\vec{V} = -k \text{ grad } h \longrightarrow \text{Loi de Darcy}$$

$$\vec{W} = -\lambda \text{ grad } \theta \longrightarrow \text{Loi de Fourier}$$

Dans tous les trois cas, l'équation fondamentale s'écrit :

$$\Delta u = 0 \qquad \Delta h = 0 \qquad \Delta \theta = 0$$

On a la similitude totale entre les phénomènes électrique, hydraulique et acoustique.

\*Une tension électrique  $\longleftrightarrow$   $h$  = charge électrique  $\longleftrightarrow$   $\theta$  = température

\* $i$  = densité de courant  $\longleftrightarrow$   $v$  = vitesse de filtration  $\longleftrightarrow$   $\Phi$  = densité de chaleur

\* $1/\rho$  = conductivité électrique  $\longleftrightarrow$   $k$  = perméabilité  $\longleftrightarrow$   $\lambda$  = conductivité thermique  
d'où il découle :

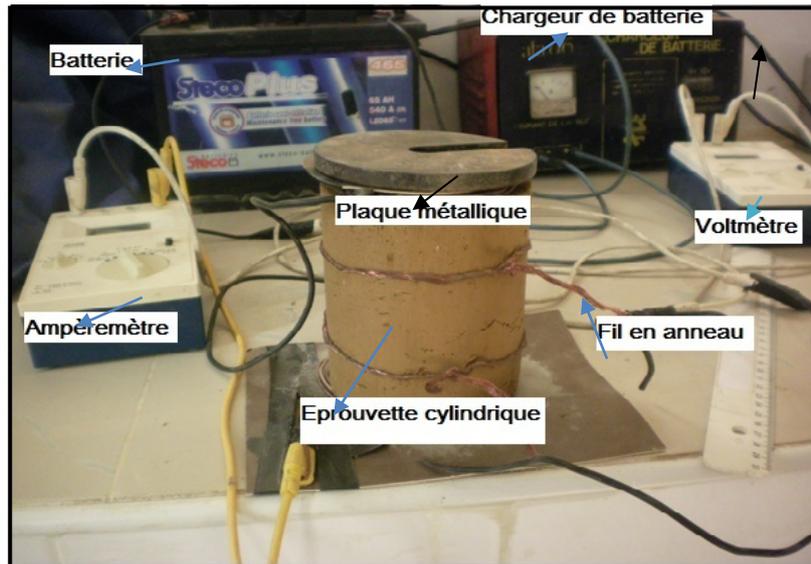
$$dI = i.ds \quad ; \quad dQ = v.ds \quad \text{et} \quad d\Phi = w.ds$$

$dI$  = densité de courant électrique ,  $dQ$  = débit et  $dF$  = flux de chaleur

### VI.2.2. Mesure de la résistivité des matériaux au laboratoire

Pour mesurer la résistivité du béton de terre, on utilise les éprouvettes confectionnées pour l'étude du retrait. Celles-ci seront traversées par un courant électrique. La mesure de l'intensité du courant qui les traverse ainsi que la différence de potentiel entre deux points du cylindre nous permettra d'en déduire la résistivité

Pour ce type de mesure on se sert du dispositif expérimental suivant :



**Figure VI.17 :** Dispositif expérimental de mesure de la résistivité électrique

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité électrique :  $1/\rho$

La résistivité électrique est donnée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{u}{I} \frac{S}{L_{elec}}$$

Où :

$u$  : la différence du potentiel entre les deux points ;

$I$  : l'intensité du courant électrique qui traverse l'échantillon ;

$S$  : la surface transversale de l'éprouvette

$L_{elec}$  : la distance qui sépare les deux fils.

**VI.2.3. La résistivité en fonction de la teneur en eau**

w %	S (mm <sup>2</sup> )	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u(V)	ρ [Ω.m]	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
20%	8103,21	5	0,05	0,107	346,82	2,88
24%	8103,21	5	0,1	0,15	243,1	4,11
26%	8103,21	5	0,15	0,1975	213,38	4,68
28%	8103,21	5	0,185	0,1715	150,24	6,656

**Tableau [38] :** Variation de la résistivité de l'argile rouge en fonction de la teneur en eau

w %	S (mm <sup>2</sup> )	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u (V)	ρ [Ω.m]	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
10%	8103,21	5	0,0205	0,0385	304,36	3,28
16%	8103,21	5	0,0255	0,0405	257,4	3,88
24%	8103,21	5	0,16	0,133	134,72	7,42
30%	8103,21	5	0,2205	0,1695	124,58	8,03

**Tableau [39] :** Variation de la résistivité de la marne en fonction de la teneur en eau

w %	S (mm <sup>2</sup> )	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u(V)	ρ [Ω.m]	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
4%	8103,21	5	0,005	0,065	2106,83	0,47
8%	8103,21	5	0,016	0,0995	1007,84	0,99
10%	8103,21	5	0,03	0,141	761,7	1,31
12%	8103,21	5	0,0385	0,1475	620,89	1,61
14%	8103,21	5	0,0665	0,129	314,38	3,18

**Tableau [40] :** Variation de la résistivité de l'argile grise en fonction de la teneur en eau

La conductivité électrique des sols croît avec l'augmentation de la teneur en eau.

La marne présente une forte conductivité par rapport aux deux autres sols, par contre l'argile grise présente les conductivités les plus basses.

La conductivité thermique et la perméabilité d'un sol peuvent être déduites par analogie électrique. Pour apprécier le matériau qui présente la meilleure isolation thermique on recherche donc par analogie le matériau présentant la plus faible conductivité électrique. Ce procédé expérimental est plus efficace que la mesure directe des propriétés thermique puisqu'il est simple, rapide et ne nécessite pas un matériel de mesure particulier.

Par analogie électrique, la conductivité thermique et la perméabilité de la marne sont les plus importantes que les deux autres sols, l'argile grise est la moins conductible thermiquement et la moins perméable, et l'argile rouge se situe entre les deux.

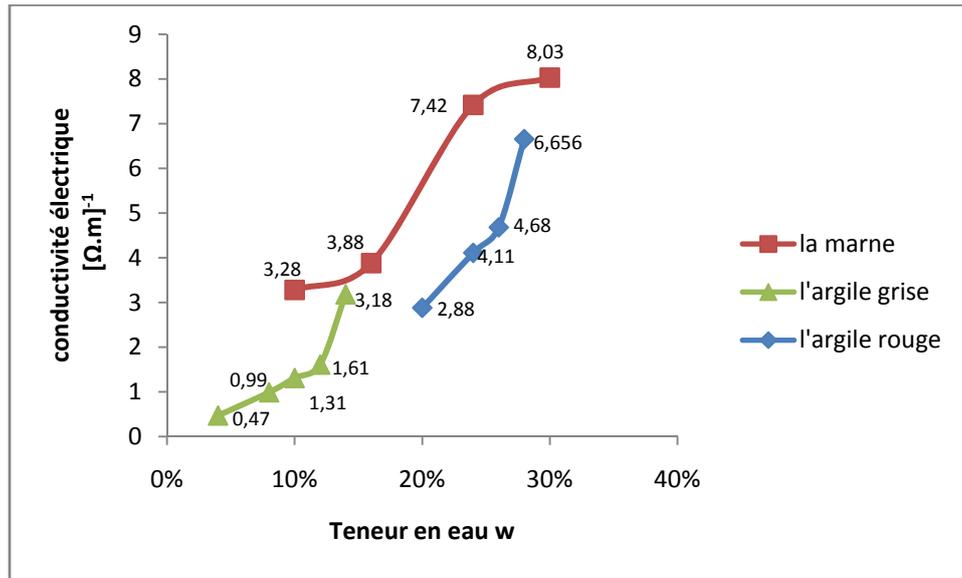


Figure VI.18: Variation de la résistivité des trois sols en fonction de la teneur en eau

#### VI.2.4. la résistivité en fonction du dosage en chaux

Les trois sols ne présentent pas le même comportement :

- L'argile rouge : La conductivité électrique augmente lorsque le dosage en chaux augmente jusqu'à un pic (4% de chaux), puis elle chute de façon brutale. L'argile rouge présente un optimum de chaux qui donne une bonne conductivité électrique.

-la Marne : La conductivité électrique décroît lorsque le dosage en chaux diminue.

-L'argile grise : La conductivité électrique diminue lorsque le dosage en chaux est réduit et à partir de 8% de chaux le sol est sec alors on arrive plus à lire les valeurs de l'intensité électrique.

% de chaux	S (mm²)	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u(V)	ρ (Ω.m)	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
2	8103,21	5	0,002	0,0925	7495,46888	0,13341394
4	8103,21	5	0,0015	0,0685	7400,93143	0,13511813
8	8103,21	5	0,0005	0,026	8427,33798	0,11866143
16	8103,21	5	0	-	-	-

Tableau [41] : Variation de la résistivité de l'argile rouge en fonction de la teneur en chaux

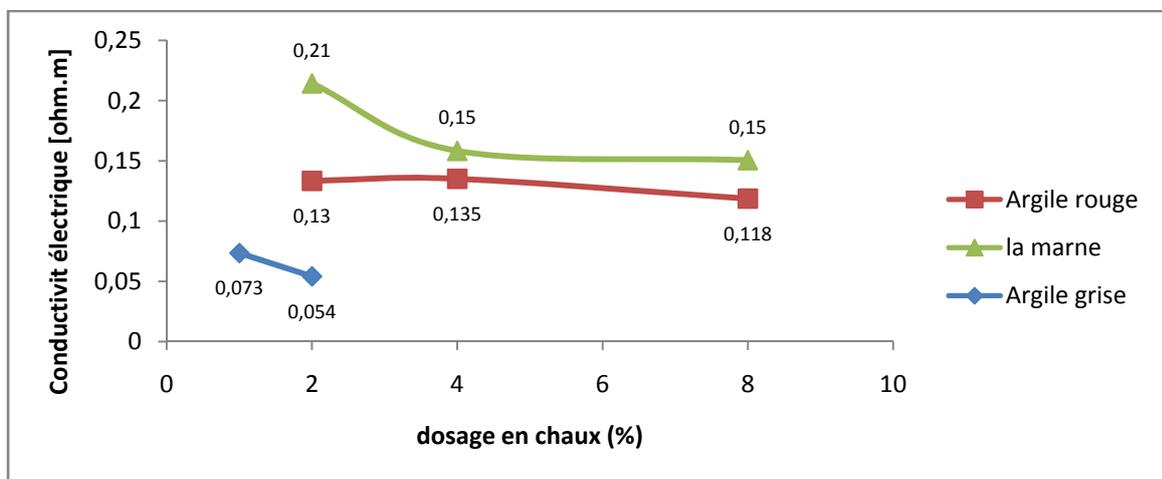
% de chaux	S (mm²)	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u(V)	ρ (Ω.m)	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
2	8103,21	5	0,0025	0,072	4667,44873	0,21424981
4	8103,21	5	0,0015	0,0585	6320,50349	0,15821524
8	8103,21	5	0,001	0,041	6644,63187	0,15049743
16	8103,21	5				

Tableau [42] : Variation de la résistivité de la marne en fonction de la teneur en chaux

% de chaux	S (mm <sup>2</sup> )	Lelec (cm)	I(10 <sup>-3</sup> )A	u(V)	ρ (Ω.m)	1/ρ [Ω.m] <sup>-1</sup>
2	8103,21	5	0,0015	0,126	13613,3921	0,07345708
4	8103,21	5	0,0005	0,057	18475,3179	0,05412627
8	8103,21	5	-	-	-	-
16	8103,21	5	-	-	-	-

**Tableau [43] :** Variation de la résistivité de l'argile grise en fonction de la teneur en chaux

Même avec l'ajout de la chaux la marne présente une forte conductivité électrique par rapport aux deux autres sols, par contre l'argile grise présente les résistivités les plus basses (figure VI.19).



**Figure VI.19:** Variation de la résistivité des trois sols en fonction du dosage en chaux

### VI.3. Conclusion

Les résultats de l'essai d'écrasement des sols ne peuvent pas être, à eux seules, déterminant du comportement du matériau. Ils doivent être accompagnés de :

- Une analyse chimique et minéralogique complète du matériau doit être faite, pour éviter son altération une fois mis au service.
- Une étude sur les températures de fusion des éléments composant le matériau.

Le grand intérêt de la stabilisation à chaud ainsi effectuée réside dans le fait que les produits obtenus sont stables à l'eau et que le gain de résistance obtenu est irréversible

La résistivité dépend de la teneur en eau du sol, de sa granulométrie et de la composition minéralogique des sols, ce qui se répercute sur la conductivité thermique et perméabilité.

L'ajout de la chaux aux sols change leur structure chimique et les déshydrate, ce qui réduit leur résistivité électrique.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail expérimental qui s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des sols nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ A défaut d'empêcher le retrait, l'étude a montré qu'on peut le réduire en maîtrisant la teneur en eau de fabrication qui gère son mécanisme et en optant pour la stabilisation à la chaux en proportions convenables.

La teneur en chaux nécessaire à incorporer doit être adaptée à la nature minéralogique du sol

L'étude du retrait par la méthode de Bigot est une nouvelle approche : essai en vraie grandeur. De ce fait, le recours aux mesures directes à partir des essais de laboratoire reste la méthode la plus fiable et incontournable

- ❖ La conservation du béton dans l'eau donne des résultats satisfaisants car le béton continue à gagner en résistance tant qu'une humidité suffisante est disponible pour permettre au processus d'hydratation et aux réactions secondaires du ciment et de l'eau de se faire.
- ❖ Le grand intérêt de la stabilisation à chaud ainsi effectuée réside dans le fait que les produits obtenus sont stables à l'eau et que le gain de résistance obtenu est irréversible. Il ressort de tout cela que :
  - ✓ La connaissance minéralogique des argiles permet de prévoir et d'expliquer le comportement d'une argile au traitement thermique.
  - ✓ La diversité des inclusions nuisibles, susceptibles d'être contenues dans les argiles nous incite à la rechercher ou à prouver son absence, déterminer la nature, et leurs proportions afin de se prémunir de problèmes ultérieurs inattendus
  - ✓ Le changement de couleur des argiles du aux ions métalliques n'a pas été étudié à cause du respect de délai. On voit qu'il y a là matière à nouvelles recherches. Le travail est arrêté mais pas épuisé.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- [1] **Vincent ROBITAILLE, Denis TREMBLAY.** « Mécanique des sols (théorie et pratique) »,
- [2] **COUSSY, Olivier DIR.** « mécanique des sols non saturés ». Paris, Hermes sciences publication, 2002.
- [3] **CAILLERE, SIMONNE.** « Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés physico-chimiques », Paris, Masson , 1982
- [4] **A.LEROUX et D.DELAHAYE.** « Désordres des remblais en marne », Bull de liaison de LPC N°75Janvier, Février 1975.
- [5] **Youdjari Djonkamla.** « caractérisation et simulation et simulation numérique du comportement volumétrique de sols argileux gonflants de N'djaména », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de Maîtrise en Génie Civil pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc); Québec , 2010
- [6] **Fatima Zohra AZZOUZ.** «Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflante de la région de Tlemcen », Mémoire de magister, spécialité mécanique des sols et géotechnique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
- [7] **Houria MOBAREK.** « Identification et prevision du gonflement de quelques argiles d'Algérie », mémoire de magister, université Mouloud Mammeri
- [8] **Yves Berthaud, patrick de Buhan, Nicolas Schmitt,** « Aide mémoire, mécanique des sols, concepts. Applications, Dunod, 2008
- [9] **Hugo HOUBEN, Hubert GUILLAUX.** « Traité de construction en terre », Parenthèses, Juin 1995.
- [10] **Centre de recherche et d'application- Terre.** «Construire en terre », Alternative, 1979
- [11] **Abdelhamid GUETALA.** « Béton de terre stabilisé : Amélioration de sa durabilité à l'eau », Mémoire de doctorat d'état en génie civil, Université Mohamed Khider- Biskra
- [12] **Mc Graw-Hillciment.** stabilisation des sols, book company, Ink, 1962
- [13] **Jaques VERDEYEN, Victor ROISIN, Jean NUYENS.** « Application de la macanique des sols tome 1 », Paris, Dunod, 1971
- [14] **Ecole d'Avignon.** « Technique et pratique de la chaux », Paris, Eyrolles, 2003
- [15] **Association Française de normalisation.** « Ciments et chaux », Paris, Afnor, 2003
- [16] **R. DUPAIN, R. , J-C.SAINT ARROMAN.** « Granulat, sols, ciments et bétons» Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Casteilla, 1995
- [17] **S.LEROUIL, J.P MAGMAN et F.TAVEN.** « Remblais sur argiles molles » LCPC et technique et documentation, Lavoisier, 1983

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

---

[18] **J.M.GRESILLON.** « Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction », annales de l'I.T.B.T.P. N°339-Mai 1976

[19] **M.KERGUIGNAS et G.GAIGNAERT.** « Résistance des matériau », Dunod, 1977

[20] **G.A .LEONARDS.** « Les fondations », Dunod, 1968

[21] **Farah LAZZALI.** « Contribution à l'étude de la stabilisation d'un sol gonflant (bentonite) par apport de chaux, thèse de magister, université des sciences et de technologie Houari Boumediene, 1997

[22] **POWERS T.C and COPELAND L.E.** (1954). «Permeability of portland cement paste », Journal of ames. Con.inst.n° 3 Novembre,1954

[23] **PAYNE et VDRANSFIELF The concret society.** «Permeability of concret and control», one day conference, 12 dec. 1985

[24] **CHANTIERS**

# ANNEXES

## RESULTATS DE L'ETUDE DU RETRAIT AU LABORATOIRE

### Nomenclature

-j : âge de l'éprouvette examinée

-L<sub>f</sub> : longueur finale de l'éprouvette après étuvage

- ΔL<sub>i</sub> : Raccourcissement de la longueur de l'éprouvette, relevé pour une durée de 24 heures sur le comparateur.

-ΔL<sub>j</sub> = ∑ ΔL<sub>i</sub> : Raccourcissement cumulé au bout de j jours.

ΔL<sub>j</sub> inversé : Raccourcissement cumulé au sens inverse de ΔL<sub>j</sub>.

Retrait = ΔL<sub>j</sub> / L<sub>f</sub>

M<sub>j</sub> : Masse de l'éprouvette à j jour après sa fabrication.

M<sub>s</sub> [g] : masse finale de l'éprouvette mesuré à la fin de l'essai après étuvage.

M<sub>j</sub>-M<sub>s</sub>[g] : la masse d'eau contenue dans l'échantillon au bout j jour

# ETUDE DE RETRAIT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DES SOLS

## ❖ ARGILE ROUGE

### Etude du retrait de l'argile rouge R10 à w = 10%

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	Longeur (mm)	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms [g]	Mj-Ms[g]	Humidité (%)
0			117			1710,8			
1	0,4	0,4	116,6	0,79	0,67521368	1646	1560,1	85,9	5,506057304
2	0,6	0,2	116,4	0,39	0,33333333	1610,1	1560,1	50	3,204922761
7	0,72	0,12	116,28	0,19	0,16239316	1591,1	1560,1	31	1,987052112
8	0,76	0,04	116,24	0,07	0,05982906	1579,5	1560,1	19,4	1,243510031
9	0,78	0,02	116,22	0,03	0,02564103	1576	1560,1	15,9	1,019165438
10	0,79	0,01	116,21	0,01	0,00854701	1573,6	1560,1	13,5	0,865329146
11	0,79	0	116,21	0	0	1572	1560,1	11,9	0,762771617
14	0,79	0	116,21	0	0	1571,5	1560,1	11,4	0,73072239
15	0,79	0	116,21	0	0	1569,2	1560,1	9,1	0,583295943
16	0,79	0	116,21	0	0	1568,8	1560,1	8,7	0,55765656
17	0,79	0	116,21	0	0	1565	1560,1	4,9	0,314082431
18	0,79	0	116,21	0	0	1560,1	1560,1		0

**Etude du retrait de l'argile rouge R16 à w = 16 %**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longeur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1900,3			
1	1,05	1,05	115,95	3,31	2,82905983	1835,7	1632,5	203,2	12,44716692
2	1,83	0,78	115,17	2,26	1,93162393	1783,2	1632,5	150,7	9,231240429
7	2,35	0,52	114,65	1,48	1,26495726	1744,1	1632,5	111,6	6,836140888
8	2,68	0,33	114,32	0,96	0,82051282	1722,4	1632,5	89,9	5,506891271
9	2,88	0,2	114,12	0,63	0,53846154	1708,4	1632,5	75,9	4,649310873
10	3,04	0,16	113,96	0,43	0,36752137	1698	1632,5	65,5	4,012251149
11	3,28	0,24	113,72	0,27	0,23076923	1688,9	1632,5	56,4	3,45482389
14	3,31	0,03	113,69	0,03	0,02564103	1668,8	1632,5	36,3	2,223583461
15	3,31	0	113,69	0	0	1650,7	1632,5	18,2	1,114854518
16	3,31	0	113,69	0	0	1644,2	1632,5	11,7	0,71669219
17	3,31	0	113,69	0	0	1639,1	1632,5	6,6	0,404287902
18	3,31	0	113,69	0	0	1632,5	1632,5	0	0

**Etude du retrait de l'argile rouge R20 à w = 20%**

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longeur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	R20
0			117			1916,2			
1	1,1	1,7	115,9	6,2	5,2991453	1857,7	1580,6	277,1	17,53131722
5	3,05	1,95	113,95	4,5	3,84615385	1780,5	1580,6	199,9	12,64709604
6	4,27	1,22	112,73	2,55	2,17948718	1717,8	1580,6	137,2	8,680248007
7	5,14	0,87	111,86	1,33	1,13675214	1677,4	1580,6	96,8	6,124256611
8	5,39	0,25	111,61	0,46	0,39316239	1654,2	1580,6	73,6	4,656459572
9	5,52	0,13	111,48	0,21	0,17948718	1642,5	1580,6	61,9	3,916234341
12	5,6	0,08	111,4	0,08	0,06837607	1635,6	1580,6	55	3,479691256
13	5,6	0	111,4	0	0	1629,7	1580,6	49,1	3,106415285
14	5,6	0	111,4	0	0	1600,4	1580,6	19,8	1,252688852
15	5,6	0	111,4	0	0	1580,6	1580,6	0	0

**Etude du retrait de l'argile rouge R25 à w = 25 %**

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longueur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	R25
0			117			1824,7			
1	7,15	6,15	109,85	19,69	16,8290598	1737,4	1456,6	280,8	19,27777015
5	12,6	5,45	104,4	13,54	11,5726496	1679,8	1456,6	223,2	15,32335576
6	17,26	4,66	99,74	8,09	6,91452991	1629,2	1456,6	172,6	11,84951256
7	19,29	2,03	97,71	3,43	2,93162393	1573,1	1456,6	116,5	7,998077715
8	20,2	0,91	96,8	1,4	1,1965812	1548,2	1456,6	91,6	6,288617328
9	20,47	0,27	96,53	0,49	0,41880342	1522,8	1456,6	66,2	4,544830427
12	20,68	0,21	96,32	0,22	0,18803419	1496,5	1456,6	39,9	2,739255801
13	20,69	0,01	96,31	0,01	0,00854701	1488,6	1456,6	32	2,196896883
14	20,69	0	96,31	0	0	1478,8	1456,6	22,2	1,524097213
15	20,69	0	96,31	0	0	1456,6	1456,6	0	0

❖ LA MARNE

Etude du retrait de La marne M10 à w = 10 %

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longeur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			1680,5			
1	0,19	0,19	116,81	0,53	0,45299145	1621,9	1521	100,9	6,63379356
2	0,32	0,13	116,68	0,34	0,29059829	1597,6	1521	76,6	5,03616042
7	0,45	0,13	116,55	0,21	0,17948718	1579,9	1521	58,9	3,87245233
8	0,51	0,06	116,49	0,08	0,06837607	1564,3	1521	43,3	2,84681131
9	0,52	0,01	116,48	0,02	0,01709402	1554,5	1521	33,5	2,20249836
10	0,53	0,01	116,47	0,01	0,00854701	1550,9	1521	29,9	1,96581197
11	0,53	0	116,47	0	0	1548,3	1521	27,3	1,79487179
14	0,53	0	116,47	0	0	1546,8	1521	25,8	1,69625247
15	0,53	0	116,47	0	0	1543,4	1521	22,4	1,47271532
16	0,53	0	116,47	0	0	1537,7	1521	16,7	1,09796187
17	0,53	0	116,47	0	0	1521	1521	0	0

**Etude du retrait de La marne M16 à w = 16 %**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longeur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1798,6			
1	0,66	0,66	116,34	1,27	1,08547009	1713,5	1558,7	154,8	9,93135305
2	1	0,34	116	0,61	0,52136752	1663,5	1558,7	104,8	6,72355168
7	1,15	0,15	115,85	0,27	0,23076923	1635	1558,7	76,3	4,8951049
8	1,21	0,06	115,79	0,12	0,1025641	1619,8	1558,7	61,1	3,91993328
9	1,24	0,03	115,76	0,06	0,05128205	1610,5	1558,7	51,8	3,32328222
10	1,27	0,03	115,73	0,03	0,02564103	1600,8	1558,7	42,1	2,70096876
11	1,27	0	115,73	0	0	1590,9	1558,7	32,2	2,06582408
14	1,27	0	115,73	0	0	1580,4	1558,7	21,7	1,3921858
15	1,27	0	115,73	0	0	1572,6	1558,7	13,9	0,89176878
16	1,27	0	115,73	0	0	1568,6	1558,7	9,9	0,63514467
17	1,27	0	115,73	0	0	1558,7	1558,7	0	0

**Etude du retrait de La marne M24 à w = 24 %**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longueur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1797			
1	2,98	2,98	114,02	7,78	6,64957265	1698,1	1443,6	254,5	17,6295373
2	4,92	1,94	112,08	4,8	4,1025641	1628,2	1443,6	184,6	12,7874758
7	6,44	1,52	110,56	2,86	2,44444444	1578,4	1443,6	134,8	9,33776669
8	7,58	1,14	109,42	1,34	1,14529915	1542,1	1443,6	98,5	6,82321973
9	7,72	0,14	109,28	0,2	0,17094017	1515,5	1443,6	71,9	4,98060405
10	7,78	0,06	109,22	0,06	0,05128205	1510	1443,6	66,4	4,59961208
11	7,78	0	109,22	0	0	1490,7	1443,6	47,1	3,26267664
14	7,78	0	109,22	0	0	1482,2	1443,6	38,6	2,67387088
15	7,78	0	109,22	0	0	1470,7	1443,6	27,1	1,87725132
16	7,78	0	109,22	0	0	1469,5	1443,6	25,9	1,7941258
17	7,78	0	109,22	0	0	1443,6	1443,6	0	0

**Etude du retrait de La marne M30 à w = 30 %**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longeur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1722,5			
1	3,82	3,82	113,18	11,26	9,62393162	1648,1	1317,7	330,4	25,0739926
2	6,25	2,43	110,75	7,44	6,35897436	1580,8	1317,7	263,1	19,9666085
7	8,05	1,8	108,95	5,01	4,28205128	1532,2	1317,7	214,5	16,2783638
8	10,14	2,09	106,86	3,21	2,74358974	1481,1	1317,7	163,4	12,4003946
9	11,11	0,97	105,89	1,12	0,95726496	1413,2	1317,7	95,5	7,24747666
10	11,25	0,14	105,75	0,15	0,12820513	1359,3	1317,7	41,6	3,15701601
11	11,26	0,01	105,74	0,01	0,00854701	1345,5	1317,7	27,8	2,10973666
14	11,26	0	105,74	0	0	1339,4	1317,7	21,7	1,64680883
15	11,26	0	105,74	0	0	1339,4	1317,7	21,7	1,64680883
16	11,26	0	105,74	0	0	1337,5	1317,7	19,8	1,5026182
17	11,26	0	105,74	0	0	1317,7	1317,7	0	0

❖ ARGILE GRISE

Etude du retrait de l'argile grise G4 à w = 4 %

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longeur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			2057,3			
1	1,02	1,02	115,98	2,6	2,222222222	2025,3	1978,04	47,26	2,38923379
2	1,8	0,78	115,2	1,58	1,35042735	2012	1978,04	33,96	1,71685102
7	2,407	0,607	114,593	0,8	0,683760684	1999,6	1978,04	21,56	1,08996785
8	2,55	0,143	114,45	0,193	0,164957265	1988,9	1978,04	10,86	0,54902833
9	2,55	0	114,45	0,05	0,042735043	1986,7	1978,04	8,66	0,43780712
10	2,55	0	114,45	0	0	1983,4	1978,04	5,36	0,27097531
11	2,55	0	114,45	0	0	1983,1	1978,04	5,06	0,25580878
14	2,55	0	114,45	0	0	1983,1	1978,04	5,06	0,25580878
15	2,55	0	114,45	0	0	1983,1	1978,04	5,06	0,25580878
16	2,55	0	114,45	0	0	1982	1978,04	3,96	0,20019818
17	2,55	0	114,45	0	0	1978,04	1978,04	0	0

### Etude du retrait de l'argile grise G8 à w = 8%

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longeur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			2246,3			
1	2,62	2,62	114,38	5,09	4,35042735	2158	2079,8	78,2	3,75997692
5	3,9	1,28	113,1	2,47	2,111111111	2130	2079,8	50,2	2,41369362
6	4,37	0,47	112,63	1,19	1,01709402	2116,6	2079,8	36,8	1,7694009
7	4,54	0,17	112,46	0,72	0,61538462	2109,9	2079,8	30,1	1,44725454
8	4,76	0,22	112,24	0,55	0,47008547	2105,8	2079,8	26	1,2501202
9	4,93	0,17	112,07	0,33	0,28205128	2100,8	2079,8	21	1,00971247
12	5,09	0,16	111,91	0,16	0,13675214	2098,3	2079,8	18,5	0,88950861
13	5,09	0	111,91	0	0	2087,2	2079,8	7,4	0,35580344
14	5,09	0	111,91	0	0	2083,5	2079,8	3,7	0,17790172
15	5,09	0	111,91	0	0	2079,8	2079,8	0	0

**Etude du retrait de l'argile grise G10 à w = 10 %**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longueur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			2251,7			
1	3,08	3,08	113,92	7,17	6,12820513	2181,8	2050,6	131,2	6,39812738
5	5,75	2,67	111,25	4,09	3,4957265	2132,5	2050,6	81,9	3,99395299
6	6,64	0,89	110,36	1,42	1,21367521	2100,7	2050,6	50,1	2,44318736
7	6,88	0,24	110,12	0,53	0,45299145	2086,7	2050,6	36,1	1,76046035
8	7	0,12	110	0,29	0,24786325	2079,7	2050,6	29,1	1,41909685
9	7,12	0,12	109,88	0,17	0,14529915	2072,5	2050,6	21,9	1,0679801
12	7,17	0,05	109,83	0,05	0,04273504	2062,2	2050,6	11,6	0,56568809
13	7,17	0	109,83	0	0	2058,6	2050,6	8	0,39012972
14	7,17	0	109,83	0	0	2056,4	2050,6	5,8	0,28284405
15	7,17	0	109,83	0	0	2050,6	2050,6	0	0

### Etude du retrait de l'argile grise G12 à w = 12 %

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	longeur	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			2187,3			
1	8,8	8,8	108,2	22,65	19,3589744	2098,6	1954,4	144,2	7,3782235
5	17,01	8,21	99,99	13,85	11,8376068	2056,2	1954,4	101,8	5,20875972
6	21,24	4,23	95,76	5,64	4,82051282	2029,4	1954,4	75	3,83749488
7	22,44	1,2	94,56	1,41	1,20512821	2012,8	1954,4	58,4	2,98812935
8	22,55	0,11	94,45	0,21	0,17948718	1993,4	1954,4	39	1,99549734
9	22,58	0,03	94,42	0,1	0,08547009	1970,7	1954,4	16,3	0,83401555
12	22,6	0,02	94,4	0,07	0,05982906	1967,7	1954,4	13,3	0,68051576
13	22,65	0,05	94,35	0,05	0,04273504	1963,9	1954,4	9,5	0,48608269
14	22,65	0	94,35	0	0	1959,1	1954,4	4,7	0,24048301
15	22,65	0	94,35	0	0	1954,4	1954,4	0	0

# ETUDE DU RETRAIT DES SOLS STABILISES A LA CHAUX

## ❖ ARGILE ROUGE

### Etude du retrait de l'argile rouge stabilisée avec 2% de chaux RS 2

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	Longueur (mm)	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			1850,6	1477,7		
1	1,58	1,58	115,42	4	3,41880342	1782,6	1477,7	304,9	20,6334168
2	2,29	0,71	114,71	2,42	2,06837607	1737,6	1477,7	259,9	17,58814374
3	2,88	0,59	114,12	1,71	1,46153846	1700	1477,7	222,3	15,04364891
6	3,67	0,79	113,33	1,12	0,95726496	1672,9	1477,7	195,2	13,2097178
7	3,88	0,21	113,12	0,33	0,28205128	1609,7	1477,7	132	8,932800974
8	3,9	0,02	113,1	0,12	0,1025641	1590,2	1477,7	112,5	7,613182649
9	4	0,1	113	0,1	0,08547009	1477,7	1477,7	0	0

**Etude du retrait de l'argile rouge stabilisée avec 4% de chaux RS 4**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>Longeur (mm)</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1852,7	1492,2		
1	1,32	1,32	115,68	3,11	2,65811966	1779,5	1492,2	287,3	19,25345128
2	2,2	0,88	114,8	1,79	1,52991453	1707,1	1492,2	214,9	14,40155475
3	2,71	0,51	114,29	0,91	0,77777778	1658,5	1492,2	166,3	11,14461868
6	3	0,29	114	0,4	0,34188034	1612,3	1492,2	120,1	8,048518965
7	3,08	0,08	113,92	0,11	0,09401709	1597,5	1492,2	105,3	7,056694813
8	3,11	0,03	113,89	0,03	0,02564103	1586,6	1492,2	94,4	6,326229728
9	3,11	0	113,89	0	0	1492,2	1492,2	0	0

**Etude du retrait de l'argile rouge stabilisée avec 8% de chaux RS 8**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>Longeur (mm)</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1847			
1	1	1	116	1,93		1775,8	1508,1	267,7	17,75081228
2	1,41	0,41	115,59	0,93	0,79487179	1722,8	1508,1	214,7	14,23645647
3	1,62	0,21	115,38	0,52	0,44444444	1688,7	1508,1	180,6	11,9753332
6	1,88	0,26	115,12	0,31	0,26495726	1653	1508,1	144,9	9,608116173
7	1,93	0,05	115,07	0,05	0,04273504	1610,3	1508,1	102,2	6,776738943
8	1,93	0	115,07	0	0	1600,6	1508,1	92,5	6,133545521
9	1,93	0	115,07	0	0	1508,1	1508,1	0	0

### Etude du retrait de l'argile rouge stabilisée avec 16% de chaux RS 16

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	Longeur (mm)	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	Mj[g]	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			1637,1	1380,6		
1	0,52	0,52	116,48	1,26	1,07692308	1576,1	1380,6	195,5	14,16050992
2	0,88	0,36	116,12	0,74	0,63247863	1528,5	1380,6	147,9	10,71273359
3	1,22	0,34	115,78	0,38	0,32478632	1487,5	1380,6	106,9	7,743010285
6	1,26	0,04	115,74	0,04	0,03418803	1452,7	1380,6	72,1	5,222367087
7	1,26	0	115,74	0	0	1444,6	1380,6	64	4,635665653
8	1,26	0	115,74	0	0	1437	1380,6	56,4	4,085180356
9	1,26	0	115,74	0	0	1380,6	1380,6	0	0

### ❖ LA MARNE

#### Etude du retrait de la marne stabilisée avec 2% de chaux MS 2

Jours	$\Delta L_j$	$\Delta L_i$	MS 2	$\Delta L_j$ inversé	retrait %	MS 22	Ms	Mj-Ms[g]	Humidité
0			117			1753,8			
1	2,51	3,77	114,49	5,66	4,83760684	1663,9	1340,5	323,4	24,1253264
2	3,41	0,9	113,59	1,89	1,61538462	1580,4	1340,5	239,9	17,8963073
3	4,1	0,69	112,9	0,99	0,84615385	1545,1	1340,5	204,6	15,2629616
6	4,35	0,25	112,65	0,3	0,25641026	1515,1	1340,5	174,6	13,0249907
7	4,4	0,05	112,6	0,05	0,04273504	1467,3	1340,5	126,8	9,45915703
8	4,4	0	112,6	0	0	1445,4	1340,5	104,9	7,82543827
9	4,4	0	112,6	0	0	1340,5	1340,5	0	0

**Etude du retrait de la marne stabilisée avec 4% de chaux MS 4**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>MS 4</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>MS 42</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1778,2	1371,3		
1	2,08	2,48	114,92	4,42	3,77777778	1675	1371,3	303,7	22,1468679
2	2,9	0,82	114,1	1,94	1,65811966	1607,8	1371,3	236,5	17,2464085
3	3,37	0,47	113,63	1,12	0,95726496	1560,1	1371,3	188,8	13,7679574
6	3,8	0,43	113,2	0,65	0,55555556	1525	1371,3	153,7	11,2083424
7	4,02	0,22	112,98	0,22	0,18803419	1503,8	1371,3	132,5	9,66236418
8	4,02	0	112,98	0	0	1483,2	1371,3	111,9	8,16014001
9	4,02	0	112,98	0	0	1371,3	1371,3	0	0

**Etude du retrait de la marne stabilisée avec 8% de chaux MS 8**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longueur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1792,2			
1	0,7	0,7	116,3	2	1,70940171	1746,4	1402,7	343,7	24,5027447
2	1,13	0,43	115,87	1,3	1,11111111	1696,5	1402,7	293,8	20,9453197
3	1,57	0,44	115,43	0,87	0,74358974	1658,8	1402,7	256,1	18,257646
6	2	0,43	115	0,43	0,36752137	1600,5	1402,7	197,8	14,1013759
7	2	0	115	0	0	1556	1402,7	153,3	10,9289228
8	2	0	115	0	0	1530,9	1402,7	128,2	9,13951665
9	2	0	115	0	0	1402,7	1402,7	0	0

**Etude du retrait de la marne stabilisée avec 16% de chaux MS 16**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longueur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			1737,6			
1	0,2	0,2	116,8	0,28	0,23931624	1688	1404,4	283,6	20,193677
2	0,26	0,06	116,74	0,08	0,06837607	1638,3	1404,4	233,9	16,6547992
3	0,28	0,02	116,72	0,02	0,01709402	1603,3	1404,4	198,9	14,1626317
6	0,28	0	116,72	0	0	1535	1404,4	130,6	9,29934492
7	0,28	0	116,72	0	0	1518	1404,4	113,6	8,08886357
8	0,28	0	116,72	0	0	1504,2	1404,4	99,8	7,10623754
9	0,28	0	116,72	0	0	1404,4	1404,4	0	0

❖ **ARGILE GRISE**

**Etude du retrait de l'argile grise stabilisée avec 2% de chaux GS 2**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longueur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			2205,2			
1	0,8	0,8	116,2	2,56	2,18803419	2154,6	1990,7	163,9	8,233284774
2	1,67	0,87	115,33	1,76	1,5042735	2100,7	1990,7	110	5,525694479
3	2,15	0,48	114,85	0,89	0,76068376	2056,6	1990,7	65,9	3,310393329
6	2,56	0,41	114,44	0,41	0,35042735	2034,1	1990,7	43,4	2,18013764
7	2,56	0	114,44	0	0	2009,5	1990,7	18,8	0,94439142
8	2,56	0	114,44	0	0	2006,5	1990,7	15,8	0,793690662
9	2,56	0	114,44	0	0	2004,2	1990,7	13,5	0,678153413
10	2,56	0	114,44	0	0	1990,7	1990,7	0	0

**Etude du retrait de l'argile grise stabilisée avec 4% de chaux GS 4**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longeur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			2171,5			
1	0,12	0,12	116,88	0,33	0,28205128	2116,5	1967,3	149,2	7,583998373
2	0,22	0,1	116,78	0,21	0,17948718	2070,4	1967,3	103,1	5,240685203
3	0,29	0,07	116,71	0,11	0,09401709	2036,6	1967,3	69,3	3,522594419
6	0,33	0,04	116,67	0,04	0,03418803	2006,5	1967,3	39,2	1,992578661
7	0,33	0	116,67	0	0	1990,3	1967,3	23	1,169115031
8	0,33	0	116,67	0	0	1986,5	1967,3	19,2	0,975956895
9	0,33	0	116,67	0	0	1982,3	1967,3	15	0,762466324
10	0,33	0	116,67	0	0	1967,3	1967,3	0	0

**Etude du retrait de l'argile grise stabilisée avec 8% de chaux GS 8**

<b>Jours</b>	<b><math>\Delta L_j</math></b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>	<b>longeur</b>	<b><math>\Delta L_j</math> inversé</b>	<b>retrait %</b>	<b>Mj[g]</b>	<b>Ms</b>	<b>Mj-Ms[g]</b>	<b>Humidité</b>
0			117			2081,5			
1	0,05	0,05	116,95	0,14	0,11965812	2000,7	1866,3	134,4	7,201414564
2	0,09	0,04	116,91	0,09	0,07692308	1955,8	1866,3	89,5	4,795584847
3	0,12	0,03	116,88	0,05	0,04273504	1926,1	1866,3	59,8	3,204200825
6	0,14	0,02	116,86	0,02	0,01709402	1911,4	1866,3	45,1	2,416546107
7	0,14	0	116,86	0	0	1887,4	1866,3	21,1	1,130579221
8	0,14	0	116,86	0	0	1884,2	1866,3	17,9	0,959116969
9	0,14	0	116,86	0	0	1880,5	1866,3	14,2	0,760863741
10	0,14	0	116,86	0	0	1866,3	1866,3	0	0