

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par**

**Mr CHAMI Idir**

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie civil

Option : Géotechnique et Environnement

Thème

**EFFETS DE L'AJOUT DES STABILISANTS (CIMENT, CHAUX ET SABLE) SUR LE RETRAIT ET SUR LA RESISTANCE MECANIQUE DES ARGILES**

Soutenu devant le Jury composé de :

Melle BELHASSANI, Maître Assistante à l'UMMTO ..... Présidente

Mr BEN AZZOUG, Maître de conférences à l'UMMTO..... Promoteur

Mme Moubarek, Maître Assistante à l'UMMTO ..... Examinatrice

Année 2016

# Remerciements

Je remercie tout particulièrement mes parents de m'avoir aidé par tous les moyens pour arriver aux termes de ce travail qui est le fruit de plusieurs années d'études. Je leur dédie ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères pour mon promoteur Mr BENAZZOUG, Maître de conférences à l'UMMTO qui représente pour moi le guide et l'exemple de sérieux dans le travail et de savoir. Je tiens à lui rendre un vibrant hommage pour m'avoir encadré et de m'avoir fait l'honneur de partager et de transmettre une partie de ses compétences et de ses connaissances scientifiques, qui m'ont permis de suivre une ligne de travail rigoureuse.

Je remercie aussi les membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail à sa juste valeur. Je nomme Melle BELHASSANI, Maître assistante à l'UMMTO qui présidera le jury de ma soutenance et Mme Moubarek, Maître assistante à l'UMMTO qui a bien voulu examiner ce mémoire.

Toute ma considération pour les membres du laboratoire LGEA et à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail de recherche.

Mes vifs remerciements à Mr LACHEBI Kamel, responsable du laboratoire de recherche (LGEA) et monsieur BOUKHEROUB Med Ameziane, responsable du laboratoire de mécanique des sols pour leur disponibilité et leur aide durant la partie expérimentale de ce travail.

Je remercie énormément mes camarades de classes en master géotechnique ainsi que mes enseignants pour les merveilleux moments que nous avons vécus ensemble durant toute l'année universitaire.

## Liste des figures

**Figure I-1 :** effets du compactage sur la structure d'un sol (LEONARDS.G.A, 1967)

**Figure I.2 :** Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (LEGERE, 2001)

**Figure I.3 :** Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux (LEGERE, 2001)

**Figure II.1 :** a)Tétraèdre de silice ; b) feuillet de silice en tétraèdre (HOLTZ Robel, 1991).

**Figure II.2 :** a)octaèdre d'aluminium(ou de magnésium); b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre.(HOLTZ Robel, 1991)

**Figure II.3 :** a) Schéma de la structure de la kaolinite ; b) Vue isométrique de la structure atomique de la atomique de la kaolinite.(HOLTZ Robel, 1991)

**Figure II.4:** photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage(AZZOUZ, 2006).

**Figure II.5 :** Schéma de la structure de la montmorillonite (HOLTZ Robel, 1991).

**Figure II.6:** Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (AZZOUZ, 2006).

**Figure II.8:** Schéma de la structure de l'illite (HOLTZ Robel, 1991).

**Figure II.9:** photographie d'une illite prise au microscope électronique à balayage (AZZOUZ, 2006).

**Figure III.1 :** Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

**Figure III.2 :** Ménisque capillaire, a) sol granulaire, b) sol fin

**Figure III.3a :** Loi de Jurin

**Figure III.3b :** Tube gras

**Figure III.4 :** Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles (Kornmann.M, 2006)

**Figure III.5 :** Désordres partiels dus à la variation d'épaisseur du sol argileux sensible (Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991)

**Figure III.6 :** Désordres concernant le gros-œuvre ; a) Désordres à l'ensemble du soubassement et de l'ossature ; b) Désordres partiels dus à l'existence d'un sous-sol partiel (Source : Ministère de l'environnement d'après CEBTP 1991)

**Figure III.7 :** Désordres affectant le gros œuvre

Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991

**Figure III.8 :** les fissurations du bâti en maçonnerie due au retrait-gonflement ([www.argiles.fr](http://www.argiles.fr))

**Figure IV.1 :** Site d'échantillonnage

**Figure IV.2:** Analyse granulométrique.

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

**Figure IV.4 :** appareil de Casagrande et outil à rainure

**Figure IV.5:** Limite de liquidité d'argile rouge, jaune et grise.

**Figure IV.6:** Equipement de l'essai Proctor normal

**Figure IV.7 :** Compactage des couches

**Figure IV.8:** Courbe d'optimum proctor d'argile rouge, jaune et grise

**Figure IV.9:** courbe granulométrique du sable

**Figure V.1 :** Dispositif expérimental de mesure du retrait.

**Figure V.2a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile rouge confectionnée à 15 % d'eau

**Figure V.2b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile rouge confectionnées à 15 % et à 17 % d'eau

**Figure V.2c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile rouge AR15, AR17 et AR20

**Figure V.2d :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile rouge AR15, AR17, AR20 et AR25

**Figure V.3a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile jaune confectionnée à 15 % d'eau

**Figure V.3b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnée à 15 % et 17 % d'eau

**Figure V.3c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnée à 15 %, 17 % et 20 % d'eau

**Figure V.3d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnée à 15 %, 17 %, 20 % et 25 % d'eau

**Figure V.4a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile grise confectionnée à 15 % d'eau

**Figure V.4b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 15 % et 17 % d'eau

**Figure V.4c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 15 %, 17 % et 20 % d'eau

**Figure V.4d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 15 %, 17 %, 20% et 25 % d'eau

**Figure V.5a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AR15

**Figure V.5b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15 et AR17

**Figure V.5c :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15, AR17 et AR20

**Figure V.5c :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15, AR17, AR20 et AR25

**Figure V.6a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AJ15

**Figure V.6b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15 et AJ17

**Figure V.6c :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15, AJ17 et AJ20

**Figure V.6d :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15, AJ17, AJ20 et AJ25

**Figure V.7a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AG6

**Figure V.7b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6 et AG8

**Figure V.7c :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6, AG8 et AG9

**Figure V.7d :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6, AG8, AG9 et AG10

**Figure V.8:** Comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de AR15, AJ15 et AG6

**Figure V.9:** comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps de AR25, AJ25 et AG10

**Figure V.10:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction de retrait de AR15, AJ15, AG6

**Figure V.11:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction de retrait de AR25, AJ25, AG10.

**Figure V.12a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes d'argile jaune stabilisées avec 5% de ciment (JC5).

**Figure V.12b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de ciment.

**Figure V.12c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de ciment.

**Figure V.12d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de ciment.

**Figure V.13:** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées au ciment et d'éprouvette d'argile jaune brut (AJ25)

**Figure V.14a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes stabilisées avec 5% de chaux

**Figure V.14b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de chaux.

**Figure V.14c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de chaux.

**Figure V.14d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de chaux.

**Figure V.15:** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées à la chaux et d'éprouvette d'argile jaune brute (AJ25)

**Figure V.16a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes d'argile jaune stabilisées avec 5% de sable (JS5).

**Figure V.16b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de sable.

**Figure V.16c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de sable.

**Figure V.16d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de sable.

**Figure V.17:** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées au sable et d'éprouvette d'argile jaune brute (AJ25)

**Figure V.18 :** pourcentage de retrait final en fonction de la teneur en stabilisant (ciment, chaux et sable)

**Figure VI.1 :** Eprouvettes d'argile stabilisée soumise à la compression simple

**Figure VI.2 :** Variation de la résistance à la compression à sec en fonction de la teneur en eau pour les trois types d'échantillon d'argile

**Figure VI.3:** Variation de la résistance à la compression à l'état sec en fonction de la teneur en stabilisant

**Figure VI.4:** Variation de la résistance à la compression ( $R_{sat}$ ) après immersion en fonction de la teneur en stabilisant

**Figure VI.5:** Evolution du coefficient de ramollissement en fonction de teneur en stabilisant

## Liste des tableaux

**Tableau I.1:** résistances à la compression simple typique de divers sols traités par 10% de ciment (LEONARDS.G.A, 1967).

**Tableau III.1 :** Hauteur approximative d'ascension capillaire pour différents sols. D'après Hansbo (1975).

**Tableau [IV.1] :** Analyse granulométrique d'argile rouge

**Tableau [IV.2] :** Analyse granulométrique d'argile jaune

**Tableau [IV.3] :** Analyse granulométrique d'argile grise

**Tableau [IV.4]:** limite de liquidité d'argile rouge, jaune et grise.

**Tableau [IV.5]:** limite de plasticité d'argile rouge, jaune et grise.

**Tableau [IV.6]:** Indice de plasticité d'argile rouge, jaune et grise.

**Tableau [IV.7] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile rouge

**Tableau [IV.8] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile jaune

**Tableau [IV.9] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile grise

**Tableau [IV.10] :** Résultats d'analyses minéralogiques des trois types d'argiles (d'après Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction)

**Tableau [IV.11] :** Résultats d'analyses chimiques des trois types d'argiles (d'après Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction de Boumèrdes)

**Tableau [IV.12] :** Composition chimique du ciment CPA

**Tableau [IV.13] :** caractéristiques de la chaux

**Tableau [IV.14] :** Analyse granulométrique du sable

**Tableau V.1 :** Limites de retrait effectives de l'argile rouge

**Tableau V.2 :** Limites de retrait effectives de l'argile jaune

**Tableau V.3 :** Limites de retrait effectives de l'argile grise

**Tableau V.4 :** retraits finals des éprouvettes confectionnées avec le sol stabilisé.

**Tableau [VI.1] :** Résistance à la compression à sec (Rsec) des éprouvettes d'argile rouge

**Tableau [VI.2] :** Résistance à la compression à sec des éprouvettes d'argile jaune

**Tableau [VI.2] :** Résistance à la compression à sec des éprouvettes d'argile grise

**Tableau [VI.4] :** Résistance à l'écrasement à sec des éprouvettes traitées avec le ciment, la chaux et le sable.

**Tableau [VI.5] :** Résistance à l'écrasement après immersion des éprouvettes traitées avec le ciment, la chaux et le sable.

**Tableau [VI.6] :** Variation de coefficient de ramollissement en fonction de pourcentage de stabilisant.

## Notation et Nomenclature

$P_c$  : Pression capillaire

$u_a$  : Pression de l'air

$u_w$  : pression de l'eau

$T_s$  : Tension superficielle

$\gamma_s$  : poids spécifique des particules

$\rho_d$  : masse volumique sèche

$h_c$  : hauteur d'ascension capillaire

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau est égal à  $1 \text{ Mg/m}^3$

$w_L$  : La limite de liquidité

$w_P$  : La limite de plasticité

$w_S$  : La limite de retrait

$w_{re}$  : limite de retrait effective

$I_P$  : Indice de plasticité

$I_L$  : Indice de liquidité

$C_u$  : Coefficient d'uniformité

$C_c$  : Coefficient de courbure

$K_{ram}$  : coefficient du ramollissement

CPA : ciment portland artificiel

C : ciment

L : chaux

S : sable

t : temps

$\alpha$  : angle que fait la tension T avec la paroi verticale du tube

r : rayon de courbure de ménisque capillaire

d : diamètre du tube

W : poids de l'eau

$P_{atm}$  : pression atmosphérique

$R_c$  : contrainte de compression

$F_{max}$  : force de compression maximale

$R_{sat}$  : Résistance à la compression simple après immersion

$R_{sec}$  : Résistance à la compression simple à l'état sec de sol stabilisé

D : la dimension des plus gros grains du sol

A R15 : Éprouvette d'argile rouge compactée avec 15% d'eau

A R17 : Argile rouge à 17% d'eau

AR20 : Argile rouge à 20% d'eau

AR25 : Argile rouge à 25% d'eau

A J15 : Argile jaune à 15% d'eau

A J17 : Argile jaune à 17% d'eau

AJ20 : Argile jaune à 20% d'eau

AJ25 : Argile jaune à 25% d'eau

A G6 : Argile grise à 6% d'eau

AG8 : Argile grise à 8% d'eau

AG9 : Argile grise à 9% d'eau

AG10 : Argile grise à 10% d'eau

JC5 : argile jaune stabilisée avec 5% du ciment.

JC10 : argile jaune stabilisée avec 10% du ciment.

JC15 : argile jaune stabilisée avec 15% du ciment.

JC20 : argile jaune stabilisée avec 20% du ciment.

JL5 : argile jaune stabilisée avec 5% de la chaux.

JL10 : argile jaune stabilisée avec 10% de la chaux.

JL15 : argile jaune stabilisée avec 15% de la chaux.

JL20 : argile jaune stabilisée avec 20% de la chaux.

JS5 : argile jaune stabilisée avec 5% du sable.

JS10 : argile jaune stabilisée avec 10% du sable.

JS15 : argile jaune stabilisée avec 15% du sable.

JS20 : argile jaune stabilisée avec 20% du sable.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **Chapitre I : Stabilisation des sols**

1. Introduction .....	4
2. Différents procédés de stabilisation .....	5
2.1. Stabilisation mécanique .....	5
2.1.1. Compactage.....	5
2.1.2. Corrections granulométriques .....	6
2.1.2.1. Addition de fines à une grave, pour assises de chaussée .....	7
2.1.2.2. Imperméabilisation d'un sol par incorporation de fines .....	7
2.1.2.3. Enlèvement des fines d'une grave. ....	7
2.2. Stabilisation par drainage .....	7
2.2.1. Stabilisation électrique.....	8
2.2.2. Drains de sable verticaux .....	8
2.2.3. Stabilisation par chauffage .....	8
2.3. Stabilisation au ciment portland .....	8
2.3.1. Généralités sur la stabilisation au ciment portland .....	8
2.3.2. Les effets des liants hydrauliques dans le sol .....	9
2.3.3. Facteurs ayant une influence sur les sols-ciments .....	10
2.3.4. Mise en œuvre des sols traités au ciment.....	11
2.4. Stabilisation à la chaux .....	12
2.4.1. Généralités sur la stabilisation à la chaux .....	12
2.4.2. La chaux vive et la chaux éteinte .....	12
2.4.3. L'échange cationique.....	13
2.4.4. La floculation et l'agglomération de l'argile .....	14
2.4.5. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques.....	15
2.5. Utilisation des cendres volantes .....	15
2.5.1. Définition des cendres volantes .....	15
2.5.2. Stabilisation des argiles à l'aide des cendres volantes .....	15
3. Conclusion.....	15

### **Chapitre II : Généralités sur les sols**

1. Introduction .....	17
2. Définition de sol.....	17
3. Propriétés des sols.....	18

3.1. Propriétés à caractère chimique .....	18
3.2. Propriétés à caractère physique .....	18
3.3. Propriétés fondamentales.....	20
4. Généralité sur les argiles .....	21
4.1 Définition de l'argile .....	21
4.2. Origine de l'argile.....	22
4.3. Différentes sortes des argiles.....	22
4.4. Les minéraux argileux .....	22
4.4.1 Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux .....	22
4.4.2. Les principaux types de minéraux argileux .....	24
4.5. Paramètres physico-chimiques des argiles .....	26
4.5.1. Nature minéralogique.....	27
4.5.2. Géométrie.....	27
4.5.3. Hydratation .....	27
4.5.4 Limites et indices d'état.....	28
4.6. Paramètres mécaniques des argiles.....	29
4.6.1. Résistance au cisaillement .....	29
4.6.2 Phénomènes liés à des variations de volume .....	29
4.6.3 Perméabilité .....	30
5. Conclusion.....	30

## **PARTIE EXPERIMENTALE**

### **Chapitre III : Phénomène de retrait**

1. Introduction .....	31
2. Facteurs qui interviennent dans le retrait.....	32
2.1. Nature du sol.....	33
2.2. Hydrogéologie .....	33
2.3. Géomorphologie .....	33
2.4. Climatologie .....	34
2.5. Facteurs anthropiques .....	34
2.6. Végétation.....	34
3. Eau dans le sol.....	35
3.1. Capillarité de l'eau - loi de Jurin .....	36
3.2. Mécanisme du retrait .....	38
3.3. Courbe de bigot .....	38
3.4. Limite de retrait .....	40
4. Conséquences de retrait sur les maisons. ....	41
4.1. Mécanismes des désordres .....	42

4.1.1. Pendant la sécheresse .....	42
4.1.2. Au retour de précipitations.....	43
4.2. Manifestation des désordres .....	43
4.2.1. Gros – œuvre .....	43
4.2.2. Second œuvre.....	43
4.2.3. Aménagements extérieurs .....	44
4.3. Déformations des structures selon le type de mouvement de sol.....	44
5. Conclusion.....	46

#### **Chapitre IV : Identification des matériaux utilisés**

1. Introduction .....	47
2. Analyse granulométrique .....	48
2.1. Classification des sols selon la granulométrie.....	49
2.2. Résultats des analyses granulométriques .....	49
2.3. Interprétation des courbes granulométriques.....	51
3. Limites d’Atterberg .....	51
3.1. Déroulement de l’essai .....	52
3.1.1. Préparation de l’échantillon .....	52
3.1.2. Détermination de limite de liquidité.....	53
3.1.3. Détermination de la limite de plasticité.....	54
3.2. Résultats des limites d’Atterberg.....	54
3.3. Discussion des résultats des limites d’Atterberg .....	56
4. Essai proctor.....	57
4.1. Principe de l’essai .....	57
4.2. Déroulement des essais.....	57
4.3. Résultats des essais Proctor .....	58
4.4. Interprétation des résultats des essais Proctor .....	60
5. L’analyse chimique et minéralogique .....	60
5.1 Analyse minéralogique .....	60
5.2. Analyse chimique .....	61
5.3 Analyse des résultats .....	62
6. Identifications des stabilisants.....	62
6.1. Ciment .....	62
6.2. Chaux.....	62
6.3. Sable .....	63
7. Conclusion.....	65

#### **Chapitre V : Etude de retrait**

1. Introduction .....	66
-----------------------	----

2. Effet du retrait au séchage .....	66
2.1. Retrait linéaire .....	67
2.2. La limite du retrait.....	67
2.3. Courbe de bigot .....	67
3. Effet de la teneur en eau sur le retrait.....	67
3.1. Principe de l'essai .....	67
3.2. Préparation des éprouvettes .....	68
3.3. Présentation, analyse et discussion des résultats. ....	69
3.3.1. Evolution de la longueur en fonction du temps .....	69
3.3.2. Variation de l'humidité en fonction du retrait .....	74
3.3.3. Comparaison des résultats obtenus .....	82
4. Stabilisation du retrait .....	84
4.1. Préparation des éprouvettes .....	84
4.2. Analyse et discussion des résultats obtenus .....	85
4.2.1. Stabilisation du retrait par le ciment .....	85
4.2.2. Stabilisation du retrait par la chaux .....	88
4.2.3. Stabilisation du retrait par le sable.....	91
4.2.4. Comparaison entre les retraits finals des trois types de stabilisants .....	94
5. Conclusion.....	95

## **Chapitre VI : Etude de la résistance mécanique**

1. Introduction .....	96
2. Préparation des éprouvettes.....	96
3. Essai de compression simple.....	97
4. Présentation, analyse et discussion des résultats.....	97
4.1. Influence de la teneur en eau de compactage sur la résistance à la compression.....	97
4.2. Résistance à la compression simple à l'état sec de sol stabilisé.....	99
4.3. Résistance à la compression simple après immersion .....	101
4.4. Coefficient de ramollissement .....	102
5. Conclusion.....	104
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	105
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	107
<b>ANNEXES</b> .....	109

# INTRODUCTION GENERALE

Dans la pratique de la géotechnique, la qualité des sols sur un site donné laisse souvent à désirer. Ces sols peuvent avoir une faible consistance et être très compressibles ou très perméables ; ce sont là des facteurs indésirables tant sur le plan technique que sur le plan économique. On pourrait, bien sûr, dans pareils conditions, trouver un nouveau site mais des considérations étrangères à la géotechnique dictent souvent l'emplacement d'un bâtiment. L'ingénieur est alors forcé de modifier sa conception de l'ouvrage en tenant compte de conditions : il peut choisir d'adapter les fondations aux conditions géotechniques du site ou d'améliorer les propriétés des sols en question en les stabilisant. Selon les circonstances, cette dernière solution pourrait être plus économique que la première. Actuellement et avec la disponibilité des moyens de mise en œuvre, de nouvelles techniques de stabilisation sont apparues et continuent à se développer. Les procédés de stabilisation peuvent être mécaniques ou chimiques.

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 (1991) 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 soumis au retrait gonflement 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. Le retrait a une influence directe sur le comportement du matériau puisque c'est lui qui gère la fissuration de ce dernier et donc affecte sa durabilité. Des fissures peuvent apparaître 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 le réduire à défaut de l'empêcher.

**Objectif :**

Le sol est un matériau complexe, chaque terre est un cas d'espèce, il faut trouver donc une méthode de traitement pour une stabilisation efficace, la nature et la teneur en proportions convenables de ces divers stabilisants nécessaires à incorporer au matériau de base pour obtenir un produit présentant une :

- Résistance mécanique à sec élevée et après immersion satisfaisante,
- Durabilité améliorée lorsqu'il est exposé à des conditions climatiques sévères donc stable à l'eau.

Les matériaux argileux, très présents dans la composition des sols, sont très réactifs à l'eau d'où la nécessité d'un traitement pour améliorer leur résistance et réduire leur sensibilité à l'eau et leur variation volumique.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale, Nous avons utilisé la technique de stabilisation par apport de ciment, chaux et sable avec des sols argileux naturels situés dans la Wilaya de Tizi-Ouzou.

**Organisation du mémoire :**

Le plan de travail est organisé en six chapitres répartis en deux parties : bibliographique et expérimentale.

La première partie est bibliographique, elle est constituée de deux chapitres ;

Le premier chapitre est une étude bibliographique qui mentionne l'état d'avancement des recherches dans le domaine de la stabilisation des sols à travers les différentes techniques.

Le deuxième chapitre consiste à décrire les sols, leurs propriétés, les argiles et leurs minéralogies.

La deuxième partie est expérimentale, elle est composée de quatre chapitres ;

Le troisième chapitre est consacré à la description du mécanisme de retrait et à la présentation des désordres rencontrés d'où l'importance d'étudier de tels phénomènes.

Dans le quatrième chapitre nous caractérisons dans une première étape nos matériaux par des essais d'identification (Analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essai Proctor...) et par analyses minéralogiques et chimiques pour identifier les minéraux argileux.

Le cinquième chapitre porte sur l'effet de différents ajouts (ciment, chaux, sable) sur le retrait, afin d'en déduire l'efficacité de ces techniques sur nos argiles.

Le sixième chapitre porte sur l'effet de différents ajouts (ciment, chaux, sable) sur la résistance mécanique.

Une conclusion générale est donnée à la fin de notre travail qui résume les principaux résultats obtenus dans le programme expérimental.

# **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**



**CHAPITRE I**

**Stabilisation des sols**

## 1. Introduction

Stabiliser un sol, au sens large du terme, consiste à modifier une des propriétés de ce sol en vue d'améliorer ces performances techniques, la stabilisation des sols est employée pour (G.A.LEONARDS, 1967) :

1. Augmenter la résistance, ou réduire sa sensibilité aux variations du milieu ambiant et plus spécialement aux variations de teneur en eau.
2. Augmenter ou diminuer la perméabilité.
3. Réduire la compressibilité.
4. Réduire la gélification.

Ce chapitre traite de quelques-uns des nombreux procédés de traitement comprenant la stabilisation mécanique, l'abaissement de la teneur en eau du sol et l'addition de nombreux types de produits.

La quasi-totalité des ouvrages, barrages, routes, aérodromes, etc. reposent sur le sol ; dans de nombreuses structures on emploie également du sol pour leur construction. Quand on a affaire à des sols ne donnant pas satisfaction on peut agir de l'une des façons suivantes.

- Mise hors compte d'un mauvais sol.
- Enlèvement d'un mauvais sol.
- Révision de la conception d'un projet.
- Traitement d'un sol en vue d'améliorer ces propriétés ; ce traitement est la stabilisation du sol, qui fait l'objet de ce chapitre.

L'étude de traitement d'un sol par un produit ajouté consiste à choisir l'agent stabilisant, à en déterminer le dosage, à définir la méthode d'addition et à déterminer la quantité de sol à traiter.

## 2. Différents procédés de stabilisation (Hugo Houben et Hubert Guillaud, 1989)

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

1. Les propriétés de la terre à traiter.
2. Les améliorations souhaitées.
3. Les produits et les matériaux utilisables.
4. Les diverses technologies de mise en œuvre.
5. Les exigences de réalisation de l'ouvrage ; tels que coûts et délais.

### 2.1. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique comprend deux méthodes permettant de modifier les propriétés d'un sol : (1) par « réarrangement » des éléments du sol, et (2) par ajout ou retrait d'éléments du sol. (G.A.LEONARDS, 1967)

#### 2.1.1 Compactage

Le compactage est la méthode de stabilisation la plus ancienne et la plus importante. Il consiste en une réduction de volume du sol dû à la réduction des vides remplis d'air. Le compactage à lui seul peut souvent résoudre un problème particulier de sol, en outre il entre pour une part essentielle dans de nombreuses autres méthodes de stabilisation.

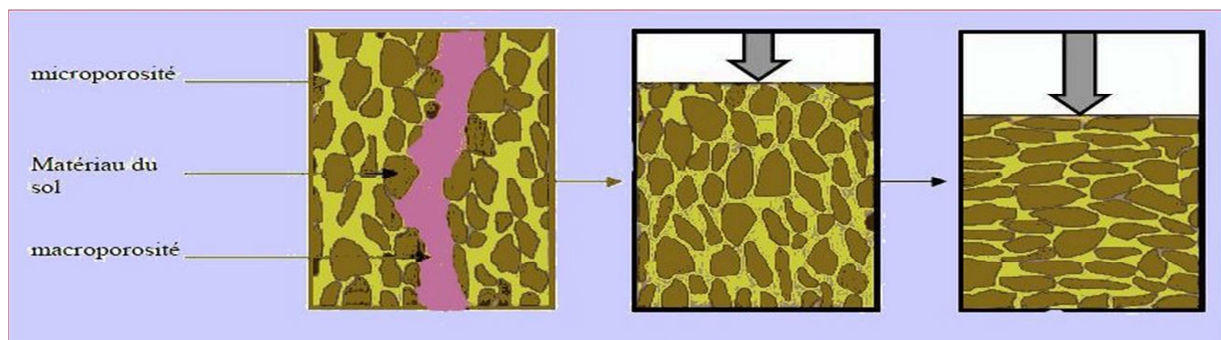


Figure I.1 : structure de sol avant et après compactage

Les objectifs atteints lors du compactage sont essentiellement les suivants :

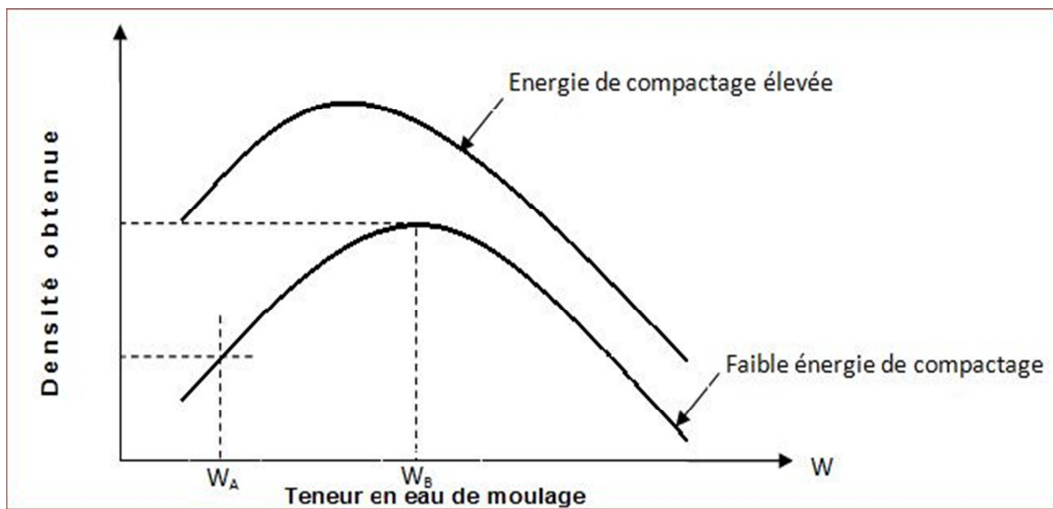
1. Limiter, sinon supprimer les vides (rapprochement des grains en modifiant leur arrangement) ;
2. Augmenter l'imperméabilité du sol compacté ;
3. Améliorer les caractéristiques mécaniques du sol.

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). (GHEDDACHE, 2012)

### Effets du compactage sur la structure d'un sol

La figure I-2 va nous permettre d'illustrer les effets du compactage sur une structure argileuse.



**Figure I-2 :** effets du compactage sur la structure d'un sol (Robel D.HOLTZ, 1991)

Le fait d'améliorer l'arrangement des particules augmente la densité jusqu'à ce que la teneur en eau optimale ( $W_B$ ) soit atteinte. Au-delà de  $W_B$  la densité décroît, parce que l'eau commence à occuper l'espace qui devrait être rempli par les particules minérales du sol.

L'augmentation de l'énergie de compactage, pour une teneur en eau quelconque donnée, améliore l'orientation des particules et par conséquent donne une densité plus élevée. Cette tendance est illustrée par les courbes de la figure I-2.

En résumé, le fait d'augmenter la teneur en eau de moulage augmente le degré d'orientation des particules d'argile et abaisse les tensions interstitielles. En augmentant l'énergie de compactage, on augmente le degré d'orientation des particules. (G.A.LEONARDS, 1967)

#### 2.1.2. Corrections granulométriques

Les propriétés d'un sol donné peuvent être sensiblement modifiées soit en lui ajoutant un sol bien choisi, soit en éliminant une certaine fraction granulométrique.

On exposera ici trois types de stabilisation par correction granulométrique.

### **2.1.2.1. Addition de fines à une grave, pour assises de chaussée**

La granularité du sol et les fines lui servant de liant devaient répondre à certaines spécifications pour que les routes économiques, non revêtues tiennent. Les granularités furent déterminées pour donner le mélange le plus compact possible, en ajoutant les éléments fins pour donner la cohésion au mélange et pour diminuer la quantité de vide. (G.A.LEONARDS, 1967)

### **2.1.2.2. Imperméabilisation d'un sol par incorporation de fines**

Pour réduire la perméabilité d'un sol, l'application courante de cette technique consiste à lui ajouter de la montmorillonite sodique (bentonite). Ainsi la perméabilité d'un sable limoneux a été réduite d'une valeur de  $10^{-4}$  cm/s à moins de  $10^{-9}$  cm/s par addition de 10% de bentonite. Cette technique est employée dans l'étanchement des grands réservoirs. (G.A.LEONARDS, 1967)

### **2.1.2.3. Enlèvement des fines d'une grave.**

La présence d'un très grand pourcentage de fines peut rendre une grave impropre à ces usages. On admet approximativement 3% comme pourcentage maximum d'éléments inférieurs à 2 mm pour une grave non gélive.

Le lavage constitue le procédé le plus évident pour éliminer les fines en excès d'une grave. (G.A.LEONARDS, 1967)

## **2.2. Stabilisation par drainage**

La résistance d'un sol saturé dépend directement de la contrainte effective ou intergranulaire. Cette contrainte effective est égale à la contrainte totale supportée par la masse de sol, moins celle supportée par l'eau interstitielle. Ainsi pour une contrainte totale donnée, la résistance d'un sol augmente quand la pression interstitielle diminue.

Citons quatre méthodes de drainage des sols :

1. Application d'une charge extérieure à la masse du sol pour expulser l'eau interstitielle.
2. Drainage de l'eau interstitielle par gravité et/ou pompage.
3. Application d'un gradient électrique.
4. Application d'un gradient thermique.
5. Emploi de drains de sable verticaux.

Ces méthodes sont employées pour activer l'expulsion de l'eau interstitielle d'un sol et pour augmenter la vitesse de consolidation. (G.A.LEONARDS, 1967)

### **2.2.1. Stabilisation électrique**

Quand on fait passer un courant électrique continu à travers un sol saturé, l'eau se déplace vers la cathode. Si l'eau enlevée à la cathode n'est pas remplacée à l'anode, le sol diminue de volume d'une quantité égale au volume d'eau enlevée. La résistance du sol se trouve accrue par cette baisse de volume, appelée consolidation électro-osmotique.

En plus de la consolidation électro-osmotique, le courant électrique peut provoquer :

1. Des échanges d'ions
2. Un dépôt de solide provenant de la décomposition électrochimique des électrodes
3. Une modification dans l'arrangement des particules du sol.

La combinaison de ces effets est appelée stabilisation électro-osmotique, ou simplement stabilisation électrique. (G.A.LEONARDS, 1967)

### **2.2.2. Drains de sable verticaux**

La technique est beaucoup employée surtout pour les remblais, et qui consiste à installer des drains de sable ou des pieux en sable pour activer le drainage d'une couche de sol soumise à une surcharge. (G.A.LEONARDS, 1967)

### **2.2.3. Stabilisation par chauffage**

Comme on peut s'y attendre, plus l'énergie calorifique par unité de masse de sol à traiter est grande, plus l'effet produit est important. Une augmentation de 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 diminuant la teneur en eau de fait que le taux d'évaporation augmente.

Une température supérieure à 100°C, chasse l'eau adsorbée par une argile et augmente ainsi sa résistance. Des températures de l'ordre de 400 à 600°C changent d'une façon irréversible certains minéraux argileux en des matériaux moins sensibles à l'eau. A 900 ou 1000 °C, certaines argiles commencent à se transformer en brique. (G.A.LEONARDS, 1967)

## **2.3. Stabilisation au ciment portland**

### **2.3.1. Généralités sur la stabilisation au ciment portland**

Dans la stabilisation des routes, ce procédé est défini par Vander et Jac Verdeyen (1971) 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 fines particules. Les sols ainsi traités sont appelés «sol ciment»

Certains auteurs préfèrent, employer le terme géobéton 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 (George Arquie ,1972).

Le ciment portland est l'un des agents stabilisants le plus employé et donnant les meilleurs résultats. Le premier ouvrage contrôlé en sol-ciment fut une route construite en 1935 près de Johnsonville, SC.

Les propriétés mécaniques du sol-ciment dépendent de la nature du sol traité, de la quantité de ciment utilisée, et des conditions de mise en place. Les résistances à la compression simple typiques de divers sols traités par 10% de ciment, données par le Road Research Laboratory (G.A.LEONARDS, 1967), sont les suivantes :

**Tableau I.1:** résistances à la compression simple typique de divers sols traités par 10% de ciment (G.A.LEONARDS, 1967).

sol	Résistance à la compression simple (bars)
Argile plastique, sol organique .....	< 3.5
Limons, argile limoneuse, sable très mal gradué, sol légèrement organique .....	3.5 - 10
Argile limoneuse, argile sableuse, sable et grave mal gradué.....	7 - 17.5
Sable limoneux, argile sableuse, sable, grave .....	17.5 - 35
Sable argileux bien gradué, mélange gravier-argile, sable, graves .....	25 - 100

Bien que le sol-ciment ait servi à de nombreux usages, il est surtout utilisé en couche de base de routes et de pistes d'aérodromes. Les sols traités au ciment ont été aussi employés pour des chaussées non revêtues, mais sans grand succès, principalement à cause de leur faible résistance à l'abrasion causée par le trafic.

### 2.3.2 Les effets des liants hydrauliques dans le sol

Les services que l'on peut attendre de l'incorporation d'un liant hydraulique (L.H.) sont variés, on peut mentionner qu'il :

- Il neutralise les fines plastiques d'un sol sensible à l'eau. Les fines sont agglomérées en particules beaucoup plus grosses, plus ou moins imperméables en surface.
- Diminue le pouvoir de gonflement et le retrait des sols fins.

- Ralentit l'évolution par attrition d'un sol friable, les liaisons dues à la prise du liant s'opposant dans une certaine mesure au frottement réciproque des grains sous les contraintes développées par la circulation.
- Ralentit ou peut arrêter l'évolution des sols altérables, c'est-à-dire des sols qui contiennent en proportion notable des éléments tels que micas, feldspaths ou feldspathoïdes.

Le traitement aux L.H. confère toujours aux sols traités une amélioration notable de leurs résistances mécaniques.

### **2.3.3. Facteurs ayant une influence sur les sols-ciments**

De nombreux résultats concernant les sols-ciment obtenus en laboratoire et sur chantier, permettent de tirer les divers facteurs qui affectent la résistance et la durabilité de ces matériaux. Les plus importants de ces facteurs sont présentés ci-dessous (G.A.LEONARDS, 1967).

#### **a) Nature de sol**

Plus la surface spécifique d'un sol est élevée, plus la quantité de ciment nécessaire au traitement est forte. La présence d'argile dans le sol peut poser des problèmes de malaxage et de compactage du mélange.

Certaines matières organiques naturelles contrarient l'hydratation de ciment et affaiblissent ainsi le sol-ciment.

#### **b) Quantité de ciment**

Plus on ajoute du ciment au sol, plus le sol-ciment résultant est résistant. De plus, un ciment à haute résistance initiale est habituellement plus actif que le ciment normal.

#### **c) Conditions de compactage (Guettala A, 2007)**

Comme pour tout sol stabilisé, les propriétés d'un sol traité au ciment dépendent, dans une large mesure, de sa teneur en eau à la mise en œuvre et de sa densité après compactage. L'eau de compactage joue deux rôles dans un sol-ciment :

1° elle influence les caractéristiques de compactage comme pour un sol naturel.

2° elle pourvoit l'hydratation du ciment.

Les sables devraient être compactés légèrement plus secs et les argiles légèrement plus humides par rapport à la teneur en eau de mise en œuvre donnant la densité maximale.

En général, plus la densité après compactage est grande, plus le sol traité résultant est résistant.

#### d) Adjuvants

Pendant de nombreuses années les ingénieurs ont ajouté de la chaux ou du chlorure de calcium aux mélanges de sols et de ciment pour accélérer la prise et améliorer les propriétés du produit final. Les études de laboratoire ont montré que l'on peut obtenir des améliorations spectaculaires de la résistance du sol-ciment par l'addition de certains produits chimiques en petite quantité (G.A.LEONARDS, 1967). Ces produits chimiques permettent :

1. Une réduction de la quantité du ciment nécessaire pour traiter un sol.
2. La stabilisation de certains sols (par exemple : certains sols organiques) qui ne sont pas traitables au ciment seul.

#### 2.3.4. Mise en œuvre des sols traités au ciment

La Portland Cement Association a décrit en détails la mise en œuvre du sol traité au ciment. Les travaux comprennent ordinairement les opérations suivantes :

- 1- Profilage du sol à traiter.
- 2- Pulvérisation du sol.
- 3- Addition d'eau et de ciment.
- 4- Malaxage.
- 5- Compactage.
- 6- Réglage.
- 7- Cure.



**Figure I.3 :** malaxage de sol avec le ciment et mise en œuvre de sol ciment

Le meilleur ordre à adopter, pour ajouter l'eau et le ciment et les mélanger au sol, dépend du sol et des conditions du chantier. La mise en œuvre des sols grenus ne présente que des problèmes mineurs comparés à ceux qu'implique le traitement de sols plastiques. L'addition de chaux (1 à 3 %) aide à surmonter certaines difficultés d'incorporation du ciment à des

argiles plastiques. Pour obtenir des résultats corrects, la mise en œuvre de ces sols exige des essais sur chantier et une grande sûreté de jugement de l'ingénieur (G.A.LEONARDS, 1967).

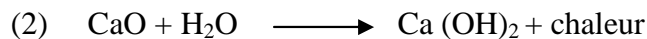
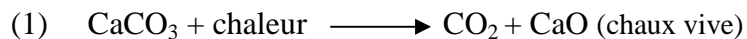
## 2.4 Stabilisation à la chaux

### 2.4.1 Généralités sur la stabilisation à la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. En général, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou concassé. (Venuat, 1980)

### 2.4.2 La chaux vive et la chaux éteinte

La chaux peut être utilisée sous deux formes soient, la chaux vive ou la chaux hydratée. La chaux vive ou l'oxyde de calcium (CaO) provient de la calcination de calcaire (équation 1). L'hydroxyde de calcium aussi appelé chaux hydratée ou chaux éteinte, est obtenu par l'ajout de 25 % d'eau en masse à la chaux vive (équation 2).



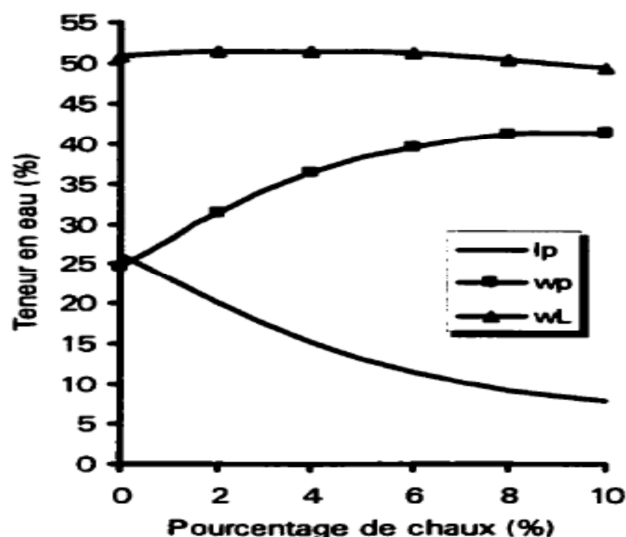
Bien que les deux types de chaux présentes puissent être utilisés. La chaux vive est plus utilisée que la chaux éteinte car elle présente plusieurs avantages ;

- La phase la plus essentielle dans la fabrication de la chaux est la cuisson au cours de laquelle le gaz carbonique est éliminé du calcaire suivant réaction 1. Elle ne nécessite pas d'apport d'eau lors de sa fabrication.
- Il est admis que l'ajout de 3 % de chaux vive a les mêmes effets que l'ajout de 4 % de chaux éteinte.
- Et puisque l'un des buts du traitement des argiles est d'abaisser le taux d'humidité, la chaux vive répond mieux à cette exigence que la chaux éteinte car elle ne contient pas d'eau au départ et la réaction exothermique contribue à évaporer une plus grande quantité d'eau

### 2.4.3. Processus de stabilisation à la chaux

Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol à granulométrie fine, comme :

- L'échange cationique et la floculation : modifient la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol, et réduisent l'indice de plasticité tel qu'illustré à la figure I.4. (LEGERE, 2001).

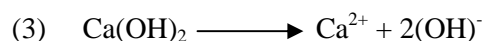


**Figure I.4 :** Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (LEGERE, 2001)

- Les réactions pouzzolaniques : constituent la période de stabilisation. Durant cette réaction, le mélange chaux-argile forme des agents de cimentation qui augmentent la résistance ainsi que la durabilité du mélange. Les réactions pouzzolaniques sont possibles grâce à l'apport d'alumine et de silice fournies par l'argile. Il est alors très important de bien connaître la proportion d'argile présente dans le sol lorsque les réactions pouzzolaniques sont désirées (LEGERE, 2001).

### 2.4.3 L'échange cationique

Lorsque la chaux vive est ajoutée au sol argileux une réaction de déshydratation se produit créant l'hydroxyde de calcium. Cette réaction assèche le sol considérablement. Ceci entraîne une dissolution de la silice et de l'alumine des particules d'argile. L'hydroxyde de calcium se dissocie comme présenté dans l'équation suivante (3) (LEGERE, 2001).



L'échange cationique peut apporter des changements importants aux sols argileux :

- Réduction de la distance (épaisseur) entre les groupes de feuillets d'argile réduisant la sensibilité à l'eau ;
- Flocculation des particules d'argile ;
- Augmentation de l'angle interne de friction entre les particules agglomérées provoquant une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- Diminution de l'indice de plasticité ;
- Changement de texture du sol d'une argile plastique vers un granulat friable.

#### 2.4.4 La flocculation et l'agglomération de l'argile

On appelle flocculation de l'argile, le fait de passer d'un état dispersé, dans lequel l'argile est plastique et sujette à des variations de volume suivant son niveau d'humidité, à un état flocculé beaucoup moins plastique et donc plus stable (LEGERE, 2001).

Le résultat des deux premières réactions (échange cationique et flocculation/agglomération) se reflète par un changement de la relation entre la densité et la teneur en eau. En effet, l'argile n'a plus la même nature où les propriétés physiques changent. Lorsque compacté, un mélange chaux-argile possède une densité maximale inférieure au sol non-traité. De plus, la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux. A cet effet, la figure I.5 illustre bien le déplacement de la courbe de l'optimum Proctor d'une argile traitée à 4 % de chaux (LEGERE, 2001).

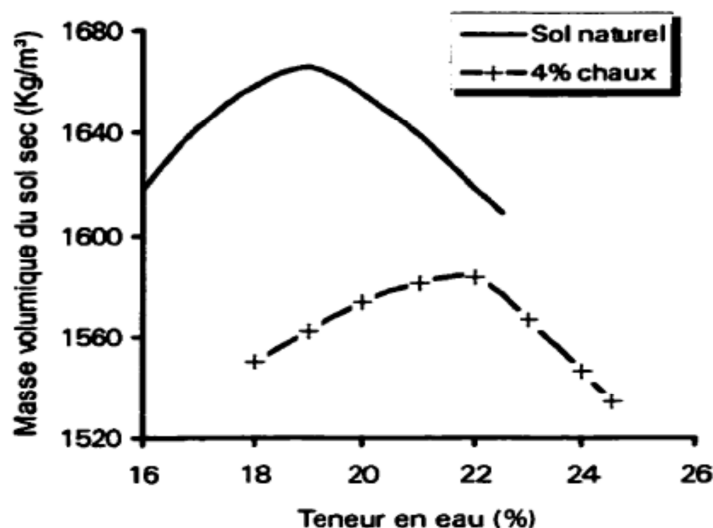


Figure I.5 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux (LEGERE, 2001).

### **2.4.5 La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques**

La carbonatation de la chaux est la réaction entre cette dernière et le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium. Les réactions pouzzolaniques peuvent se produire lentement, pouvant s'échelonner sur plusieurs mois et même des années. Durant cette période, le sol gagnera de la résistance en cisaillement et la plasticité sera diminuée.

Dans le cas où il n'y a pas suffisamment d'argile dans le sol à traiter, certains matériaux comme les cendres volantes (pouzzolanes) peuvent être ajoutées au mélange. Les cendres volantes ont la propriété de réagir avec la chaux en présence d'eau pour former des composés agissant comme liants (LEGERE, 2001).

### **2.5 Utilisation des cendres volantes**

Les cendres volantes et la chaux sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation.

#### **2.5.1 Définition des cendres volantes**

Les cendres volantes sont des cendres fines produites lorsqu'un carburant pulvérisé tel le charbon, est brûlé dans une centrale thermique pour la production d'énergie. Ce produit est connu comme une pouzzolane artificielle possédant les propriétés d'un liant pouzzolanique. Un exemple de pouzzolane naturelle est le charbon volcanique.

#### **2.5.2 Stabilisation des argiles à l'aide des cendres volantes**

La plupart des sols peuvent être traités avec un mélange chaux-cendres volantes. L'addition de cendres volantes et de chaux ne peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule. Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air, mais également dans l'eau (LEGERE, 2001).

### **3. Conclusion**

D'après les conséquences de variation des caractéristiques des sols sur les ouvrages géotechniques en surface et souterrain, plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols.

La stabilisation des sols a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'un produit sur la stabilisation d'un sol. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits comme le ciment, la chaux, le sable... servant à la stabilisation des sols argileux.

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

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

La présence d'argiles dans un sol influence le choix du type de stabilisation. La classification géotechnique des sols tient compte de l'argilosité des sols. Ainsi un traitement à la chaux est mieux adapté aux sols argileux, alors que les sols sableux sont traités aux liants hydrauliques seuls.



**Chapitre II**

**Généralités sur les sols**

## 1. Introduction

L'ingénieur qui dispose d'un sol pour construire un remblai ou supporter un ouvrage a besoin avant tout de connaître ses propriétés mécaniques. Celles-ci dépendent des caractéristiques physico-chimiques de sol.

D'une 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 révèle des propriétés qui ne se rapportent pas exclusivement à sa granulométrie, mais elle est liée à la nature chimique, la structure minéralogique et son interaction avec l'eau.

## 2. Définition de sol

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. Elle résulte de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions bioclimatiques et à la vie animale et végétale. (Guillaud, 1989)

La formation et l'évolution d'un sol s'opèrent selon trois processus, plus ou moins simultanés (Guillaud, 1989).

### **Processus 1: Altération de la roche mère**

La roche mère qui peut être dure (granite, schiste, grés...), tendre (craie, marne, argile...) ou meuble (sables, éboulis, loess...) est fissurée, réduite en éléments plus fins ; elle est désagrégée par l'action de la pluie, le vent, le froid et le soleil.

### **Processus 2 : Poursuite de l'altération par les matières organiques**

Le sol désagrégé et altéré, constitué de minéraux et d'éléments plus au moins pâteux est alors colonisé par une flore et une faune qui s'enrichissent en substances chimiques et organiques, dont l'humus.

### **Processus 3 : Migration verticales des éléments solubles**

Sous climat pluvieux, les éléments solubles migrent vers le bas : C'est le lessivage. Sous climat sec à forte évaporation, les éléments solubles migrent vers la surface et l'enrichissent.

Cette migration des éléments, va créer dans le sol des couches plus ou moins distinctes et définir les horizons, qui constituent le profil pédologique d'un sol.

### 3. Propriétés des sols

D'une terre à une autre, les propriétés peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de silts, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz, les propriétés de la terre sont changeantes. C'est souvent la fraction dominante d'une terre qui régit les propriétés fondamentales du matériau.

#### 3.1. Propriétés à caractère chimique

Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques. La quantité en oxyde de fer, de magnésium ou de calcium, en carbonates et en sulfates peut caractériser la terre d'un point de vue chimique. Le sulfate de calcium, particulièrement gonflant à l'hydratation peut être très néfaste ; sa solubilité dans l'eau peut augmenter la sensibilité des argiles. Par exemple, dans une terre latéritique, l'oxyde de fer peut accélérer certains procédés de solidification. De même, une abondance d'oxyde d'aluminium peut réduire la résistance avec l'âge. A noter aussi l'importance de la mesure de pH d'une terre qui précise la concentration d'ions  $H^+$ , ou  $OH^-$ , et sa nature acide ou basique (Guillaud, 1989).

#### 3.2. Propriétés à caractère physique

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'une terre pour la construction (Guillaud, 1989).

–**Ameublissement** : c'est l'aptitude d'une terre à être facilement brisée. Les terres à fraction sableuse dominante se brisent facilement alors que les terres très argileuses s'ameublissent très difficilement.

–**Adhérence** : c'est l'aptitude d'une terre, pour un certain degré d'humidité, à adhérer aux objets, notamment aux outils. Elle augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour être ensuite diminuer.

– **Masse volumique des grains solides** : Elle s'exprime en  $\text{kg/m}^3$  ; par exemple, les micas et les feldspaths ont une masse volumique de 2600 à 2700 $\text{kg/m}^3$ , les sables de 2600 à 3000  $\text{kg/m}^3$ , les argiles de 2500  $\text{kg/m}^3$ .

– **Teneur en eau** : c'est le rapport de la quantité d'eau contenue dans la terre sur la quantité de terre sèche, soit à l'état naturel, soit après manipulation et séchage. Elle s'exprime en % pondéral et définit les différents états hydriques de la terre. Il s'agit d'eau que l'on peut éliminer par évaporation.

– **Porosité** : ou indice des vides ; c'est le volume des vides de la terre exprime en % du volume total. Il y a une relation entre la porosité et la densité spécifique ; par exemple, pour un limon de densité spécifique de 1600 à 1800  $\text{kg/m}^3$ , la porosité est inférieure à 40%.

– **Pouvoir absorbant** : c'est la propriété que possède l'argile, l'humus et le complexe argilo-humique de retenir à leur surface des ions électropositifs surtout, mais également électro-négatifs, provenant de la solution de la terre. La fixation des ions s'explique par les charges négatives et positives entourant les feuillets d'argile et les micelles d'humus.

– **Perméabilité** : c'est la vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure. Elle s'exprime en cm/heure ; par exemple, un limon argileux peu perméable donne une mesure de 0.6cm/heure et une terre sableuse très perméable de 50 à 60 cm/heure.

– **Chaleur spécifique** : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1°C. Elle s'exprime en  $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$  ; par exemple l'eau a une chaleur de 1  $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ , le sable de 0.191, l'argile de 0.23.

– **Surface spécifique** : c'est une mesure qui s'applique surtout aux argiles et qui permet d'apprécier l'activité chimique d'échange d'ions. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{gramme}$  ; par exemple, les gros sables ont une surface spécifique de 23  $\text{cm}^2/\text{g}$ , les limons de 454  $\text{cm}^2/\text{g}$  et les argiles jusqu'à 800  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

– **Résistance sèche** : La résistance à la rupture à l'état sec peut atteindre des valeurs très variables selon les argiles et dépend de la distribution et de la taille des particules, de leur cristallinité mais aussi de la nature des ions échangeables. Les kaolinites ont une résistance de l'ordre de 0.7 à 50 bars, les illites de 13 à 70 bars et les montmorillonites de 20 à 60 bars.

### 3.3. Propriétés fondamentales

L'étude exhaustive des propriétés de la terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont :

1–**Texture** : qui est la quantité centésimale en cailloux, graviers, sables, limons, argiles et colloïdes

2–**Plasticité** : ou aptitude de la terre à être modelée.

3–**Cohésion** : ou propriété des particules de la terre à rester associées.

#### 1) Texture des sols

La texture fait référence à l'apparence extérieure d'un sol ; elle peut varier suivant les dimensions et la forme des particules, ainsi que selon la distribution relative des grosseurs des grains. Par conséquent, les sols à grains grossiers comme les sables et les graviers, ont une texture grossière ; les sols à texture fine, tels que les silts et les argiles, sont constitués essentiellement de grains de minéraux très petits, invisibles à l'œil nu. (A.KOMAR, 1976)

La texture d'une terre se mesure par l'analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers : cailloux, graviers, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses. La classification des fractions de grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et se référant aux normes American society for testing material (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante :

>V : cailloux :	200mm - 20mm
V : graviers :	20 mm - 2mm
IV : sables grossiers :	2mm - 0.2mm
III : sables fins :	0.2mm - 0.06mm
II : Silts :	0.06mm - 0.02mm
IIA : Silts fins	0.02mm - 0.002
I : Argiles :	0.002mm - 0 mm

## 2) Plasticité

La plasticité se définit comme la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles s'effectuent sur la fraction « mortier fin » de la terre ( $\Phi$  des particules  $< 0.4$  mm) la quantité d'eau exprimée en %, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommé limite de liquidité  $W_L$ . Entre l'état plastique et l'état solide la transition est nommée limite de plasticité  $W_P$ . A  $W_L$ , le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement. A  $W_P$  la terre cesse d'être plastique et devient cassante.

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) égal à  $W_L - W_P$  précise la plage de comportement plastique de la terre. La combinaison de  $W_L$  et  $W_P$  précise la sensibilité de la terre aux variations d'humidité.

## 3) Cohésion

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ces particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de  $\Phi < 2$  mm) qui lie les grains inertes entre eux.

Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles.

On peut classer les mortiers de la façon suivante (Guillaud, 1989) :

- a- Mortier sableux
- b- Mortier maigre
- c- Mortier moyen
- d- Mortier gras
- e- Argiles.

## 4. Généralité sur les argiles

### 4.1 Définition de l'argile

Historiquement, en géologie et science du sol, le terme argile correspond à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à  $2 \mu\text{m}$  dans une roche. Les cristaux présentant alors une taille inférieure à  $2 \mu\text{m}$  n'étaient pas reconnaissables et classés sous l'appellation argile. Aujourd'hui, l'appellation argile diffère en fonction des domaines d'étude.

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption.

#### **4.2. Origine de l'argile**

L'argile se forme à partir de granite au contact de l'eau, le granite est constitué de feldspath, de mica et de quartz, cette roche se désagrège petit à petit sous l'action d'érosion, et certaines particules de feldspath se transforment chimiquement en argile (feuilletés d'argile), ces feuilletés et les autres matériaux sont ensuite entraînés par l'eau qui ruisselle sur les pentes jusqu'à l'océan. Les feuilletés d'argile se sont disposés au fond de la mer jusqu'à la formation de couche de plusieurs dizaines de mètres de hauteur.

Parfois l'argile ne voyage pas et reste sur place, en effet il arrive que l'eau entre en contact avec des blocs de granites situés en profondeur, donne une argile plus plane.

#### **4.3. Différentes sortes des argiles**

L'argile qui est formée au fond des océans contient des particules de matières organiques et des particules métalliques qui étaient obtenues lors de trajet. Ce sont ces petites particules qui sont à l'origine des différents types d'argile, celles qui sont rouges contiennent l'oxyde de fer, celles qui sont blanches contiennent du calcaire et les grises renferment également des matières organiques en décomposition, y a aussi celles qui contiennent de titane, de manganèse.

#### **4.4. Les minéraux argileux**

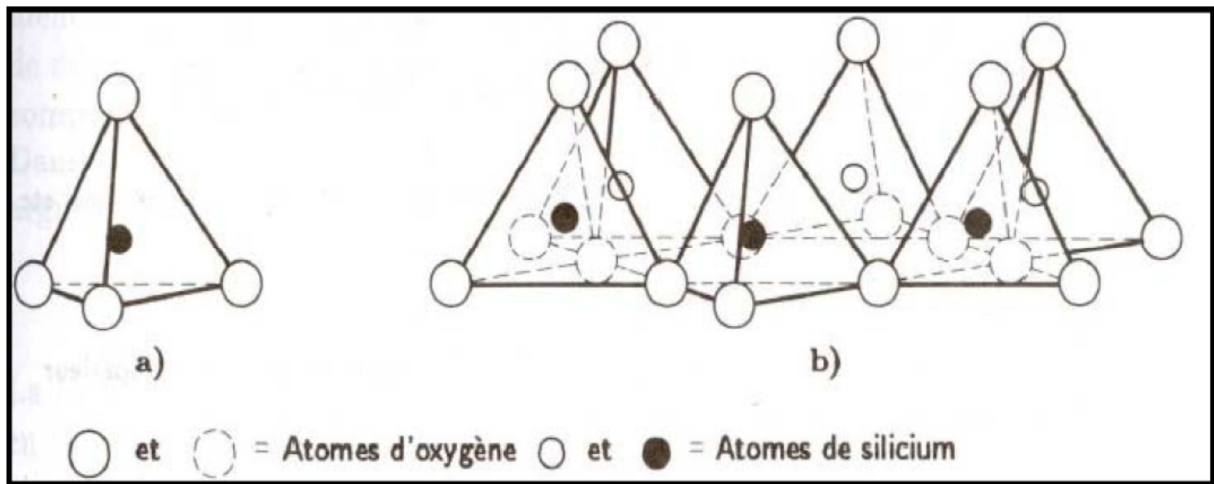
Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,002 mm, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ce sont pour la plupart des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques, qui portent le nom de feuilletés (DJONKAMLA, 2010).

##### **4.4.1 Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux**

Les feuilletés sont l'unité de base des minéraux argileux. Ils sont constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan. On évalue l'épaisseur des feuilletés 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 un atome de silicium dans son centre (SiO<sub>4</sub>). Un feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques.

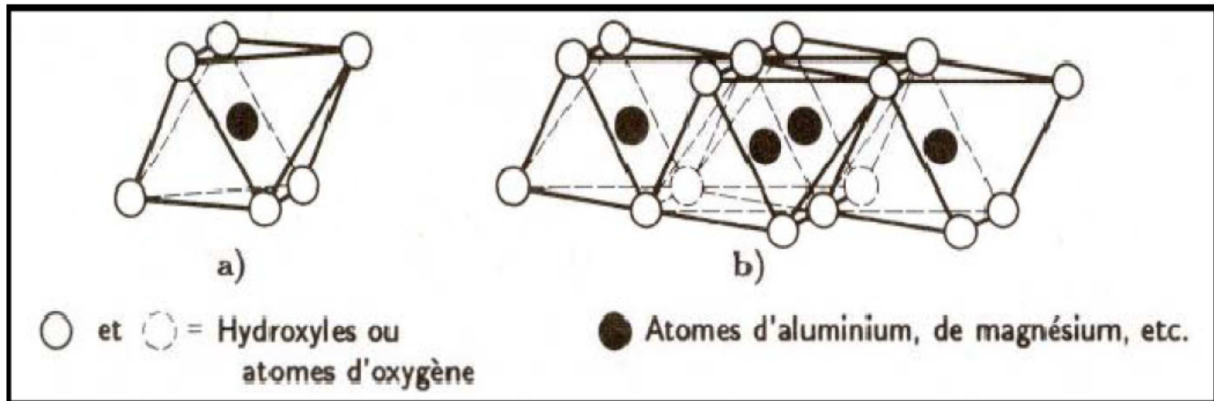


**Figure II.1** : a)Tétraèdre de silice; b) feuillet de silice en tétraèdre. (Robel D.HOLTZ, 1991)

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 Al(OH)<sub>3</sub>. Si ce sont pour la plupart des atomes de magnésium, la structure portera le nom de brucite Mg(OH)<sub>2</sub> (GHEDDACHE, 2012).



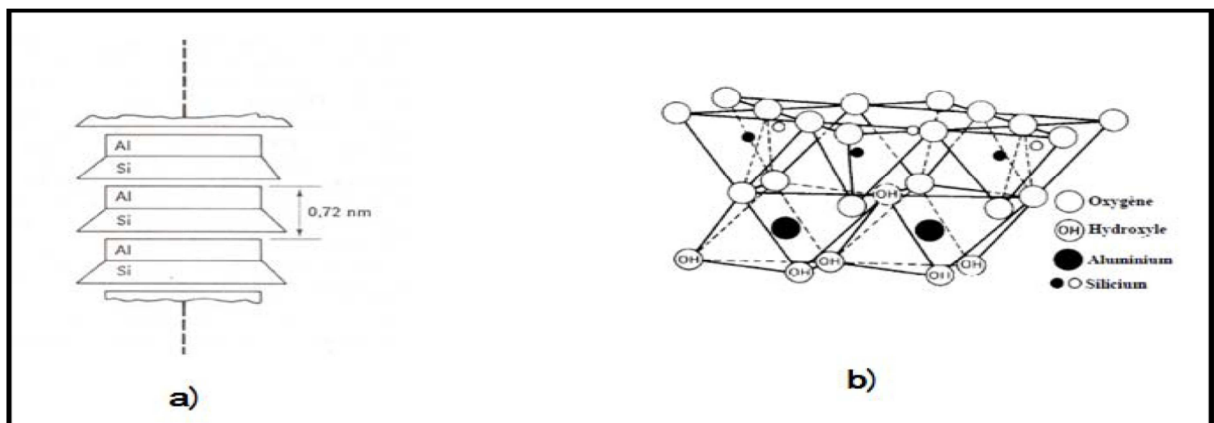
**Figure II.2 :** a) octaèdre d'aluminium (ou de magnésium); b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre. (Robel D.HOLTZ, 1991)

#### 4.4.2. Les principaux types de minéraux argileux

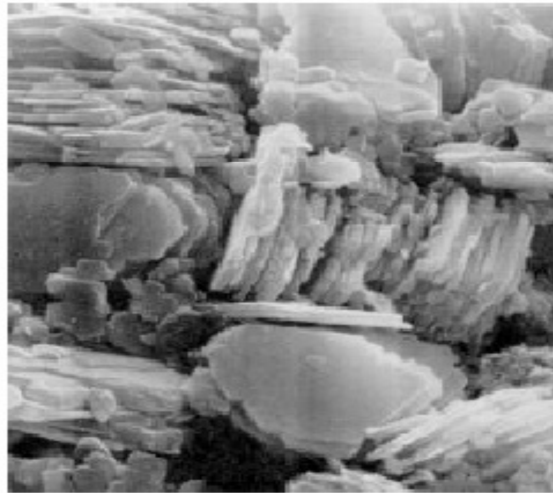
##### a) La kaolinite

C'est une argile blanchâtre, 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.

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de Van der Waals.



**Figure II.3 :** a) Schéma de la structure de la kaolinite ; b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite. (Robel D.HOLTZ, 1991)

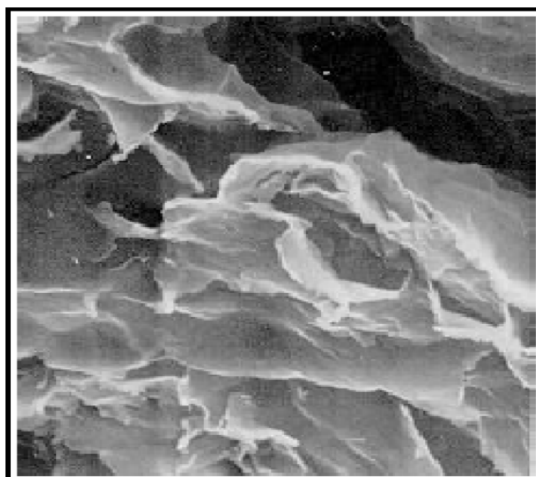


**Figure II.4:** photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (AZZOUZ, 2006)

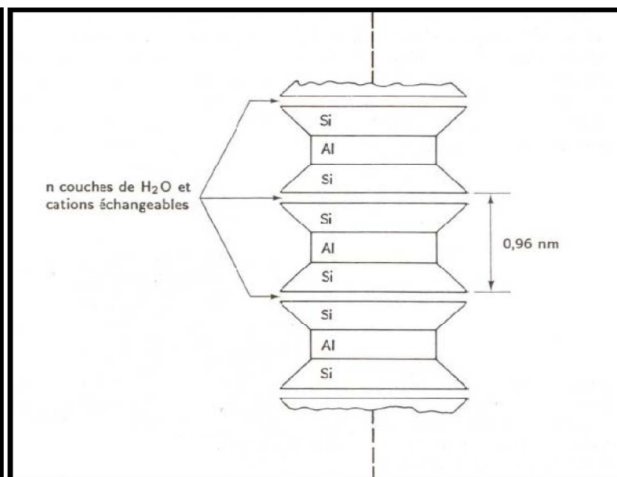
**b) La montmorillonite**

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). Elle porte parfois le nom de smectite.

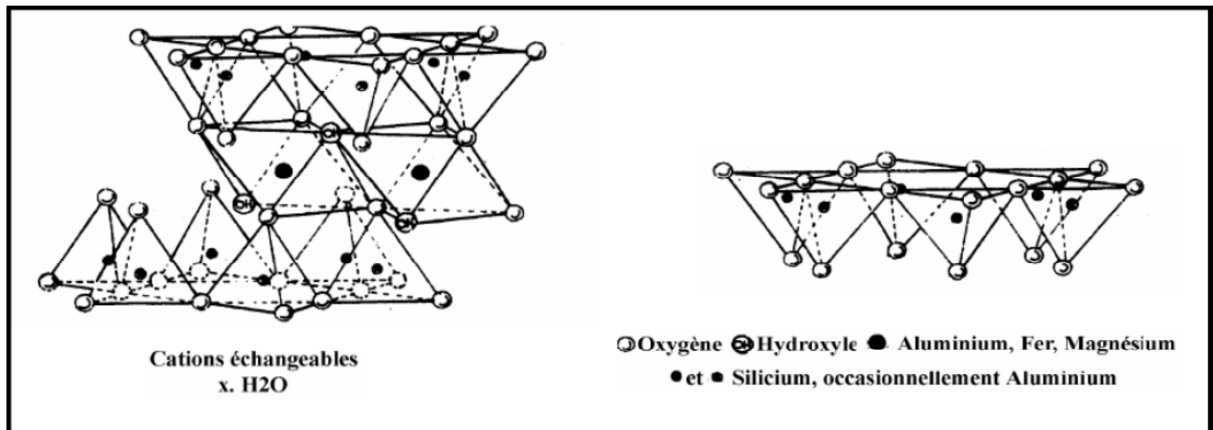
Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurent les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer.



**Figure II.6:** Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (AZZOUZ, 2006).



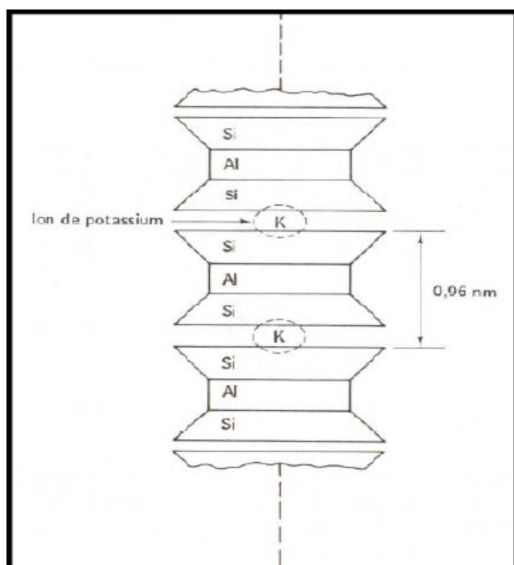
**Figure II.5 :** Schéma de la structure de la montmorillonite (Robel D.HOLTZ, 1991)



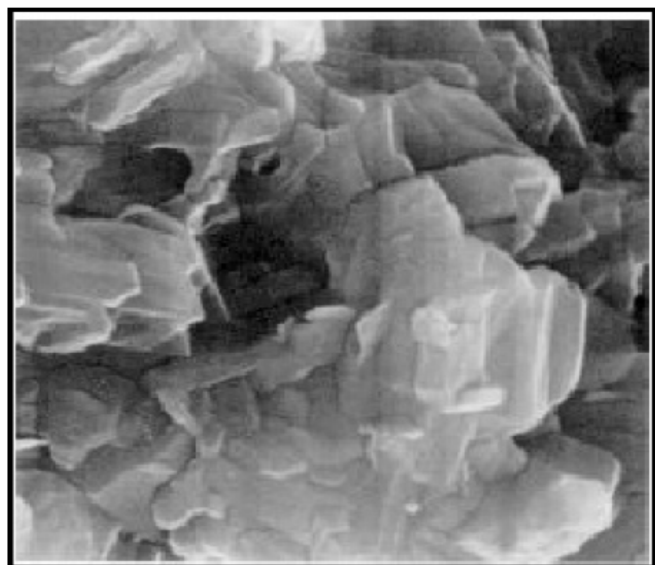
**Figure II.7:** Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Robel D.HOLTZ, 1991).

### c) L'illite

Elle est formée d'un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques. Les liens qui unissent les couches élémentaires, 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 (GHEDDACHE, 2012).



**Figure II.8:** Schéma de la structure de l'illite (Robel D.HOLTZ, 1991).



**Figure II.9:** photographie d'une illite prise au microscope électronique à balayage (AZZOUZ, 2006).

## 4.5. Paramètres physico-chimiques des argiles

Il nous a paru possible de traduire l'ensemble des phénomènes physico-chimiques jouant un rôle dans le comportement mécanique des argiles par les paramètres physico-chimiques suivants (A.BOTTERO, 1972) :

- nature minéralogique
- géométrie
- hydratation
- limites et indices d'état.

Le dernier de ces « paramètres » est en fait un ensemble de valeurs obtenues par des essais normalisés (limites d'Atterberg, etc.) et qui dépendent étroitement des paramètres précédents dont elles constituent, en quelque sorte, la synthèse.

Examinons plus en détail chacun de ces cinq paramètres.

#### **4.5.1. Nature minéralogique**

L'existence de déséquilibres électriques (dus à des substitutions d'ions de charges différentes à l'intérieur des particules) entraîne l'apparition de charges électriques à leur surface. Cela se traduit, en présence d'eau et d'ions par la naissance de forces d'attraction et de répulsion entre une particule et son environnement. Ces forces conditionnent l'arrangement géométrique des particules (texture) et par conséquent le comportement mécanique du matériau argileux (A.BOTTERO, 1972).

#### **4.5.2. Géométrie**

Il est courant d'appeler « particules argileuses », toutes celles qui sont inférieures à 2 microns. Ce paramètre est très important car les plus petites ont une surface spécifique très grande par rapport aux grosses, ce qui implique que les forces résultant des phénomènes superficiels sont prépondérantes pour les petites particules. Il apparaît donc comme très intéressant de faire une mesure de la surface spécifique qui est, au moins, aussi fidèle que la mesure de la dimension (A.BOTTERO, 1972).

#### **4.5.3. Hydratation**

Les molécules d'eau sont polaires : la charge positive du dipôle de ces molécules est attirée par les charges superficielles négatives des particules d'argile.

Une première couche monomoléculaire d'eau est ainsi fixée sur leur surface. Les « extrémités négatives » des molécules d'eau de cette première couche peuvent à leur tour, attirer une seconde couche de molécules d'eau orientée, et ainsi de suite. L'ensemble constitué par la surface négative du minéral et par l'eau liée, plus ou moins fortement, constitue la « double

couche ». La concentration des ions contenus dans cette eau décroît lorsque la distance à la particule augmente : cela fait qualifier de « diffuse » la double couche.

Le rôle de cette eau liée dans le comportement mécanique des argiles est très important car, dans le domaine habituel des contraintes, elle empêche généralement tout contact direct entre les particules.

Bien entendu, ces phénomènes liés à l'eau, en particulier l'épaisseur de la « double couche » dépendent de la teneur en eau de l'argile (A.BOTTERO, 1972).

#### 4.5.4 Limites et indices d'état

Les limites d'Atterberg ( $w_L$ ,  $w_P$ ,  $w_S$ ) et les indices d'état ( $I_P$ ,  $I_L$ , etc.) sont directement fonction de tous les paramètres physico-chimiques : aussi peut-on considérer qu'ils constituent des paramètres de synthèse. Nous indiquerons simplement le sens physique que nous entendons donner aux trois limites d'état et à l'indice de plasticité (A.BOTTERO, 1972).

**La limite de plasticité ( $w_P$ ) :** est la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules. Dans une même famille minéralogique,  $w_P$  peut recouvrir une grande plage de valeurs à cause des cations échangeables, de la présence d'éléments non argileux et de différents degrés de cristallisation que peut présenter un même minéral.

**La limite de liquidité ( $w_L$ ) :** est la mesure de la quantité d'eau qui éloigne suffisamment les particules pour annuler pratiquement les forces interparticulaires et qui, grâce au pourcentage élevé d'eau « visqueuse » par rapport à l'eau liée, permet un libre déplacement relatif des particules. La plage des valeurs obtenues par  $w_L$  est encore plus étendue, pour un même minéral argileux, que celle de  $w_P$  à cause de l'importance du degré de cristallisation et des ions échangeables sur la valeur de  $w_L$ .

**La limite de retrait ( $w_S$ ) :** est la teneur en eau atteinte lors du séchage d'un échantillon quand l'épaisseur du film d'eau est telle que les couches d'« eau rigide » entourant les particules peuvent venir en contact, ce qui interdit toute contraction ultérieure.

Ce paramètre est intéressant pour traiter des problèmes de retrait et de gonflement posés par les couches superficielles des terrains cohérents. Il représente un critère valable car sa détermination est indépendante du facteur humain.

**L'indice de plasticité ( $I_P$ ) :** il mesure l'intervalle de teneur en eau, compris entre  $w_P$  et  $w_L$ , à l'intérieur duquel on doit s'attendre pour le matériau à un comportement « plastique ». La

plasticité optimale se trouve réalisée quand les particules sont entièrement recouvertes d'eau rigide et qu'un peu d'eau visqueuse, additionnelle, joue le rôle de lubrifiant.

#### **4.6. Paramètres mécaniques des argiles**

On peut considérer que le comportement mécanique des matériaux argileux se traduit par trois sortes de phénomènes (A.BOTTERO, 1972):

- résistance mécanique au « cisaillement sans variation sensible de volume » ;
- phénomènes liés à des variations de volume : compressibilité, consolidation, retrait et gonflement ;
- perméabilité (notons que le phénomène de consolidation est lié à la perméabilité).

Sans vouloir énumérer les définitions détaillées de tous les paramètres issus des trois types de phénomènes précités, nous rappellerons simplement certaines notions.

##### **4.6.1. Résistance au cisaillement**

La résistance au cisaillement d'un sol argileux est théoriquement la superposition de trois composantes qu'il convient de ne dissocier qu'avec la plus grande prudence :

- la cohésion, fonction complexe des forces interparticulaires.
- le frottement interne, fonction de la taille et de la forme des particules ainsi que de la structure initiale du matériau,
- la « dilatance » ou changement de volume en début de glissement dans le plan de cisaillement.

##### **4.6.2 Phénomènes liés à des variations de volume**

Les phénomènes de variation de volume, avec ou sans charge appliquée, sont essentiellement fonction du comportement de l'eau interparticulaire et, par conséquent, de propriétés physico-chimiques du matériau.

Dans le cas de la compressibilité et de la consolidation c'est la charge appliquée qui conditionne les caractéristiques finales du matériau, mais l'allure et la vitesse du mouvement sont liées aux propriétés physico-chimiques.

##### **4.6.3 Perméabilité**

La percolation de l'eau à travers un matériau argileux est généralement très lente. Le coefficient  $k$  qui la mesure, exprimé en cm/s, peut varier dans des proportions de  $10^{-5}$  à  $10^{-10}$

suivant la nature du fluide percolant, la structure et les propriétés physico- chimiques de l'argile.

## **5. Conclusion**

La connaissance de propriétés des sols est un pas essentiel dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie de stabilisation ou de transformation de la terre en matériau de construction.

La microstructure d'une argile est le reflet fidèle de toute l'histoire géologique d'un dépôt donné et des contraintes qu'il a subies.

L'analyse générale de la structure des argiles illustre la complexité de leur comportement. De nombreux comportements des argiles ont été éclaircis ces dernières années.

La structure de presque tous les dépôts naturels d'argile est très complexe. Le comportement géotechnique de ces dépôts est fortement influencé par la macrostructure et la microstructure des argiles. Actuellement, bien qu'il n'existe pas de relations quantitatives entre la microstructure et les propriétés géotechniques, il est néanmoins important que l'ingénieur puisse apprécier la complexité de la structure des sols cohérents et les relations qui peuvent exister entre la structure et le comportement de ces sols sous sollicitation.

# **CHAPITRE III**

## **Phénomène de retrait (causes et conséquences)**

## 1. Introduction

De nombreux problèmes de fissuration rencontrés dans les canalisations enterrées, les trottoirs, les bâtiments et les routes ne résultent pas d'un chargement excessif du sol d'assise mais du gonflement ou du retrait de celui-ci. En Algérie, plusieurs cas de désordres très préjudiciables, liés au retrait-gonflement des argiles, ont été signalés sur des ouvrages dans plusieurs régions: la raffinerie pétrolière de In Amenas au sud-est du pays (Ameur, Derrich, Hachichi&Fleureau) , l'hôpital de N'Gaous et la ligne de chemin de fer Ramdane Djamel (Nord-est), l'hôpital de Sidi Chahmi et la briqueterie de Mers El Kébir situés au nord-ouest du pays à proximité de la ville d'Oran (A.HACHICHI, 2009).

Le phénomène de retrait de certains sols argileux provoque des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel. Selon les critères mécaniques, les variations de volume du sol ou des formations lithologiques sont dues, d'une part, à l'interaction eau-solide, et d'autre part, à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume).

## 2. Facteurs qui interviennent dans le retrait (MANTHO, 2005) :

Le phénomène de retrait des formations argileuses est dû, pour l'essentiel, à des variations de volume de ce type de formation, sous l'effet de l'évolution des teneurs en eau comme schématisé sur la figure III.1.

Parmi les facteurs intervenant, on cite :

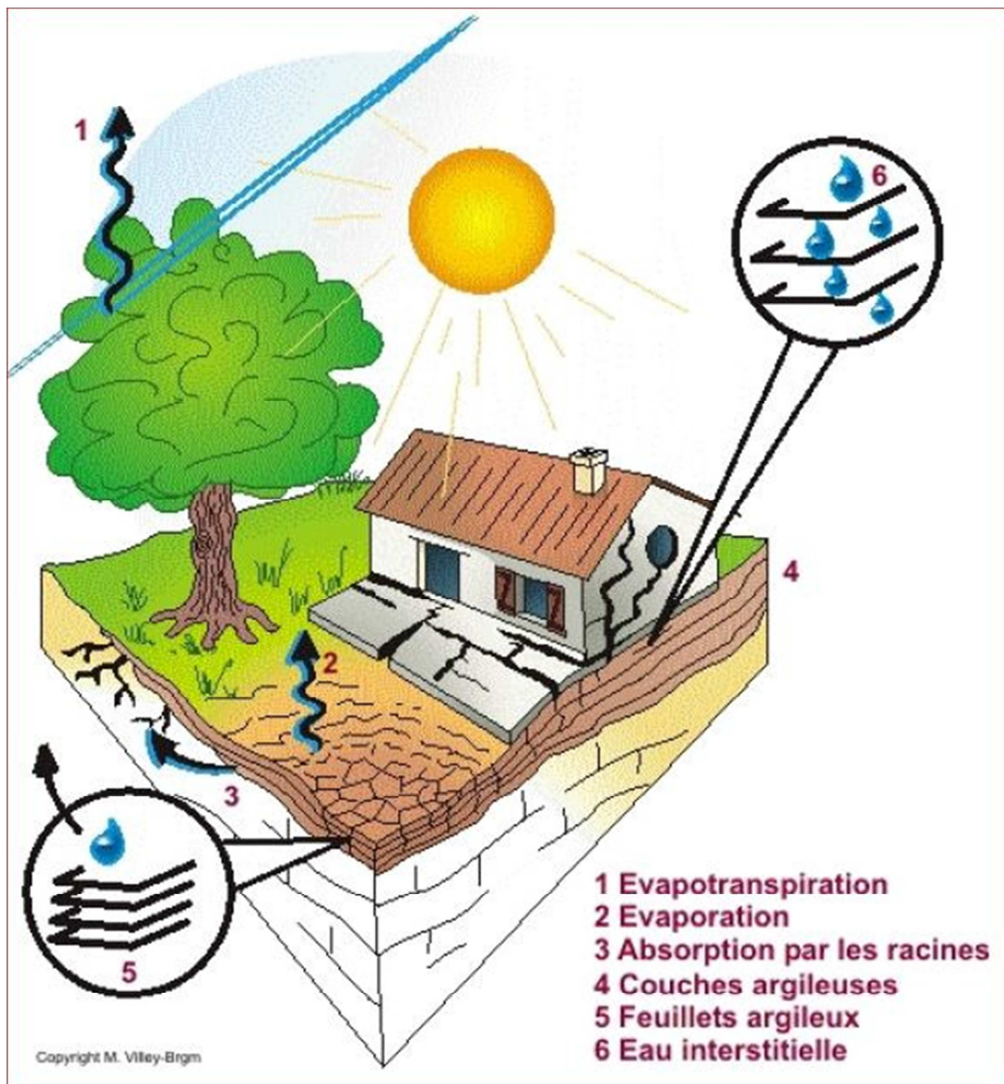
**Les facteurs de prédisposition**, liés à la nature des sols ou du site ;

**Les facteurs de déclenchement**, liés à des sollicitations (humaines ou naturelles).

Les facteurs de prédisposition sont ceux qui induisent le phénomène de retrait, mais dont la seule présence ne suffit pas à le déclencher. Ces facteurs sont fixés ou évoluent très lentement dans le temps. On distingue les facteurs internes qui sont liés à la nature du sol et des facteurs d'environnement qui caractérisent plutôt le site.

Les facteurs de déclenchement sont ceux qui provoquent le phénomène de retrait, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La

connaissance des facteurs de déclenchement permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).



**Figure III.1** : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

Les facteurs les plus importants sont :

- Nature du sol,
- Hydrologie,
- Géomorphologie,
- Climatologie,
- Facteurs anthropiques (fuites d'eau, drainages, etc.).
- Végétation

on explique plus en détail chacun de ces facteurs

### **2.1.Nature du sol**

Les facteur prédominant, qui caractérise la susceptibilité au retrait d'une formation argileuse, est la géometrie de la formation et sa composition minéralogique. Une formation argileuse sera d'autant plus sensible au retrait qu'elle est en position superficielle et qu'elle est épaisse et continue, et elle sera plus sensible au phénomène que sa fraction argileuse contiendra une forte proportion de minéraux argileux gonflants (Smectites, vermiculites et de certaines chlorites).

### **2.2.Hydrogéologie**

L'hydrogéologie constitue un facteur d'environnement qui règle la présence d'eau et entre dans les facteurs de prédisposition. La présence d'une nappe aquifère rend plus complexe le phénomène de retrait.

La présence d'une nappe permanente à faible profondeur permet généralement d'éviter la dissiccation de la tranche de sol superficielle.

Les variations hydriques des sols se traduisent, pour les formations argileuses sensibles, par des variations de leurs caractéristiques mécaniques.

### **2.3.Géomorphologie**

La topographie de surface constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait. La présence d'une morphologie plate sera plus susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol.

Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain exposé différemment.

D'autre part il arrive souvent qu'une maison construite sur un terrain en pente soit plus sensible au problème de retrait, en raison d'une dissymétrie des fondations lorsque celles-ci sont descendues partout à la même cote. Le bâtiment se trouve alors enterré plus profondément du côté amont. De ce fait, les fondations situées à l'aval subiront des mouvements plus importants car le sol, en position plus superficielle, est d'avantage soumis à l'évaporation (et par ailleurs, souvent plus altéré et donc plus sensible aux variations de teneur en eau.

## **2.4.Climatologie**

Les phénomènes météorologiques exceptionnels constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait. Les variations de teneur en eau du sol sont dues à des variations climatiques saisonnières. La profondeur de terrain affectée par les variations saisonnières de teneur en eau ne dépasse guère 1 à 2 m sous des climats tempérés, mais peut atteindre 3 à 5 m lors d'une sécheresse exceptionnelle, ou dans un environnement défavorable (végétation proche).

Les deux paramètres importants sont les précipitations et l'évapotranspiration. En absence de nappe phréatique, ces deux paramètres contrôlent en effet les variations de teneur en eau dans la zone superficielle des sols.

## **2.5.Facteurs anthropiques**

C'est un facteur de déclenchement qui n'est pas lié à un phénomène climatique par nature imprévisible, mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, en modifiant la répartition des écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les possibilités d'évaporation naturelle, sont susceptibles d'entraîner des modifications dans l'évolution des teneurs en eau de la zone superficielle de sol. En particulier, des travaux de drainage réalisés à proximité immédiate d'une maison peuvent provoquer des mouvements différentiels du terrain dans le voisinage.

## **2.6.Végétation**

L'effet de la végétation est souvent prépondérant, les racines des végétaux aspirent l'eau du sol par succion, elles ne favorisent donc que le phénomène de retrait du fait de leur besoin en eau. Ce facteur peut être à la fois le facteur de déclenchement et le facteur de prédisposition. Zawalsko et Woziwodzki (2002) (MANTHO, 2005), ont observé l'influence des arbres en fonction de leur âge pendant 20 ans. Ils ont constaté qu'à partir de l'âge où l'arbre devient adulte, il se comporte comme un facteur de déclenchement. De même, pendant la saison sèche les racines des arbres appliquent une succion plus importante afin de trouver de l'eau, et aggravent ainsi le tassement.

### 3. 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. 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.

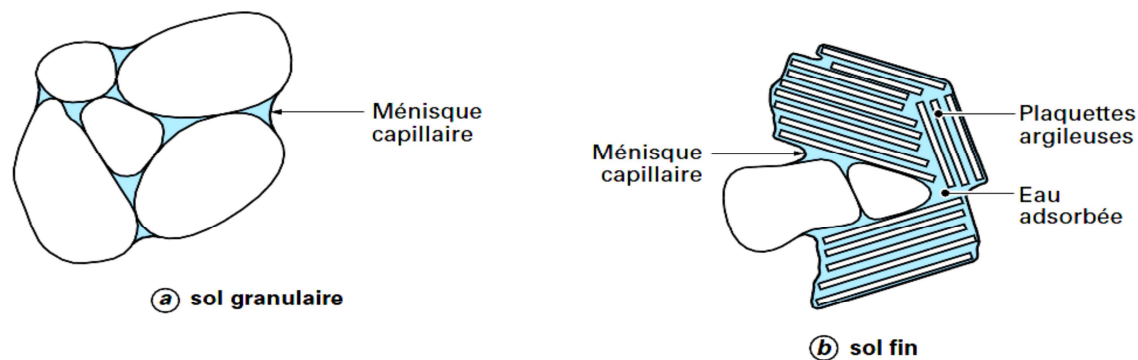


Figure III.2 : Méninge capillaire, a) sol granulaire, b) sol fin

Différentes sortes d'eau pénètrent dans le sol et y sont retenues. Elles jouent un rôle important dans la détermination des propriétés (Guillaud, 1989).

- 1- **L'eau libre** : elle se meut par gravitation ou par capillarité, au gré des mouvements de la nappe phréatique ou des variations journalières de la pression atmosphérique et de la température.  
L'eau capillaire accumulée dans de petits pores à la surface des particules n'est pas absorbée ; elle peut être éliminée à des températures ambiantes normales.
- 2- **L'eau interstitielle** : elle est retenue par des pores très petits où la capillarité est supérieure aux forces hydrodynamiques. Cette eau peut être éliminée à des températures normales mais après un long séchage ou à l'étuve entre 50 et 120°C.
- 3- **L'eau de solution** : sous forme de film autour des particules solides et retenue à leur surface par les forces polaires, électrostatique et d'hydratation ionique. Elle peut être éliminée à des températures ambiantes normales.
- 4- **L'eau absorbée** : sous forme de film très fin, à la fois sur les surfaces externes et internes. Cette eau est retenue par des forces si puissantes qu'elle ne peut se mouvoir. Elle peut être éliminée à des températures supérieures à 100°C et jusqu'à 200°C.

5- **L'eau de structure** : ce n'est pas vraiment de l'eau car elle présente les groupes hydroxyles qui font parties des réseaux cristallins solides. Elle peut être éliminée à partir de températures proches de 600°C.

### 3.1.Capillarité de l'eau - loi de Jurin

Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interaction non équilibrées, à la différence d'une molécule située au sein du fluide. Le potentiel capillaire est une fonction de la pression capillaire qui est la différence entre la pression de l'air et de l'eau, liée à la tension superficielle du couple air-eau et au rayon de courbure moyen du ménisque.(Yigzaw, 2010)

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 tubes 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.(Robel D.HOLTZ, 1991)

#### ➤ **Loi de Jurin** (PHILIPPONNAT, 2003)

Dans un tube capillaire de rayon  $r$ , l'eau monte jusqu'à une hauteur  $h$  telle que le poids de la colonne d'eau ainsi obtenue équilibre les forces de tension superficielle  $T$  (figure III.3a).

La résultante des forces de tension est :  $F_c = 2.\pi.r.T$ , et le poids de la colonne d'eau est  $P_w = \pi.r^2.h.\gamma_w$ , d'où : 
$$h = \frac{2.T}{r.\gamma_w} \quad (3)$$

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

La tension superficielle de l'eau est de l'ordre de  $8.10^{-4}$  N/cm, ce qui est faible. Il faut donc que  $r$  soit très petit pour que  $h$  soit élevé.

Avec un tube gras, le rayon du ménisque  $R$  est supérieur au rayon du tube  $r$  et la hauteur  $h$  est plus faible (figure III.3b) :  $r/R = \cos\alpha$  ; la formule (3) devient :

$$h = \frac{2.T.\cos\alpha}{r.\gamma_w} \quad (4)$$

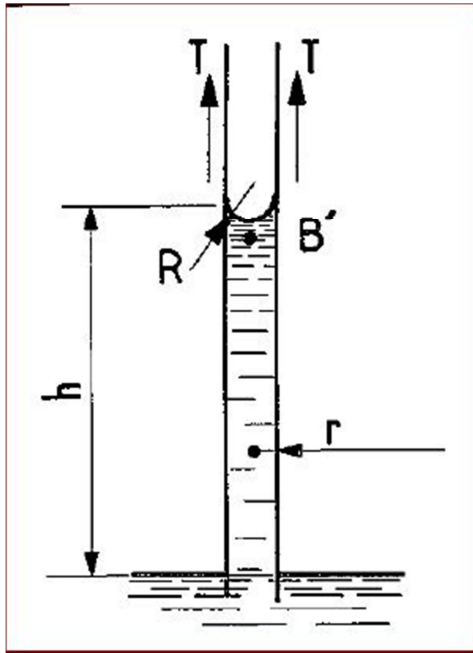


Figure III.3a : Loi de Jurin

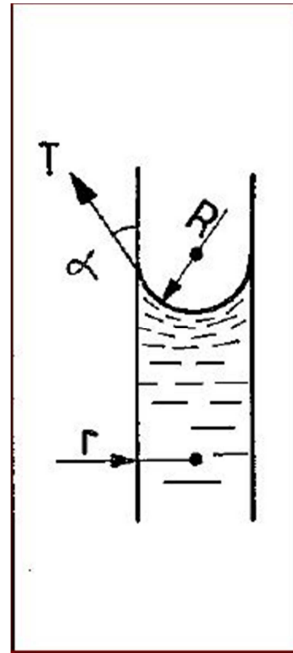


Figure III.3b : Tube gras

Les hauteurs d'ascension capillaire et tension négative associées, peuvent atteindre des valeurs importantes, en particulier dans le cas des sols à grains fins. Le tableau III.1 donne quelques valeurs caractéristiques de hauteur d'ascension capillaire pour certains sols.

**Tableau III.1** : Hauteur approximative d'ascension capillaire pour différents sols.  
D'après Hansbo (1975)

	Lâche	dense
sable grossier	0,03-0,12 m	0,04-0,15 m
sable moyen	0,12-0,50 m	0,35-1,10 m
sable fin	0,30-2,0 m	0,40-3,5 m
silt	1,5-10 m	2,5-12 m
Argile	≥10 m	

C'est cette capillarité 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 s'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 (GHEDDACHE, 2012).

On peut démontrer l'existence de tensions capillaires élevées dans les sols en laissant sécher lentement sur la peau, une argile grasse à haute teneur en eau. Les pressions élevées de retrait

causeront une certaine douleur ; autrefois, on avait recours à ce procédé comme moyen de torture. Un corps humain couvert d'argile séchant lentement sous le soleil ne peut résister longtemps à des pressions pouvant atteindre plusieurs atmosphères (Robel D.HOLTZ, 1991).

### **3.2.Mécanisme du retrait (Yigzaw, 2010)**

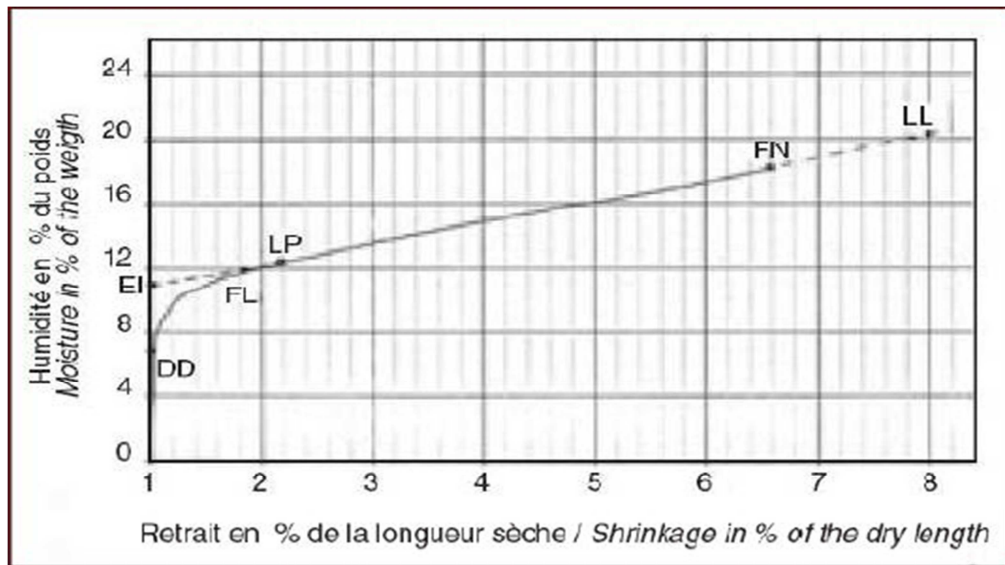
Lorsque l'eau s'évapore les rayons diminuent alors les grains se resserrent entre eux et entraînent la diminution du volume, tandis que le squelette solide est comprimé et se raccourcit : c'est le phénomène de retrait.

La tension interne de l'eau a donc pour effet de lier les grains de sol. Plus la tension capillaire est grande, plus l'attraction entre les grains est importante. La pression de l'air extérieure rapproche les grains et de ce fait augmente considérablement leur résistance. Des recherches ont montré qu'on peut obtenir différentes distributions de diamètres de pores pour un sol donné selon le procédé de compactage utilisé et la teneur en eau.

Une diminution de la teneur en eau correspond à une étroitesse sur le squelette, ce qui entraîne une diminution du volume (retrait) dans les sols. Plus un sol est desséché, plus l'eau interstitielle est en dépression. C'est pour cela qu'une argile sèche est avide d'absorber de l'eau. Le départ de l'eau provoque un retrait, parce que cette eau est plus au moins liée au solide. L'étude du mécanisme de retrait revient à étudier cette liaison.

### **3.3.Courbe de bigot**

Bigot a étudié la relation humidité-retrait d'une argile saturée qui est une des données importantes utilisées pour prévoir la facilité de séchage d'un sol argileux, La courbe de Bigot permet de connaître les propriétés de retrait du mélange argileux, Sur la figure III. 4, on voit la courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles avec les différentes humidités remarquables. (Kornmann.M, 2006)



**Figure III.4 :** Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles (Kornmann.M, 2006)

- LL et LP : limites de liquidité et de plasticité selon Atterberg ;
- FN : "façonnage normal"
- EI : point critique ou concentration critique ou eau d'interposition ;
- FL : fin de linéarité
- DD : début de déformation.

On observe nettement trois zones différentes (GHEDDACHE, 2012).

**Zone de forte humidité :** cette zone est caractérisée par une portion de droite rectiligne et inclinée représentant la phase pendant laquelle la diminution d'humidité est proportionnelle au retrait. 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.

**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 l'humidité, 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 continue.

➤ **Interprétations et limitations de la courbe de Bigot** (Kornmann.M, 2006)

La courbe de Bigot classique peut être tracée à partir des essais avec les commentaires suivants :

- Le test de Bigot permet de tracer la courbe simplement en continu avec un seul échantillon ;
- Les variations de volume sont données maintenant sous forme de variation d'une longueur ;
- Elle donne des indications sur la porosité de l'éprouvette sèche et donc sur les vitesses de diffusion d'eau.
- Il est utile de mesurer la densité du mélange sec après test.

Les interprétations qu'on donne de cette courbe montrent certaines variations.

- Plus la courbe est longue, plus le retrait sera important, ce qui est le cas des argiles fines et plastiques. Elles sont difficiles à sécher ;
- Plus la teneur en eau d'interposition est élevée, plus l'argile est facile à sécher puisque la phase correspondante au départ d'eau sans variation dimensionnelle est importante
- La pente est plus forte si la densité du mélange sec est plus faible (matériau de densité légère ou forte porosité).

### **3.4.Limite de retrait**

Le paramètre normalement utilisé pour caractériser le retrait d'un sol est la limite de retrait ou la limite de retrait effective. La limite de retrait d'un sol correspond à la teneur en eau à partir de laquelle un sol commence à se désaturer, tandis que son degré de saturation est encore voisin de 100%(Robel D.HOLTZ, 1991). Son estimation est basée sur la courbe de retrait qui exprime la diminution de volume en fonction de la diminution de la teneur en eau. C'est une limite

conventionnelle qui sépare le comportement du sol en deux domaines : un domaine avec variation importante de volume, d'un domaine avec variation de volume quasiment nulle. Selon la norme AFNOR (Yigzaw, 2010), il existe deux types d'essais de limite de retrait : la limite de retrait conventionnelle sur le passant à 400 µm d'un matériau et la limite de retrait effective sur un sol non remanié. Dans le premier cas, l'essai consiste à déterminer la perte de volume d'une éprouvette de sol remanié, entre l'état initial liquide (teneur en eau supérieure à la limite de liquidité) et l'état sec.

Dans le deuxième cas, l'essai consiste à laisser se dessécher librement et progressivement une éprouvette de sol posée sur un plateau de la balance et à mesurer périodiquement sa variation de hauteur et sa masse (Yigzaw, 2010).

#### **4. Conséquences de retrait sur les maisons.**

Les fissures dues au retrait peuvent se produire en certains endroits lorsque les tensions capillaires sont plus fortes que la cohésion et à la résistance à la traction du sol. Ces fissures qui font partie de la macrostructure des argiles, représentent les zones faibles susceptibles de réduire de façon importante la résistance globale d'une masse de sol, la stabilité des talus argileux et la capacité portante des fondations. La croute desséchée et fissurée qui recouvre habituellement les dépôts d'argile molle a un effet négatif sur la stabilité des remblais construits sur ces dépôts. Lorsque le climat change et que le sol peut à nouveau être irrigué, il a tendance à gonfler ou à augmenter de volume souvent, le retrait ou le gonflement des sols à grains fins entraînent des variations de volume assez marquées pour causer des dommages importants aux pavages et aux petits édifices.(Robel D.HOLTZ, 1991)

Les problèmes dus aux mouvements des terrains suite à des cycles de retrait-gonflement sont également présents partout dans le monde. Aux Etats-Unis, le coût des dégâts provoqués par le retrait-gonflement dépasse celui engendré par les tremblements de terre, les cyclones et les inondations.(JAHANGIR, 2011)

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux peuvent produire des désordres aussi bien sur les ouvrages construits en surface (bâtiments, fondations superficielles, ouvrages de soutènement, remblais, etc....) que sur les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisations).

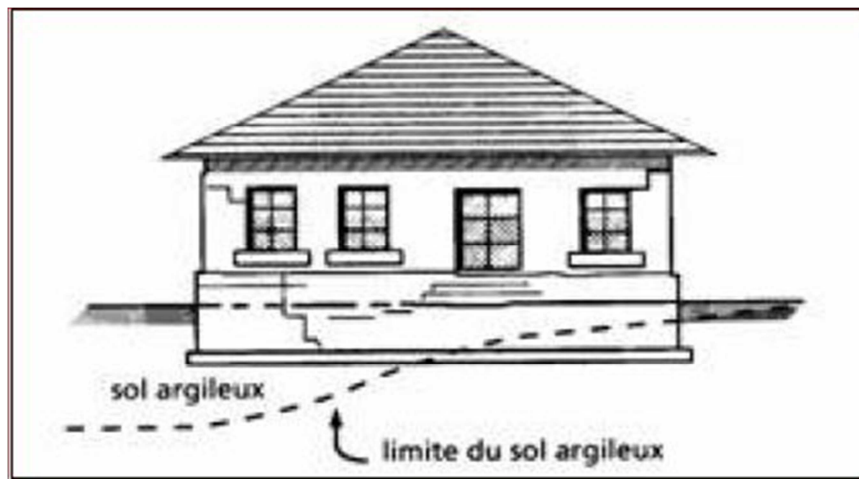
#### 4.1. Mécanismes des désordres (d'après Ministère de l'Environnement 1993)

Les mécanismes principaux sont (MANTHO, 2005) :

##### 4.1.1. Pendant la sécheresse

Les mouvements du sol qui sont à l'origine des désordres des constructions pendant une sécheresse intense sont dus essentiellement aux diminutions de la teneur en eau. Ce sont les tassements différentiels du sol qui les provoquent. En effet, les variations de teneur en eau ne sont pas uniformes à l'ensemble des fondations pour diverses raisons :

- La présence du bâtiment constitue un écran à l'évaporation et modifie les conditions d'équilibre hydrique des sols, entre la partie centrale (teneur en eau qui reste sensiblement constante) et la périphérie du bâtiment, notamment les angles saillants ;
- Les hétérogénéités diverses (natures des sols, géométrie des couches (figure III.5)) ;
- La topographie ;
- La végétation ;
- La circulation des nappes d'eau souterraines, les drains ou fossés, les fuites de réseaux etc.



**Figure III.5** : Désordres partiels dus à la variation d'épaisseur du sol argileux sensible (Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991)

Dans la majorité des cas de bâtiments courants (murs en maçonnerie porteurs ou de remplissage, murs en béton non armé, poutres ou poteaux en béton armé) la structure ne peut accepter sans désordre les mouvements différentiels des sols de fondation et les flexions parasites, que jusqu'à un certain seuil : distorsion en général de l'ordre de 1/500 à 1/1000.

#### 4.1.2. Au retour de précipitations

Lorsque les sols se rehumidifient, ils ne retrouvent généralement pas complètement leur volume antérieur et les fissures des bâtiments ne se referment pas tout à fait. Dans le cas des sols argileux particulièrement gonflants, l'amplitude du gonflement par réhumidification peut être supérieure à celle du retrait antérieur et entraîner de nouveaux désordres.

Comme dans le cas du retrait, les déformations dues au gonflement du sol ne sont pas uniformes (gonflements différentiels) et peuvent engendrer des désordres de même type.

#### 4.2. Manifestation des désordres (d'après Ministère de l'Environnement 1993)

On peut distinguer trois parties :

##### 4.2.1. Gros – œuvre

- La fissuration des structures (enterrées ou aériennes) : elle peut être verticale, horizontale ou inclinée à 45°. Cette fissuration recoupe systématiquement les points faibles que constituent les ouvertures situées dans les murs, les cloisons, les planchers ou les plafonds (figure III.6.a)
- Le déversement des structures : il affecte les parties fondées à des niveaux différents (Figure III.6.b).



**Figure III.6:** Désordres concernant le gros-œuvre ; a) Désordres à l'ensemble du soubassement et de l'ossature ; b) Désordres partiels dus à l'existence d'un sous-sol partiel  
(Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991)

##### 4.2.2. Second œuvre

- La distorsion des ouvertures : elle gêne, voire empêche le bon fonctionnement des portes et fenêtres ;
- Le décollement de tous les éléments composites (matériaux différents assemblés par

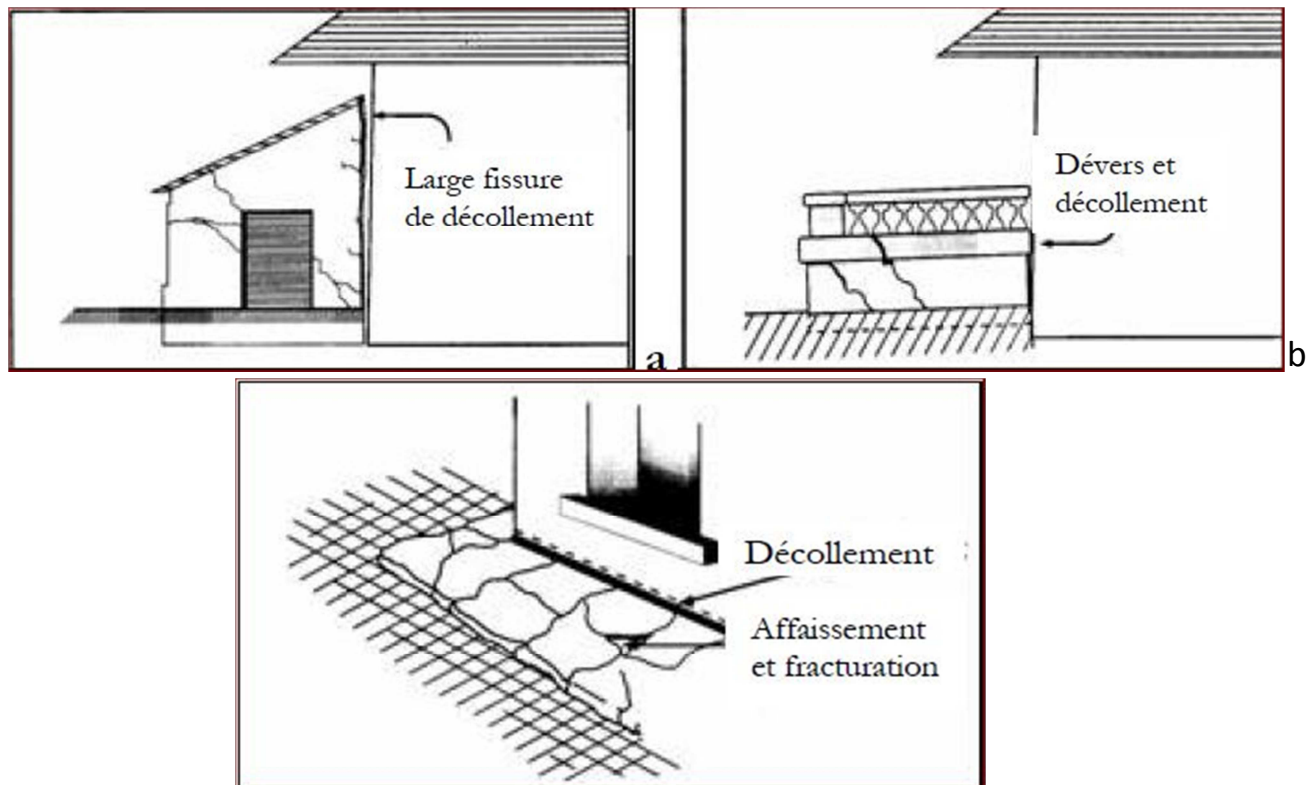
superposition) enduits et placages de revêtement sur les murs, carrelages sur dallages ou planchers, soumis à une flexion ou à une compression selon le plan d'assemblage ;

- L'étirement, la mise en compression ou la rupture des tuyauteries et canalisations : eau potable, eaux usées, gaz, chauffage central, gouttières.

#### 4.2.3. Aménagements extérieurs

Ils subissent des désordres (Figure III.7) du même type que le gros-œuvre et le second-œuvre et parmi eux on peut citer :

- Les murs de soutènement (ex. descente de garage) ;
- Les conduites de raccordement des réseaux de distribution, entre le bâtiment et le collecteur extérieur.



**Figure III.7 :** Désordres affectant a) un appentis, b) une terrasse et c) les dallages extérieurs

Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991

#### 4.3. Déformations des structures selon le type de mouvement de sol

Que ce soit un gonflement ou un tassement, la déformation du sol de fondation, principalement en fonction de la rigidité de la structure portée, peut prendre deux aspects :

- Déformation par flexion ;
- Déformation par cisaillement.

Dans le premier cas (flexion), tout comme une poutre sur deux appuis, une face va être comprimée et l'autre face sera tendue et parcourue en conséquence de fissures de traction, alors que dans le second cas (cisaillement) les fissures vont être générales dans toute la section de la poutre et orientée à 45°. Quelques exemples qui illustrent la forme et les directions des fissures sont présentés dans la Figure III.8 :



**Figure III.8 :** les fissurations du bâti en maçonnerie due au retrait-gonflement ([www.argiles.fr](http://www.argiles.fr))

## 5. Conclusion

Cette étude se place dans le contexte des préoccupations actuelles liées aux dégâts causés par le retrait – gonflement des sols argileux. Elle comporte une grande partie dédiée aux nouveaux développements expérimentaux.

En l'absence de références concernant ces développements, tout a été préparé soigneusement et réalisé par tâtonnements. Trouver et adopter la procédure appropriée pour chaque nouveau développement représentaient un défi important.

En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche se présentant par retrait. Plus le sol est loin de sa limite de retrait, plus l'amplitude de tassement est grande. Donc suite à un hiver pluvieux, une sécheresse prolongée peut engendrer un tassement de grande amplitude.

En conclusion, plus le bâti est chargé et plus la profondeur d'assise de la fondation est élevée, plus le taux de transmission du tassement au bâti diminue. Autrement dit, le bâti devient moins vulnérable vis-à-vis de l'action du retrait-gonflement

# **PARTIE EXPERIMENTALE**

## **CHAPITRE IV**

### **Identification des matériaux utilisés**

## 1. Introduction

Les sols sont généralement le résultat de la désagrégation mécanique ou chimique des roches de l'écorce terrestre. Certains sols particuliers qu'on dit organiques peuvent contenir des débris végétaux ou animaux en quantité plus ou moins grande. Les matériaux minéraux ou organiques sont généralement à l'état de grains ou particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est indispensable d'identifier certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent le squelette, l'eau et le gaz d'un sol, si l'on veut réaliser une économie sur la production des matériaux en terre crue et sur leur emploi en construction. Une bonne identification de base de sol peut donc assurer un gain de temps et d'argent non négligeable.

Les essais effectués doivent permettre la caractérisation des matériaux utilisés et la détermination des facteurs et paramètres qui influent sur le comportement du sol stabilisé. Les essais sont classés de la manière suivante :

- a) Analyse granulométrique.
- b) Analyse sédimentométrique.
- c) Limites d'Atterberg.
- d) Essai Proctor.
- e) Analyse minéralogique.
- f) Analyse chimique.

### **Situation géographique des sites d'échantillonnages**

Pour mener cette étude on a prélevé trois échantillons de sols, de trois régions de la grande Kabylie, comme montre la figure IV.1

- Une argile rouge d'Oued Aissi ;
- Une argile jaune de M'douha ;
- Une argile grise provenant de Thakhoukht.



Figure IV.1 : Site d'échantillonnage

## 2. Analyse granulométrique (NF P 94-056), (NF P 94-057)

L'analyse granulométrique est un essai qui consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à 80  $\mu\text{m}$ , la séparation se fait par tamisage. Pour les fines (< 80  $\mu\text{m}$ ), on a pratiqué l'essai de sédimentométrie.

### a) Tamisage

Le tamisage consiste à séparer l'ensemble des grains de matériau grâce à des séries de tamis puis à peser les refus sur chacun d'eux. Il peut s'effectuer à sec (cas des sables, des graviers) ou sous l'eau (cas des sols argileux ou limoneux).

La courbe granulométrique se trace en portant :

- En abscisses les diamètres des grains  $d$  : exprimés en microns sur une échelle logarithmique [logd].
- En ordonnées les tamisats cumulés en (%).

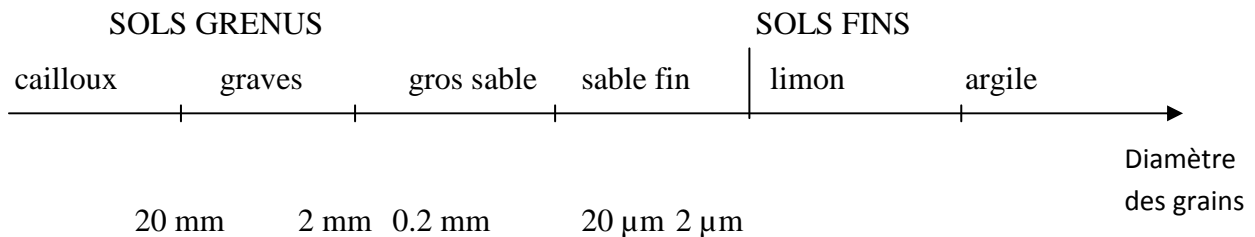
### b) Sédimentométrie

L'analyse granulométrique par sédimentométrie, complète le tamisage pour déterminer la répartition selon le diamètre des grains de fraction fine de sol inférieure à 80 microns.

L'essai de sédimentométrie est un essai qui est basé sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite  $V_{lim}$  d'une particule de poids spécifique des grains solides  $\gamma_s$  tombant sous l'action de la pesanteur, dans un liquide visqueux de poids spécifique  $\gamma_w$  et de viscosité  $\epsilon$ . En réalité cet essai se fait en dispersant les particules de sol dans l'eau par agitation. On laisse décanter, et on mesure la densité de la solution à différents niveaux et en fonction du temps. En établissant le diamètre des particules d'une part, et le pourcentage de particules d'autre part, on peut ainsi tracer la courbe sédimentométrique qui complète la courbe granulométrique.

### 2.1. Classification des sols selon la granulométrie. (SCHLOSSER, 1997)

- a) **Sols à granulométrie uniforme** : lorsque les dimensions des grains sont peu différentes, on peut adopter la classification suivante, reposant sur le diamètre moyen des grains :



- b) **Sols à granulométrie non uniforme** : suivant la classification LCPC, on distingue trois types de sols :
- Les sols grenus dont plus de 50 % d'éléments en poids sont supérieurs à 80 µm ;
  - Les sols fins dont plus de 50 % d'éléments en poids sont inférieurs à 80 µm ;
  - Les sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée.

### 2.2. Résultats des analyses granulométriques

Les tableaux [IV.1], [IV.2] et [IV.3] présentent les résultats des analyses granulométriques des trois échantillons d'argiles.

La figure IV.2, présente les courbes granulométriques des trois échantillons d'argiles.

**Tableau [IV.1] :** Analyse granulométrique d'argile rouge

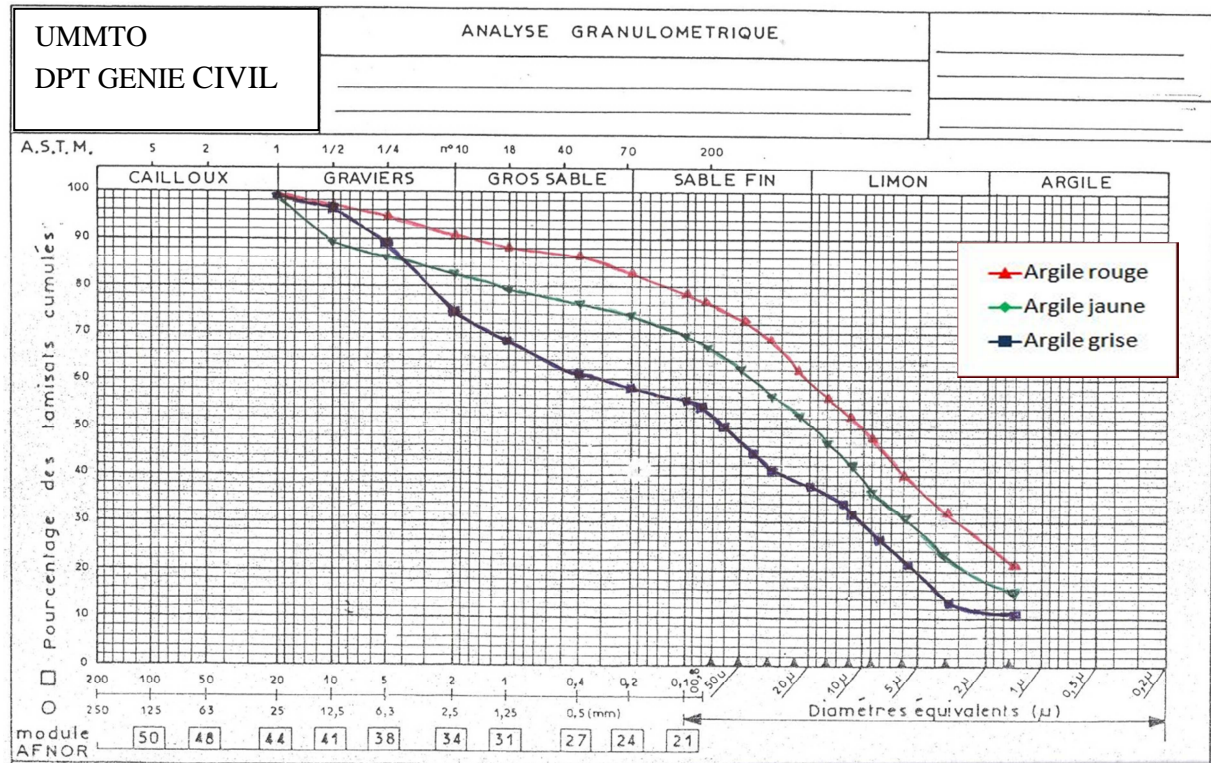
Tamis (mm)	tamisât cumulé (%)
20	100
10	97,92
5	94,33
2	90,70
1	88,54
0,4	86,17
0,2	83,41
0,1	78,61
0,08	77,95
0,0673	76,74
0,0489	72,91
0,0349	69,07
0,0224	63,31
0,0161	57,56
0,0114	52,95
0,0081	47,97
0,0058	40,29
0,0034	32,62
0,0014	21,1

**Tableau [IV.2] :** Analyse granulométrique d'argile jaune

Tamis (mm)	tamisât cumulé(%)
20	100
10	89,73
5	86,62
2	82,49
1	79,28
0,4	76,54
0,2	74,18
0,1	72,09
0,08	69,96
0,0673	66,30
0,0489	62,40
0,035	56,55
0,0225	52,65
0,0161	47,97
0,0114	42,90
0,0082	37,05
0,0059	30,42
0,0034	23,40
0,0015	15,60

**Tableau [IV.3] :** Analyse granulométrique d'argile grise

Tamis (mm)	tamisât cumule (%)
20	100
10	97,45
5	89,49
2	74,41
1	68,54
0,4	61,77
0,2	58,33
0,1	56,00
0,08	54,59
0,0628	50,75
0,0417	45,81
0,0323	41,87
0,0198	37,98
0,0129	34,04
0,0122	31,90
0,0080	27,21
0,0057	21,38
0,0033	13,60
0,0014	11,66



**Figure IV.2:** Courbe granulométrique des sols

### 2.3. Interprétation des courbes granulométriques

On déduit de cette analyse que :

Les trois sols contiennent plus de 50 % d'éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ , donc sont classés comme des sols fins.

- L'argile rouge contient 10 % de gravier, 7 % de gros sable, 21 % de sable fin, 36 % de limon et 26 % d'argile.
- L'argile jaune contient 17 % de gravier, 9 % de gros sable et 23 % de sable fin, 33 % de limon et 18 % d'argile.
- L'argile grise contient 26 % de gravier, 16 % de gros sable et 20 % de sable fin, 26 % de limon et 12% d'argile.

La texture est celle d'un sol argilo limoneux, légèrement sableux, et faiblement graveleux pour l'argile rouge et l'argile jaune. Et celle d'un sol argilo limoneux, partiellement sableux, et moyennement graveleux pour l'argile grise.

La position de la courbe la plus haute est celle de l'argile rouge donc elle représente le sol le plus fin.

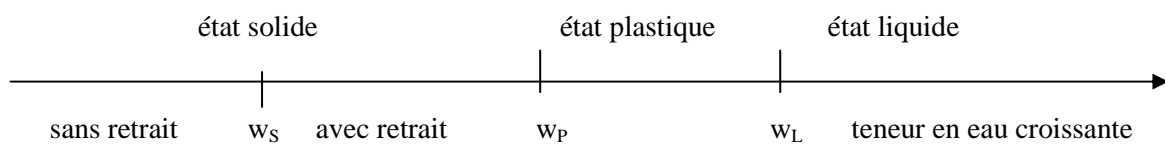
### 3. Limites d'Atterberg (Norme NF P94-051)

Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent de celles d'un solide ( $w$  faible) jusqu'à celles d'un liquide ( $w$  élevée). Entre ces deux états, pour les teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, c'est-à-dire qu'il est capable de se déformer rapidement et considérablement sans se casser, se fendiller ou changer de volume et sans présenter de déformation réversible notable.

On définit pour les sols fins :

- Une limite de liquidité  $w_L$  qui sépare l'état plastique de l'état liquide ;
- Une limite de plasticité  $w_P$  qui sépare l'état plastique de l'état solide.

L'état solide peut lui-même être séparé en deux états : un état dans lequel l'eau adsorbée est encore en place, appelé état solide avec retrait et un état dans lequel toute l'eau adsorbée a disparu, appelé état solide sans retrait.



L'indice de plasticité  $I_P$  est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Cet indice définit l'étendue de domaine de plasticité.

$$I_p = w_L - w_p$$

$I_p$  : indice de plasticité

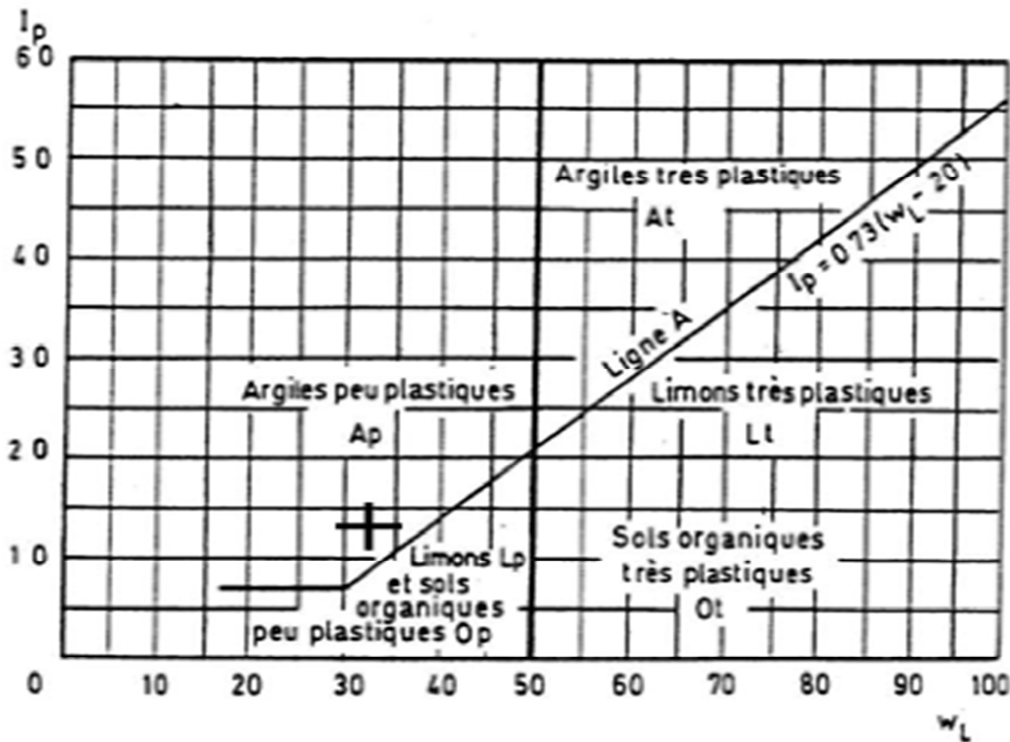
$w_L$  : limite de liquidité

$w_p$  : limite de plasticité

La classification des sols fins utilise des critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. On définit quatre grandes catégories principales suivant la méthode LCPC:

- Les limons très plastiques (LT) ;
- Les limons peu plastiques (LP) ;
- Les argiles très plastiques (AT) ;
- Les argiles peu plastiques (AP) ;

Selon la position d'un point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité  $w_L$  et pour ordonnée l'indice de plasticité  $I_p$  dans un diagramme de plasticité de Casagrande (figure.IV.2)



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

### 3.1. Déroulement de l'essai

#### 3.1.1. Préparation de l'échantillon

On a fait passer l'échantillon à travers le tamis de 0.4 mm par voie humide suivant les étapes ci-dessous :

- Placer le sol dans le tamis, sur un récipient plus grand.
- Verser doucement de l'eau.

- Puis laver séparément les gros éléments (refus), sur le même récipient.
- Laisser reposer ; décanter.
- Siphonner l'eau pure et laisser sécher, sans chauffer.

### 3.1.2. Détermination de limite de liquidité.

#### a) Matériel utilisé

- Appareil de Casagrande (figure IV.3) : comporte une coupelle métallique (calotte sphérique), qui en actionnement d'une came tombe de 10 mm sur un socle en bois de dureté bien déterminée.
- Outil à rainurer (figure IV.3) : permet de faire, dans le mortier placé dans la coupelle, une rainure de forme et dimensions identique à celles de l'outil.



Figure IV.4 : appareil de Casagrande et outil à rainurer

#### b) Mode opératoire.

Le processus de détermination de la limite de liquidité passe par les étapes suivantes :

- Amener l'échantillon à une teneur en eau légèrement supérieure à la limite de liquidité ;
- Mise en place de l'échantillon, de façon bien homogène. Epaisseur au centre : 15 à 20 mm.
- Faire une rainure dans l'axe de la coupelle, outil sensiblement perpendiculaire à cette coupelle.

- Tourner la manivelle : 2 chocs par seconde. Arrêter lorsque la fermeture de la rainure s'est produite sur 1 cm environ.
  - Si le nombre de chocs (n) a été inférieur à 15 (laisse sécher un peu)
  - Si ce nombre a été supérieur à 35 (ajouter un peu d'eau, et bien homogénéiser).
  - Si  $15 \leq n \leq 35$ , déterminer la teneur en eau w.

$$W = \frac{\text{Poids humide} - \text{poids sec}}{\text{poids sec}}$$

Recommencer le processus en faisant varier w ; on pourra tracer la courbe  $n = f(w)$  et en déduire w correspondant à  $n = 25$ .

### 3.1.3. Détermination de la limite de plasticité.

La limite de plasticité  $w_p$  est inférieure à  $w_L$  ; il faut donc laisser l'échantillon sécher un peu plus.

- De l'échantillon préparé, faire une boulette de mortier.
- Rouler la boulette sur une plaque en verre, à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre, et il doit avoir environ 10 cm de longueur et doit se rompre en deux ou trois morceaux.

La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint  $3\text{mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ .

- Si aucune fissure n'apparaît, la pâte est séchée légèrement, et reformer un nouveau rouleau.
- Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau afin de déterminer sa teneur en eau.

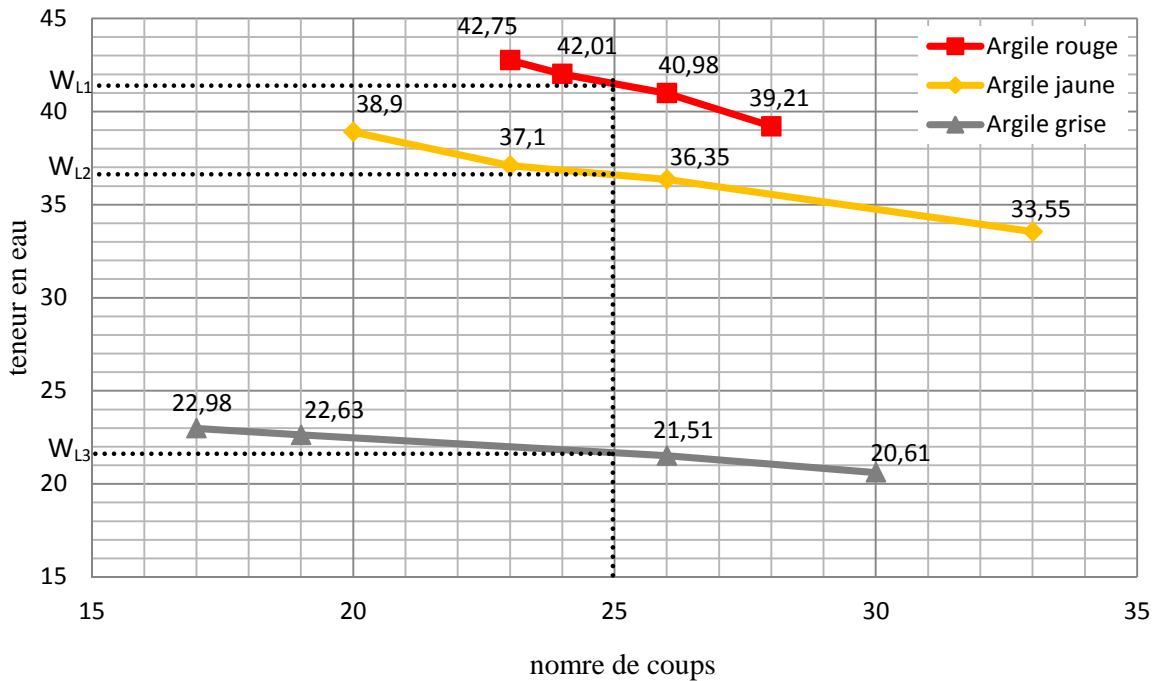
$W_p$  est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de ces essais

### 3.2. Résultats des limites d'Atterberg

Les valeurs trouvées des limites de liquidité des trois échantillons sont inscrites au tableau [IV.4], et les courbes de limites de liquidité ont été représentées dans la figure IV.4.

**Tableau [IV.4] :** limite de liquidité d'argile rouge, jaune et grise.

N° de l'essai	Argile jaune		Argile rouge		Argile grise	
	Nombre de coups	Teneur en eau (%)	Nombre de coups	Teneur en eau (%)	Nombre de coups	Teneur en eau (%)
1	20	38,9	23	42,755	17	22,98
2	23	37,1	24	42,012	19	22,63
3	26	36,35	26	40,979	26	21,51
4	33	33,55	28	39,206	30	20,61



**Figure IV.5:** Limite de liquidité d'argile rouge, jaune et grise.

La limite de liquidité de l'argile rouge est :  $W_{L1} = 41,4$

La limite de liquidité de l'argile jaune est :  $W_{L2} = 36,7$

La limite de liquidité de l'argile grise est :  $W_{L3} = 21,6$

**a) La limite de plasticité**

**Tableau [IV.5]:** limite de plasticité d’argile rouge, jaune et grise.

N° de l'essai	Teneur en eau		
	Argile jaune	Argile rouge	Argile grise
1	19,74	23,75	13,57
2	20,22	22,68	13,67
3	21,98	22,16	13,97

On déduit la limite de plasticité de chaque argile par la formule suivante :

$$Wp = \frac{\sum_1^3 W}{3}$$

La limite de plasticité de l’argile rouge est :  $W_{P1} = 22.86$

La limite de plasticité de l’argile jaune est :  $W_{P2} = 20.65$

La limite de plasticité de l’argile grise est :  $W_{P3} = 13.74$

**b) Indice de plasticité**

L’indice de plasticité  $I_p$  est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$I_p = W_L - W_P$$

**Tableau [IV.6]:** Indice de plasticité d’argile rouge, jaune et grise.

Type de sol	Indice de plasticité
Argile jaune	16.05
Argile rouge	18.54
Argile grise	7.86

**3.3.Discussion des résultats des limites d’Atterberg**

Les limites d’Atterberg nous donnent la classification suivante :

- Les trois argiles étudiées sont classées comme des argiles peu plastiques selon le diagramme de plasticité de Casagrande.
- Le domaine de plasticité de l’argile rouge est plus large que les deux autres car son indice de plasticité est plus grand, alors que l’argile grise a un domaine de plasticité faible.
- On peut conclure que les trois sols étudiés sont des argiles peu plastiques.

#### 4. Essai proctor

La teneur en eau optimale (T.E.O) à laquelle on obtient une densité sèche maximale est déterminée par l'essai Proctor (du nom de l'entrepreneur américain qui l'a mis au point). Les trois variables principales intervenant sur l'obtention de la masse volumique sèche maximale sont : la texture, l'état hydrique et l'énergie de compactage.

##### 4.1.Principe de l'essai (NF P 94-093)

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et le compacter à chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau. Les résultats sont consignés sur un diagramme qui note en ordonnée la masse volumique sèche, exprimée en  $\text{kg/m}^3$  et en abscisse la teneur en eau, exprimée en % pondéral.

##### 4.2.Déroulement des essais

###### a) Choix du moule.

Il existe deux types d'essai de compactage :

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

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

- Si  $D \leq 5$  mm (et seulement dans ce cas), le moule Proctor normal est autorisé, mais le moule California Bearing Ratio (C.B.R) est conseillé ;
- Si  $5 < D \leq 20$  mm, utiliser le moule C.B.R ;
- Si  $D > 20$  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 écrêté à 20mm).
- Si refus  $> 25\%$ , l'essai Proctor ne peut pas être fait.

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

###### b) Matériels utilisés 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 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 IV.6:** 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 IV.7.



**Figure IV.7 :** Compactage des couches

L'essai Proctor est réalisé en principe sur la fraction de terre qui passe au travers du tamis 5 mm. Le compactage se fait en trois couches d'épaisseur égale sur toute la surface des couches avec un poids normalisé (dame proctor) tombant d'une hauteur déterminé vingt-cinq fois. Chaque opération terminée, on pèse le moule et l'échantillon puis on calcule le poids spécifique sec et l'on porte les résultats sur un diagramme Proctor et on trace la courbe passant par les points expérimentaux.

### 4.3. Résultats des essais Proctor

Les résultats obtenus de l'essai Proctor sont inscrits au tableau [IV.7], [IV.8] et [IV.9], ainsi que les courbes obtenues à partir de ces valeurs sont données par la figure IV.8.

Avec :  $\gamma_d = \rho_d \cdot g$        $\gamma_d$  : poids volumique sec d'une éprouvette  
     $\rho_d$  : masse volumique sèche d'une éprouvette

**Tableau [IV.7] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile rouge

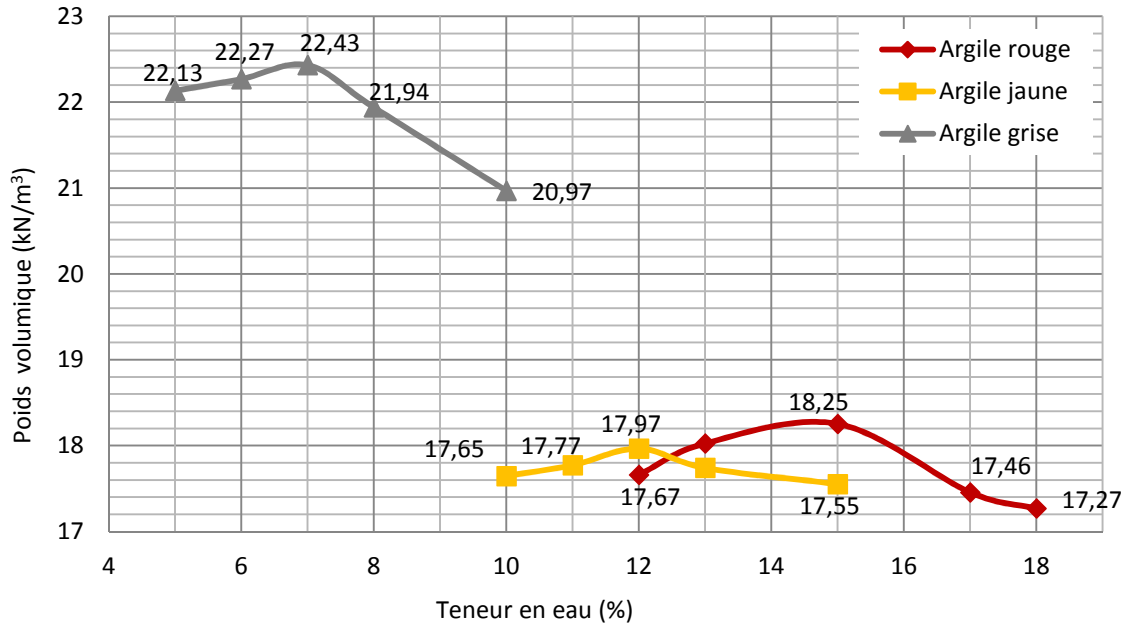
Teneur en eau de fabrication	Poids humide $P_h$ (g)	Poids sec $P_s$ (g)	Volume du moule ( $m^3$ )	Poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) ( $kN/m^3$ )
12	1887,38	1676,02	0,000949	17,66
13	1941,89	1710,46		18,02
15	1993,42	1732,23		18,25
17	1943,69	1656,55		17,46
18	1941,79	1638,66		17,27

**Tableau [IV.8] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile jaune

Teneur en eau de fabrication	Poids humide $P_h$ (g)	Poids sec $P_s$ (g)	Volume du moule ( $m^3$ )	Poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) ( $kN/m^3$ )
10	1885,65	1674,65	0,000949	17,65
11	1897,46	1686,51		17,77
12	1936,40	1704,87		17,97
13	1937,11	1683,51		17,74
15	1948,38	1665,54		17,55

**Tableau [IV.9] :** détermination de l'optimum proctor pour l'argile grise

Teneur en eau de fabrication	Poids humide $P_h$ (g)	Poids sec $P_s$ (g)	Volume du moule ( $m^3$ )	Poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) ( $kN/m^3$ )
5	2220,15	2100,22	0,000949	22,13
6	2228,14	2113,12		22,27
7	2272,17	2128,59		22,43
8	2245,91	2081,97		21,94
10	2183,21	1989,72		20,97



**Figure IV.8:** Courbe d'optimum proctor d'argile rouge, jaune et grise

#### 4.4. Interprétation des résultats des essais Proctor

L'argile grise a un poids volumique sec plus grand que les deux autres sols et a une teneur en eau inférieure aux deux autres, et cela vient de sa texture qui contient des grosses particules. Alors que l'argile jaune et l'argile rouge présentent des teneurs en eau optimales et des poids volumiques secs sensiblement identiques.

### 5. L'analyse chimique et minéralogique

#### 5.1 Analyse minéralogique

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

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

**Tableau [IV.10] :** Résultats d'analyse minéralogique des trois types d'argiles (d'après Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction)

Minéraux présents	Formules	Teneur en % des éléments présents		
		Argile rouge	Argile grise	Argile jaune
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20,0	49,0	34,0
Dolomie	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,0	1,0	11,0
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	-	-	21,0
Kaolinite	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH)	18,0	17,0	8,0
Chlorite	Al <sub>4</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Si <sub>3</sub>	8,0	2,0	-
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	29,0	13,0	17,0
Feldspath (Na,Ca)	Na (AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	11,0	7,0	4,0
Rutile	TiO <sub>2</sub>	1,0	1,0	-
Feldspath K	K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	5,0	4,0	-
Autres: minéraux ferrugineux	Fond RX	7,0	6,0	5,0

## 5.2.Analyse chimique

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

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

**Tableau [IV.11] :** Résultats d'analyses chimiques des trois types d'argiles (d'après Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction de Boumèrdes)

Désignation 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>	CaO	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	2,05	0,03	4,29	1,33	0,14	1,19	5,59
Argile grise	68,72	14,29	6,43	0,44	0,8	0,01	2,24	0,8	0,11	1,02	5,14
Argile jaune	45,4	10,61	5,25	16,14	1,98	0,06	2,05	0,52	0,12	0,57	17,31

### 5.3 Analyse des résultats

L'échantillon de couleur rouge est une argile qui contient 20 % de Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et 71% de fraction argileuse (Kaolinite 18%, chlorite 8%, Muscovite 29%, feldspath (NaCa) 11% et feldspath k 5%).

L'échantillon de couleur grise est une argile composée de 49% de Quartz et de 43% de fraction argileuse (Kaolinite 17%, Chlorite 2%, Muscovite 13%, Feldspath NaCa 7%, Feldspath K 4%)

L'échantillon de couleur jaune est constituée essentiellement de carbonates (calcaire, dolomie) 34% de quartz et de minéraux argileux (muscovite, kaolinite, feldspaths et chlorite) à un taux de 29% ainsi qu'une faible teneur en chlorite.

## 6. Identifications des stabilisants

### 6.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland artificiel de classe 325, sa composition chimique est la suivante :

**Tableau [IV.12] :** Composition chimique du ciment CPA

Eléments	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$
%	21	5,3	3,3	65,6	1,1	2,7

### 6.2. 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 que ceux obtenus sans ajout de chaux. Les caractéristiques physico-chimiques de la chaux vive utilisée sont données dans le tableau suivant :

**Tableau [IV.13] : caractéristiques de la chaux (Bellouattar 1988)**

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

### 6.3.Sable

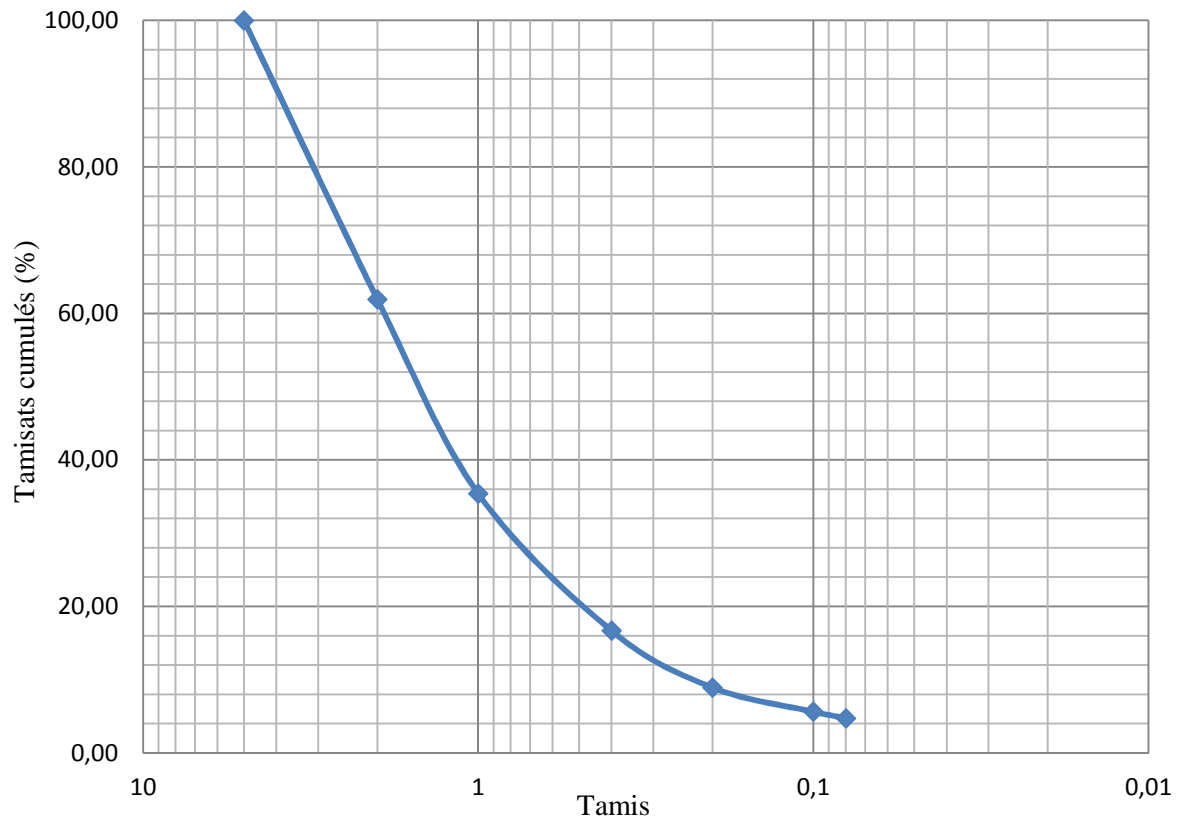
Le sable utilisé provient de la carrière. Le résultat de l'analyse granulométrique est donné dans le tableau [14], et sa courbe granulométrique est représentée dans la figure IV.9

**Tableau [IV.14] : Analyse granulométrique du sable**

Tamis (mm)	refus (g)	refus (%)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât cumulé
5	0,00	0,00	0	-	100,00
2	380,60	38,06	380,60	38,06	61,94
1	265,49	26,55	646,09	64,61	35,39
0,4	187,01	18,70	833,10	83,31	16,69
0,2	77,69	7,77	910,79	91,08	8,92
0,1	32,95	3,30	943,74	94,37	5,63
0,08	8,98	0,90	952,72	95,27	4,73
fond	42,79	4,28	995,51	99,55	0,45

La classification de ce sol est faite selon la méthode du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC). Le tamisât au diamètre de 80µm est égal à 4,73%, c'est un sol grossier puisqu'il contient 95,27% de grosses particules, il peut être soit du sable soit du gravier.

Le tamisât au diamètre de 2 mm est de 61,94% il contient 38,06% de grosses particules donc c'est un sable. La teneur en fines est égale à 4,73%, elle est inférieure à 5%. C'est un sable propre.



**Figure IV.9:** courbe granulométrique du sable

Afin de connaître l'étalement granulométrique de la fraction étudiée et pouvoir la classer, deux paramètres sont utilisés (F.Schlosser, 1997) : Le paramètre de forme de la courbe, appelé coefficient d'uniformité ( $C_u$ ), dit coefficient de Hazen, donné par la relation :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{I. II}$$

$C_u > 2 \rightarrow$  la granulométrie est dite étalée

$C_u < 2 \rightarrow$  la granulométrie est dite étroite ou serrée

Le paramètre de courbure, appelé coefficient de courbure ( $C_c$ ), donné par la relation :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}} \quad \text{II}$$

Un sable est bien gradué si  $C_c$  est compris entre 1 et 3 et  $C_u$  est supérieur à 6

$D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$  représentent les diamètres correspondant respectivement à 10, 30 et 60 % du tamisât cumulé.

Ces coefficients sont donc calculés à partir de la courbe granulométrique.

$$C_u = \frac{1.9}{0.21} = 9,05$$

$$C_c = \frac{(0.8)^2}{1.9*0.21} = 1,60$$

On peut conclure que le sable étudié a une granulométrie étalée et bien graduée.

## 7. Conclusion

Les essais d'identification, sont simples et peu coûteux. Il faut les multiplier tant sur les chantiers que dans les laboratoires afin de se rendre compte de l'état d'homogénéité ou d'hétérogénéité du sol. Les essais d'identification permettent de classer les sols, de les reconnaître, d'avoir une bonne idée de leur comportement.

Pour la courbe granulométrique, le tamisage et la sédimentométrie nous fournissent la répartition des fractions de sol selon le diamètre des grains.

Les tests d'Atterberg, faciles à effectuer, permettent de calculer des limites de plasticité et de liquidité assez précises, et très importantes pour la détermination du type de sol. Ces deux éléments sont largement suffisants, pour classer ces différents sols.

- L'argile rouge et l'argile jaune sont des argiles limoneuses légèrement sableuses peu plastiques, et ont une densité moyenne.
- L'argile grise est une argile limoneuse qui contient de sable et de gravier, et a une densité élevée.
- Le sable utilisé est un sable propre bien gradué et à granulométrie étalée.

L'analyse granulométrique a montré un pourcentage de très fines particules (inférieures à 0,0014 mm) particulièrement élevées 21,1%, il est moyen pour l'argile jaune 15,60%, il est faible pour l'argile grise 11,66%.

Il est connu que plus un sol est très fin, plus la quantité d'eau absorbée est élevée et a un comportement néfaste à l'eau



**CHAPITRE V**

**Etude de retrait**

## 1. INTRODUCTION

Le séchage d'un sol riche en argile provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait, se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition de fissures et microfissures d'où une diminution aussi de la résistance et de la durabilité. En effet, les fissures que l'on observe à la surface d'un sol ayant subi des cycles de dessiccation et d'humidification sont dues en général à la fois au retrait et au gonflement.

Dans ce chapitre on 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 volume en renforçant le squelette inerte par des stabilisants.

Pour bien cerner le phénomène du retrait on a mené une étude portant sur deux séries d'éprouvettes :

Dans la première série les éprouvettes sont confectionnées à base de trois types d'argiles brutes (argile rouge, argile jaune et une argile grise) dans lesquelles nous avons varié les teneurs en eau de façonnage, pour étudier l'effet de la teneur en eau sur le retrait.

Dans la deuxième série les éprouvettes confectionnées à base d'argile jaune stabilisées avec trois types de stabilisant.

- Epreuves confectionnées à base d'argile jaune stabilisée à différents teneurs en ciment, à une teneur en eau de saturation, pour tester l'effet du traitement au ciment sur le retrait.
- Epreuves confectionnées à base d'argile jaune stabilisée avec la chaux, à une teneur en eau de saturation, pour tester l'effet du traitement à la chaux sur le retrait.
- Epreuves confectionnées à base d'argile jaune stabilisée avec du sable, à une teneur en eau de saturation, pour tester l'effet du traitement au sable sur le retrait.

## 2. Effet du retrait au séchage

Le séchage d'un sol fin dans l'air s'accompagne d'une variation de teneur en eau qui engendre une diminution de son volume apparent en l'absence de toute force extérieure : c'est le retrait. Celui-ci sera d'autant plus important que les particules ont été initialement plus éloignées les unes des autres. Cela explique que pour une argile donnée, plus le pourcentage d'eau contenu dans la pâte est élevé au moment du façonnage plus le retrait de séchage est élevé. De même, plus l'argile est fine, plus le tassement est important et plus le retrait est élevé. Mais si l'argile est grossière, le retrait sera plus faible (BEN AZZOUG, 2011).

## 2.1. Retrait linéaire

La valeur du retrait linéaire est un indicateur de l'importance du retrait volumique possible d'un sol lors de son assèchement. Initialement, le sol est saturé en eau, lorsque la teneur en eau diminue, son volume total diminue, puis se stabilise. Ce processus de diminution de la teneur en eau se traduit par deux phases successives. Lors de la première, les grains constituant le sol se rapprochent, mais le sol reste toujours saturé : la variation de volume du sol est donc proportionnelle à la diminution de la teneur en eau, cette phase correspond au retrait normal. Lors de la seconde, les grains sont en contact et ne peuvent plus se rapprocher, l'élimination de l'eau ne fait plus varier le volume du sol, mais se traduit par sa désaturation, donc cette zone correspond à l'absence du retrait (M.Saint, 2010).

**2.2. 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 (GHEDDACHE, 2012).

## 2.3. Courbe de bigot

Bigot a étudié la relation humidité-retrait d'une argile saturée qui est une des données importantes utilisées pour prévoir la facilité de séchage d'un sol argileux. En relevant périodiquement le poids et les dimensions d'un produit au cours de séchage, on peut calculer l'humidité et le retrait à différents moments de séchage. Dans la courbe de bigot, le point de référence est l'état sec pour faciliter la comparaison des courbes entre elles (BEN AZZOU, 2011).

## 3. Effet de la teneur en eau sur le retrait

### 3.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer quotidiennement des mesures de la hauteur et du poids des éprouvettes confectionnées à des teneurs en eau différentes pour tester l'influence de la teneur en eau de fabrication sur le retrait.

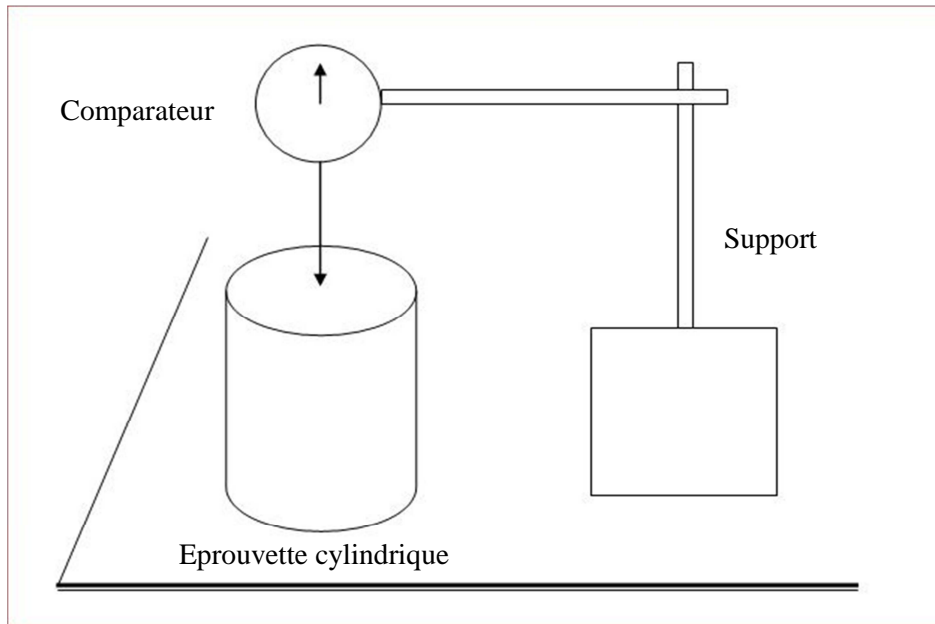
L'essai dure jusqu'à l'achèvement du retrait. Il est donné par l'expression :

$$\% \text{ de retrait} = \frac{\text{Longueur initial} - \text{Longueur final}}{\text{Longueur initial}} * 100$$

Il représente le rapport de la variation de la hauteur finale (lf) sur la hauteur initiale (li).

L'évolution de la hauteur des éprouvettes au cours du temps est suivie et décrite à l'aide d'un comparateur de précision de 1/100 millimètre.

La figure V.1, nous montre le dispositif expérimental de mesure du retrait.



**Figure V.1** : Dispositif expérimental de mesure du retrait.

### 3.2. Préparation des éprouvettes

Pour chaque type de sol (argile rouge, argile jaune et argile grise) on fabrique des éprouvettes à des teneurs en eau différentes, situées sur le versant mouillé de la courbe Proctor. Les éprouvettes sont faites à l'aide du moule Proctor normal, on les compacte suivant le mode de compactage utilisé pour l'essai Proctor. 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.

#### Nomenclature

- A R15 : Éprouvette d'argile rouge compactée avec 15% d'eau
- A R17 : Argile rouge à 17% d'eau
- AR20 : Argile rouge à 20% d'eau
- AR25 : Argile rouge à 25% d'eau
- A J15 : Argile jaune à 15% d'eau
- A J17 : Argile jaune à 17% d'eau
- AJ20 : Argile jaune à 20% d'eau
- AJ25 : Argile jaune à 25% d'eau
- A G6 : Argile grise à 6% d'eau
- AG8 : Argile grise à 8% d'eau

- AG9 : Argile grise à 9% d'eau
- AG10 : Argile grise à 10% d'eau

### **3.3. Présentation, analyse et discussion des résultats.**

#### **3.3.1. Evolution de la longueur en fonction du temps**

Les résultats des essais de retrait réalisés sur les trois types d'argiles brutes pour différentes teneurs en eau sont donnés sur les courbes de variation de la longueur en fonction du temps et sous forme de tableau en annexe.

L'analyse des résultats obtenus permet de faire les observations suivantes :

- Le diagramme de la variation de la longueur en fonction du temps est d'abord très concave, puis se redresse progressivement avec le temps et cette concavité est d'autant plus forte que la teneur en eau de fabrication est élevée.
- Plus la teneur en eau de fabrication est élevée plus la diminution de la longueur est importante, les grandes variations de la longueur sont observées durant les premiers jours suivant la confection 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 15% d'eau, on observe un raccourcissement important dans les 7 premiers jours (Figure V.2a). En augmentant la teneur en eau à 17%, on constate que le raccourcissement de la longueur de AR17 est plus important que celui de AR15 (Figure V.2b) et en la portant à 20%, la variation de la longueur de AR20 excède celle de AR15 et AR17, la courbe de AR15 tend à s'aplatir (figure V.2c).

Sur la figure V.2d, le sol compacté avec 25% d'eau a un raccourcissement excessif devant celui de AR15, AR17 et AR20.

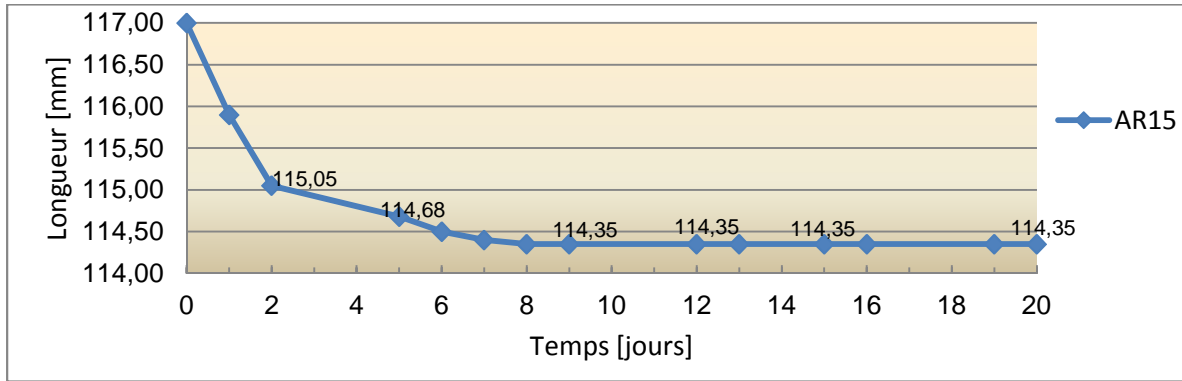


Figure V.2a : Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile rouge confectionnée à 15 % d'eau

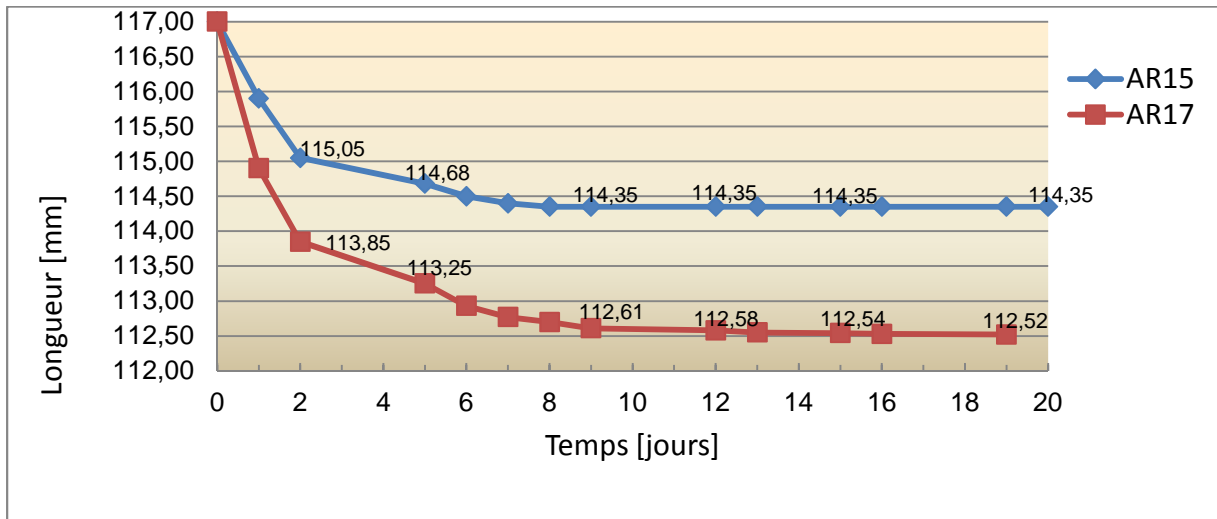


Figure V.2b : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile rouge confectionnées à 15 % et à 17 % d'eau

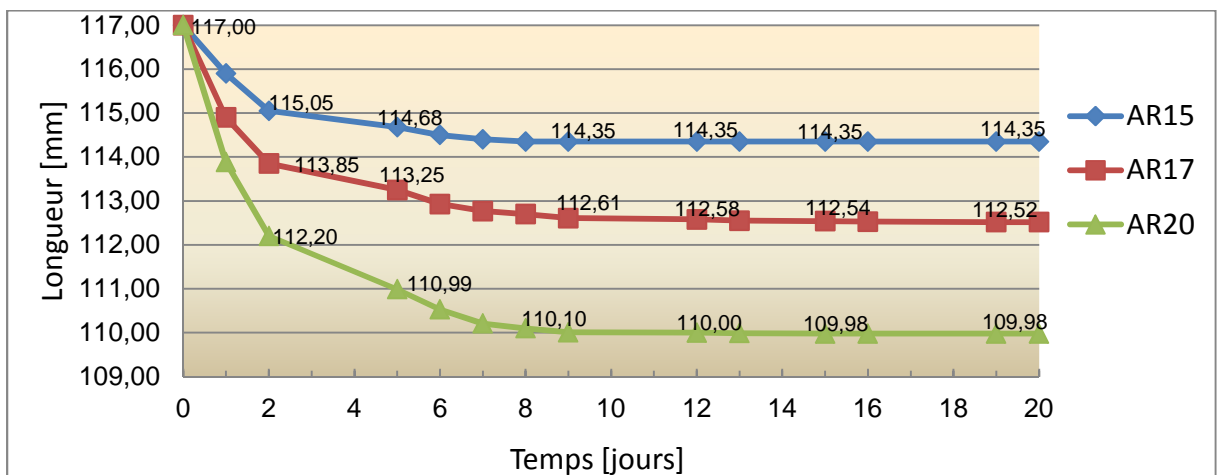
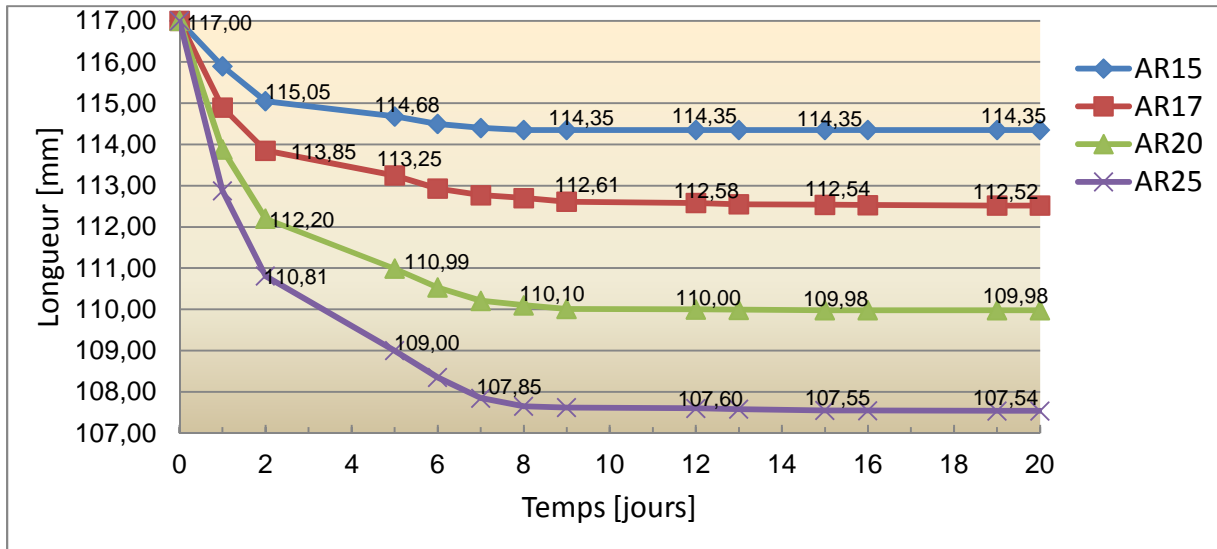


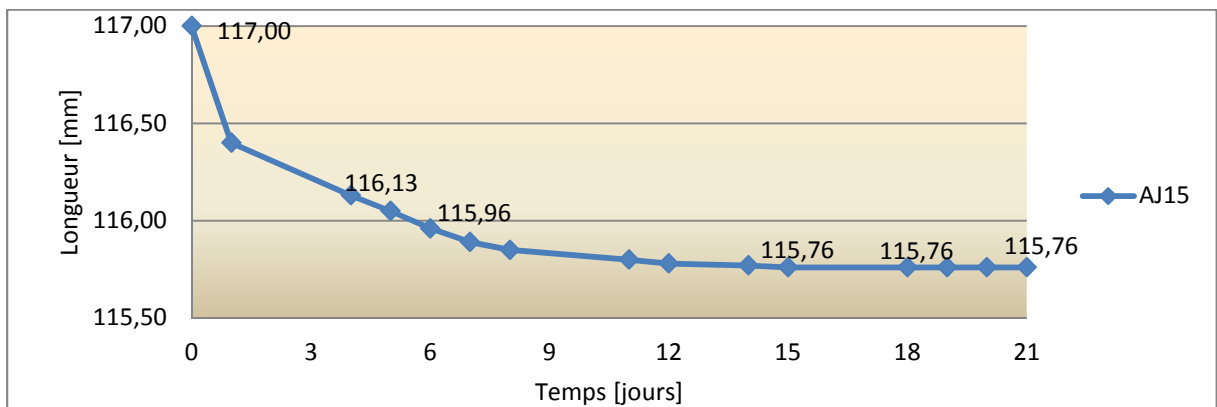
Figure V.2c : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile rouge AR15, AR17 et AR20



**Figure V.2d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile rouge AR15, AR17, AR20 et AR25

### Argile jaune

On remarque sur la figure V.3a, comme sur la figure V.3b que le raccourcissement de la longueur du sol AJ15, est moins important que celui de AJ17, et le raccourcissement de la longueur de AJ17 est moins important que celui de AJ20, et la concavité de la courbe de AJ25 outrepassse celle de R15, AR17 et AR20.



**Figure V.3a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile jaune confectionnée à 15 % d'eau

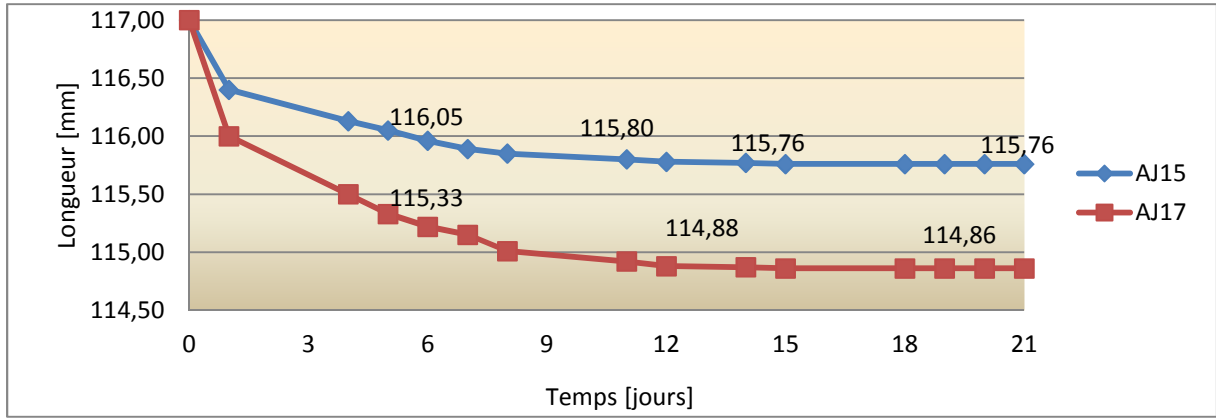


Figure V.3b : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnées à 15 % et 17 % d'eau

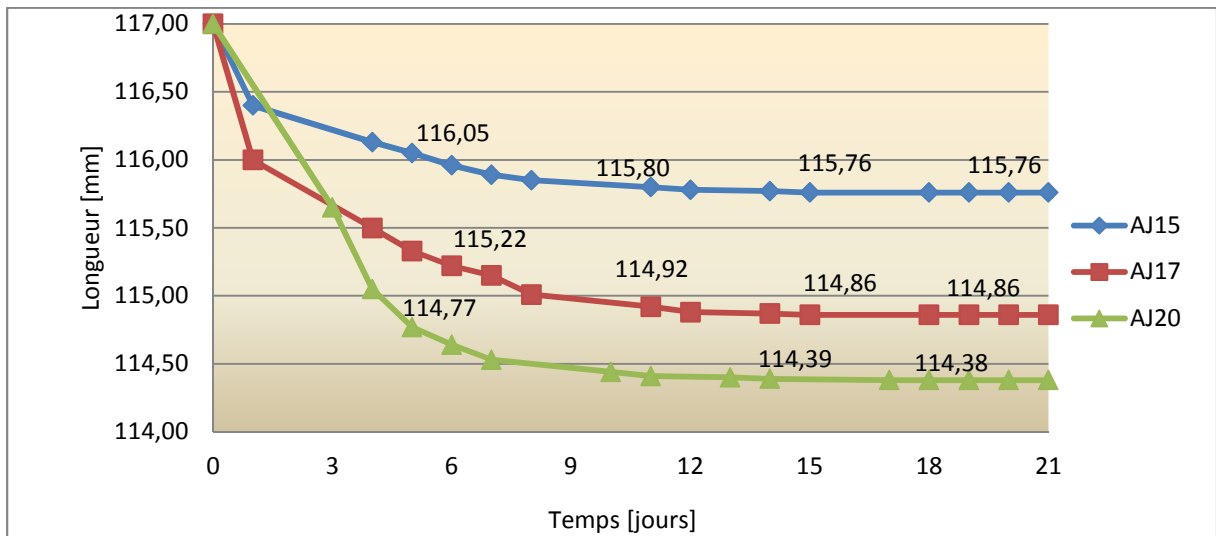


Figure V.3c : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnées à 15 %, 17 % et 20 % d'eau

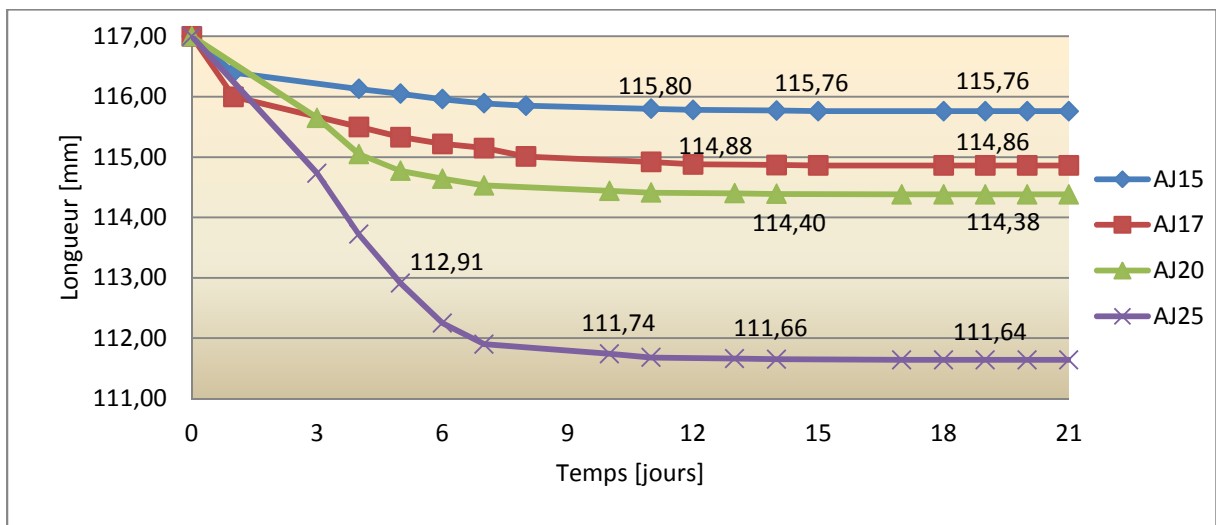
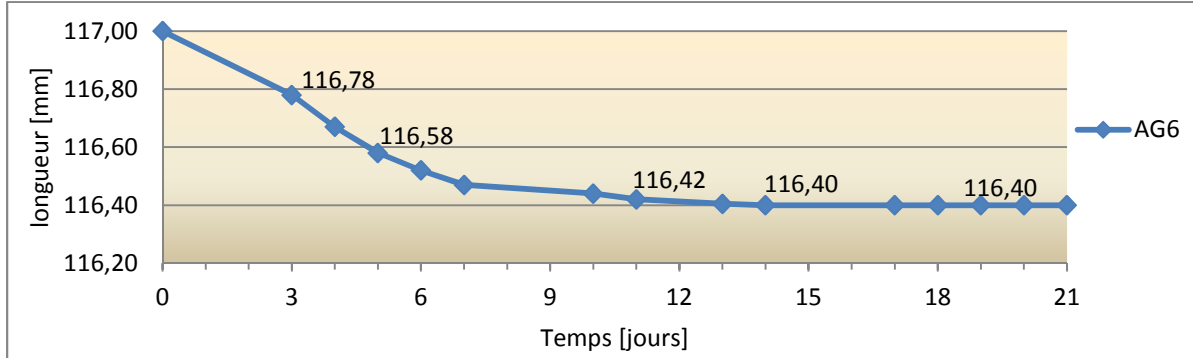


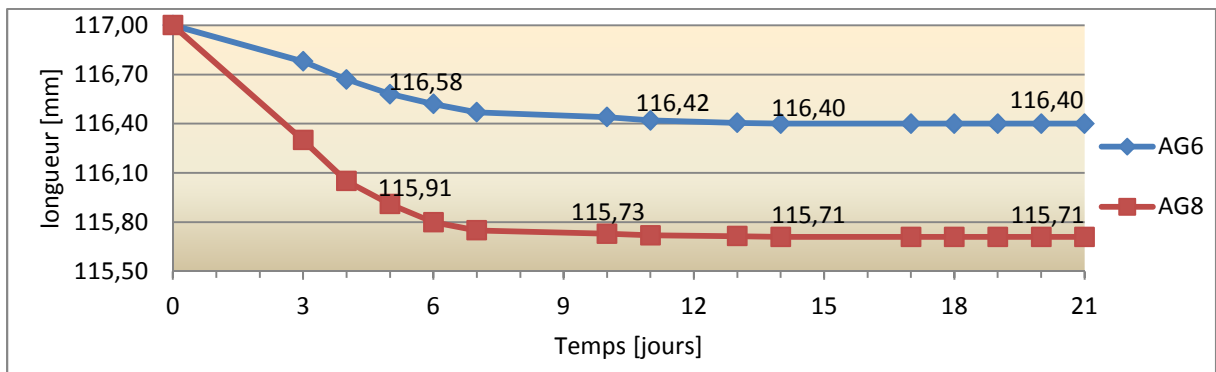
Figure V.3d : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile jaune confectionnées à 15 %, 17 %, 20 % et 25 % d'eau

**Argile grise**

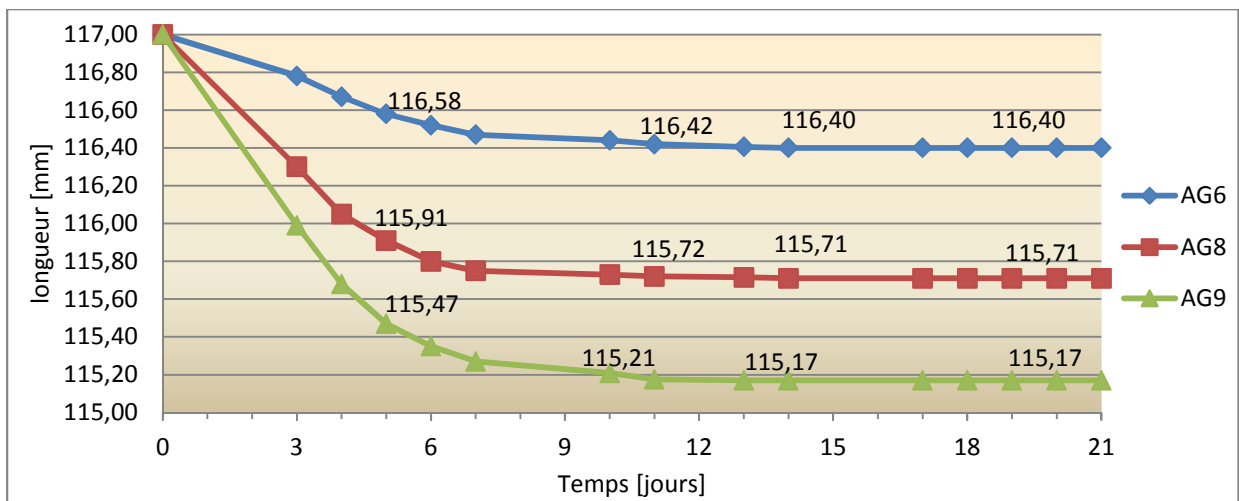
On remarque sur les figures V.4a, comme sur les figures V.4b et V.4c et V.4d que le raccourcissement de longueur des éprouvettes d'argile grise croit avec l'élévation de la teneur en eau de fabrication



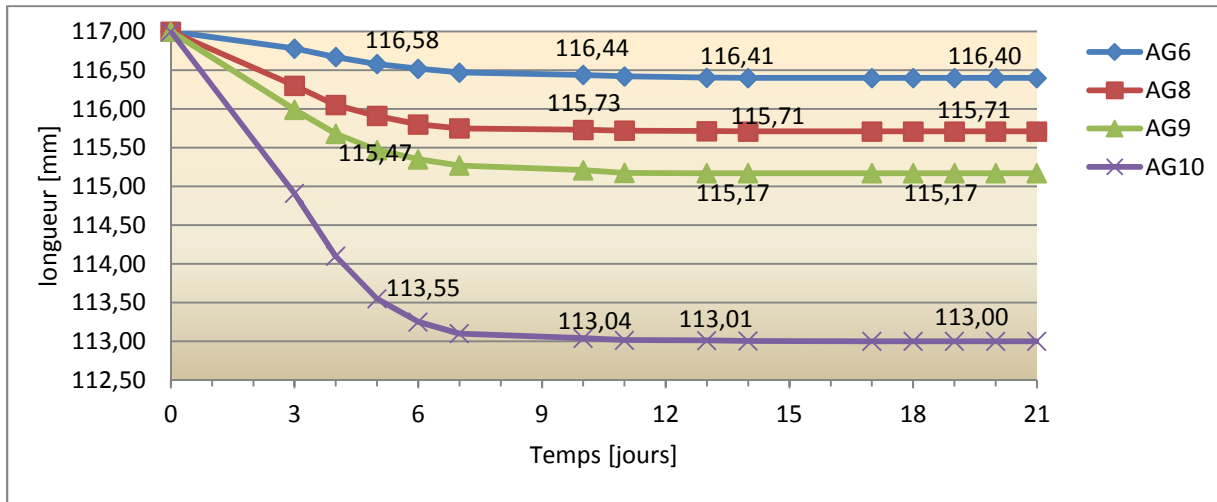
**Figure V.4a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvette d'argile grise confectionnée à 6 % d'eau



**Figure V.4b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 6 % et 8 % d'eau



**Figure V.4c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 6 %, 8 % et 9 % d'eau



**Figure V.4d** : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes d'argile grise confectionnées à 6 %, 8 %, 9 % et 10 % d'eau

### 3.3.2. Variation de l'humidité en fonction du retrait

Les figures V.5a, V.5b et V.5c et V.5d qui suivent, sont tracées à partir du tableau en annexe  $w = f(\text{retrait})$ . Elles représentent la variation de l'humidité en fonction du retrait des trois sols étudiés, et elles montrent que :

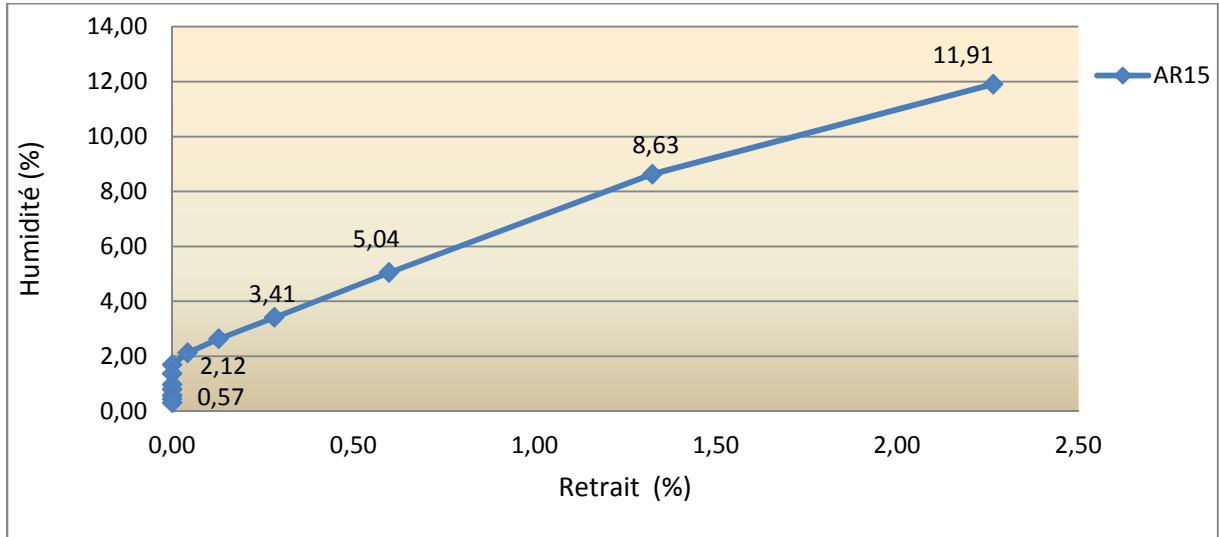
Le retrait varie en fonction de la teneur en eau de compactage. Lorsque la teneur en eau de compactage est très élevée le retrait augmente et lorsque la teneur en eau de compactage se rapproche de l'optimum, le retrait diminue, alors le retrait évolue avec la densité sèche, quand le sol est dense le retrait sera très faible et quand le sol est poreux le retrait sera plus important.

On observe aussi clairement les deux principales phases du retrait : retrait normal et l'absence de retrait.

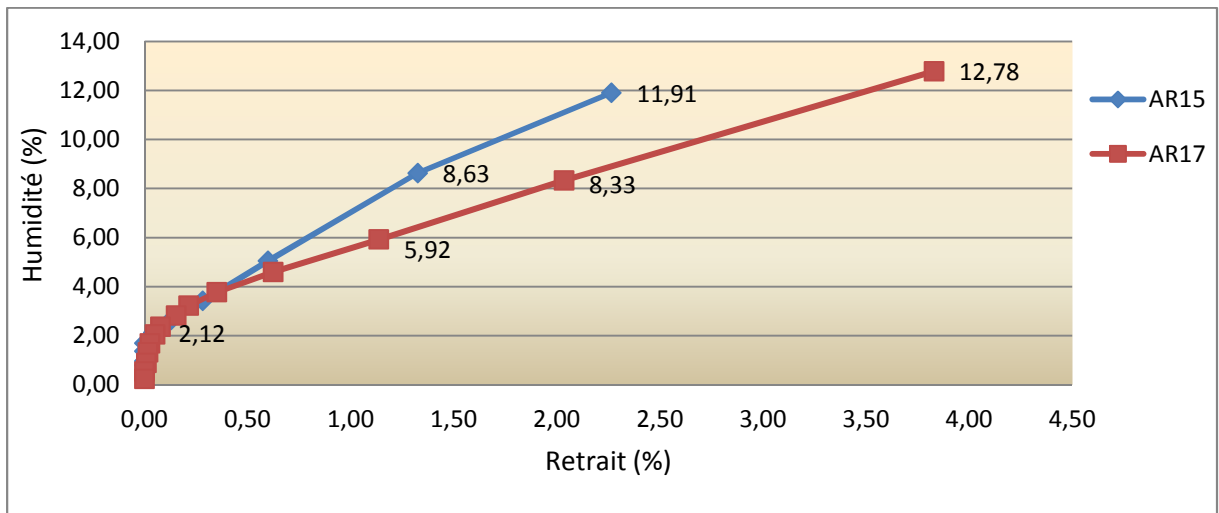
- **Retrait normal** : Cette phase est caractérisée par une portion de droite rectiligne et inclinée représentant la phase pendant laquelle l'humidité varie linéairement en fonction de retrait. Cette humidité correspond à une teneur en eau de saturation car quand le volume de l'éprouvette varie cette dernière reste toujours saturée tant que cette teneur en eau est supérieure à la limite de retrait.
- **Absence du retrait** : Dans l'autre portion de droite, parallèle à l'axe vertical portant l'humidité on constate que dans cette phase, l'humidité de l'éprouvette diminue et le retrait reste constant.

**Argile rouge**

La zone de retrait normal de AR15 est inférieure à celle de AR17 et sa zone de retrait nul aussi (figure V.5b), et La zone de retrait normal de AR20 est plus importante que celle de AR17, et celle de AR15. La zone de retrait normal de AR25 est la plus importante que les autres éprouvettes, donc l'étendue de la zone de retrait normal dépend de l'humidité initiale du sol.



**Figure V.5a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AR15



**Figure V.5b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15 et AR17

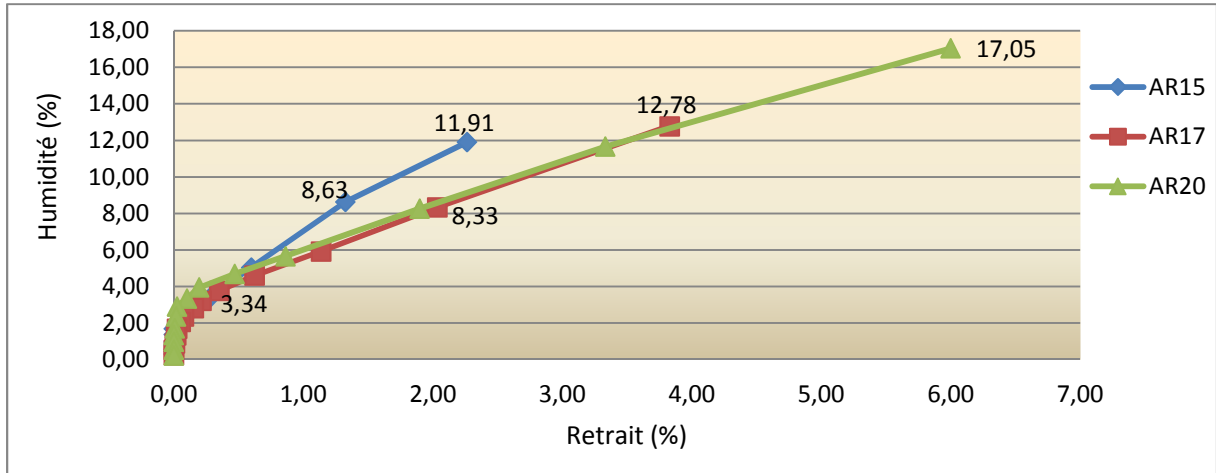


Figure V.5c : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15, AR17 et AR20

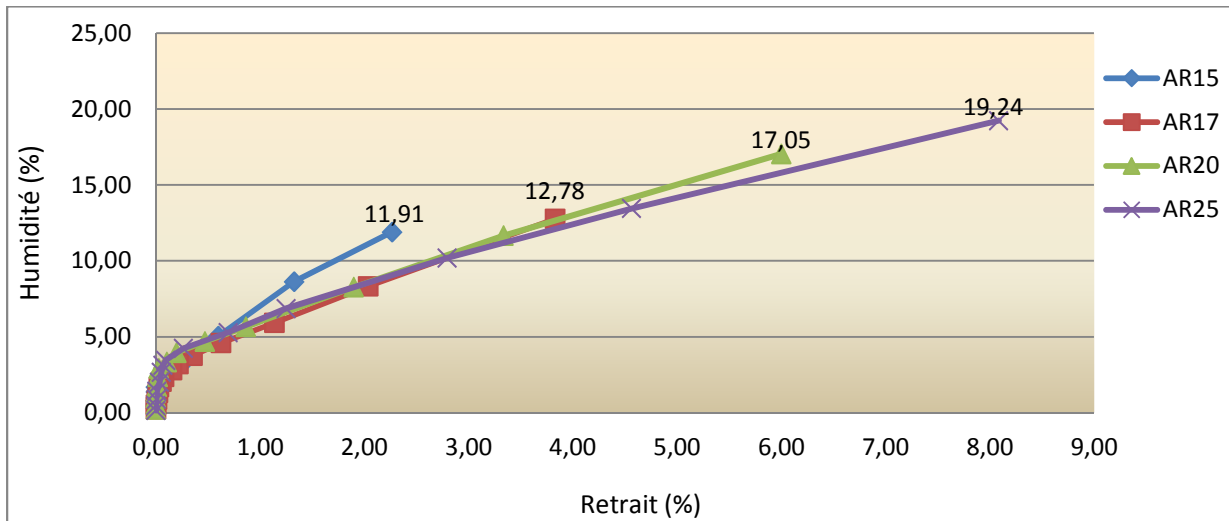


Figure V.5d : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AR15, AR17, AR20 et AR25

### Détermination de la limite de retrait de l'argile rouge

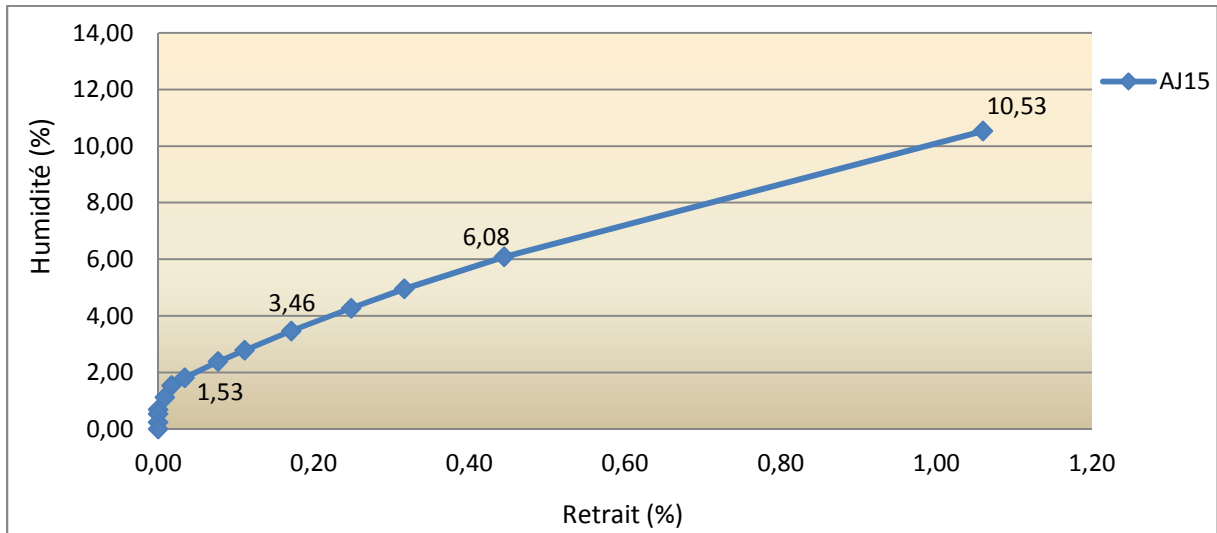
L'intersection de la droite représentant le retrait normal avec l'axe portant l'humidité (absence de retrait) donne la limite de retrait effective. Cette limite augmente avec la croissance de la teneur en eau de façonnage des éprouvettes. Les valeurs des limites de retrait obtenues pour les différents échantillons d'argile rouge sont données dans le tableau V.1 suivant :

Tableau V.1 : Limites de retrait effectives de l'argile rouge

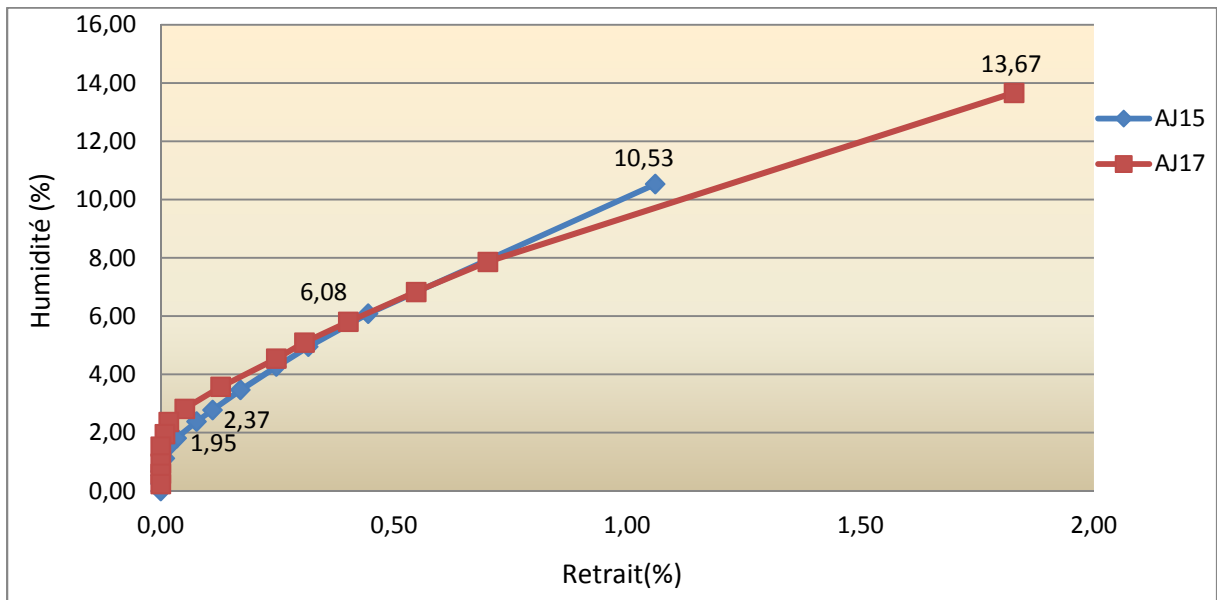
Eprouvette	AR15	AR17	AR20	AR25
Limite de retrait effective $w_{re}$ (%)	1.8 %	2.5 %	3.5 %	4%

**Argile jaune :**

Sur la figure V.6a, nous observons une zone de retrait normal large devant celle de retrait nul. Sur les figures V.6b, V.6c, V.6d, on remarque que la zone de retrait normal est d'autant plus importante que la teneur en eau de compactage plus élevée, et la zone de retrait nul aussi s'élargit avec l'augmentation de la teneur en eau de façonnage.



**Figure V.6a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AJ15



**Figure V.6b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15 et AJ17

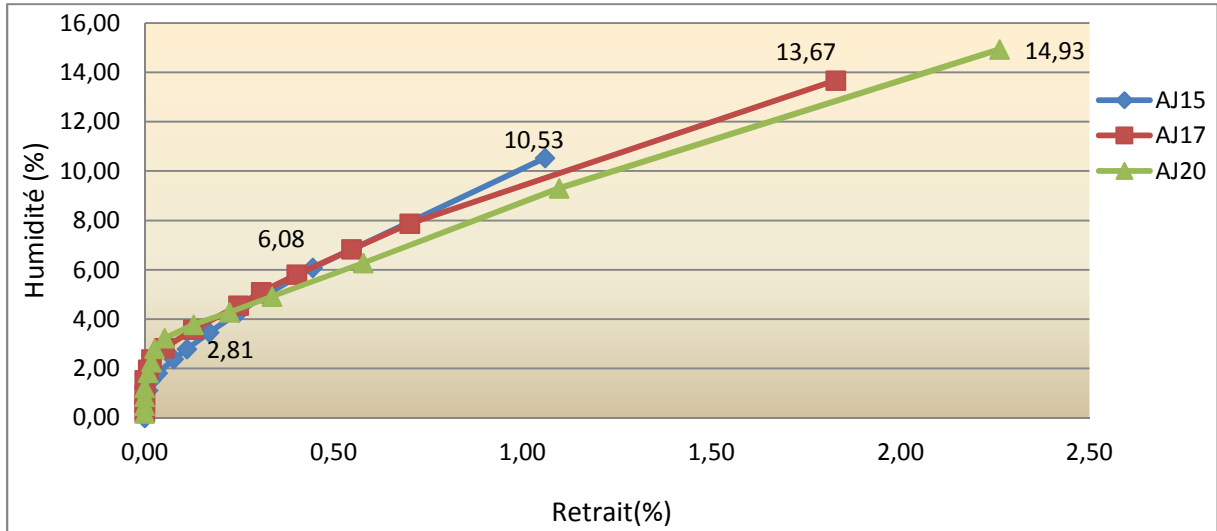


Figure V.6c : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15, AJ17 et AJ20

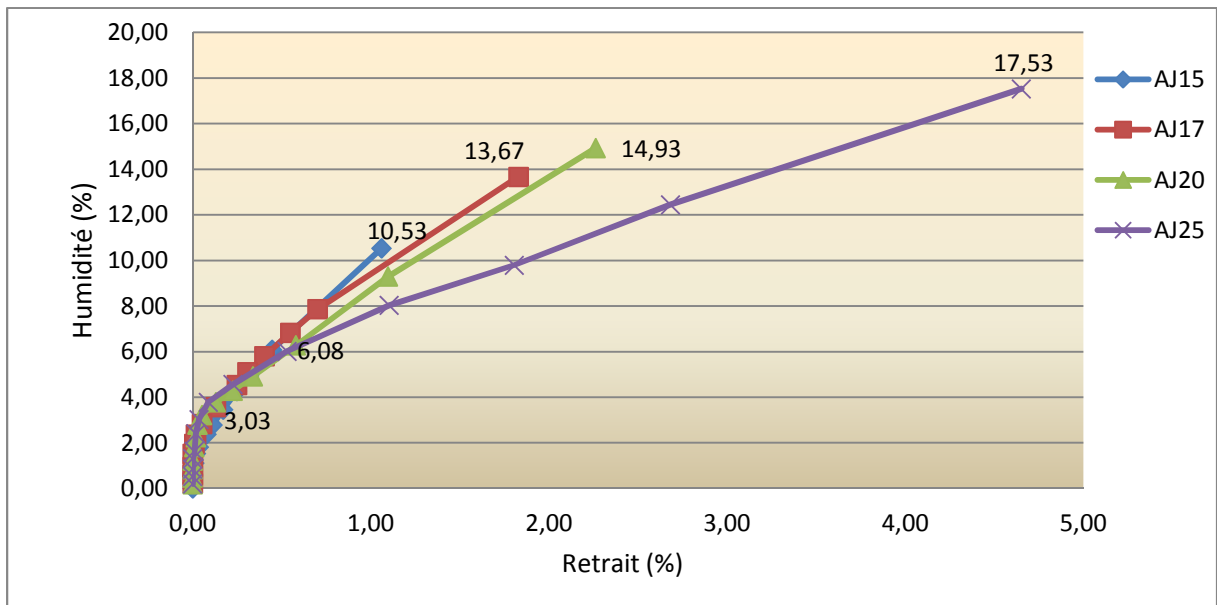


Figure V.6d : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AJ15, AJ17, AJ20 et AJ25

### Détermination de la limite de retrait de l'argile jaune

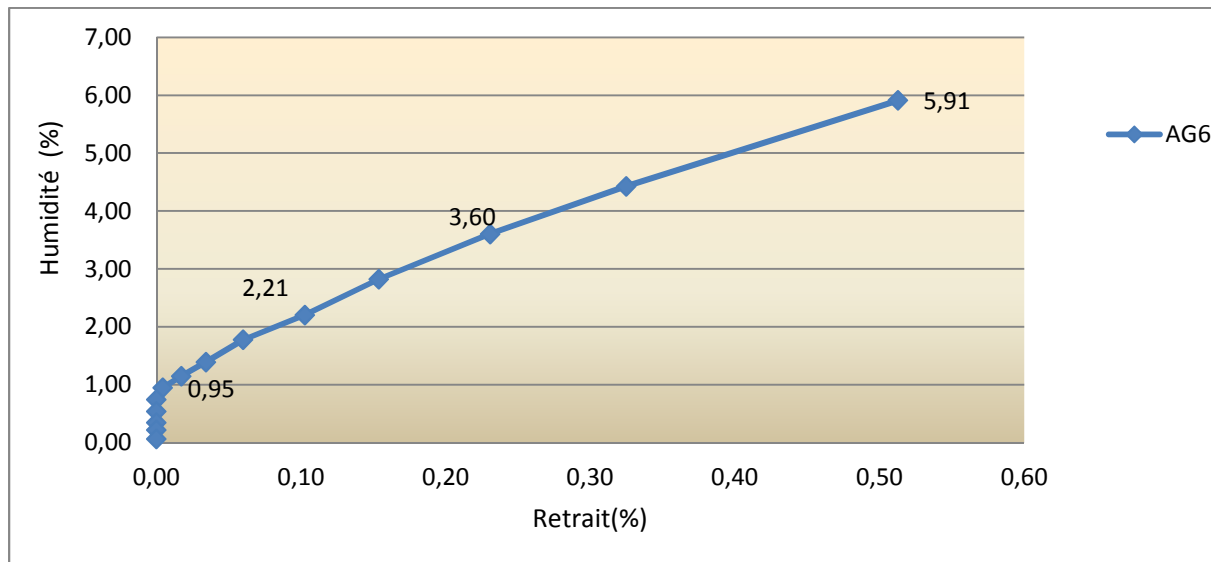
La limite du retrait effective de l'argile jaune augmente avec la croissance de la teneur en eau de façonnage des éprouvettes de sol.

Tableau V.2 : Limites de retrait effectives de l'argile jaune

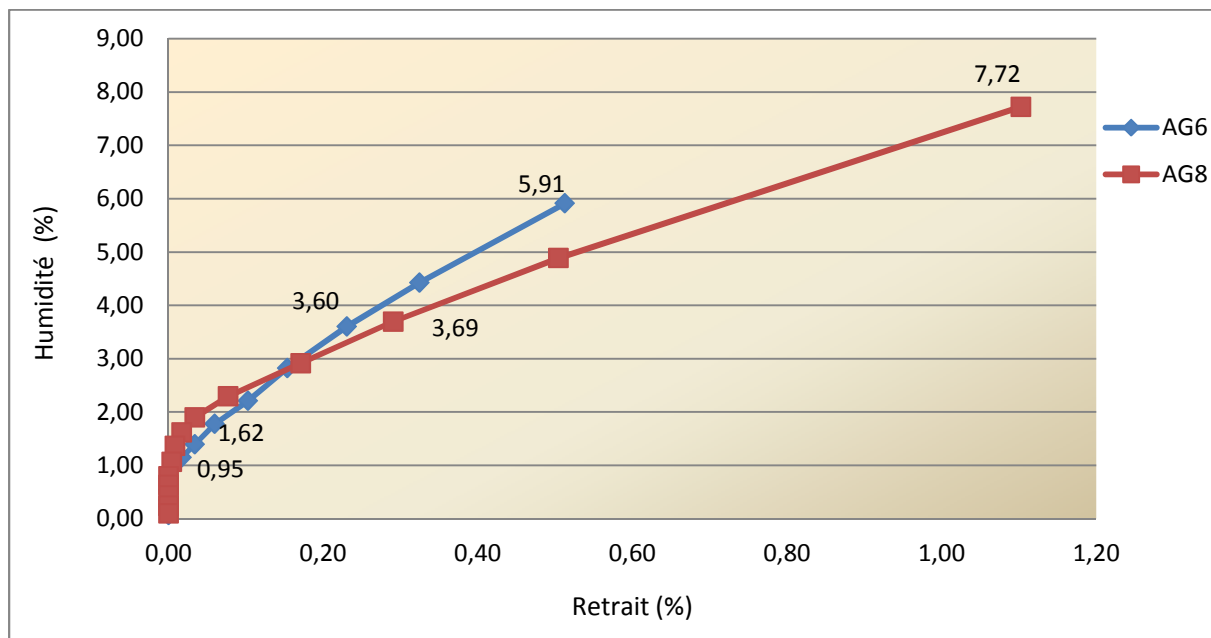
Eprouvette	AJ15	AJ17	AJ20	AJ25
Limite de retrait effective $w_{re}$ (%)	1.5 %	2.2 %	3%	3.6 %

**Argile grise :**

Sur les courbes de variation de l'humidité en fonction de retrait pour les éprouvettes d'argile grise, on tire les mêmes observations que sur les courbes des éprouvettes d'argile jaune et d'argile rouge, que les zones de retrait normal et de retrait nulle s'élargissent avec l'augmentation de la teneur en eau.



**Figure V.7a :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait d'éprouvette AG6



**Figure V.7b :** Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6 et AG8

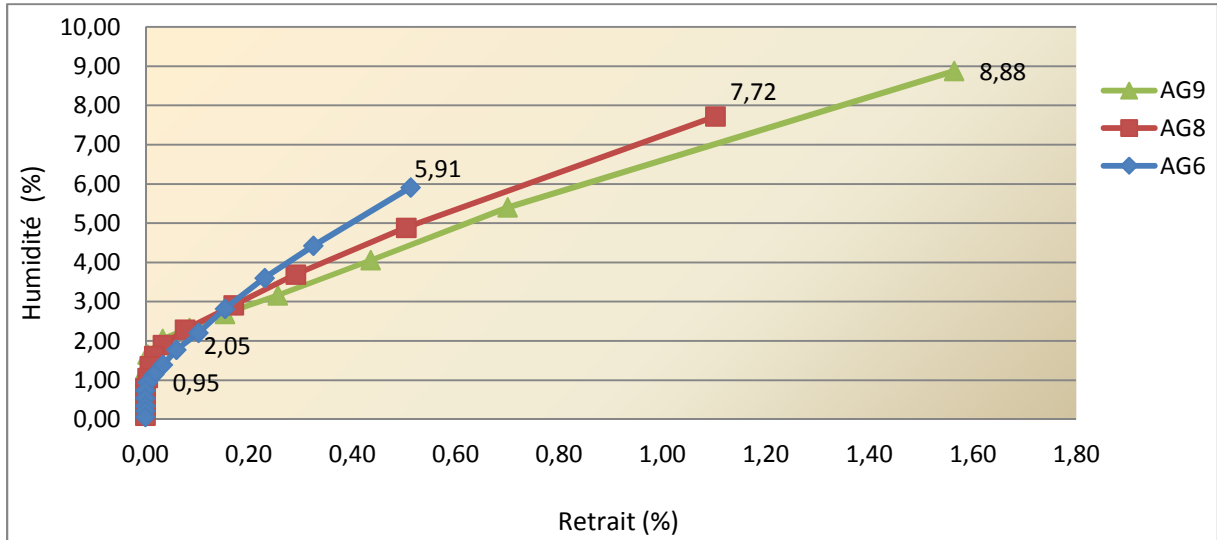


Figure V.7c : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6, AG8 et AG9

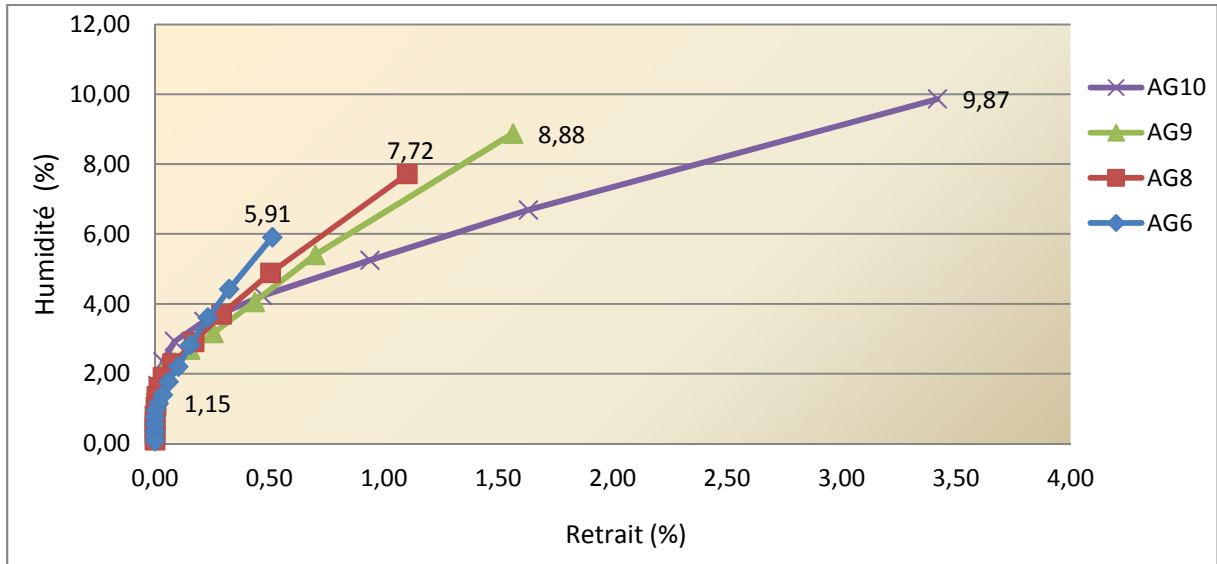


Figure V.7d : Evolution de l'humidité en fonction du retrait des éprouvettes AG6, AG8, AG9 et AG10

### Détermination de la limite de retrait de l'argile grise

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

Tableau V.3 : Limites de retrait effectives de l'argile grise

Eprouvette	AG6	AG8	AG9	AG10
Limite de retrait effective $w_{re}$ (%)	0.8 %	1.6 %	1.9 %	3%

### 3.3.3. Comparaison des résultats obtenus

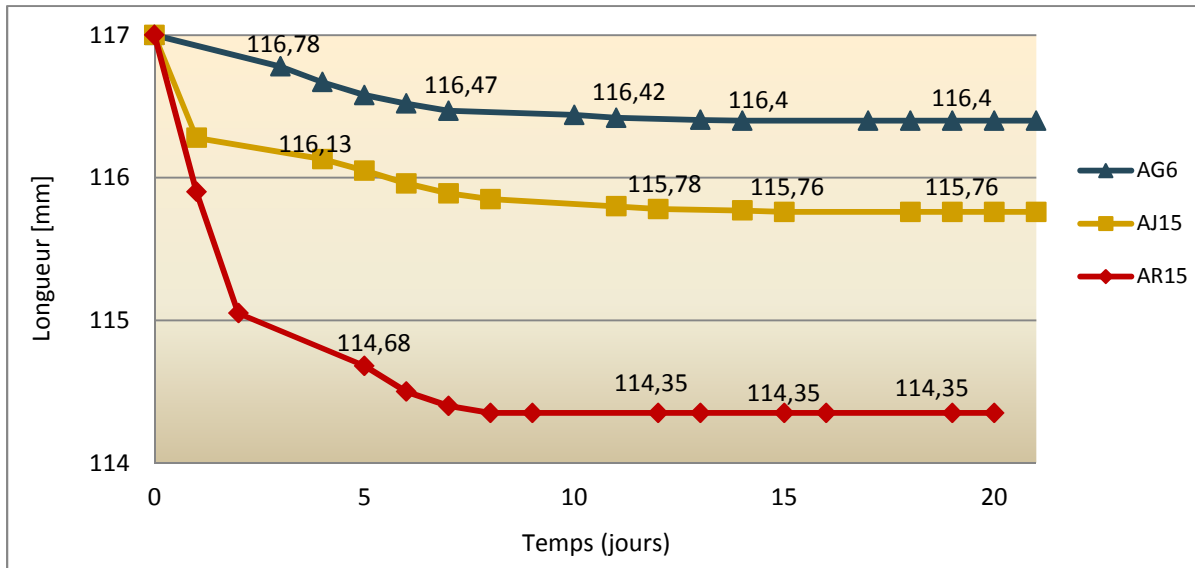
On fait la comparaison entre les trois types d'argiles sur les éprouvettes suivantes :

- Éprouvettes confectionnées à des teneurs en eau proches des optimums Proctor qui sont : AR15, AJ15 et AG6.
- Éprouvettes confectionnées à des teneurs en eau maximales, où elles maintiennent leur forme, qui sont : AR25, AJ25 et AG10.

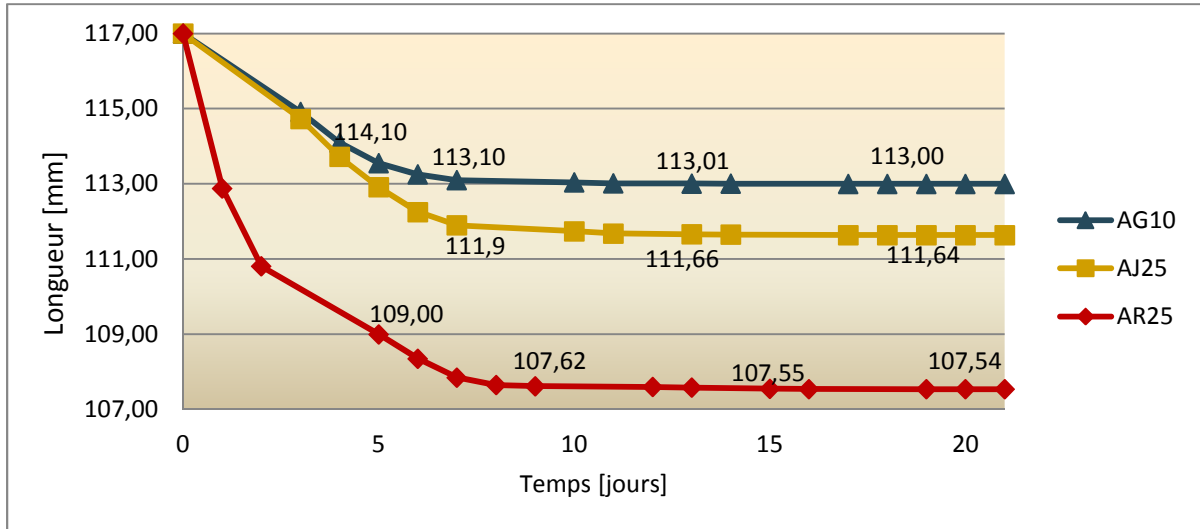
#### ➤ Variation de la longueur en fonction du temps

L'argile rouge présente un retrait plus important que les deux autres, et l'argile jaune a un retrait plus important que la grise.

- Sur la figure V.8 on remarque que les courbes de raccourcissement d'AG6 et AJ15 sont peu concaves devant celle d'AR15 qui est très concave, ce qui indique que l'argile grise et l'argile jaune ont un raccourcissement très faible devant l'argile rouge.
- Sur la figure V.9, la concavité des courbes est plus grande par rapport celle de la figure V.8, et le raccourcissement de AR25 est toujours la plus importante que celui de AJ25 et AG10



**Figure V.8:** Comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps d'AR15, AJ15 et AG6 pour des teneurs en eau optimales.

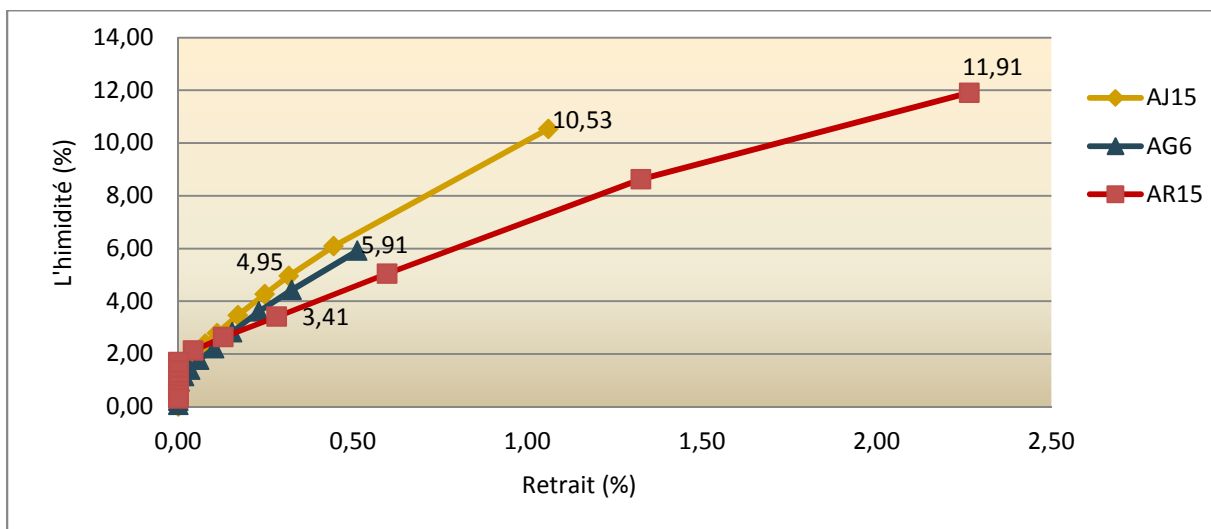


**Figure V.9:** comparaison de la variation de la longueur en fonction du temps d'AR25, AJ25 et AG10 pour des teneurs en eau de saturation

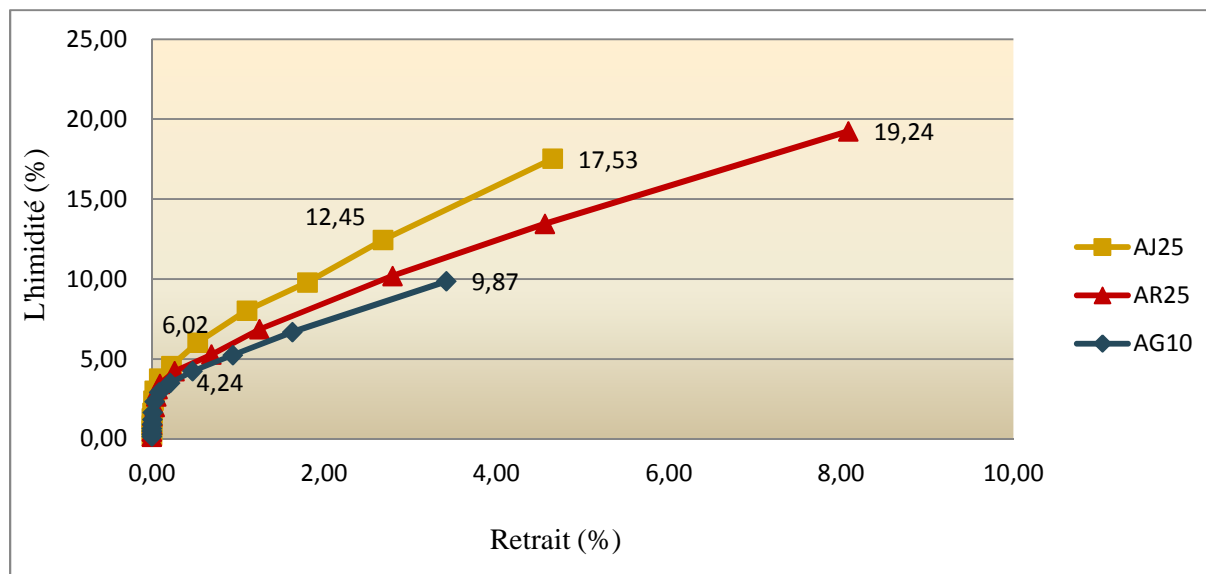
➤ **La variation de l'humidité en fonction du retrait**

Les limites de retrait des sols sont déduites des courbes de variation de l'humidité, en fonction du retrait on a : la limite de retrait de l'argile rouge est supérieure à celle de l'argile jaune qui, à son tour est supérieure à celle de l'argile grise. (Voir les tableaux V1, V2 et V3)

L'indice de plasticité qui est, la longueur du segment rectiligne, est plus grand pour l'argile rouge que pour l'argile jaune. L'argile grise présente un palie de plat plus petit que les deux autres, ce qui veut dire que son indice de plasticité est moins important (figure V.10 et V.11).



**Figure V.10:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction de retrait d'AR15, AJ15, AG6



**Figure V.11:** comparaison de la variation de l'humidité en fonction de retrait d'AR25, AJ25, AG10.

**Conclusion :** La teneur en eau de fabrication a un effet très important sur le retrait.

Pour lier à la fois la meilleure densité et le moindre retrait, le choix de la teneur en eau est déterminant.

Les retraits considérables sont obtenus dans les premiers jours de fabrication, pour les réduire à défaut de les éliminer il est nécessaire de protéger les échantillons du départ rapide de l'eau.

## 4. Stabilisation du retrait

Le retrait est la première cause de fissuration, la solution proposée pour le limiter, est d'utiliser des produits compensateurs de retrait. On a utilisé trois produits répandus : le ciment, la chaux et le sable, à différents dosages. L'objectif de cette étude est de comparer l'efficacité de chaque stabilisant.

### 4.1. Préparation des éprouvettes

Toutes les éprouvettes sont confectionnées à partir de l'argile jaune, de la même façon que le sol non stabilisé, en utilisant le même matériel (moule Proctor normal) et le même mode de compactage (dynamique). Les échantillons de sol sont fabriqués à la teneur en eau de saturation qui est de 25% de la masse du mélange (sol + stabilisant) sec. Les essais sont réalisés avec différents teneurs en stabilisant (5%, 10%, 15% et 20%). Nous avons fait les mêmes essais que celles du sol non stabilisé.

**Nomenclature :**

- JC5 : argile jaune stabilisée avec 5% du ciment.
- JC10 : argile jaune stabilisée avec 10% du ciment.
- JC15 : argile jaune stabilisée avec 15% du ciment.
- JC20 : argile jaune stabilisée avec 20% du ciment.
- JL5 : argile jaune stabilisée avec 5% de la chaux.
- JL10 : argile jaune stabilisée avec 10% de la chaux.
- JL15 : argile jaune stabilisée avec 15% de la chaux.
- JL20 : argile jaune stabilisée avec 20% de la chaux.
- JS5 : argile jaune stabilisée avec 5% du sable.
- JS10 : argile jaune stabilisée avec 10% du sable.
- JS15 : argile jaune stabilisée avec 15% du sable.
- JS20 : argile jaune stabilisée avec 20% du sable.

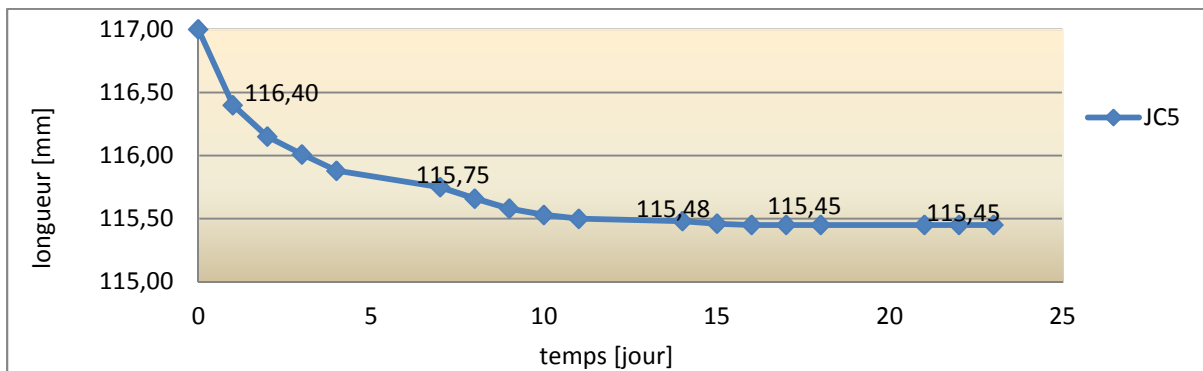
**4.2. Analyse et discussion des résultats obtenus**

**4.2.1. Stabilisation du retrait par le ciment**

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

Le retrait évolue avec le temps dans le sol stabilisé au ciment mais le taux de retrait varie d'un échantillon à un autre en fonction de la quantité de ciment ajouté. Plus le dosage en ciment est important plus la diminution de la longueur est plus faible, donc l'amplitude du raccourcissement de l'éprouvette est inversement proportionnelle au pourcentage ajouté de ciment.

Les courbes pour les petites quantités de ciment sont concaves, puis elles tendent à s'aplatir, donc le raccourcissement important se produit dans les dix premiers jours puis il devient lent.



**Figure V.12a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes d'argile jaune stabilisée avec 5% de ciment (JC5).

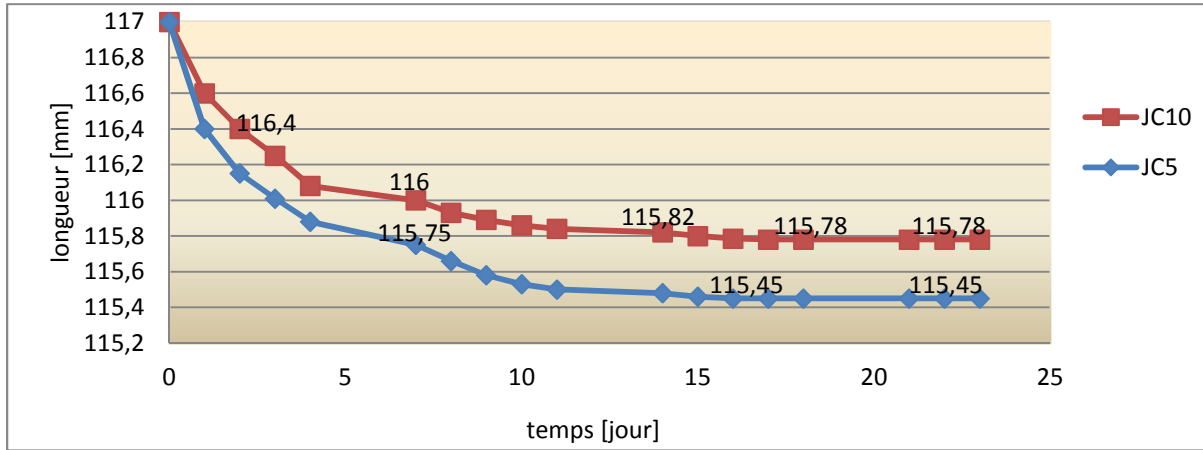


Figure V.12b : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de ciment.

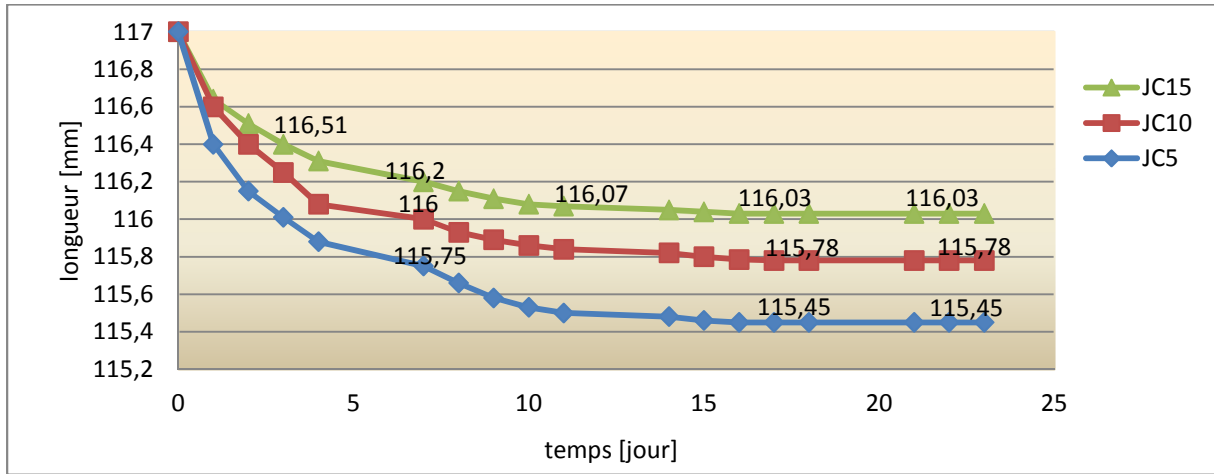


Figure V.12c : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de ciment.

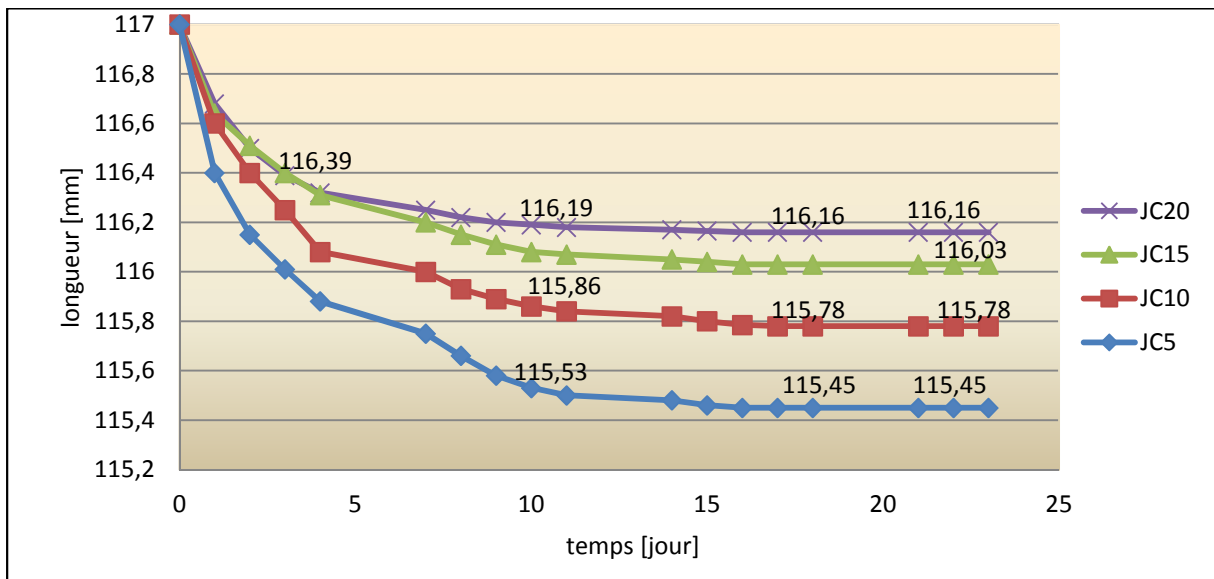


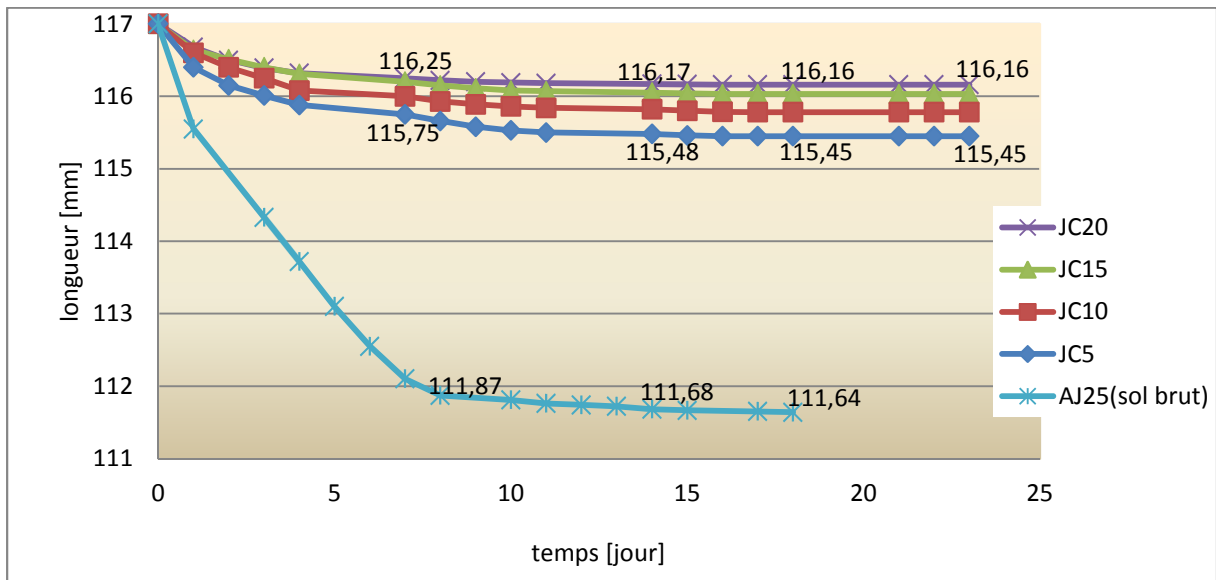
Figure V.12d : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de ciment.

➤ **Comparaison entre le matériau brut et le matériau stabilisé avec le ciment**

L'évolution du retrait en fonction du temps sont présentées sur la figure V.13, en comparaison entre les éprouvettes confectionnées avec l'argile jaune stabilisée avec le ciment et les éprouvettes confectionnées sans stabilisant et avec une teneur en eau de 25% (AJ25).

On remarque de la figure V.13, que :

Le raccourcissement s'est réduit avec le premier dosage en ciment 5%, de 72% par rapport au sol non traité. A chaque fois qu'on augmente le dosage du ciment, le raccourcissement devient moins important. Cela permet de dire que le ciment a rendu notre sol plus stable vis-à-vis du retrait.



**Figure V.13 :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées au ciment et d'éprouvette d'argile jaune brut (AJ25)

**4.2.2. Stabilisation du retrait par la chaux**

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

On remarque sur la figure V.14 que :

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

On note un retrait important aux premiers jours, ensuite il augmente très faiblement comme pour le matériau non traité.

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 chaux.

L'amplitude du retrait au bout du 20<sup>ème</sup> jour est de 2,02 mm, 1,18 mm et 0,54 mm respectivement pour une teneur en chaux de 5%, 10% et 15%.

A 20% de chaux, le raccourcissement diminue mais il est proche de celui de 15%, on peut dire qu'un pourcentage très élevé supérieure à 20 % ne donne pas un résultat très bon.

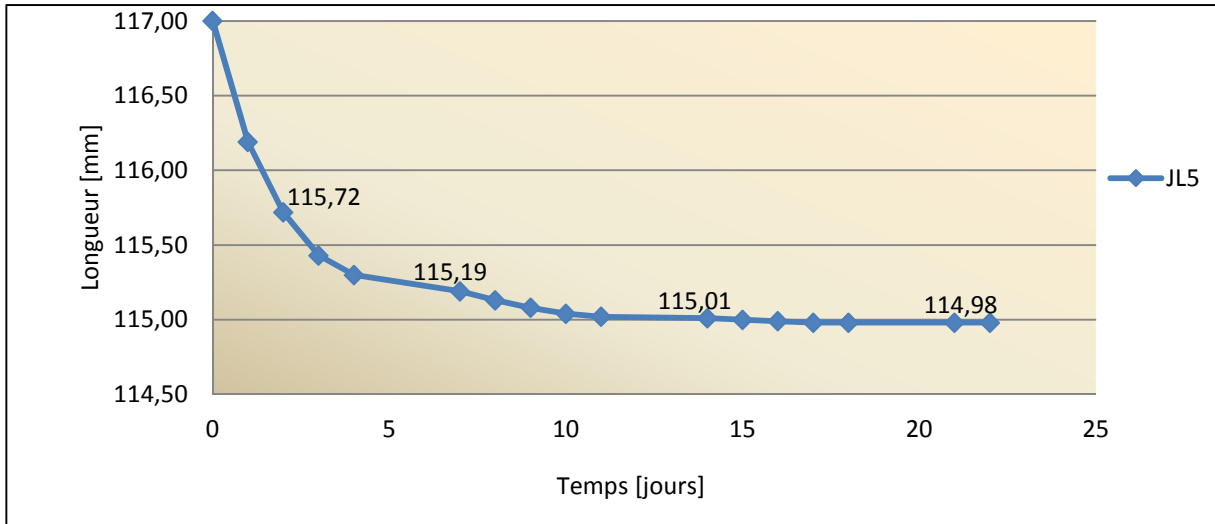


Figure V.14a : Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes stabilisée avec 5% de chaux

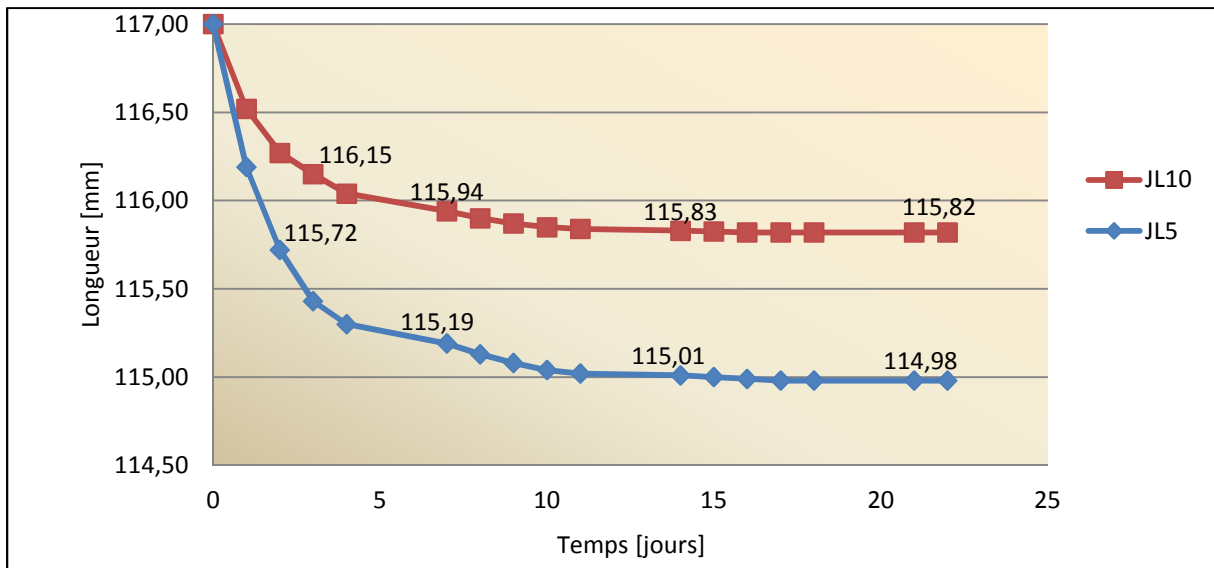


Figure V.14b : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de chaux.

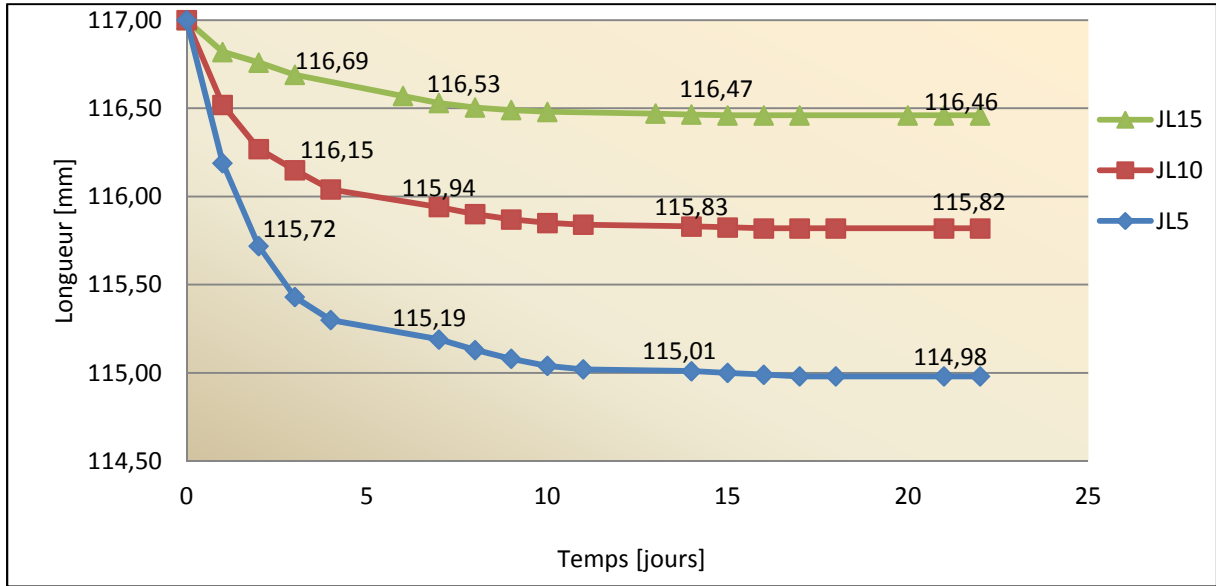


Figure V.14c : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de chaux.

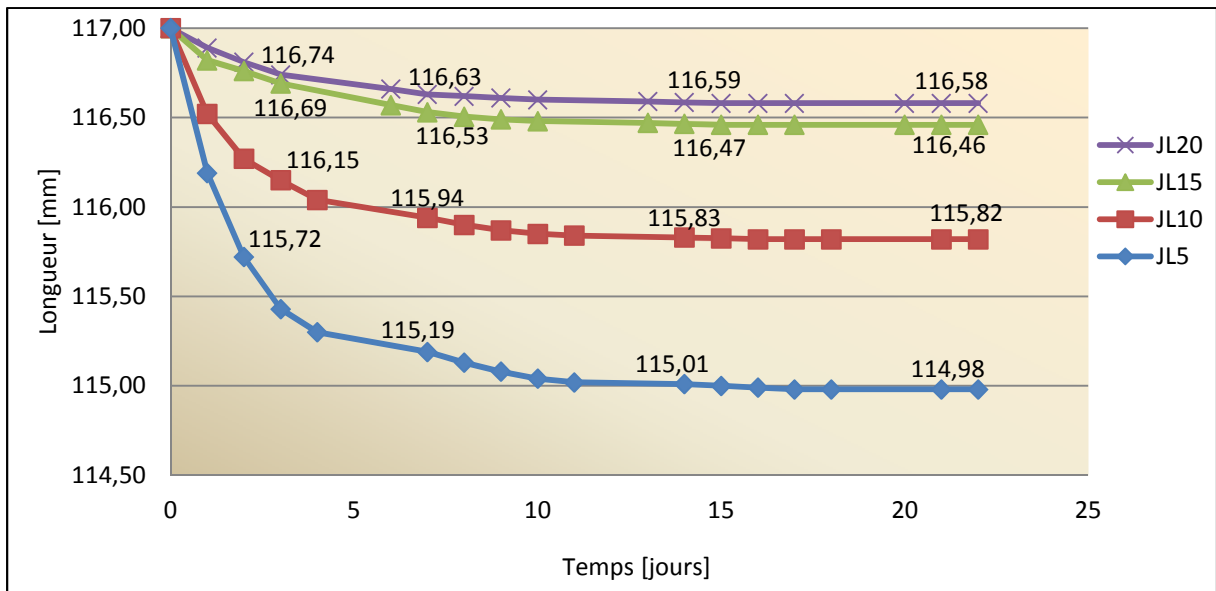
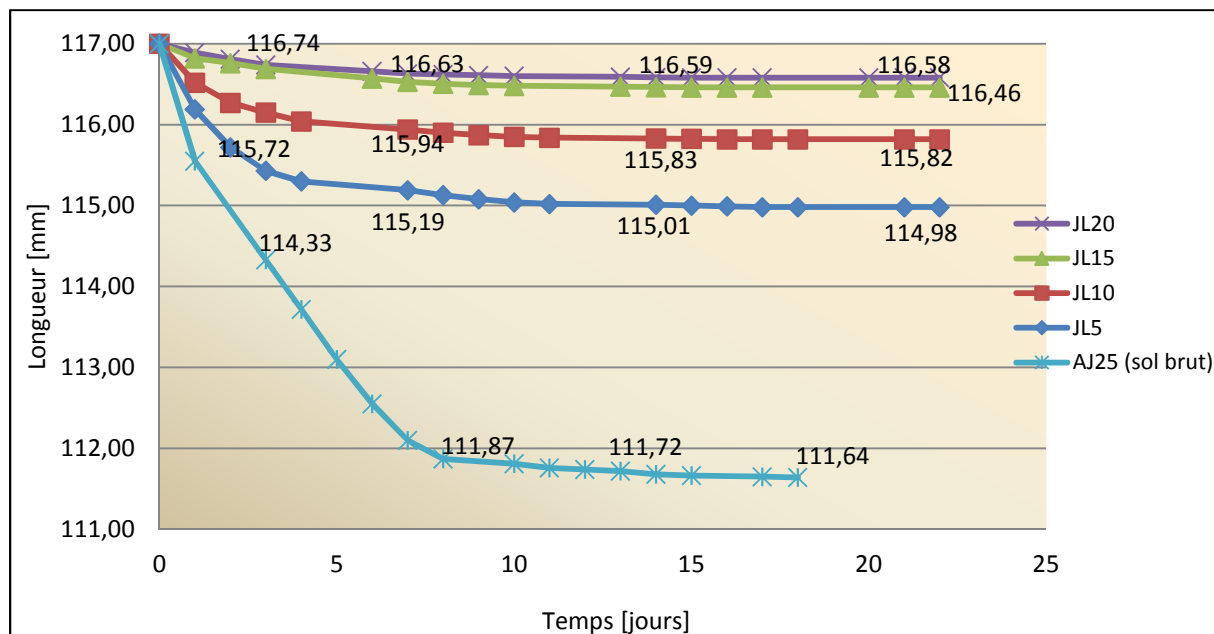


Figure V.14d : Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de chaux.

➤ **Comparaison entre le matériau brut et le matériau stabilisé avec la chaux**

L'argile jaune avant le traitement à la chaux présente un retrait très important (5,36 mm), à 5% de chaux le raccourcissement est déjà diminué considérablement par rapport à l'éprouvette sans la chaux et qui a la même teneur en eau, ce qui montre que la chaux a un effet considérable sur l'argile



**Figure V.15:** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées à la chaux et d'éprouvette d'argile jaune brut (AJ25)

#### 4.2.3. Stabilisation du retrait par le sable

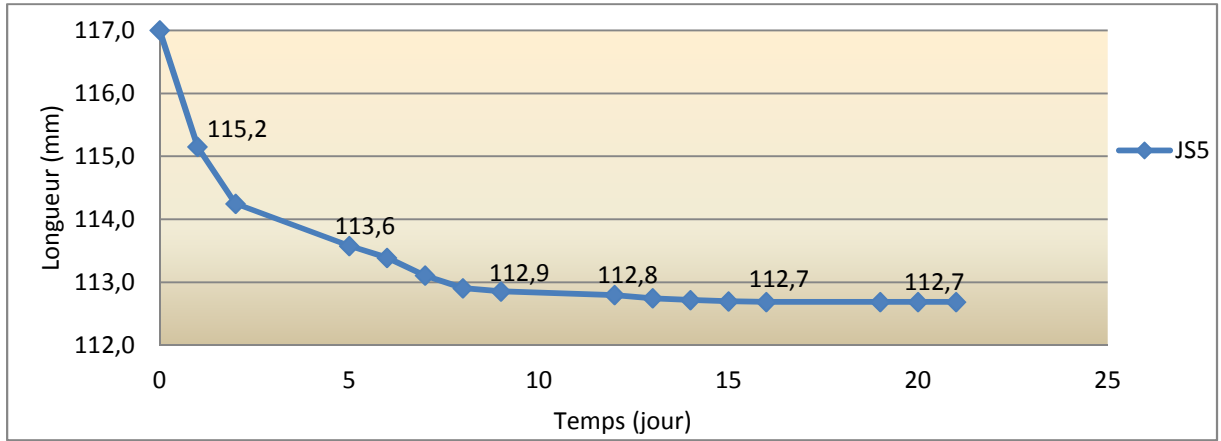
##### ➤ Evolution de la longueur en fonction du temps

Les résultats obtenus sur la mesure du retrait en fonction du temps sur les éprouvettes stabilisées avec de différents pourcentages de sable sont présentés sur les figures V.16

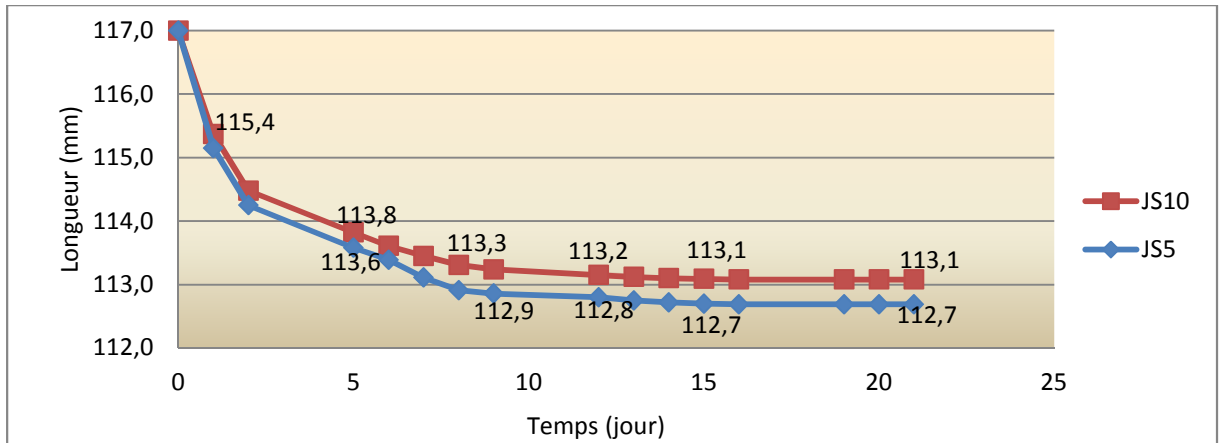
Le raccourcissement mesuré au bout de 21 jours sur les éprouvettes stabilisées diminue avec l'augmentation de pourcentage du sable ajouté.

Pour le sol associé à 5% de sable, le retrait est de 4,3 mm, avec 10%, 15% et 20% du sable, le retrait est respectivement de 3,9 ; 3,5 et 3,4 mm.

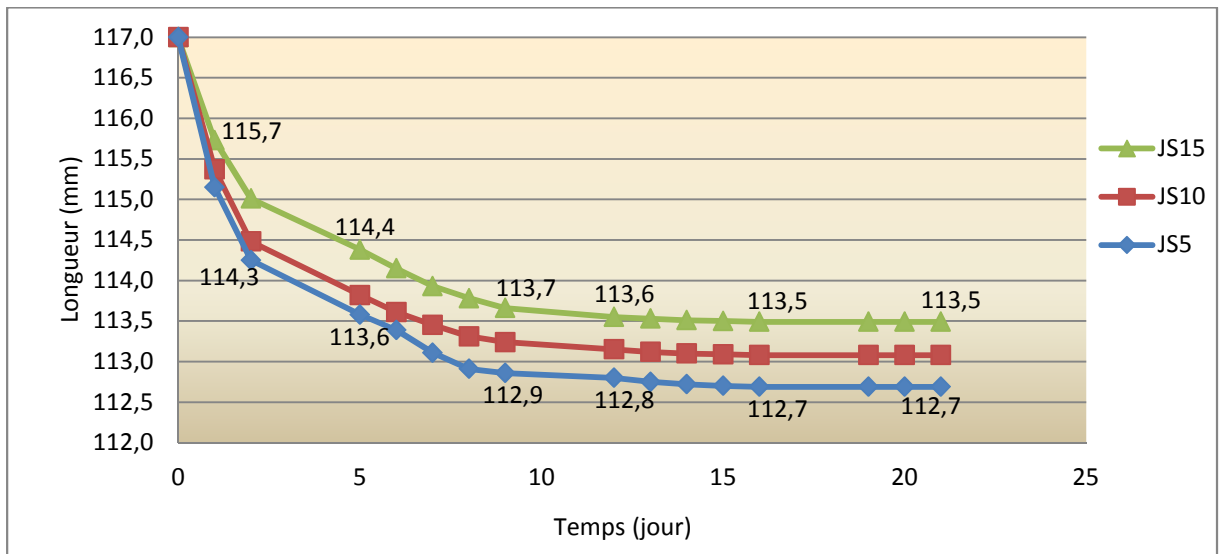
La diminution du retrait est très sensible pour un pourcentage de sable supérieur à 10%. Mais au-delà de 15%, le retrait varie faiblement avec le pourcentage de sable.



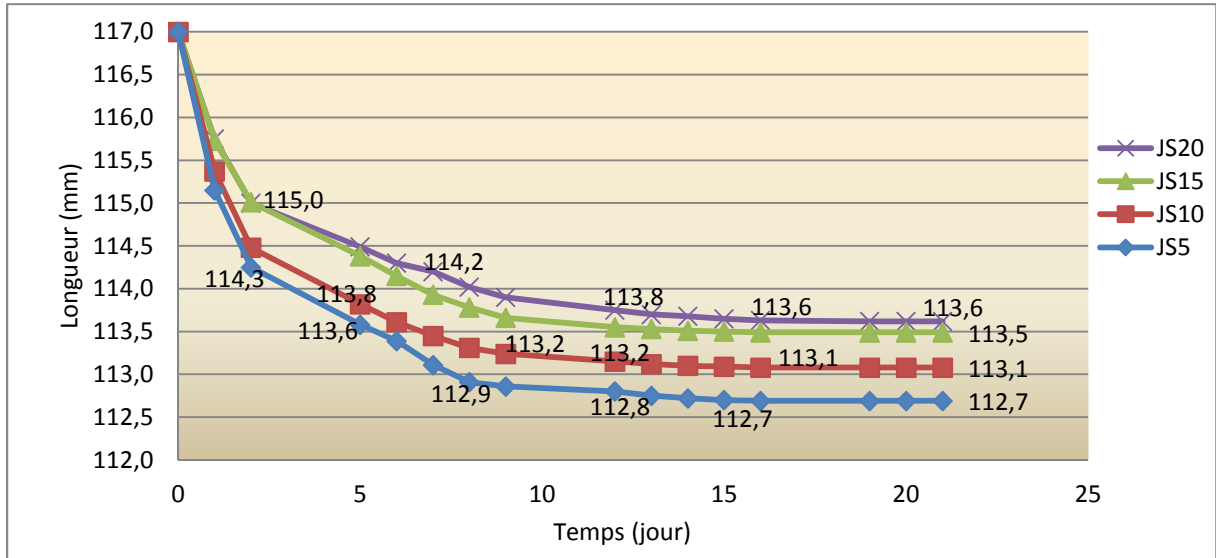
**Figure V.16a :** Variations de la longueur en fonction du temps d'éprouvettes d'argile jaune stabilisée avec 5% de sable (JS5).



**Figure V.16b :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5% et 10% de sable.



**Figure V.16c :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10% et 15% de sable.

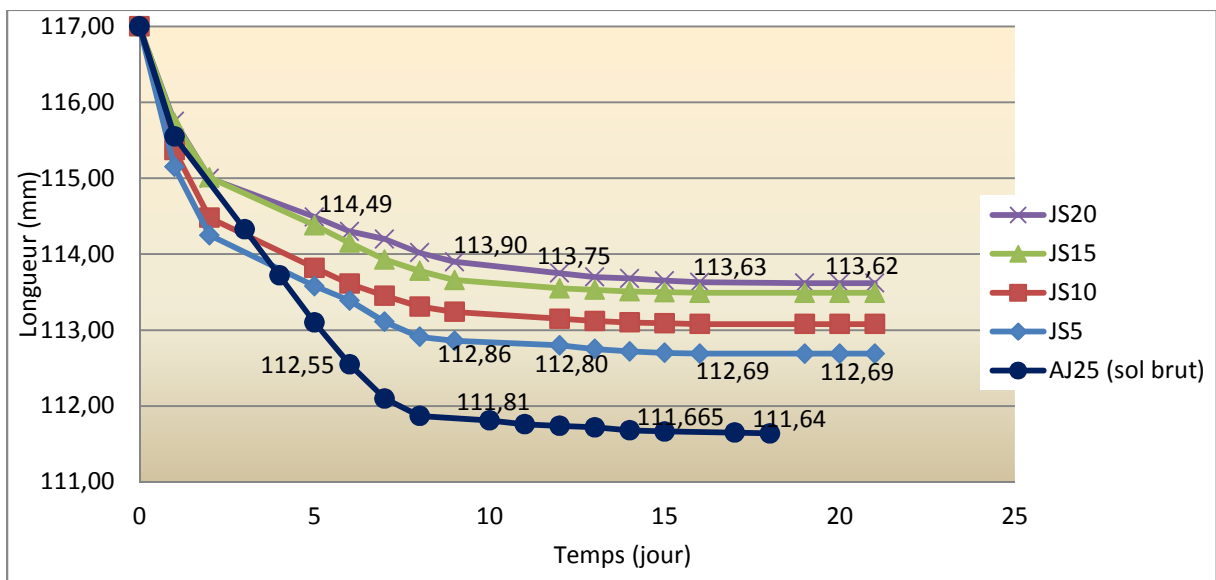


**Figure V.16d :** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées avec 5%, 10%, 15% et 20% de sable.

➤ **Comparaison entre le matériau brut et le matériau stabilisé avec le sable**

On observe sur la figure.17 que le raccourcissement des éprouvettes diminue avec l’ajout de sable par rapport à l’éprouvette AJ25 non traitée, lorsqu’on augmente le dosage du sable le retrait final diminue.

Les valeurs des raccourcissements des éprouvettes à différentes teneurs en sable sont très proches.



**Figure V.17:** Variations de la longueur en fonction du temps des éprouvettes stabilisées au sable et d’éprouvette d’argile jaune brute(AJ25)

#### 4.2.4. Comparaison entre les retraits finals des trois types de stabilisants

En comparant les retraits obtenus avec les différents stabilisants et avec celui du matériau brut, on obtient le tableau [V.4].

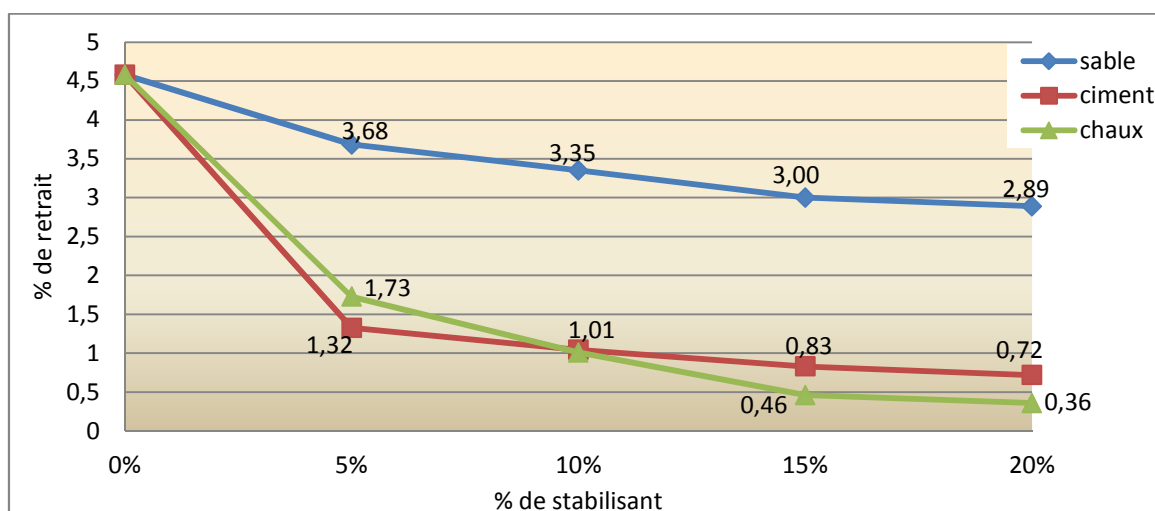
Le ciment, la chaux et le sable réduisent le retrait de façon importante. Le pourcentage de 5% de ciment donne le meilleur résultat, c'est-à-dire le minimum de retrait.

Avec un apport de 10 % de ciment ou de chaux nous obtenons un faible retrait, alors qu'avec 10% de sable nous avons un retrait très important.

Au-delà de 15% de stabilisant, la chaux présente des résultats très satisfaisants surtout vu le prix bas de la chaux.

**Tableau V.4 :** retraits finals des éprouvettes confectionnées avec le sol stabilisé.

% de stabilisant	% de retrait		
	ciment	chaux	sable
0% (matériau brut)	4,58	4,58	4,58
5%	1,32	1,73	3,68
10%	1,04	1,01	3,35
15%	0,83	0,46	3,00
20%	0,72	0,36	2,89



**Figure V.18 :** pourcentage de retrait final en fonction de la teneur en stabilisant (ciment, chaux et sable)

## 5. Conclusion

L'évaporation de l'eau de la masse de sol est une cause essentielle du retrait, et le retrait est accentué par l'augmentation de leur teneur en eau. Lorsque les sols sont asséchés, les changements de volume les plus importants sont d'avantage associés aux sols contenant :

- Une forte proportion de minéraux argileux.
- Un indice des vides élevés. Les sols dont l'indice des vides est faible subissent des retraits moindres.

La structure physique et chimique des sols, détermine leur degré de déformation ; l'argile rouge se déforme plus que l'argile jaune, cette dernière se déforme plus que l'argile grise.

Pour réduire le retrait il faut éviter de compacter le sol avec de fortes teneurs en eau, au contraire il est souhaitable de se rapprocher le plus possible de la teneur en eau optimale pour obtenir une densité maximale et un retrait négligeable. On en déduit que plus un matériau est dense plus le retrait est faible.

En ce qui concerne l'étude de la stabilisation par ajout de ciment, de chaux ou de sable, le retrait diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, donc la réduction du retrait est proportionnelle au pourcentage du stabilisant incorporé.

La constatation la plus importante à signaler dans la stabilisation au ciment et à la chaux qui donnent les meilleures réductions, sont obtenues pour des teneurs élevés (20%) de chaux et de ciment.

L'effet le plus important observé est la stabilisation au ciment et à la chaux qui donne de meilleurs résultats.

Au-delà de 15% d'ajout, la chaux présente de très bons résultats avec l'avantage d'un prix bas.

Parmi les différentes méthodes de mesure de retrait, l'étude de la masse en fonction de la longueur est un essai en vraie grandeur qui permet de :

- Suivre avec exactitude des déformations de l'ordre du centième de millimètre.
- Se substituer à l'essai classique de limite de retrait conventionnelle où l'emploi du mercure qui est un produit toxique inévitable.
- Réaliser des mercures pendant la période de cure puisque c'est un essai non destructif.

# **CHAPITRE VI**

**Etude de la résistance mécanique**

## 1. INTRODUCTION

Dans cette étude, nous tenterons d'améliorer la résistance à la compression du sol argileux, pour cela nous avons opté pour deux procédés de stabilisation, qui sont la stabilisation par compactage et la stabilisation par incorporation des stabilisants.

Cette étude a montré deux paramètres influents sur la qualité du matériau à savoir :

- La teneur en eau de compactage.
- La teneur en stabilisant.

Pour étudier ces paramètres on a mené une étude portant sur les éprouvettes suivantes :

- Éprouvettes confectionnées à base de trois types d'argiles brutes (argile rouge apportée d'Oued-Aissi, argile jaune amenée de M'douha et une argile grise amenée de Thakhoukht) en variant les teneurs en eau de façonnage.
- Éprouvettes confectionnées à base d'argile jaune, à une teneur en eau de saturation, stabilisée au ciment avec 5%, 10%, 15% et 20%.
- Éprouvettes confectionnées à base d'argile jaune, à une teneur en eau de saturation, stabilisée à la chaux avec 5%, 10%, 15% et 20%.
- Éprouvettes confectionnées à base d'argile jaune, à une teneur en eau de saturation, stabilisée au sable avec 5%, 10%, 15% et 20%.

## 2. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont faites à l'aide du moule Proctor normal on les compacte suivant le mode de compactage utilisé pour l'essai proctor, et sont conservées à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire.

Les échantillons de sol sont fabriqués à la teneur en eau de saturation qui est de 25% de la masse du mélange (sol + stabilisant) sec.

Pour chaque pourcentage en stabilisant cité ci-dessus, on fabrique deux (2) éprouvettes A et B :

- Eprouvette (A) subira un essai d'écrasement à sec.
- Eprouvette (B) subira un essai d'écrasement après immersion totale pendant 24 heures dans l'eau.

### 3. Essai de compression simple

Pour évaluer la résistance à la compression du sol stabilisé on le soumet à l'essai de compression, après 28 jours de cure.

L'éprouvette 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 0,1 MPa /seconde. La rupture se fait en compression simple. La contrainte à pour expression :  $R_c = \frac{F_{max}}{S}$



**Figure VI.1 :** Eprouvettes d'argile stabilisée soumise à la compression simple

### 4. Présentation, analyse et discussion des résultats.

#### 4.1. Influence de la teneur en eau de compactage sur la résistance à la compression

Pour étudier l'évolution de la résistance en fonction de la teneur en eau de compactage on a opté pour les teneurs en eau situées sur le versant mouillé de la courbe Proctor qui sont les suivantes : 15%, 17%, 20% et 25%, pour l'argile rouge et jaune et 6%, 8%, 9% et 10%, pour l'argile grise.

Les résultats obtenus pour les trois types d'argile sont portés sur les tableaux [VI.1], [VI.2] et [VI.3] et la figure VI.2.

**Tableau [VI.1] : Résistance à la compression à sec (Rsec) des éprouvettes d'argile rouge**

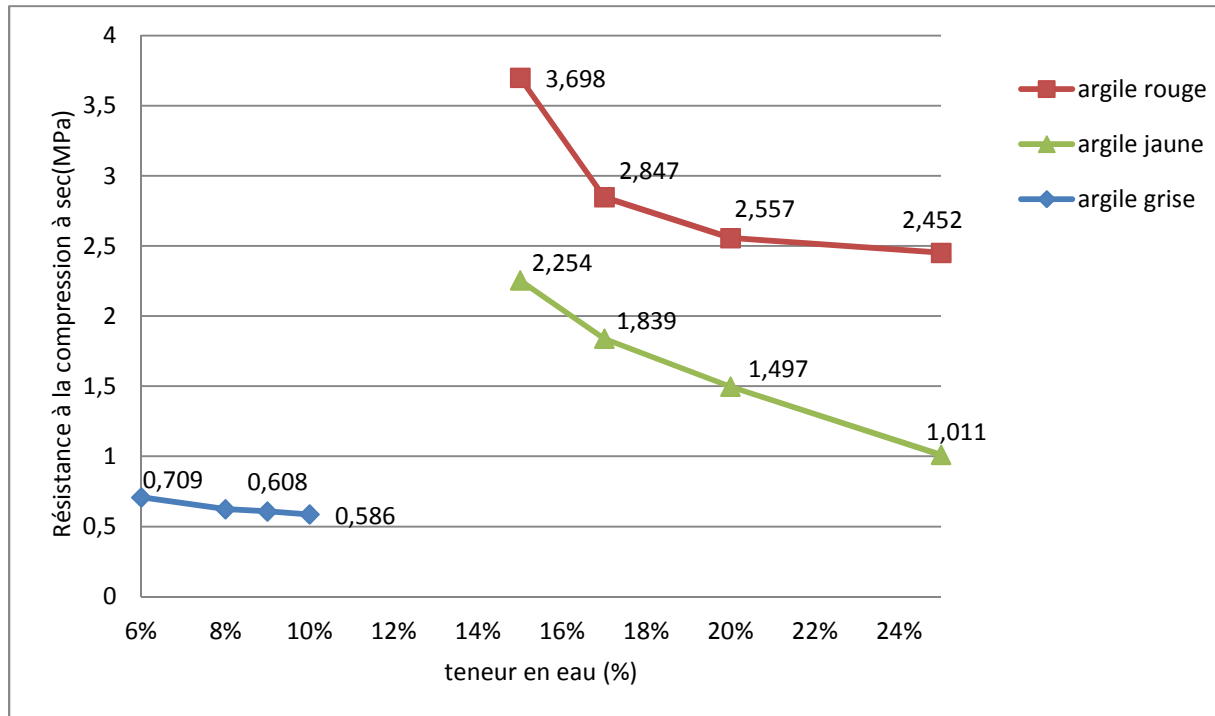
Teneur en eau	Force (kN)	Résistance à la compression à sec (MPa)
15%	29	3,698
17%	22,4	2,847
20%	20,1	2,557
25%	19,3	2,452

**Tableau [VI.2] : Résistance à la compression à sec des éprouvettes d'argile jaune**

teneur en eau	Force (kN)	Résistance à la compression à sec (MPa)
15%	17,7	2,254
17%	14,4	1,839
20%	11,8	1,497
25%	7,9	1,011

**Tableau [VI.3] : Résistance à la compression à sec des éprouvettes d'argile grise**

teneur en eau	Force (kN)	Résistance à la compression à sec (MPa)
6%	5,6	0,709
8%	4,8	0,624
9%	0,049	0,608
10%	4,6	0,586



**Figure VI.2 :** Variation de la résistance à la compression à sec en fonction de la teneur en eau pour les trois types d'échantillon d'argile

D'après les résultats obtenus on constate que :

La résistance à la compression est très élevée à une teneur en eau proche de l'optimum Proctor et elle diminue quand la teneur en eau augmente.

La courbe d'argile rouge représente une forte pente négative à l'intervalle 15%–20%, puis elle se redresse ce qui signifie une chute importante de résistance dans l'intervalle 15%–20% et une faible variation dans l'intervalle 20%–25%.

La courbe d'argile jaune nous montre que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en eau cela explique la sensibilité à l'eau de cette argile.

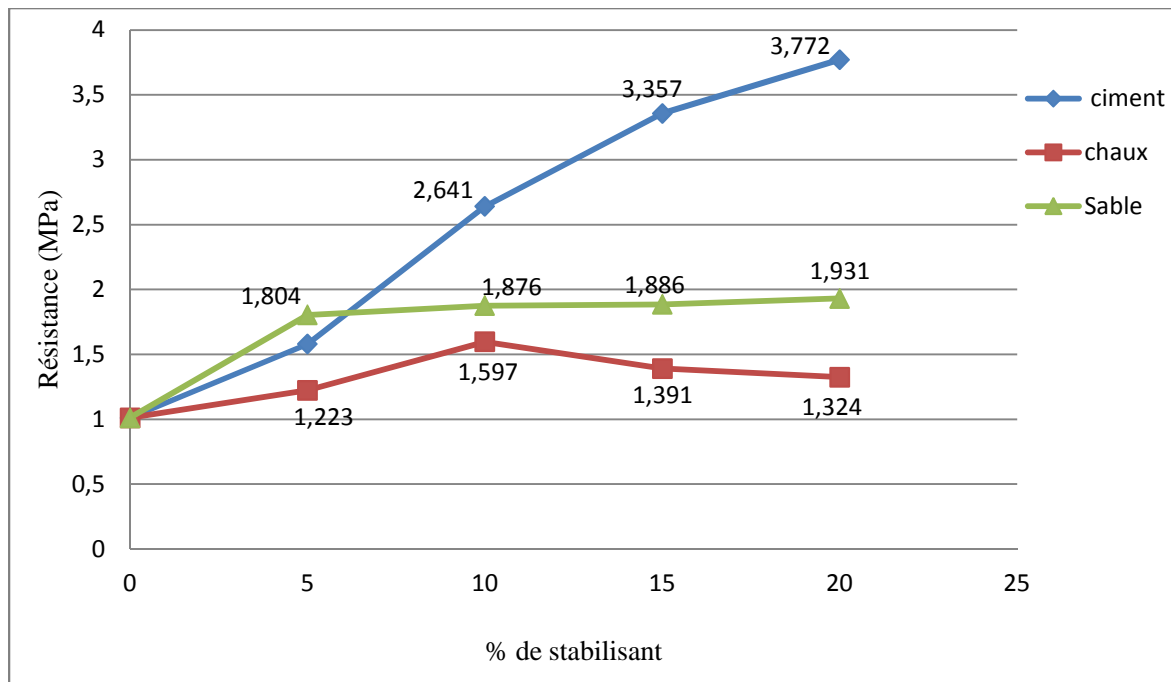
L'argile grise représente la résistance la plus faible parmi les trois types d'argile, avec une faible sensibilité à la variation de la teneur en eau.

#### 4.2. Résistance à la compression simple à l'état sec de sol stabilisé

Les résultats d'essais d'écrasement à sec des éprouvettes d'argile jaune stabilisées au ciment, à la chaux et au sable sont portés sur le tableau [VI.4], et la figure VI.3

**Tableau [VI.4] :** Résistance à l'écrasement à sec des éprouvettes traitées avec le ciment, la chaux et le sable.

pourcentage de stabilisant	Résistance à la compression Rsec (MPa)		
	Ciment	Chaux	Sable
0%	1,01	1,01	1,01
5%	1,58	1,22	1,80
10%	2,64	1,60	1,88
15%	3,36	1,39	1,89
20%	3,77	1,32	1,93



**Figure VI.3:** Variation de la résistance à la compression à l'état sec en fonction de la teneur en stabilisant

Selon les résultats obtenus on remarque que :

La courbe de sol stabilisé avec le ciment est monotone et croissante cela signifie que l'apport de ciment dans les sols argileux les rend plus résistants à la compression, plus on augmente le pourcentage du ciment dans le mélange (ciment + argile) plus on obtient une résistance meilleure.

La courbe de stabilisation à la chaux représente deux phases :

A la première phase (de 0% à 10%) la résistance augmente avec le pourcentage de chaux jusqu'à un maximum d'amplitude 1,6 MPa, et à la deuxième phase (de 10% à 20%) la résistance diminue. Donc l'apport de la chaux ne doit pas dépasser 10%.

La courbe de stabilisation au sable présente une augmentation significative à 5% de sable, puis le gain de résistance devient très faible avec l'augmentation de la teneur en sable, donc l'apport de plus de 5% de sable n'améliore pas significativement la résistance.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le traitement au ciment.

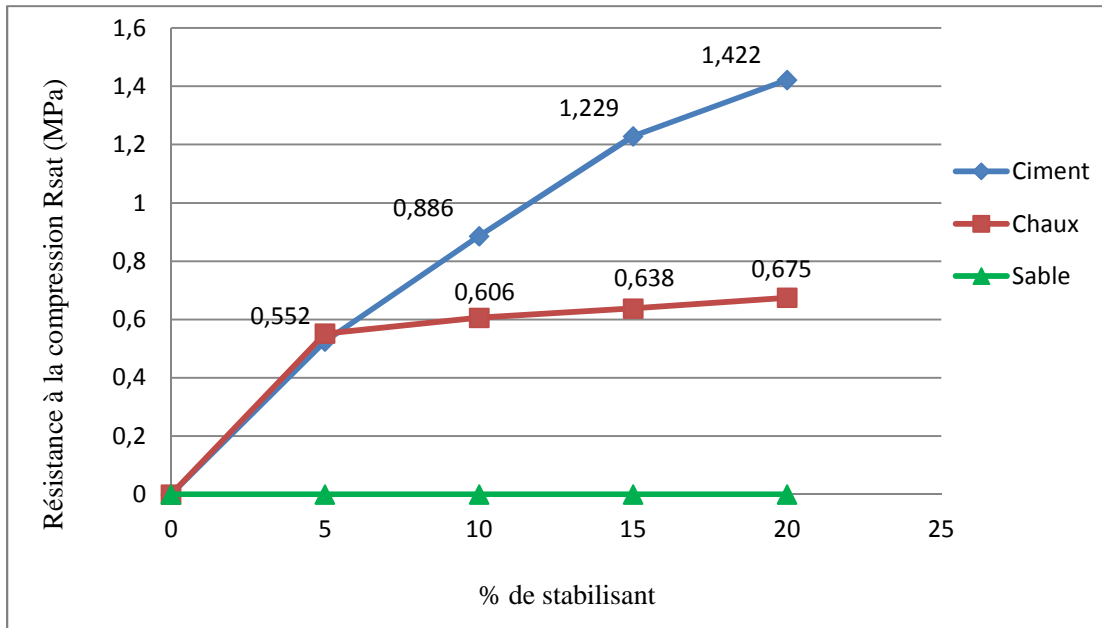
#### 4.3. Résistance à la compression simple après immersion (R<sub>sat</sub>) :

L'essai d'écrasement après immersion totale pendant 24 heures dans l'eau est un essai extrême destiné à vérifier la sensibilité à l'eau conférée par le stabilisant.

Les résultats obtenus sont portés sur le tableau VI.5 et la figure VI.3

**Tableau [VI.5] :** Résistance à l'écrasement après immersion des éprouvettes traitées avec le ciment, la chaux et le sable.

pourcentage de stabilisant	résistance à la compression R <sub>sat</sub> en (MPa)		
	Ciment	Chaux	Sable
0%	0	0	0
5%	0,578	0,575	0
10%	0,886	0,606	0
15%	1,229	0,638	0
20%	1,334	0,752	0



**Figure VI.4:** Variation de la résistance à la compression (Rsat) après immersion en fonction de la teneur en stabilisant

D'après la figure VI.4, on remarque que la résistance à la compression après immersion des éprouvettes d'argile jaune, augmente proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en ciment.

Contrairement à la stabilisation avec la chaux, où on remarque que la résistance à la compression varie faiblement avec l'apport de chaux, l'ajout de ciment améliore considérablement la résistance à la compression simple.

A 20% de stabilisant, la résistance à la compression atteint 1.422 MPa pour le ciment et 0.676 MPa pour la chaux.

Avec l'incorporation du sable, les éprouvettes perdent leur forme et se désagrègent dans l'eau, donc ne présentent aucune résistance à l'eau.

#### 4.4. Coefficient de ramollissement (KAOMAR)

Le coefficient de ramollissement (Kram) est le rapport entre la résistance à la compression après immersion (Rsat) sur la résistance à la compression à sec (Rsec) du même matériau.

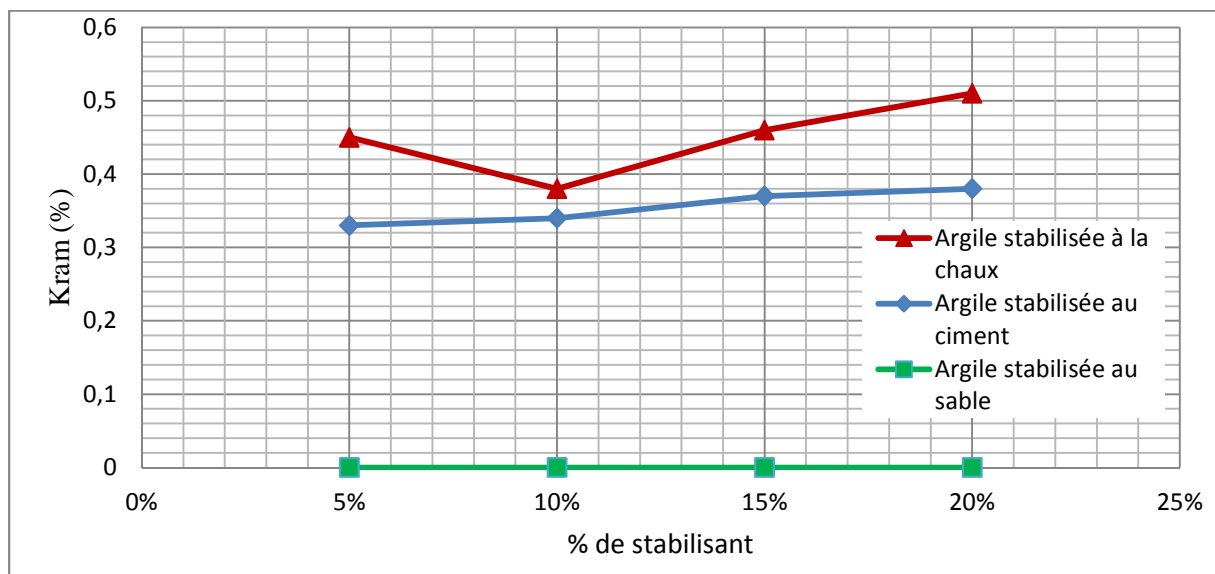
$$Kram = \frac{Rsat}{Rsec}$$

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.

Le tableau VI.6 et la figure IV.4 donnent l'évolution du coefficient de ramollissement Kram en fonction de la teneur en stabilisant.

**Tableau VI.6 :** Variation de coefficient de ramollissement en fonction de pourcentage de stabilisant

% de stabilisant	5%	10%	15%	20%
Kram des éprouvettes stabilisées au ciment	0,37	0,34	0,37	0,35
Kram des éprouvettes stabilisées au ciment	0,47	0,38	0,46	0,57
Kram des éprouvettes stabilisées au sable	0	0	0	0



**Figure IV.5:** Evolution du coefficient de ramollissement en fonction de teneur en stabilisant

Après immersion des éprouvettes, celles stabilisées avec la chaux et le ciment restent intactes contrairement à celles stabilisées avec le sable.

Pour la stabilisation avec du ciment, le coefficient de ramollissement (Kram) augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la teneur en stabilisant. Deux phases sont observées lors de la stabilisation avec la chaux ; (5-10 et 10-20), une diminution de Kram dans la 1<sup>ère</sup> phase qui correspond à la chute de résistance à la compression après immersion. Dès 10% de

stabilisant, le coefficient Kram augmente qui correspond à l'augmentation de la résistance à la compression après immersion.

La teneur en ciment et en chaux améliore le coefficient de ramollissement mais les résultats demeurent insuffisants pour que le matériau soit considéré comme moderne.

Le coefficient de ramollissement est nul pour le sol stabilisé au sable

## 5. CONCLUSION

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce chapitre :

A partir des courbes de résistance en fonction de la teneur en eau on constate que la résistance à la compression des sols argileux diminue avec les pourcentages élevés de la teneur en eau de compactage. Alors la résistance à la compression est proportionnelle avec la densité sèche.

Et à partir des courbes de résistance en fonction de pourcentage de stabilisant on conclure que :

- La résistance à la compression augmente proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de ciment. Bien que le maximum de ciment ne soit pas fixé de façon précise.
- L'apport de la chaux améliore la résistance mécanique de nos échantillons avec les pourcentages 5% et 10%, mais au-delà de 10%, elle diminue.
- L'apport de 5% de sable augmente la résistance à la compression, mais plus qu'on augmente le dosage de sable la résistance reste sensiblement constante.
- Les meilleurs résultats de résistance à l'écrasement à sec sont obtenus avec le traitement au ciment.

A partir des courbes de résistance après immersion en fonction de pourcentage de stabilisant on conclure que :

L'incorporation de la chaux et de ciment aux sols argileux lui donne l'aptitude de résister vis-à-vis d'humidité, mais avec une décroissance de résistance importante par rapport à l'état sec.

Avec l'incorporation du sable, le sol ne présente aucune résistance à l'eau.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail expérimental qui s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des sols nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Plusieurs facteurs doivent être considérés avant d'entreprendre des travaux de stabilisation. Dans un premier temps, les ingénieurs doivent bien connaître les propriétés du sol à traiter. Entre autres, les limites d'Atterberg, la granulométrie, l'homogénéité du sol et la densité optimum de compactage doivent être convenablement évaluées dès le départ.

Le retrait est important dans le matériau brut et croît pour des teneurs en eau élevées, par conséquent on doit éviter le recours à des teneurs en eau fortes car la résistance, la densité et le retrait se trouvent compromis, et en compactant énergiquement car le compactage est également très important dans tous travaux de stabilisation. Le compactage est une forme de stabilisation mécanique permettant d'augmenter la stabilité mécanique du sol.

A défaut d'empêcher le retrait, l'étude a montré qu'on peut le réduire en optant à la stabilisation par incorporation du ciment, de la chaux et de sable en proportions convenables,

La réduction de retrait est proportionnelle au pourcentage des stabilisants (ciment, chaux, sable). A 20% de stabilisant le retrait atteint 0.72% pour le ciment, 0.36% pour la chaux et 2.89% pour le sable. Par contre le retrait dans le sol brut atteint 4.6%

Les études de la résistance à la compression effectuées ont montré que les propriétés mécaniques des sols argileux sont généralement faibles, et cette dernière diminuée avec l'élévation de la teneur en eau au-delà de l'optimum. L'usage des stabilisants (ciment, chaux, sable) permet d'améliorer la résistance et de réduire la sensibilité à l'eau du matériau.

Avec l'incorporation de ciment la résistance à la compression croît proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de ciment. Contrairement à l'incorporation de la chaux qui représente un pic à 10%. L'apport de sable augmente aussi la résistance à la compression, et plus on élève le dosage de sable plus la résistance s'améliore.

La stabilisation avec la chaux et le ciment des sols argileux lui donne l'aptitude de résister vis-à-vis d'humidité, mais avec une décroissance de résistance importante par rapport à l'état sec.

Par conséquent avec un sol de composition granulométrique adéquate, comprimé à la teneur en eau optimale, stabilisé, il est possible d'obtenir un matériau aussi résistant et aussi durable que les matériaux dits modernes utilisés habituellement pour la construction.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AOUISSI, Fatima.** *Comportement physique et mécanique de l'adobe paillé.* Algerie : Centre Universitaire AMAR TELEDJI Laghout.
- AZZOUZ, Fatima Zohra. 2006.** *Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de tlemcen.* Tlemcen, Algerie : Université Abou Bekr Belkaid.
- BEN AZZOUG, Mouloud. 2004.** *Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil.* J Mater Sci DOI 10.1007/s10853-006-0226-1.
- BEN AZZOUG, Mouloud. 2011.** *Sols stabilisés, performances physique, mécanique et durabilité.* Algerie : Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- BEN AZZOUG Mouloud. 2014.** *Durability of earth stabilized material.* Key Engineering Materials Vol.600 (2014) pp 495-503 doi : 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.495
- BENKHERA, M & ZARIF, M. 1983.** *B.T.S.* Algerie : Ecole Nationale des Travaux Public.
- BENLAHMIDI, Said. 2013.** *Etude du séchage convectif par l'énergie solaire.* Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra.
- BOTTERO.A & GIROUD.J.P. 1972.** *Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique.* France : Institut universitaire de technologie de Grenoble.
- Centre de recherches routières Bruxelles.** *code de bonne pratique pour la stabilisation du sol au ciment.*
- DJONKAMLA, Youdjari. 2010.** *Caractérisation et simulation numérique du comportement volumétrique de sols argileux gonflants de n'djaména.* Montréal : Université Laval de Québec.
- GHEDDACHE, Hora. 2012.** *Stabilisation des sols a la chaux et a chaud.* Tizi-Ouzou : Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- GUILLAUD, Hugo Houben & HUBERT. 1989.** *Traité de construction en terre.* Marseille.
- HACHICHA, S.A. BOUROKBA, A. BENAÏSSA, J.M. FLEUREAU, M. HATTAB, S. TAIBI. 2009.** *Etude des phénomènes retrait- gonflement et stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran.* Marseille : 19ème Congrès Français de Mécanique. Page [1].
- HOLTZ Robel, KOVACS Wiliam. 1991.** *Introduction à la geotechnique.* s.l. : Ecole polytechnique de Montréal.
- JAHANGIR, Emad. 2011.** *Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait/gonflement.* FRANCE : INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE. Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages. Pages [71-79].
- KOMAR.A. 1976.** *Matériaux et éléments de construction.* Moscou.

**KORNMANN.M. 2006.***Consultant technique, CH-1212 Grand Lancy (La courbe de Bigot revisitée).* Suisse/switzerland.

**LANCHON, R. 1989.***Cours de laboratoire\_Granulats, Bétons, Sols.* Editions casteilla PARIS.

**LEGERE, Glen. 2001.***Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestières.* Montréal : Ecole de technologie supérieure université du Québec.

**LEONARDS.G.A. 1967.***traduction adaptée de l'ouvrage publié en langue anglaise sous titre foundation engeneering.* Lafayette, Indiana : par McGraw-Hill Book Company,INC.

**MANTHO, Altin Théodore. 2005.***Echanges sol-Atmosphère , application à la sechresse.* FRANCE : Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES)\_ENPC\_LCPC\_Institut NAVIER. Pages [3-7;17-19].

**MEZGHRANE, Moussa &MAAMES, Nordine. 1989.***Etude geotechnique d'un sol en vue de l'obtention de la capacité portante et analyse des propriétés du béton de terre stabilisée.* Algerie : Institut national d'enseignement superieur de genie civil de Tizi-ouzou.

**PHILIPPONNAT, Gérard & HUBERT, Bertrand. 2003.** *Fondations et ouvrages en terre.* Paris : Union Française des Géologues.

**SAINT, Martin. 2010.** *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de cantal.* France : Etude réalisée dans le cadre des projets de service public du BRGM.

**SCHLOSSER, François. 1997.***Eléments de mécanique des sols.* s.l. : Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

**YIGZAW, Zemenu Geremew. 2010.***Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques: role de la microstructure.* Paris : ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS.

## ANNEXES

## ETUDE DE RETRAIT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DES SOLS

## ANNEXE 1 : Etude du retrait de l'argile rouge AR15 à w = 15%

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	$\Delta L_j$ inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1971,3	210,4	11,91
1	1,10	115,90	2,65	2,26	1913,4	152,5	8,63
2	1,95	115,05	1,55	1,32	1850,1	89,1	5,04
5	2,32	114,68	0,7	0,60	1821,3	60,3	3,41
6	2,50	114,50	0,33	0,28	1807,5	46,5	2,63
7	2,60	114,40	0,15	0,13	1798,5	37,5	2,12
8	2,65	114,35	0,05	0,04	1790,8	29,8	1,69
9	2,65	114,35	0	0	1785,1	24,2	1,37
12	2,65	114,35	0	0	1778,0	17,1	0,97
13	2,65	114,35	0	0	1775,1	14,1	0,80
15	2,65	114,35	0	0	1771,1	10,1	0,57
16	2,65	114,35	0	0	1768,9	7,9	0,45
19	2,65	114,35	0	0	1766,4	5,4	0,31
20	2,65	114,35	0	0	1761,0	0,0	0,00

## ANNEXE 2 : Etude du retrait de l'argile rouge AR17 à w = 17%

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\square L_j$ [mm]	Longueur [mm]	$\Delta L_j$ inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1951,4	221,1	12,78
1	2,10	114,90	4,48	3,83	1874,3	144,1	8,33
2	3,15	113,85	2,38	2,03	1832,7	102,4	5,92
5	3,75	113,25	1,33	1,14	1809,7	79,5	4,59
6	4,07	112,93	0,73	0,62	1795,3	65,1	3,76
7	4,23	112,77	0,41	0,35	1785,9	55,6	3,21
8	4,30	112,70	0,25	0,21	1778,9	48,6	2,81
9	4,39	112,61	0,18	0,15	1771,0	40,7	2,35
12	4,42	112,58	0,09	0,08	1765,7	35,5	2,05
13	4,45	112,55	0,06	0,05	1759,4	29,2	1,69
15	4,46	112,54	0,03	0,03	1752,9	22,7	1,31
16	4,47	112,53	0,02	0,02	1745,4	15,2	0,88
19	4,48	112,52	0,01	0,01	1739,4	9,2	0,53
20	4,48	112,52	0,00	0,00	1734,3	4,0	0,23
21	4,48	112,52	0,00	0,00	1730,3	0,0	0,00

**ANNEXE 3 : Etude du retrait de l'argile rouge AR20 à w = 20%**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1916,9	279,2	17,05
1	3,12	113,88	7,02	6,00	1828,6	191,0	11,66
2	4,80	112,20	3,9	3,33	1773,0	135,3	8,26
5	6,01	110,99	2,22	1,90	1730,3	92,6	5,65
6	6,47	110,53	1,01	0,86	1714,3	76,6	4,68
7	6,79	110,21	0,55	0,47	1702,3	64,6	3,94
8	6,90	110,10	0,23	0,20	1692,4	54,7	3,34
9	6,99	110,01	0,12	0,10	1685,2	47,6	2,90
12	7,00	110,00	0,03	0,03	1676,2	38,6	2,35
13	7,01	109,99	0,02	0,02	1665,6	28,0	1,71
15	7,02	109,98	0,01	0,01	1659,4	21,8	1,33
16	7,02	109,98	0	0,00	1653,5	15,8	0,96
19	7,02	109,98	0	0,00	1646,3	8,6	0,52
20	7,02	109,98	0	0,00	1641,3	3,6	0,22
21	7,02	109,98	0	0,00	1637,7	0,0	0,00

**ANNEXE 4 : Etude du retrait de l'argile rouge AR25 à w = 25%**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1810,3	292,1	19,24
1	4,12	112,88	9,46	8,09	1722,5	204,3	13,46
2	6,19	110,81	5,34	4,56	1673,0	154,8	10,20
5	8,00	109,00	3,27	2,79	1622,3	104,1	6,86
6	8,65	108,35	1,46	1,25	1598,3	80,1	5,28
7	9,15	107,85	0,81	0,69	1582,5	64,3	4,24
8	9,35	107,65	0,31	0,26	1570,5	52,4	3,45
9	9,38	107,62	0,11	0,09	1565,5	47,4	3,12
12	9,40	107,60	0,08	0,07	1558,5	40,4	2,66
13	9,42	107,58	0,06	0,05	1548,6	30,4	2,01
15	9,45	107,55	0,04	0,03	1539,6	21,5	1,41
16	9,46	107,55	0,01	0,01	1531,6	13,5	0,89
19	9,46	107,54	0,01	0,00	1525,2	7,1	0,47
20	9,46	107,54	0,00	0,00	1520,4	2,2	0,14
21	9,46	107,54	0,00	0,00	1518,2	0,0	0,00

**ANNEXE 5 : Etude du retrait de l'argile jaune AJ15 à w = 15 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1880,691	199,8	11,89
1	0,72	116,28	1,24	1,06	1857,927	177,0	10,53
4	0,87	116,13	0,52	0,44	1783,093	102,2	6,08
5	0,95	116,05	0,37	0,32	1764,101	83,2	4,95
6	1,04	115,96	0,29	0,25	1752,613	71,7	4,27
7	1,11	115,89	0,2	0,17	1739,122	58,2	3,46
8	1,15	115,85	0,13	0,11	1727,636	46,7	2,78
11	1,2	115,80	0,09	0,08	1720,962	40,1	2,38
12	1,22	115,78	0,04	0,03	1711,368	30,5	1,81
14	1,23	115,77	0,02	0,02	1706,674	25,8	1,53
15	1,24	115,76	0,01	0,01	1699,676	18,8	1,12
18	1,24	115,76	0	0,00	1692,383	11,5	0,68
19	1,24	115,76	0	0,00	1689,888	9,0	0,54
20	1,24	115,76	0	0,00	1684,888	4,0	0,24
21	1,24	115,76	0	0,00	1680,888	0,0	0,00

**ANNEXE 6 : Etude du retrait de l'argile jaune AJ17 à w = 17 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1920,627	230,9	13,67
1	1,32	115,68	2,14	1,83	1822,567	132,9	7,86
4	1,5	115,50	0,82	0,70	1805,126	115,4	6,83
5	1,67	115,33	0,64	0,55	1787,754	98,1	5,80
6	1,78	115,22	0,47	0,40	1775,868	86,2	5,10
7	1,85	115,15	0,36	0,31	1766,486	76,8	4,55
8	1,99	115,01	0,29	0,25	1750,101	60,4	3,58
11	2,08	114,92	0,15	0,13	1737,438	47,8	2,83
12	2,12	114,88	0,06	0,05	1729,748	40,1	2,37
14	2,13	114,87	0,02	0,02	1722,66	33,0	1,95
15	2,14	114,86	0,01	0,01	1715,465	25,8	1,53
18	2,14	114,86	0	0,00	1705,581	15,9	0,94
19	2,14	114,86	0	0,00	1699,684	10,0	0,59
20	2,14	114,86	0	0,00	1693,684	4,0	0,24
21	2,14	114,86	0	0,00	1689,684	0,0	0,00

**ANNEXE 7 : Etude du retrait de l'argile jaune AJ20 à w = 20 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	115,80			1882,987	244,6	14,93
3	1,35	114,45	2,62	2,26	1790,7	152,3	9,30
4	1,95	113,85	1,27	1,10	1741,225	102,9	6,28
5	2,23	113,57	0,67	0,58	1718,946	80,6	4,92
6	2,36	113,44	0,39	0,34	1708,56	70,2	4,28
7	2,47	113,33	0,26	0,22	1700,278	61,9	3,78
10	2,56	113,24	0,15	0,13	1691,227	52,9	3,23
11	2,59	113,21	0,06	0,05	1684,339	46,0	2,81
13	2,6	113,20	0,03	0,03	1675,35	37,0	2,26
14	2,61	113,19	0,02	0,02	1668,252	29,9	1,82
17	2,62	113,18	0,01	0,01	1658,369	20,0	1,22
18	2,62	113,18	0	0,00	1652,369	14,0	0,85
19	2,62	113,18	0	0,00	1646,369	8,0	0,49
20	2,62	113,18	0	0,00	1641,369	3,0	0,18
21	2,62	113,18	0	0,00	1638,369	0,0	0,00

**ANNEXE 8 : Etude du retrait de l'argile jaune AJ25 à w = 25 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	115,20			1798,622	268,3	17,53
3	2,27	112,93	5,36	4,65	1720,846	190,5	12,45
4	3,28	111,92	3,09	2,68	1680,272	149,9	9,80
5	4,09	111,11	2,08	1,81	1653,292	122,9	8,03
6	4,75	110,45	1,27	1,10	1622,411	92,1	6,02
7	5,1	110,10	0,61	0,53	1600,232	69,9	4,57
10	5,26	109,94	0,26	0,23	1588,288	57,9	3,79
11	5,32	109,88	0,1	0,09	1576,701	46,4	3,03
13	5,34	109,86	0,04	0,03	1567,109	36,8	2,40
14	5,35	109,85	0,02	0,02	1555,312	25,0	1,63
17	5,36	109,84	0,01	0,01	1550,347	20,0	1,31
18	5,36	109,84	0	0,00	1543,347	13,0	0,85
19	5,36	109,84	0	0,00	1538,347	8,0	0,52
20	5,36	109,84	0	0,00	1533,347	3,0	0,20
21	5,36	109,84	0	0,00	1530,347	0,0	0,00

**ANNEXE 9 : Etude du retrait de l'argile grise AG6 à w = 6 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			2213,46	123,5	5,91
3	0,22	116,78	0,6	0,51	2182,42	92,5	4,43
4	0,33	116,67	0,38	0,32	2165,23	75,3	3,60
5	0,42	116,58	0,27	0,23	2148,94	59,0	2,82
6	0,48	116,52	0,18	0,15	2136,04	46,1	2,21
7	0,53	116,47	0,12	0,10	2127,04	37,1	1,78
10	0,56	116,44	0,07	0,06	2119,05	29,1	1,39
11	0,58	116,42	0,04	0,03	2113,95	24,0	1,15
13	0,595	116,41	0,02	0,02	2109,75	19,8	0,95
14	0,6	116,40	0,005	0,00	2105,45	15,5	0,74
17	0,6	116,40	0	0,00	2101,25	11,3	0,54
18	0,6	116,40	0	0,00	2097,22	7,3	0,35
19	0,6	116,40	0	0,00	2094,52	4,6	0,22
20	0,6	116,40	0	0,00	2091,32	1,4	0,07
21	0,6	116,40	0	0,00	2089,92	0,0	0,00

**ANNEXE 10 : Etude du retrait de l'argile grise AG8 à w = 8 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			2250	161,2	7,72
3	0,7	116,30	1,29	1,10	2190,799	102,0	4,89
4	0,95	116,05	0,59	0,50	2165,915	77,2	3,69
5	1,09	115,91	0,34	0,29	2149,625	60,9	2,91
6	1,2	115,80	0,2	0,17	2136,631	47,9	2,29
7	1,25	115,75	0,09	0,08	2128,436	39,7	1,90
10	1,27	115,73	0,04	0,03	2122,552	33,8	1,62
11	1,28	115,72	0,02	0,02	2117,252	28,5	1,36
13	1,285	115,72	0,01	0,01	2110,953	22,2	1,06
14	1,29	115,71	0,005	0,00	2105,352	16,6	0,79
17	1,29	115,71	0	0,00	2101,955	13,2	0,63
18	1,29	115,71	0	0,00	2097,755	9,0	0,43
19	1,29	115,71	0	0,00	2093,755	5,0	0,24
20	1,29	115,71	0	0,00	2090,755	2,0	0,10
21	1,29	115,71	0	0,00	2088,755	0,0	0,00

**ANNEXE 11 : Etude du retrait de l'argile grise AG9 à w = 9 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			2228,534	181,7	8,88
3	1,01	115,99	1,83	1,56	2157,444	110,6	5,40
4	1,32	115,68	0,82	0,70	2129,867	83,1	4,06
5	1,53	115,47	0,51	0,44	2111,584	64,8	3,16
6	1,65	115,35	0,3	0,26	2101,91	55,1	2,69
7	1,73	115,27	0,18	0,15	2094,598	47,8	2,33
10	1,791	115,21	0,1	0,09	2088,812	42,0	2,05
11	1,825	115,18	0,039	0,03	2080,714	33,9	1,66
13	1,83	115,17	0,005	0,00	2072,915	26,1	1,28
14	1,83	115,17	0	0,00	2064,416	17,6	0,86
17	1,83	115,17	0	0,00	2059,717	12,9	0,63
18	1,83	115,17	0	0,00	2056,817	10,0	0,49
19	1,83	115,17	0	0,00	2053,817	7,0	0,34
20	1,83	115,17	0	0,00	2049,817	3,0	0,15
21	1,83	115,17	0	0,00	2046,817	0,0	0,00

**ANNEXE 12 : Etude du retrait de l'argile grise AG10 à w = 10 %**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			2192,792	196,9	9,87
3	2,090	114,91	4	3,42	2129,405	133,5	6,69
4	2,900	114,10	1,91	1,63	2100,635	104,7	5,25
5	3,450	113,55	1,1	0,94	2080,454	84,6	4,24
6	3,750	113,25	0,55	0,47	2065,765	69,9	3,50
7	3,900	113,10	0,25	0,21	2054,271	58,4	2,92
10	3,960	113,04	0,1	0,09	2042,688	46,8	2,34
11	3,985	113,02	0,04	0,03	2029,19	33,3	1,67
13	3,990	113,01	0,015	0,01	2020,092	24,2	1,21
14	3,995	113,01	0,01	0,01	2014,293	18,4	0,92
17	4,000	113,00	0,005	0,00	2009,095	13,2	0,66
18	4,000	113,00	0	0,00	2005,895	10,0	0,50
19	4,000	113,00	0	0,00	2001,895	6,0	0,30
20	4,000	113,00	0	0,00	1998,895	3,0	0,15
21	4,000	113,00	0	0,00	1995,895	0,0	0,00

**ETUDE DU RETRAIT D'ARGILE JAUNE STABILISEE AU CIMENT****ANNEXE 13 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 5 % de ciment (C5)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1810,53	220,5	13,87
1	0,60	116,40	1,55	1,32	1779,353	189,4	11,91
2	0,85	116,15	0,95	0,81	1763,179	173,2	10,89
3	0,99	116,01	0,70	0,60	1750,692	160,7	10,11
4	1,12	115,88	0,56	0,48	1725,216	135,2	8,50
7	1,25	115,75	0,43	0,37	1705,785	115,8	7,28
8	1,34	115,66	0,30	0,26	1689,51	99,5	6,26
9	1,42	115,58	0,21	0,18	1673,823	83,8	5,27
10	1,47	115,53	0,13	0,11	1653,454	63,5	3,99
11	1,50	115,50	0,08	0,07	1638,672	48,7	3,06
14	1,52	115,48	0,05	0,04	1628,295	38,3	2,41
15	1,54	115,46	0,03	0,03	1617,512	27,5	1,73
16	1,55	115,45	0,01	0,01	1608,626	18,6	1,17
17	1,55	115,45	0,00	0,00	1603,534	13,5	0,85
18	1,55	115,45	0,00	0,00	1600,256	10,3	0,65
21	1,55	115,45	0,00	0,00	1595,453	5,5	0,34
22	1,55	115,45	0,00	0,00	1593,369	3,4	0,21
23	1,55	115,45	0,00	0,00	1591,865	1,9	0,12

**ANNEXE 14 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 10 % de ciment (C10)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1810,403	190,4	11,75
1	0,40	116,60	1,22	1,04	1775,859	155,9	9,62
2	0,60	116,40	0,82	0,70	1744,788	124,8	7,70
3	0,75	116,25	0,62	0,53	1720,409	100,4	6,20
4	0,92	116,08	0,47	0,40	1705,827	85,8	5,30
7	1,00	116,00	0,30	0,26	1690,874	70,9	4,37
8	1,07	115,93	0,22	0,19	1678,489	58,5	3,61
9	1,11	115,89	0,15	0,13	1668,399	48,4	2,99
10	1,14	115,86	0,11	0,09	1660,712	40,7	2,51
11	1,16	115,84	0,08	0,07	1653,123	33,1	2,04
14	1,18	115,82	0,06	0,05	1648,844	28,8	1,78
15	1,2	115,80	0,04	0,03	1644,662	24,7	1,52
16	1,215	115,79	0,02	0,02	1640,372	20,4	1,26
17	1,22	115,78	0,00	0,00	1637,484	17,5	1,08
18	1,22	115,78	0,00	0,00	1633,546	13,5	0,84
21	1,22	115,78	0,00	0,00	1629,025	9,0	0,56
22	1,22	115,78	0,00	0,00	1627,422	7,4	0,46
23	1,22	115,78	0,00	0,00	1625,965	6,0	0,37

**ANNEXE 15 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 15 % de ciment (C15)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1821,186	181,2	11,05
1	0,36	116,64	0,97	0,83	1771,641	131,6	8,03
2	0,49	116,51	0,61	0,52	1752,665	112,7	6,87
3	0,60	116,40	0,48	0,41	1740,978	101,0	6,16
4	0,69	116,31	0,37	0,32	1733,292	93,3	5,69
7	0,80	116,20	0,28	0,24	1717,04	77,0	4,70
8	0,85	116,15	0,17	0,15	1707,657	67,7	4,13
9	0,89	116,11	0,12	0,10	1698,065	58,1	3,54
10	0,92	116,08	0,08	0,07	1690,08	50,1	3,05
11	0,93	116,07	0,05	0,04	1685,991	46,0	2,80
14	0,95	116,05	0,04	0,03	1673,413	33,4	2,04
15	0,96	116,04	0,02	0,02	1665,028	25,0	1,53
16	0,97	116,03	0,01	0,01	1660,74	20,7	1,26
17	0,97	116,03	0,00	0,00	1657,35	17,3	1,06
18	0,97	116,03	0,00	0,00	1652,085	12,1	0,74
21	0,97	116,03	0,00	0,00	1648,692	8,7	0,53
22	0,97	116,03	0,00	0,00	1646,245	6,2	0,38
23	0,97	116,03	0,00	0,00	1644,236	4,2	0,26

**ANNEXE 16 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 20 % de ciment (C20)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1814,397	179,4	10,97
1	0,32	116,68	0,84	0,72	1770,847	135,8	8,31
2	0,50	116,50	0,52	0,44	1742,667	107,7	6,59
3	0,61	116,39	0,34	0,29	1726,188	91,2	5,58
4	0,68	116,32	0,23	0,20	1710,2	75,2	4,60
7	0,75	116,25	0,16	0,14	1695,943	60,9	3,73
8	0,78	116,22	0,09	0,08	1686,157	51,2	3,13
9	0,80	116,20	0,06	0,05	1680,665	45,7	2,79
10	0,81	116,19	0,04	0,03	1675,883	40,9	2,50
11	0,82	116,18	0,03	0,03	1671,297	36,3	2,22
14	0,83	116,17	0,02	0,02	1665,714	30,7	1,88
15	0,835	116,17	0,01	0,01	1658,229	23,2	1,42
16	0,84	116,16	0,01	0,00	1653,54	18,5	1,13
17	0,84	116,16	0,00	0,00	1650,851	15,9	0,97
18	0,84	116,16	0,00	0,00	1648,231	13,2	0,81
21	0,84	116,16	0,00	0,00	1643,546	8,5	0,52
22	0,84	116,16	0,00	0,00	1641,125	6,1	0,37
23	0,84	116,16	0,00	0,00	1640,255	5,3	0,32

**ETUDE DU RETRAIT D'ARGILE JAUNE STABILISEE A LA CHAUX****ANNEXE 17 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 5 % de la chaux (L5)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0,00	117,00			1801,817	204,1	12,77
1	0,81	116,19	2,02	1,73	1753,741	156,0	9,76
2	1,28	115,72	1,21	1,03	1720,672	122,9	7,69
3	1,57	115,43	0,74	0,63	1695,995	98,3	6,15
4	1,70	115,30	0,45	0,38	1683,808	86,1	5,39
7	1,81	115,19	0,32	0,27	1668,267	70,5	4,41
8	1,87	115,13	0,21	0,18	1661,494	63,8	3,99
9	1,92	115,08	0,15	0,13	1655,204	57,5	3,60
10	1,96	115,04	0,10	0,09	1647,732	50,0	3,13
11	1,98	115,02	0,06	0,05	1640,65	42,9	2,69
14	1,99	115,01	0,04	0,03	1634,994	37,3	2,33
15	2	115,00	0,03	0,03	1625,71	28,0	1,75
16	2,01	114,99	0,02	0,02	1618,13	20,4	1,28
17	2,02	114,98	0,01	0,01	1613,744	16,0	1,00
18	2,02	114,98	0,00	0,00	1609,475	11,7	0,73
21	2,02	114,98	0,00	0,00	1599,254	1,5	0,09
22	2,02	114,98	0,00	0,00	1597,744	0,0	0,00

**ANNEXE 18 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 10 % de la chaux (L10)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1825,679	230,4	14,45
1	0,48	116,52	1,18	1,01	1770,131	174,9	10,96
2	0,73	116,27	0,70	0,60	1726,359	131,1	8,22
3	0,85	116,15	0,45	0,38	1705,425	110,2	6,91
4	0,96	116,04	0,33	0,28	1688,475	93,2	5,84
7	1,06	115,94	0,22	0,19	1675,29	80,1	5,02
8	1,1	115,90	0,12	0,10	1662,777	67,5	4,23
9	1,13	115,87	0,08	0,07	1650,294	55,1	3,45
10	1,15	115,85	0,05	0,04	1638,907	43,7	2,74
11	1,16	115,84	0,03	0,03	1628,524	33,3	2,09
14	1,17	115,83	0,02	0,02	1620,944	25,7	1,61
15	1,175	115,83	0,01	0,01	1615,184	19,9	1,25
16	1,18	115,82	0,00	0,00	1610,506	15,3	0,96
17	1,18	115,82	0,00	0,00	1606,217	11,0	0,69
18	1,18	115,82	0,00	0,00	1602,531	7,3	0,46
21	1,18	115,82	0,00	0,00	1598,125	2,9	0,18
22	1,18	115,82	0,00	0,00	1595,24	0,0	0,00

**ANNEXE 19 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 15 % de la chaux (L15)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1826,977	226,9	14,18
1	0,18	116,82	0,54	0,46	1787,424	187,3	11,71
2	0,24	116,76	0,36	0,31	1770,746	170,6	10,66
3	0,31	116,69	0,30	0,26	1748,26	148,1	9,26
6	0,43	116,57	0,23	0,20	1700,28	100,2	6,26
7	0,47	116,53	0,11	0,09	1684,8	84,7	5,29
8	0,495	116,51	0,07	0,06	1668,811	68,7	4,29
9	0,51	116,49	0,05	0,04	1660,936	60,8	3,80
10	0,52	116,48	0,03	0,03	1651,757	51,6	3,23
13	0,53	116,47	0,02	0,02	1637,979	37,9	2,37
14	0,535	116,47	0,01	0,01	1628,895	28,8	1,80
15	0,54	116,46	0,01	0,00	1621,805	21,7	1,35
16	0,54	116,46	0,00	0,00	1615,915	15,8	0,99
17	0,54	116,46	0,00	0,00	1610,955	10,8	0,68
20	0,54	116,46	0,00	0,00	1606,585	6,5	0,40
21	0,54	116,46	0,00	0,00	1602,255	2,1	0,13
22	0,54	116,46	0,00	0,00	1600,125	0,0	0,00

**ANNEXE 20 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 20 % de la chaux (L20)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1829,772	228,9	14,30
1	0,11	116,89	0,42	0,36	1783,427	182,5	11,40
2	0,19	116,81	0,31	0,26	1755,759	154,9	9,67
3	0,26	116,74	0,23	0,20	1728,784	127,9	7,99
6	0,34	116,66	0,16	0,14	1690,064	89,2	5,57
7	0,37	116,63	0,08	0,07	1675,294	74,4	4,65
8	0,38	116,62	0,05	0,04	1667,305	66,4	4,15
9	0,39	116,61	0,04	0,03	1660,234	59,3	3,71
10	0,4	116,60	0,03	0,03	1649,15	48,3	3,01
13	0,41	116,59	0,02	0,02	1638,978	38,1	2,38
14	0,415	116,59	0,01	0,01	1629,193	28,3	1,77
15	0,42	116,58	0,01	0,00	1620,309	19,4	1,21
16	0,42	116,58	0,00	0,00	1615,319	14,4	0,90
17	0,42	116,58	0,00	0,00	1610,112	9,2	0,58
20	0,42	116,58	0,00	0,00	1606,32	5,4	0,34
21	0,42	116,58	0,00	0,00	1603,25	2,4	0,15
22	0,42	116,58	0,00	0,00	1600,898	0,0	0,00

**ETUDE DU RETRAIT D'ARGILE JAUNE STABILISEE AU SABLE****ANNEXE 21 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 5 % du sable (S5)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1844,449	254,3	15,99
1	1,85	115,15	6,31	5,39	1790,474	200,3	12,60
2	2,75	114,25	4,46	3,81	1759,701	169,6	10,66
5	3,42	113,58	3,56	3,04	1714,407	124,3	7,82
6	3,61	113,39	2,89	2,47	1697,526	107,4	6,75
7	3,89	113,11	2,70	2,31	1680,848	90,7	5,71
8	4,09	112,91	2,42	2,07	1666,988	76,9	4,83
9	4,142	112,86	2,22	1,90	1658,221	68,1	4,28
12	4,2	112,80	2,17	1,85	1641,669	51,5	3,24
13	4,25	112,75	2,11	1,80	1630,1	40,0	2,51
14	4,28	112,72	2,06	1,76	1621,127	31,0	1,95
15	4,3	112,70	2,03	1,74	1613,043	22,9	1,44
16	4,31	112,69	2,01	1,72	1609,385	19,3	1,21
19	4,31	112,69	2,00	1,71	1601,62	11,5	0,72
20	4,31	112,69	2,00	1,71	1597,23	7,1	0,45
21	4,31	112,69	2,00	1,71	1593,54	3,4	0,21
22	4,31	112,69	2,00	1,71	1590,125	0,0	0,00

**ANNEXE 22 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 10 % du sable (S10)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1830,871	274,8	17,66
1	1,63	115,37	6,42	5,49	1780,72	224,6	14,43
2	2,52	114,48	4,79	4,09	1750,946	194,8	12,52
5	3,18	113,82	3,90	3,33	1697,446	141,3	9,08
6	3,39	113,61	3,24	2,77	1674,774	118,7	7,63
7	3,55	113,45	3,03	2,59	1656,589	100,5	6,46
8	3,69	113,31	2,87	2,45	1643,543	87,4	5,62
9	3,76	113,24	2,73	2,33	1635,767	79,7	5,12
12	3,85	113,15	2,66	2,27	1618,705	62,6	4,02
13	3,88	113,12	2,57	2,20	1600,243	44,1	2,84
14	3,9	113,10	2,54	2,17	1586,466	30,4	1,95
15	3,91	113,09	2,52	2,15	1576,278	20,2	1,30
16	3,92	113,08	2,51	2,15	1569,24	13,1	0,84
19	3,92	113,08	2,50	2,14	1562,36	6,3	0,40
20	3,92	113,08	2,50	2,14	1559,74	3,6	0,23
21	3,92	113,08	2,50	2,14	1556,11	0,0	0,00

**ANNEXE 23 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 15 % du sable (S15)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1813,199	255,6	16,41
1	1,27	115,73	6,61	5,65	1768,919	211,3	13,57
2	1,99	115,01	5,34	4,56	1729,142	171,5	11,01
5	2,62	114,38	4,62	3,95	1655,297	97,7	6,27
6	2,85	114,15	3,99	3,41	1649,819	92,2	5,92
7	3,07	113,93	3,76	3,21	1644,46	86,9	5,58
8	3,22	113,78	3,54	3,03	1635,572	78,0	5,01
9	3,34	113,66	3,39	2,90	1628,395	70,8	4,54
12	3,45	113,55	3,27	2,79	1612,046	54,4	3,49
13	3,47	113,53	3,16	2,70	1600,173	42,6	2,73
14	3,49	113,51	3,14	2,68	1587,192	29,6	1,90
15	3,5	113,50	3,12	2,67	1578,608	21,0	1,35
16	3,51	113,49	3,11	2,66	1572,35	14,7	0,95
19	3,51	113,49	3,10	2,65	1568,65	11,0	0,71
20	3,51	113,49	3,10	2,65	1563,92	6,3	0,41
21	3,51	113,49	3,10	2,65	1560,125	2,5	0,16

**ANNEXE 24 : Etude du retrait de l'argile jaune stabilisée avec 20 % du sable (S20)**

jours	Variation dimensionnelle				Variation de masse		
	$\Delta L_j$ [mm]	Longueur [mm]	DLj inversé [mm]	Retrait %	Mj [g]	Mj-Ms [g]	Humidité %
0	0	117,00			1815,895	296,6	19,52
1	1,25	115,75	6,80	5,81	1765,327	246,0	16,19
2	2	115,00	5,55	4,74	1736,451	217,1	14,29
5	2,51	114,49	4,80	4,10	1676,796	157,5	10,36
6	2,7	114,30	4,29	3,67	1655,445	136,1	8,96
7	2,8	114,20	4,10	3,50	1634,962	115,6	7,61
8	2,98	114,02	4,00	3,42	1616,7	97,4	6,41
9	3,1	113,90	3,82	3,26	1604,926	85,6	5,63
12	3,25	113,75	3,70	3,16	1584,968	65,6	4,32
13	3,3	113,70	3,55	3,03	1572,4	53,1	3,49
14	3,32	113,68	3,50	2,99	1562,919	43,6	2,87
15	3,35	113,65	3,48	2,97	1548,738	29,4	1,94
16	3,37	113,63	3,45	2,95	1539,75	20,4	1,34
19	3,38	113,62	3,43	2,93	1532,23	12,9	0,85
20	3,38	113,62	3,42	2,92	1525,5	6,2	0,41
21	3,38	113,62	3,42	2,92	1521,02	1,7	0,11
22	3,38	113,62	3,42	2,92	1519,33	0,0	0,00