



**Ministère de l'enseignement supérieure  
et de la recherche scientifique**

**UNIVERSITE DE M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**Département de génie civil**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention d'un diplôme de  
MASTER**

**Option : STRUCTURES**

**THEME**

**Le béton de terre stabilisée renforcée  
par des fibres**

**Proposé et dirigé par :**

**Mr. BENIA Mounir**

**Présentée par :**

**MAHMOUDI Saadia**

**Promotion : 2013/2014.**



Introduction Générale.....	1
organisation du mémoire .....	4

## *Chapitre I :*

### *Le béton de terre stabilisée*

I-1- Définition, genèse et principe du BTS .....	6
I-2- Quelques modes de mise en œuvre .....	6
I-2-1- La technique du torchis .....	7
I-2-2- La technique de la bauge .....	7
I-2-3- La technique de la terre coulée .....	7
I-2-4- Les blocs comprimés .....	8
I-2-5- La technique du pisé .....	8
I-2-6- La brique d'adobe.....	9
I-3- Architectures contemporaines .....	10
I-4- Les constituants du BTS .....	11
I-4-1- La matière première (la terre) .....	11
I-4-1-1- Définitions et origines de la terre .....	11
I-4-1-2- Structure .....	13
I-4-1-3- Texture.....	14
I-4-1-4- Propriétés de la terre .....	15
I-4-1-5- Qualités requises et identification des terres employées dans la construction .....	22
I-4-2- Le stabilisant .....	24
I-4-2-1- Définition .....	24
I-4-2-2- But et moyens .....	25
I-4-2-3- Mécanismes observés lors de la stabilisation .....	31

## *Chapitre II :*

### *Caractéristiques des blocs de terre stabilisée*

II-1- Introduction.....	34
II-2- L'Aspect.....	34
II-3- Résistance mécanique .....	34
II-3-1- Résistance à la compression .....	34
II-3-2 Résistance à la compression humide.....	36
II-3-3- Résistance à la traction .....	36
II-4- Durabilité .....	36
II-4-1- Sur pisé .....	36
II-4-2- Sur blocs de terre stabilisée .....	37

## *Chapitre: III*

### *Matériaux, matériels et méthodes*

III-1-Introduction .....	41
III-2-Matériaux utilisés .....	41
III-2-1-Eau de gâchage.....	41
III-2-2-Ciment .....	41
III-2-3-Les fibres .....	42
III-2-3-1-les fibres végétales .....	42
III-2-3-2-Fibres synthétiques.....	42
III-2-4-Le sol .....	42
III-2-4-1-Analyse granulométrique Par tamisage .....	42
III-2-4-2-Les limites d'Atterberg .....	44
III-2-4-3-Masse volumique apparente .....	47
III-2-4-4-Masse volumique (absolue) .....	48
III-2-4-5-Porosité .....	49
III-2-4-6-Compacité .....	49
III-2-4-6-L'indice des vides .....	50
III-2-4-7-Essai Proctor normal .....	50
III-3-Formulation .....	51

III-3-1-Fabrication des éprouvettes .....	51
---	----

## *Chapitre IV :*

### *Caractérisation*

IV-1- Technologie de production .....	55
IV-1-1-Technique traditionnelle .....	55
IV-1-1-1-Présentation des essais .....	55
IV-1- 2-Techniques améliorées .....	73
IV-2-Discussion des résultats et interprétations .....	83
IV-2-1- Interprétation de l'essai de durabilité .....	83
IV-2-2- Interprétation de l'essai d'écrasement .....	84
Conclusion .....	85

# *Liste des tableaux*

## *Chapitre : III*

<b>Tableau III-1</b> : Caractéristiques du ciment C.P.A de classe 325.....	41
<b>Tableau III-2</b> : Granulométrie par tamisage.....	43
<b>Tableau III-3</b> : détermination de la limite de liquidité.....	46
<b>Tableau III-4</b> : détermination de la limite de plasticité.....	47
<b>Tableau III-5</b> : Masse volumique apparente.....	48
<b>Tableau III-6</b> : Masse volumique apparente.....	48
<b>Tableau III-7</b> : Masse volumique absolue.....	49
<b>Tableau III-8</b> : la porosité, la compacité et l'indice de vide.....	50
<b>Tableau III-9</b> : Essai de Proctor.....	51

## *Chapitre : IV*

<b>Tableau IV-1</b> : poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage.....	56
<b>Tableau IV-2</b> : la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage.....	57
<b>Tableau IV-3</b> : poids des éprouvettes stabilisées à la chaux après chaque cycle de mouillage-séchage.....	57
<b>Tableau IV-4</b> : la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux après chaque cycle de mouillage-séchage.....	58
<b>Tableau IV-5</b> : poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétiques après chaque cycle de mouillage-séchage.....	58
<b>Tableau IV-6</b> : la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétiques après chaque cycle de mouillage-séchage.....	59
<b>Tableau IV-7</b> : poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage.....	59
<b>Tableau IV-8</b> : la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage.....	60
<b>Tableau IV-9</b> : poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	60
<b>Tableau IV-10</b> : la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	61

<b>Tableau IV-11:</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage .....	62
<b>Tableau IV-12:</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage .....	62
<b>Tableau IV-13 :</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage.....	63
<b>Tableau IV-14:</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage .....	63
<b>Tableau IV-15 :</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	64
<b>Tableau IV-16:</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	64
<b>Tableau IV-17:</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment..	65
<b>Tableau IV-18 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille.....	66
<b>Tableau IV-19 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier. ....	68
<b>Tableau IV-20:</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique.....	69
<b>Tableau IV-21 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées a la chaux.	70
<b>Tableau IV-22 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées a la chaux et renforcée par des fibres de paille.....	71
<b>Tableau IV-23:</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de palmier .....	72
<b>Tableau IV-24 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres synthétique.....	73
<b>Tableau IV-25 :</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage. ....	75
<b>Tableau IV-26 :</b> la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage .....	76
<b>Tableau IV-27:</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage. ....	76
<b>Tableau IV-28:</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage .....	77
<b>Tableau IV-29:</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	78
<b>Tableau IV-30 :</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.....	78

<b>Tableau IV-31 :</b> poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage.....	79
<b>Tableau IV-32:</b> la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage .....	79
<b>Tableau IV-33 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment.	80
<b>Tableau IV-34 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille.....	81
<b>Tableau IV-35 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier. ....	83
<b>Tableau IV-36 :</b> les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique. ....	84

# *Liste des figures*

## *Introduction générale*

**Fig.1** : Plus vieux bâtiments en terre encore debout.....2

**Fig.2** : Béton de terre stabilisée BTS.....2

## *Chapitre : I*

**Fig. I-1** : Le torchis.....7

**Fig. I-2** : Mur en bauge .....7

**Fig. I-3** : Terre coulée.....8

**Fig. I-4** : Blocs de terre comprimée .....8

**Fig. I-5** : Mur en pisé.....9

**Fig. I-6** : Brique d'adobe .....9

**Fig. I-7** : Quelques constructions en terre en Algérie. ....10

**Fig. I-8 a** : New Gournā (Égypte) .....11

**Fig. I-8 b** : Ville de Shibām (Yémen) .....11

**Fig. I-9** :Schéma des 3 phases du sol. ....11

**Fig. I-10** : Différents horizons d'un profil de sol .....13

**Fig. I-11** : schéma de différentes structures d'un sol .....13

**Fig. I-12** : Cohésion.....18

**Fig. I-13** : Plasticité .....19

**Fig. I-14** :états possibles d'un sol .....20

**Fig. I-15** :limites d'Atterberg .....20

**Fig. I-16** : exemple de courbe Proctor d'un sol .....21

**Fig. I-17** : Courbe granulométrique optimale B.T.S Fuseau limite . ....23

**Fig. I-18-a**: variation résistance à la compression en fonction de la densité sèche.....26

**Fig. I-18-b**: variation de la densité en fonction de la teneur en eau pour différentes énergies de compactage.....26

## *Chapitre : II*

**Fig. II-1**: Procédures d'essais sur BTC. ....35

**Fig. II-2** : A et B Préparation des demi-blocs .....35



## *Chapitre : III*

<b>Fig. III-1</b> : les fibres de Palmier dattier.....	42
<b>Fig. III-2</b> : les fibres de paille .....	42
<b>Fig. III-3</b> : les fibres synthétiques .....	42
<b>Fig. III-4</b> : Appareillage d'analyse granulométrique .....	43
<b>Fig. III-5</b> : la courbe granulométrique .....	44
<b>Fig. III-6</b> : Matériels spéciales Pour la limite de liquidité. ....	45
<b>Fig. III-7</b> : la courbe de la limite de liquidité.....	46
<b>Fig. III-8</b> : la courbe de Proctor .....	51
<b>Fig. III-9</b> : Etapes de préparation de la terre. ....	52

## *Chapitre: IV*

<b>Fig. IV-1</b> : Un malaxage manuel.....	55
<b>Fig. IV-2</b> : Les éprouvettes cubiques .....	55
<b>Fig. IV-3</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment.....	57
<b>Fig. IV-4</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage. ....	58
<b>Fig. IV-5</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcées par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage. ....	59
<b>Fig. IV-6</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcées par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage...	60
<b>Fig. IV-7</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcées par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage. ....	61
<b>Fig. IV-8</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcées par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage...	62
<b>Fig. IV-9</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcées par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage. ....	63
<b>Fig. IV-10</b> : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcées par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage. ....	64
<b>Fig. IV-11</b> : l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment.....	65
<b>Fig. IV-12</b> : l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment.....	65

<b>Fig. IV-13 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de paille en fonction de la teneur en ciment.....	66
<b>Fig. IV-14 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de paille en fonction de l'âge de cure.....	66
<b>Fig. IV-15:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de palmier en fonction de la teneur en ciment. ....	67
<b>Fig. IV-16 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de palmier en fonction de l'âge de cure. ....	67
<b>Fig. IV-17 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment.....	68
<b>Fig. IV-18 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment. ....	68
<b>Fig. IV-19:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées a la chaux .....	69
<b>Fig. IV-20:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées a la chaux .....	69
<b>Fig. IV-21:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à.....	70
<b>Fig. IV-22:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées a la chaux .....	70
<b>Fig. IV-23:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux .....	71
<b>Fig. IV-24:</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et .....	71
<b>Fig. IV-25 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcéepar des fibres synthétique en fonction de l'âge de cure.....	72
<b>Fig. IV-26 :</b> l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en chaux. ....	72
<b>Fig. IV-27:</b> Les éprouvettes cylindriques.....	73
<b>Fig. IV-28 :</b> Essai de mouillage-séchage.....	73
<b>Fig. IV-29 :</b> courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au .....	74
<b>Fig. IV-30 :</b> courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au cimentet renforcée par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle. ....	75
<b>Fig. IV-31 :</b> courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment etrenforcée par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle .....	76
<b>Fig. IV-32 :</b> courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment etrenforcée par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle.....	77
<b>Fig. IV-33 :</b> Etats des éprouvettes après l'écrasement .....	78
<b>Fig. IV-34 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment.....	78
<b>Fig. IV-35:</b> L'évolution de la des éprouvettes stabilisées au ciment résistance.....	79
<b>Fig. IV-36 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et.....	79
<b>Fig. IV-37 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de paille en fonction de la teneur en ciment.....	80
<b>Fig. IV-38 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et.....	80

<b>Fig. IV-39 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres de palmier en fonction de la teneur en ciment .....	81
<b>Fig. IV-40 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment.....	81
<b>Fig. IV-41 :</b> L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcéepar des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment.....	82
<b>Fig. IV-42 :</b> Essai de compression par écrasement. ....	82

**ملخص:** موضوع البحث الآتي يدرس خصائص خرسانة التراب المستقر المدعومة بالألياف، محور البحث الأول يشمل دراسة تأثير معالجة الطوب التقليدي المضغوط بمختلف أنواع المواد الرابطة والتي تشمل الاسمنت، الجير و الألياف على المقاومة الميكانيكية، النتائج المحصل عليها أظهرت سلوكا ميكانيكيا جيدا حينما تكون المعالجة بالجير مقارنة بالمعالجة بالاسمنت. دراسة عملية التلف بعد مراحل متتالية من الغمر في الماء متبوعة بتجفيف داخل فرن قد تمت من خلال تقييم نسبة الخسارة في الوزن، النتائج المحصلة أظهرت سلوكا رديئا للطوب يتمثل في خسارة كبيرة في الوزن تفوق القيم المتوقعة.

---

**Résumé :** Le présent thème de recherche étudie les caractéristiques du béton de terre stabilisée renforcée par des fibres, le premier axe de recherche consiste à analyser la stabilisation des éprouvettes de terre compactée et non compactée à partir de l'effet des différents types de traitement utilisés à savoir, le ciment, la chaux et les fibres, sur les résistances mécaniques.

Les résultats obtenus ont montré un meilleur comportement mécanique lorsque la stabilisation se fait à l'aide de la chaux devant la stabilisation au ciment.

Une analyse des processus d'altération suite à des cycles continus d'immersion dans l'eau suivie de séchage à l'étuve, à été effectuée en se basant sur les valeurs de perte en poids. Les résultats obtenus ont révélé un très mauvais comportement qui se traduit par des pertes importantes de matières dans l'eau dépassant les valeurs admissibles.

---

**Abstract:** The present them of research studies the characteristics of stabilized earth concrete reinforced by fibers, The first axis of research consist in analyzing the stabilization of compacted earth blocks from the effect of different types of treatments used and which include cement, lime and fibers, on mechanical strength. The results obtained showed a better mechanical behavior when the stabilization is done using the lime, compared with cement. Analysis of weathering processes due to continuous cycles of immersion in water followed by drying in an oven was carried out based on the values of weight loss. The obtained results revealed a very bad behavior that results in important loss of matter in water, which pass the admissible values.

### **INTRODUCTION GENERALE**

L'utilisation de la terre comme matériau de construction est une tradition très ancienne. En raison de son abondance et la disponibilité de la main d'œuvre, la construction en terre est très répandue dans toute la longue histoire d'Algérie, particulièrement dans Les zones rurales et les régions arides. La plupart des constructions traditionnelles sont faites avec de la terre associée à d'autres matériaux d'appoint tels que les ajouts végétaux ou minéraux. Cependant, la terre a l'inconvénient de présenter une faible durabilité sous l'action des intempéries. L'eau est donc un facteur Susceptible de provoquer des désordres importants sur les ouvrages en terre mettant en cause leur pérennité. Toutefois, en raison de son bas coût et les besoins importants dans le logement, les autorités locales encouragent la recherche dans ce domaine.

Du point de vue technique, les constructions en terre traditionnelle présentent deux caractéristiques particulièrement défavorables :

- d'une part la terre (non stabilisée) ne résiste pas à l'érosion due aux précipitations atmosphériques qui conduisent au chargement du volume des blocs, aux fissures de retrait, par conséquent au détachement des enduits et aux pertes de la résistance mécanique.
- d'autre part, la terre tend à gonfler ou à se rétracter, en fonction des variations d'hygrométrie de l'air ambiant, ce qui peut mener à sa désagrégation après un certain nombre de cycles d'humidification, séchage.

D'où le problème que pose l'utilisation traditionnelle de la terre, de durabilité du matériau lui-même ou de son enduit de protection, qui tend à se fissurer et à se décoller en raison de la mauvaise stabilité dimensionnelle du support due au comportement de l'argile plastique,

Cependant, il est très regrettable d'abandonner cette technique de construction à base de béton de terre à une époque où les connaissances en mécanique des sols, acquises grâce au développement des études routières, permettent de réaliser des compositions de béton de terre, éventuellement stabilisé pour un liant hydraulique ou par un traitement chimique.[2]

En effet de nombreuses études de recherches ont été menées pour améliorer la mauvaise image qu'offrait la construction en terre, et développer une technique appropriée de construction munie d'une future garantie bien adoptée, et qui conduisent à l'obtention d'un matériau d'actualité qu'est dans la plus part des cas, possédait des propriétés thermiques et économiques

## Introduction générale

---

nettement supérieurs à celles du béton de ciment, à savoir le B.T.S ou Géo-béton et ainsi la terre stabilisée pourra reconquérir ses lettres de noblesse et perdre au béton son prestige à la campagne et sa suprématie dans les villes.[12]



*Ramasseum, Egypt ~ 1300 BC*



*Tabo monastery, India 996 AD*

**Fig.1** : Plus vieux bâtiments en terre encore debout [3].

Afin de réintégrer ce mode de construction dans le monde moderne, de nombreuses recherches ont été effectuées, ayant pour objectif l'amélioration de l'usage de la terre dans la construction, en garantissant:

Un moindre coût.

Une moindre consommation d'énergie.

Une plus grande durabilité.

L'idée consistait à stabiliser de la terre avec un liant classique : ciment, chaux, ...etc. dosés en petite quantité. De la comprimer à l'aide d'une presse après gâchage et malaxage et de la produire sous forme de blocs connus sous le nom de « **Béton de Terre Stabilisée (BTS)** ».



**Fig.2** : Béton de terre stabilisée BTS.

### **Les avantages :**

- Le BTS est un produit fait à base de terre, matériau naturel disponible et directement utilisable.
- le confort thermique : Le B.T.S présente des caractéristiques bien meilleures que celles du béton de ciment. [20]
- Sa mise en œuvre simple favorise la pratique de l'auto-construction et de l'entraide collective.
- Une grande variété de terres est utilisée dans sa fabrication, à condition de respecter les normes et les codes adaptés
- le confort acoustique : Le béton de terre présente de très bonnes caractéristiques. Elles sont similaires à celles du béton de ciment classique. [20]
- Bonne résistance au feu.
- Le BTS est un matériau biodégradable et réversible. En imaginant un bâtiment en terre stabilisée détruit et qu'un vaste espace vert ait germé autour de lui: les bio produits chimiques contenus dans l'humus de la terre arable détruiront le mélange sol/ciment dans 10 ou 20 années et le BTS redeviendra la terre mère dont il a été fabriqué. Aucun autre matériau de construction ne peut faire cela. [6]

### **Les inconvénients :**

- La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante.
- Manque de professionnels formés.
- Possibilités architecturales limitées.
- Résistance mécanique limitée.
- Sensibilité à l'eau.
- Vulnérabilité aux attaques chimiques.

Les derniers points sont les plus importants à considérer lors de la conception d'une structure en terre. Un mauvais comportement de la terre vis-à-vis des sollicitations, qu'elles soient chimiques, physiques ou mécaniques peut mettre en péril la construction et entraîner des déboires irréversibles qui affecteront la durabilité de celle-ci.

### **Organisation du mémoire :**

La présente étude est entamée par une revue exhaustive sur le matériau « béton de terre stabilisée » BTS, ses modes de mise en œuvre et son utilisation dans les constructions antique et contemporaine. Quelques réalisations en Algérie sont présentées dans le cadre de l'habitat économique.

La seconde partie concerne les constituants du BTS. Les types de terres et les critères de convenance pour la construction sont décrits de même que les différents processus de stabilisation. Il s'ensuit une description du procédé de fabrication des blocs de terre comprimée ; mode de mise en œuvre le plus utilisé dans la construction.

La troisième partie regroupe la procédure de l'ensemble des essais expérimentaux, les essais d'identification et leurs interprétations.

La quatrième partie comprend une synthèse bibliographique des essais utilisés pour évaluer les caractéristiques mécaniques du matériau et les essais de durabilité.

L'étude est finalisée par une conclusion générale.



## **Chapitre I : Le béton de terre stabilisée**

### **I-1- Définition, genèse et principe du BTS:**

Le béton de terre stabilisée BTS est comme son nom l'indique un béton fait à base de terre, assemblée à des liants et à de l'eau. La littérature abonde en d'autres dénominations qui désignent toutes des produits identiques « Géobéton, Adobéton, Sol Ciment, Stabibloc, Géobloc, Tersta... ». Son utilisation est surtout répandue dans les zones rurales et sahariennes. Il permet la réalisation de logements collectifs, maisons individuelles, écoles, bâtiments à usage agricole, abribus...etc. L'architecture utilisée est adaptée au matériau qui ne doit travailler qu'en compression [8]. Le matériau est doté de bonnes caractéristiques thermiques. Il est produit à différentes échelles : presses manuelles, hydraulique ou électro-hydrauliques...

L'origine du béton de terre stabilisée est liée au comportement instable des terres employées dans la construction. Celles-ci devant leur cohésion essentiellement à l'argile, réagissent à l'humidité, en gonflant quand l'eau est absorbée, et en se rétrécissant quand le sol s'assèche. Un tel mouvement peut engendrer en surface des fissures qui accélèrent l'érosion et par conséquent entraînent des dégâts structurels. Gorgée d'eau, l'argile perd rapidement sa résistance mécanique et devient une boue liquide. La stabilisation de la terre ou l'incorporation de produits stabilisants tels que la chaux, le ciment, la l'asphalte,...etc. aura pour effet de remédier aux problèmes d'instabilité de l'argile à l'égard de ces variations hygrométriques. Le compactage du mélange améliore notablement la résistance mécanique. Le principe du béton de terre stabilisée BTS consiste donc à utiliser au mieux la terre et à lui conférer des qualités qu'elle ne possède pas.

### **I-2- Quelques modes de mise en œuvre :**

Les modes de mise en œuvre découlent de la texture du sol et de sa teneur en eau pendant la fabrication (sèche, humide). D'où la diversité de l'architecture que permet la terre dans la construction. Celle-ci est aussi fonction du degré de technicité atteint et des contextes sociaux et culturels.

Il existe différents procédés de mise en œuvre de la terre, ils permettent de construire des structures monolithes telles que les murs, les coupoles, etc. ou maçonneries telles que les briques et les blocs. Ces structures peuvent être autoportantes (mur de briques compressées, par exemple) ou non (remplissage d'une armature en bois, par exemple).

**I-2-1- La technique du torchis :**

Le torchis est considéré comme étant le premier matériau composite de l'histoire car il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales).

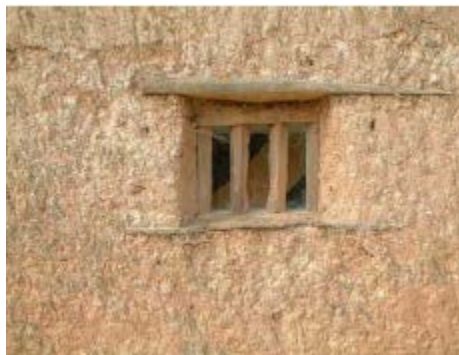
Torchis, vient de « tordre », car sa pose traditionnelle consiste à poser de la paille ou du foin torsadés dans une boue ou pâte de limon argileux projetée ou placée en enrobage sur une ossature de bois ou de bambou, qui assure la fonction porteuse. Le torchis forme naturellement un écran de sécurité contre le feu.



**Fig. I-1 :** Le torchis

**I-2-2- La technique de la bauge :**

La technique de la construction en bauge consiste en l'édification de murs massifs, souvent porteurs, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales voire animales mis en œuvre par empilement de couches de terre à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage.



**Fig. I-2 :** Mur en bauge

**I-2-3- La technique de la terre coulée :**

La terre coulée, également appelée « pisé coulé », est un mélange très graveleux utilisé pour la réalisation d'éléments non porteurs (cloisons, remplissages, etc.).

La terre coulée est un béton de terre, réalisé et mis en œuvre de manière similaire à un béton de ciment. Elle est composée de granulats et d'une pâte d'argile qui sert de liant. Pour obtenir la

bonne granularité (c'est-à-dire les bonnes proportions de granulats, sables et argiles), il est nécessaire de décomposer ou de recomposer la terre locale : soit on la tamise si elle est déjà graveleuse, soit on lui ajoute des granulats si elle est trop fine.



**Fig. I-3 :Terre coulée**

#### **I-2-4- Les blocs comprimés :**

Les blocs comprimés sont fabriqués à partir d'une terre tamisée, très légèrement humide, stabilisée puis comprimée. Traditionnellement ces blocs étaient moulés dans du bois puis comprimés par battage ou en laissant tomber un couvercle très lourd. Aujourd'hui la technique a été améliorée d'un point de vue compression et rendement avec la mécanisation. On utilise alors des presses qui compriment la terre. Ce qui permet de réduire le volume des vides dans le bloc, diminuant ainsi sa sensibilité à l'eau et augmentant sa résistance.



**Fig.I-4 :Blocs de terre comprimée**

#### **I-2-5- La technique du pisé :**

Le "pisé" est un principe de construction de murs épais en damant à l'aide d'un pilon ou d'un fouloir de la terre de différentes natures, stabilisée à la chaux dans des coffrages latéraux, qu'on

déplace au fur et à mesure de l'avancement du travail. Ce dernier procédé connu aussi en Algérie avant 1962 est encore employé à ce jour au Maroc.



**Fig.I-5 : Mur en pisé**

#### **I-2-6- La brique d'adobe:**

Le mot « Adobe » vient de l'arabe « at-tūb »: brique de terre séchée, d'où l'appellation « Adobéton » : néologisme arabo-hispanique résultant tout bonnement de la contraction des mots “adobe” et “béton”. La brique d'adobe est un mélange d'argile, d'eau et éventuellement de débris végétaux (paille hachée, copeaux de bois, sciure) en très petites quantités. Les briques sont moulées dans des moules en bois. Après un temps de repos de quelques jours, les briques sont démoulées et sont laissées à sécher au soleil le temps nécessaire à un séchage complet (15 jrs environ). Elles sont utilisables dans la réalisation de murs porteurs comme pour les cloisons intérieures.[5]



**Fig.I-6 :Brique d'adobe**

**I-3- Architectures contemporaines :**

En Algérie, on compte de nombreux édifices en terre qui ont été construits aussi bien par la population que par les autorités.



Hopital d'ADRAR

village en toub entre  
Khenchela et Biskra

Temimoun

**Fig. I-7 :**Quelques constructions en terre en Algérie.

A une époque récente qui démarre des années 70, une nouvelle impulsion a été donnée à la construction en terre par l'Etat, dans le cadre d'une politique de construction de logements économiques entre autres dans le projet des Villages Agricoles Socialistes. Cette relance a été accompagnée de programmes de recherche scientifique qui ont été principalement menés par le LNTPB (Laboratoire National de Travaux Publics et du Bâtiment) et les CPRA (Chantiers Populaires de la Révolutions Agraire).

- En 1970, des logements ont été construits en B.T.S coulé et banché (Wilaya de Tipaza).
- En 1973, un village agricole de 30 logements a été construit en pisé (Wilaya Sidi Bel Abbès).
- En 1976, un village agricole de 100 logements (M'SILA) a été construit en BTC.
- En 1982, un 1er prototype expérimental en B.T.S. (Tamanrasset) a été réalisé en presse manuelle.
- En 1984, le travail de la recherche a été encouragé par les autorités au niveau des universités et des centres de recherche, dans le but d'encourager l'usage de matières locales à faible coût dans la construction dans les régions rurales et sahariennes (gypse, chaux, sable de dune et sol stabilisé).

Quelques machines hydrauliques ont été développées pour améliorer le compactage et produire des blocs semblables aux blocs de béton. Les moyens de stabilisation chimique par ciment, chaux et par les fibres naturelles ont été étudiés. [2]

Mais, de toutes les villes du monde construites entièrement en terre, « Shibām » au Yémen du Sud, est la plus étonnante. On l'appelle parfois le " Manhattan du désert " car ses 511 immeubles



donnent l'impression d'une forêt de gratte-ciels : ils sont élevés jusqu'à 31 mètres de hauteur sur 8 niveaux. Plus de la moitié de ces immeubles ont été construits au XXe siècle, prouvant ainsi la vitalité de ce savoir-faire et ses possibilités d'adaptation à l'urbanisation contemporaine. [11]



**Fig. I-8a :** New Gournā (Égypte) [10]**Fig. I-8 b :** Ville de Shibām (Yémen) [11]

#### **I-4- Les constituants du BTS :**

##### **I-4-1- La matière première (la terre):**

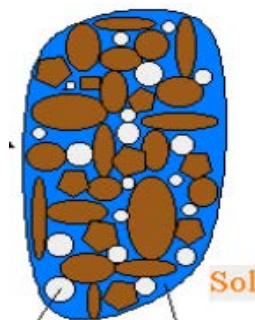
##### **I-4-1-1-Définitions et origines de la terre:**

La terre est le matériau le plus constamment rencontré dans la nature. Connue aussi sous l'appellation de sol, elle constitue une grande partie de la pellicule superficielle de la croûte terrestre, résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques.

Contrairement aux autres matériaux de construction, tels que le béton, l'acier, le bois et leurs dérivées, la terre est un matériau difficile à définir, car elle n'a pas de composition précise normalisable.

Il s'agit d'un complexe multiphasique, formé en général des phases suivantes :

- solide : des grains solides (minéraux ou fragments de roche) ;
- liquide : de l'eau ;
- gazeuse : de l'air.



**Fig. I-9 :**Schéma des 3 phases du sol.

L'assemblage des grains solides forme le squelette du sol. Autour de ce squelette, les vides ou les pores peuvent être remplis par de l'eau ou de l'air. Si l'eau remplit tous les pores, le sol est saturé.

On différencie le sol de la croûte terrestre par la présence significative de vie. Il existe plusieurs définitions de la terre ou du sol: Les agronomes nomment parfois « sol » la partie arable homogénéisée par les labours et explorée par les racines des plantes. Pour un ingénieur civil, le sol est un support sur lequel sont construites des routes, et fondés les bâtiments. Pour un écologue, le sol est un habitat et un élément de l'écosystème qui est le produit et la source d'un grand nombre de processus et interactions chimiques, biochimiques et biologiques. Les pédologues estiment que la partie arable ne constitue que la partie superficielle du sol.

La science qui étudie les sols, leur formation, leur constitution et leur évolution, est la pédologie.

La terre est constituée d'un mélange de minéraux formés lors de la désagrégation de la roche mère sous l'action des facteurs climatiques et érosifs. Elle contient très souvent des quantités de matières organiques d'origine animale ou végétale, nécessaires pour l'agriculture mais nuisibles pour la construction.

Un profil de sol est constitué de plusieurs horizons humifères, (riches en humus), au-dessus d'horizons minéraux. On distingue :

- A0 : Couche organique peu décomposée recouvrant le sol minéral (plus de 30% de matières organiques).
- A1 : Horizon mixte, mélange de matières organiques (- 30 %) et minérales.
- A2 : Horizon dit "éluvial", pauvre en matières organiques, souvent lessivé en argiles et oxydes de fer et décoloré.
- A3 : Transition entre les zones éluviales et illuviales, début d'accumulation des colloïdes.
- B1 : Couche ferreuse contenant de la matière organique et des oxydes de fer et d'aluminium (sesquioxydes).
- B2 : Horizon dit "illuvial", enrichi en argiles accumulées et en oxydes de fer.
- B3 : Couche de transition entre B et C.
- C : Matériau originel.
- R : Roche mère non altérée. [13]

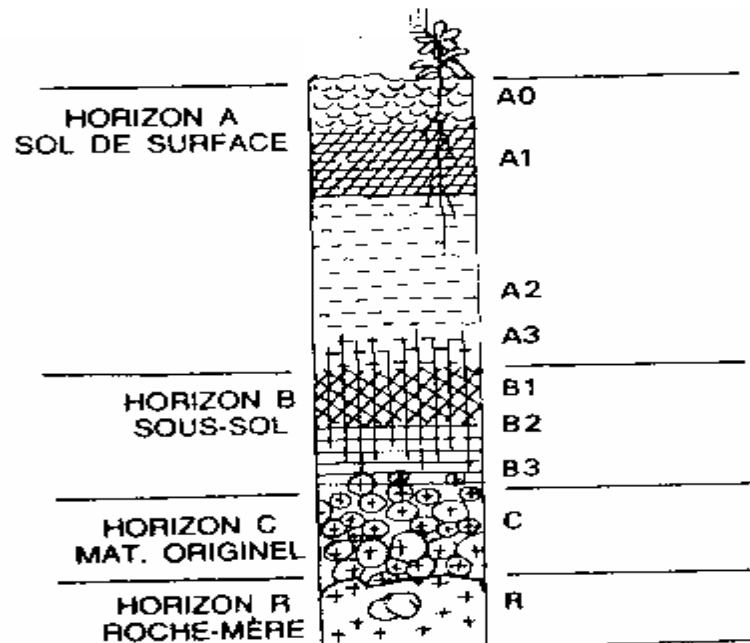


Fig.I-10 :Différents horizons d'un profil de sol [13].

#### I-4-1-2-Structure :

La structure d'une terre caractérise la nature de la liaison entre les particules. Elle permet de différencier les propriétés physiques du sol. On distingue :

- Structure particulaire**: les éléments ont une très faible liaison argileuse (éléments graveleux).
- Structure fragmentaire**: les éléments sont liaisonnés par de l'argile sous formes de paquets.
- Structure continue**: de type poudingue; les éléments inertes sont pris dans une masse d'argile et de limon.

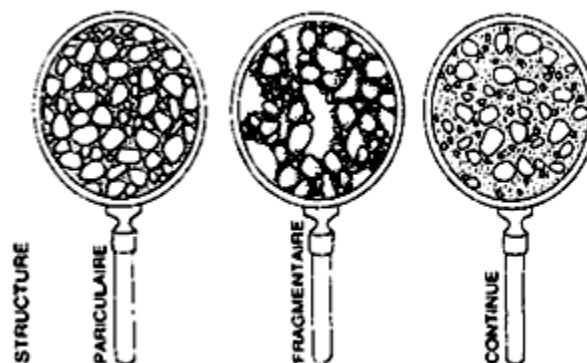


Fig.I-11 : schéma de différentes structures d'un sol [13]

#### I-4-1-3-Texture:

C'est la composition granulaire d'une terre. Elle permet la classification des terres selon la quantité des différentes fractions : graveleuse, sableuse, silteuse, argileuse ou organique. On distingue selon la taille des particules :



**a- Les argiles :**

Elles sont constituées de particules invisibles à l'œil nu, de dimensions inférieures à 2 microns. Elles se caractérisent par une plasticité à l'état humide et une dureté à l'état sec. Il existe différents types d'argiles (kaolinite, montmorillonite,...) qui ont des comportements différents. Les moins actives sont les argiles à kaolinite, elles sont préconisées lors de la fabrication de blocs de terre comprimés car elles présentent un cycle gonflement/retrait minimum. [14]

Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques. Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires. Physiquement, les argiles sont très souvent de forme plate et allongée, lamellaire. Leur surface spécifique est infiniment plus grande que celle des particules grossières de forme sphérique ou anguleuse.

**b- les silts:**

Les silts sont des petites particules de taille entre 0,06 mm et 0,002 mm, très perméables et sensibles au gel. Ils possèdent des films d'eau inter-particules qui confèrent un certain degré de cohésion.

**c- Les sables :**

Les particules de sables sont souvent composées de silice ou de quartz et ont des dimensions comprises entre 2 mm et 0,06 mm. A l'état humide, les sables ont une faible cohésion du fait de la faible influence des films d'eau au voisinage de leur surface. Ils ne présentent aucune réaction de retrait en séchant et se caractérisent par une grande friction interne.

**d- Les graviers :**

Les graviers sont des particules de forme anguleuse ou arrondie. Leur taille peut aller jusqu'à 60 mm. Ils constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait. Les graviers n'ont aucune cohésion et ne présentent aucune variation dimensionnelle.

**e- Autres terres :**

En dehors de ces quatre types de terres on peut distinguer, vu leur importance particulière, les sols organiques et les latérites.

- **Les sols organiques :**

Ils se trouvent dans l'horizon de surface des sols et contiennent beaucoup de matières organiques, végétales ou animales décomposées. Les matières organiques ont une structure ouverte et spongieuse et sont dotées d'une faible résistance mécanique. Les matières organiques de nature

acide, peuvent provoquer des réactions nocives avec l'eau du sol affectant fortement les caractéristiques des terres.

Les sols organiques, ou qui contiennent des matières organiques, sont inutilisables pour construction. En effet, la présence de telles matières peut sérieusement affecter la réaction entre la chaux et le sol, empêcher le durcissement du ciment, et compromettre la stabilité à long terme du matériau.

- **Les sols latéritiques :**

Il existe de nombreuses sortes de latérites et donc de définitions de celles-ci. Elles résultent du "vieillissement" naturel du sol en climat tropical ou subtropical et se rencontrent sous des formes dégradées allant de l'état rocheux (avec des éléments de dimensions supérieures à 60 mm) à des éléments fins comparables à l'argile. Les latérites contiennent, en proportion très variable, des oxydes de fer et d'aluminium, du quartz, etc., et leur couleur va de l'ocre au noir en passant par le rouge, le brun et le violet. Les latérites sont généralement plus résistantes que l'argile et présentent, pour les éléments fins, des phénomènes de gonflement et de retrait [14].

Enfin, en fonction de la teneur en chaux, on parle pour certains sols de craie ou de calcaire (teneur supérieure à 75%), et de marnes pour des sols qui ont une teneur en chaux comprise entre 25 et 75% [13].

#### **I-4-1-4- Propriétés de la terre :**

Les propriétés de la terre diffèrent selon les quantités des fractions qui la constituent. C'est souvent la fraction dominante d'une terre qui régit les propriétés fondamentales du matériau.

##### **a- Propriétés chimiques:**

Ces propriétés diffèrent selon la composition chimique de la terre, la nature de ses constituants ainsi que leurs teneurs. La mesure du pH d'une terre par exemple précise la concentration d'ions et sa nature acide ou basique. Parmi les éléments, les plus influents du point de vue chimique sont notamment les sels, qu'ils soient solubles ou insolubles. La salinité élevée d'une terre peut induire des propriétés chimiques très marquées. Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique des minéraux et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques: ces composants instables, en cours d'évolution chimique et biochimique, peuvent faire évoluer la structure même de la terre en produisant des précipités de différente nature, des colloïdes et des sortes de pâtes collantes humifères et bactériennes.

De même, la quantité en oxydes 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, la côte d'alerte de la teneur en sulfates d'un sol est basse et se situe de 2 à 3%. La teneur tolérable en chlorures est de même ordre. Les oxydes métalliques peuvent être très influents. 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. [13]

**b- Propriétés physiques :**

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'une terre pour la construction.

- **Couleur :**

Le spectre de couleur des terres est très large et peut aller du blanc au noir en passant par le beige, l'ocre jaune ou rouge, l'orangé, le rouge, le brun, le gris et même le bleu et le vert. Les terres qui peuvent convenir pour la fabrication de blocs stabilisés sont les terres de couleur : rouge, brun rougeâtre, jaune, brun-jaunâtre [19].

- **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.

- **Stabilité structurale:**

C'est la solidité de la structure de la terre qui précise sa résistance aux agents de dégradation.

- **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 ensuite diminuer.

- **Masse volumique apparente:**

Elle concerne la terre dans son ensemble et s'exprime en kg/m<sup>3</sup>.

- **Masse volumique spécifique:**

C'est la densité des constituants de la terre. Elle s'exprime en kg/m<sup>3</sup>.

- **Teneur en eau:**

C'est la quantité d'eau contenue dans la terre, 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 de l'eau que l'on peut éliminer par évaporation

- **Porosité :**

C'est le volume des vides de la terre exprimé en % du volume total. Il ya une relation entre la porosité et la densité spécifique.

- **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'argiles et les micelles d'humus.

- **Potentiel capillaire :**

Il mesure la force de succion de l'eau par la terre et s'exprime en g/cm<sup>3</sup> ou en atmosphère. pF est le logarithme décimal de cette pression. Plus le sol est humide, plus la succion est élevée et moins l'eau est retenue dans la terre. Plus la terre est sèche, plus la succion augmente.

- **Diffusion capillaire :**

C'est le déplacement de l'eau retenue dans la terre.

- **Perméabilité :**

C'est la vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure. Elle s'exprime en cm/heure.

- **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 cm<sup>2</sup>/g.

- **Chaleur spécifique :**

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1°C.

- **Résistance sèche :**

La résistance à la rupture transversale 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 perfection et de leur cristallinité mais aussi de la nature des ions échangeables

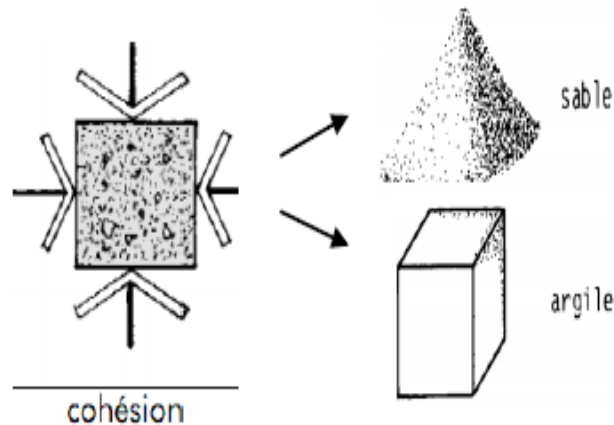
c- **Propriétés élémentaires :**

- **Granulométrie :**

La première caractéristique d'un sol est la dimension des particules qui le composent : la "granulométrie". La taille de ces particules est en effet fort différente selon qu'il s'agisse de gros gravier (plusieurs mm) ou d'argile (quelques millièmes de mm). Les particules peuvent être toutes de même taille (sable, par exemple) ou, au contraire, de tailles différentes (sable argileux, par exemple). Cette solution étant la meilleure pour la fabrication des briques compressées.

Selon leur granulométrie, les sols auront une cohésion plus ou moins forte : les particules les plus grosses (gravier, sable) ont une cohésion nulle, les plus fines (argiles) ont une forte cohésion. La

cohésion est la propriété qu'ont certaines particules d'adhérer les unes aux autres lorsqu'elles sont pressées. Une brique de graviers ou de sable sec ne tiendra pas après le démoulage ... On voit donc la nécessité absolue d'avoir une certaine quantité d'argile dans la composition des sols utilisés pour la fabrication des briques afin d'assurer à ceux-ci la cohésion indispensable à la tenue des briques.



**Fig. I-12 : Cohésion**

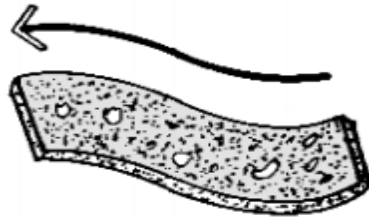
La granulométrie de la terre représente la teneur centésimale en fractions de grains différents mesurées en pourcentages. Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers: cailloux, graviers, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses.

À partir de la courbe granulométrique, la composition d'une terre est déterminée; il s'agit d'un graphique qui indique, pour une dimension donnée « d » d'un grain (portée en abscisse), le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à « d » (tamisât, passant) ou supérieure à « d » (refus).

La courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmiques, de façon à donner une représentation plus précise des particules fines (qui influent énormément sur le comportement des sols).

- **Plasticité:**

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans fissuration ou pulvérisation. [13]



**Fig.I-13** : Plasticité

La consistance d'une terre varie dans des proportions importantes en fonction de la teneur en eau; ceci est lié à l'importance plus ou moins grande des couches d'eau adsorbées autour des ses grains et plus généralement aux propriétés colloïdales des argiles et à leur proportion dans le sol considéré:

- Si la teneur en eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir en place les particules de sol. Ce dernier se comporte sensiblement comme un fluide (boue). Il est à l'état liquide (le sol tend à s'étaler si on le dépose sur une surface horizontale).
- Si la teneur en eau diminue, le sol peut être modelé sans qu'il s'effrite et conserve sa forme. Les particules sont rapprochées car l'eau adsorbée est mise en commun (les grains sont reliés entre eux par des molécules d'eau). Le sol est alors à l'état plastique, (posé sur une surface horizontale, il ne s'étale pas mais n'offre aucune résistance à l'action d'une charge même très faible.)
- Si la teneur en eau diminue encore, les grains deviennent très rapprochés; le sol ne peut plus être modelé et se fend lorsqu'on le travail, c'est l'état solide. Cet état peut se découper en deux sous-états:

Lorsque la quantité d'eau est relativement importante la pellicule d'eau qui entoure les grains tend à les repousser et augmente le volume apparent; si l'on sèche un tel sol le volume diminue : il y a retrait. C'est l'état solide avec retrait. La déformabilité du sol est beaucoup plus faible qu'à l'état plastique.

Lorsque la quantité d'eau devient encore plus faible, la rigidité du corps augmente encore mais son volume ne change pas alors que la teneur en eau diminue. On parle d'état solide sans retrait. Les trois schémas ci- contre résument les états possibles d'un sol. [15]

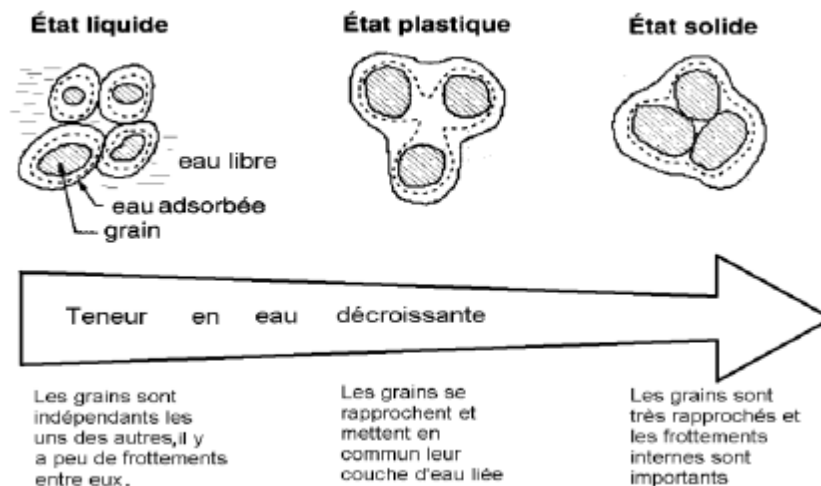


Fig. I-14 : états possibles d'un sol [15]

### Les limites d'Atterberg :

Au début du XXI<sup>ème</sup> siècle, le Suédois Atterberg a défini des limites entre les états (liquide, plastique, solide), et Casagrande a repris plus tard ce concept et mis au point des essais normalisés permettant de déterminer les teneurs en eau pour lesquelles la transition s'effectue.

La connaissance des limites d'Atterberg permet de présumer le comportement d'un sol donné (en fonction de la nature et de la quantité d'argiles qu'il contient) lorsqu'il est soumis à différentes sollicitations.. On distingue trois limites conventionnelles :

- La limite de liquidité  $W_L$  : teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.
- La limite de plasticité  $W_P$  : teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide.
- La limite de retrait  $W_R$  : teneur en eau qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait (elle correspond à la quantité d'eau juste nécessaire pour combler les vides d'un sol lorsque celui-ci est à son volume minimum)...

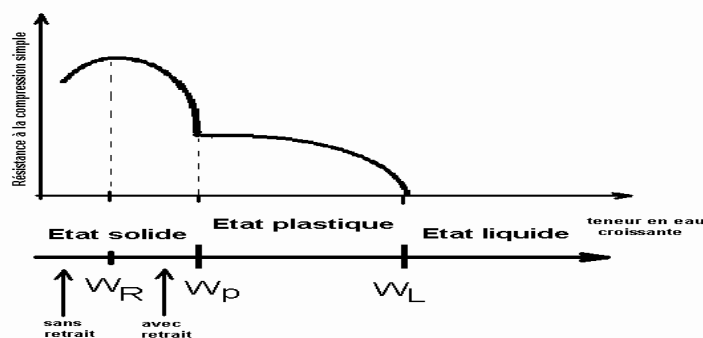


Fig. I-15 :limites d'Atterberg [15]

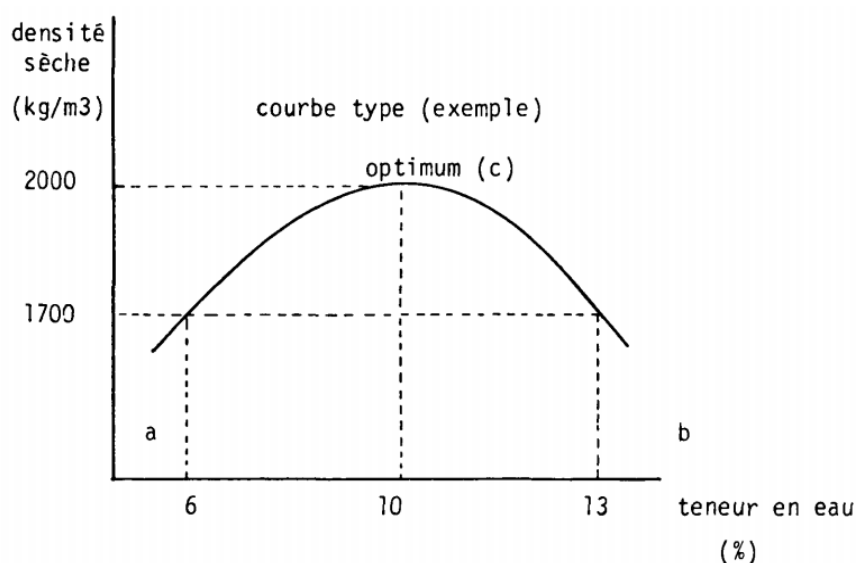
En général, dans leur état naturel, les sols ont une teneur en eau  $W_0$  comprise entre  $W_P$  et  $W_L$ . L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P$  donne une indication sur l'étendue du domaine plastique. Plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessiccation). L'indice de plasticité n'est jamais nul mais peut être non mesurable. [15]

- **Compressibilité:**

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (Teneur en Eau Optimale TEO). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité est bloquée et moins l'eau peut avoir l'occasion d'y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.

La compressibilité d'une terre est mesurée par l'Essai Proctor. Au début des années 1930, M. Proctor trouva une solution pour déterminer la densité maximum des sols. Il trouva que dans un environnement contrôlé (pour un volume contrôlé), le sol pouvait être compacté jusqu'à un point où il n'y aurait plus d'air présent dans le sol, simulant les conditions d'un sol in situ. À partir de là, la densité sèche pouvait être déterminée en mesurant simplement le poids du sol avant et après compaction, calculant la teneur en eau et la densité sèche.

L'optimum est déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une compacité maximum.



**Fig. I-16** : exemple de courbe Proctor d'un sol [11]



**I-4-1-5- Qualités requises et identification des terres employées dans la construction :**

Quelques propriétés doivent être présentes dans la terre afin d'assurer une qualité satisfaisante du matériau produit:

- La terre ne doit pas être trop argileuse au risque d'entraîner des fissurations de retrait ou de gonflement fragilisant les briques, en plus du fait qu'elle nécessiterait beaucoup de stabilisant.
- La terre doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage.
- Il faut que la terre contienne des particules de dimensions différentes pour que celles-ci puissent s'enchevêtrer les unes dans les autres. Les gros éléments du matériau ne doivent pas dépasser une taille limite dépendant de la taille des blocs [8]

D'où la nécessité d'effectuer des essais d'identification afin de vérifier l'aptitude de la terre à la stabilisation et déterminer le type de traitement le mieux adapté du double point de vue de l'économie (type de stabilisant, pourcentage) et des performances techniques (résistance mécanique...). Les essais d'identification doivent être divers car il n'existe pas d'essai unique qui réponde à tous les critères.

- **L'essai granulométrique :**

L'essai granulométrique donne les proportions des éléments qui constituent un sol. Une granulométrie étalée, c'est à dire un sol comportant non seulement de l'argile mais aussi du sable et des gravillons, est souhaitable (ce qui élargit la gamme des sols utilisables) en raison du rôle du squelette rigide joué par les sables et graviers et de la cohésion qu'apportent les argiles au mélange.[2]

Des recherches de laboratoires ont montré que la compacité maximum (minimum de vides) était obtenue pour des compositions granulométriques continues (la résistance d'un sol aux efforts de compression étant fonction de sa compacité). TALBOT préconise les compositions granulométriques correspondant aux courbes d'équation :

$$P = 100 (d/D)^n \text{ [17]}$$

P : pourcentage en poids des particules de dimensions inférieures ou égales à d, c'est-à-dire passant au diamètre d.

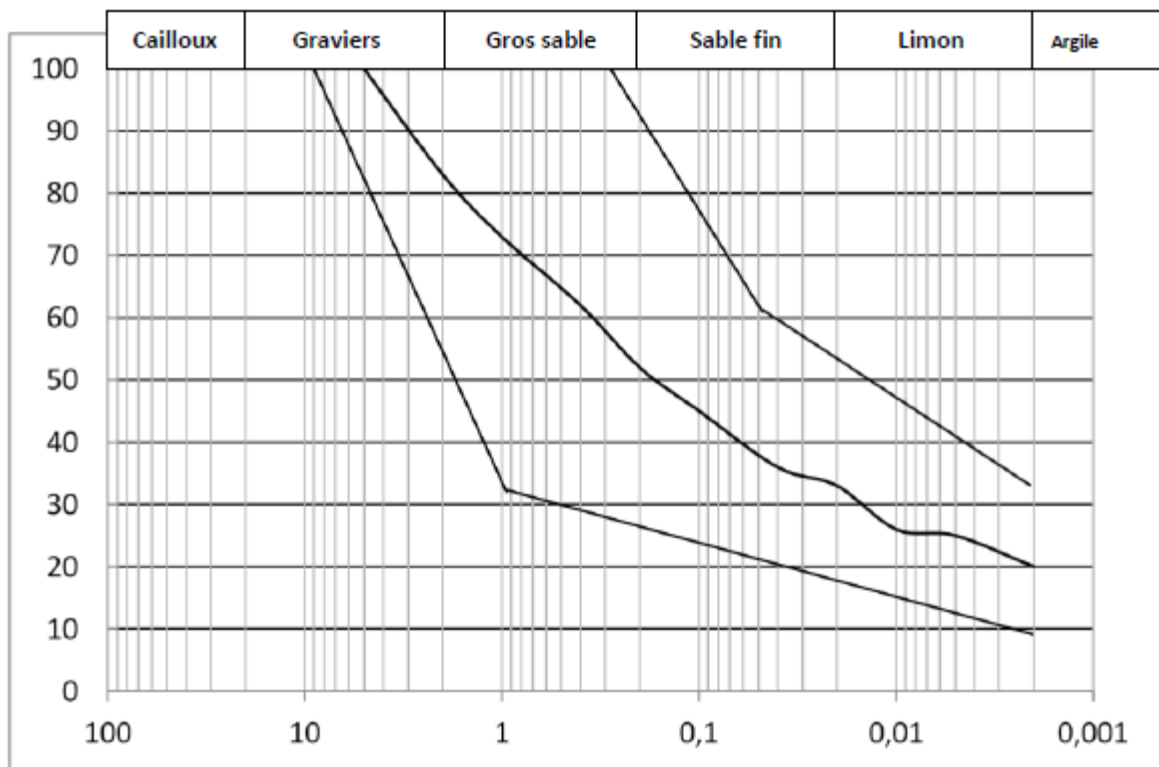
D : diamètre maximum admis.

n : exposant variant de 0.11 à 0.35 suivant la valeur de D.

La courbe de TALBOT (D étant choisi) définit la composition granulométrique optimum. Cependant, des sols présentant des compositions voisines peuvent convenir. Des essais

permettent de définir les courbes de composition granulométrique limite des sols présentant une compacité suffisante pour pouvoir constituer des briques crues. [17]

Selon le manuel de recommandations sur le béton de terre stabilisée édité par le CNERIB [20], la courbe granulométrique du sol analysé doit s'inscrire à l'intérieur du fuseau donné en figure.



**Fig. I-17 :** Courbe granulométrique optimale B.T.S Fuseau limite [20].

- **Etat de consistance :**

L'état de consistance d'un sol est défini par : son indice de plasticité  $I_p$ , sa limite de liquidité  $W_L$ , sa limite de plasticité  $W_p$ , sa teneur en eau optimale (T.E.O).

Il est recommandé de respecter les fourchettes suivantes : [20]

- La limite de liquidité  $W_L$  maximum admissible est de 25 à 50%.
- L'indice de plasticité  $I_P$  maximum admissible est de 17 à 29% et le minimum admissible est de 2,5%.
- Les meilleurs sols pour la stabilisation sont ceux avec un indice de plasticité bas ( $I_P$ ).
- Pour un indice de plasticité  $>20$ , le compactage manuel n'est plus convenable. [21]

Concernant la teneur en eau optimale admissible (PROCTOR), elle est comprise entre les valeurs suivantes: T.E.O minimale admissible 7 à 10% [10]. La teneur en eau à la mise en œuvre devra être légèrement supérieure à la T.E.O. la T.E.O maximale admissible est de 14 à 16%. [20]

Selon [22], la teneur en eau optimum  $10\% \leq \text{TEO} \leq 14\%$  pour les constructions urbaines permanentes, régions où les précipitations dépassent 75cm /an. Pour les constructions rurales d'envergure modeste, pluviométrie modérée  $7\% \leq \text{TEO} \leq 06\%$ .

- **Analyse chimique :**

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en élément nocifs :

Sels solubles

Sels acides

Sels alcalins

Matières organiques

Carbonates

Chlorures

Sulfates.

Les sulfates sont les plus fréquents dans les sols (gypses) et les plus préjudiciables, car gonflants et solubles. A l'état sec, les sulfates de calcium que l'on rencontre fréquemment sont moins néfastes que les sulfates de magnésium. A l'état humide, les sulfates sont toujours très néfastes. Les sulfates détruisent la matrice durcie du liant et augmentent la sensibilité à l'humidité des argiles. Une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3% de teneur totale de sulfates est indispensable. [22]

#### **I-4-2- Le stabilisant :**

##### **I-4-2-1-Définition :**

La stabilisation d'une terre cherche à rendre ce matériau utilisable pour la construction en améliorant ses caractéristiques rhéologiques, chimique, mécaniques et sa stabilité. Ces principales techniques de stabilisation peuvent se développer de deux façons différentes :

- Soit rendre superficiellement le béton de terre hydrofuge, ou étanche ; soit réagir avec les composants de la terre et former à l'intérieur de la masse du béton une armature rigide.

##### **I-4-2-2-But et moyens :**

La plupart des terres, mais pas toutes, peuvent être stabilisées, soit par rapport de ciment, soit par rapport de chaux « chaux hydraulique naturelle ou chaux vive, ou encore mélange de chaux vive et éteinte », soit par rapport de ciment (ciment + chaux) à un sol traité probablement à la chaux, soit par densification avec des moyens mécaniques « compactages, damage... », Soit enfin par ajout de certains constituants (mort ou actifs chimiquement : bitume, hydrophobes...).

Revenons encore sur le fait que bien que la stabilisation s'applique à une très grande variété de sols, qu'ils soient fins, argileux, à forte teneur en eau, certains sols ne sont pas stabilisés (sols très plastiques ou contenant trop de matières organiques néfastes, ou trop de sulfates expansifs).

A noter que les améliorations obtenues (réduction de la sensibilité à l'eau, augmentation de la résistance mécanique, conclusion ...) doivent avoir un caractère irréversible.[12]

On distingue plusieurs types de stabilisation :

**a- Stabilisation mécanique :**

La stabilisation mécanique agit en modifiant la densité naturelle, sans ajout d'un matériau stabilisant. Il s'agit du compactage qui consiste essentiellement à comprimer les grains, ce qui a pour effet la réduction de la porosité du matériau par resserrement de ses particules.

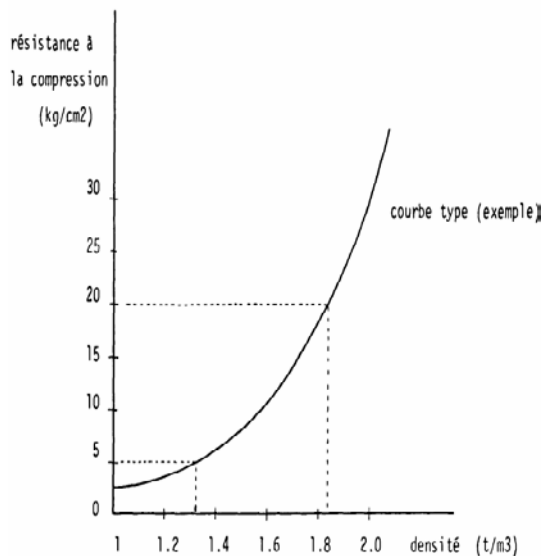
Les effets d'un compactage effectué dans de bonnes conditions se traduisent par une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Les résistances mécaniques initiales et à long terme augmentent. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, ce qui permet, par exemple de démouler les briques compressées directement après le compactage et d'obtenir des briques résistant à une pression plus élevée. [14]

Cependant la terre reste très sensible à l'eau. Mise en contact avec l'eau, ce matériau redevient plastique et ne résiste plus du tout à la compression. L'immersion d'une brique de terre comprimée non stabilisée dans un sceau d'eau, donne le lendemain un tas de boue au fond du sceau. [21]

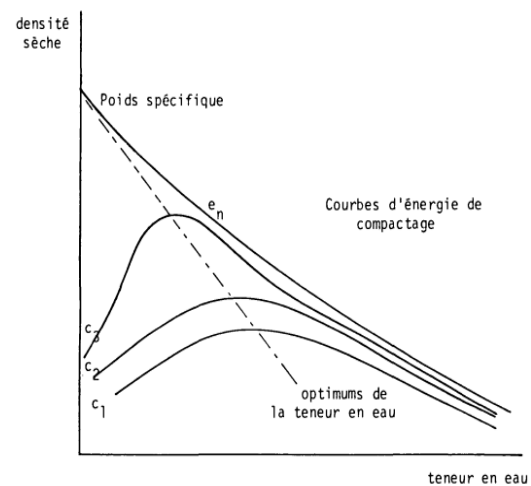
L'efficacité du compactage est fonction de quatre facteurs : la granulométrie, l'épaisseur de la couche compactée, la teneur en eau et l'énergie de compactage. [14], [23].

- Un sol qui a une granulométrie étroite ne peut pas être fortement compacté, au contraire d'un sol qui a une granulométrie étalée. Pour obtenir une grande résistance mécanique, il faut donc un mélange bien proportionné.
- L'épaisseur de la couche compactée influence le compactage : un bon compactage ne peut avoir lieu que pour des épaisseurs modérées (environ 10 cm).
- L'eau contenue dans le sol à une certaine proportion, permet de compacter ce dernier convenablement en lubrifiant les particules et en leur permettant de se disposer de la façon la plus dense possible. En compactant un sol, les particules auront plus de contact entre elles, ce qui augmente les frottements internes. La teneur en eau présente un optimum en-deçà duquel l'énergie nécessaire augmente, ou la densité diminue, et au-delà duquel le même phénomène se produit jusqu'à un point où tout compactage devient impossible (incompressibilité de l'eau).
- L'énergie de compactage est l'énergie dépensée pour effectuer le travail de compactage. La densité sèche augmente si l'on dépense plus d'énergie. La relation est pratiquement

linéaire pour des pressions faibles à moyennes. D'autre part, pour des pressions très élevées, des phénomènes néfastes peuvent se présenter dans la brique (délitage ou désagrégation de la brique). On peut donc dire que des pressions trop élevées conduisent à un gaspillage d'énergie et sont inutiles. [14]



**Figure I.18.a :** variation résistance à la compression en sèche en fonction de la densité [14]



**Figure I.18.b :** Variation de la densité fonction de la teneur en eau pour différentes énergies de compactage [14]

Le compactage peut être effectué selon deux modes d'action :

- Statique : on applique une pression continue sur le sol que l'on désire compacter; c'est le mode d'action employé par la quasi-totalité des presses à briques, par les rouleaux employés pour les routes...etc.
- Dynamique : on applique une série de chocs, de coups sur le sol; ce mode d'action est employé dans les dames (fabrication du pisé, les rouleaux vibrants...etc.)

Le compactage dynamique est mieux adapté aux sols pulvérulents et contenant beaucoup de grosses particules, il permet une bonne réorganisation des grains et conduit à une densité plus élevée. Alors que le compactage statique l'est surtout pour les sols contenant de fines particules. Un compactage dynamique sur un sol argileux entraîne une saturation de l'éprouvette au droit de la dame de compactage, il en résulte une éprouvette hétérogène en termes de densité. [8]

### **b- Stabilisation physique :**

La stabilisation physique consiste à améliorer les caractéristiques d'un sol moyennant l'adjonction de stabilisants inertes :

- ✓ Soit qu'il s'agit de corriger la granularité par suppression ou par ajout de proportions bien définies de sable ou d'argile faisant défaut à la composition du sol, le mélange obtenu conduit soit à modifier l'indice de plasticité du matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion.
- ✓ Ou bien, il s'agit d'incorporer des fibres qui vont reprendre et répartir les contraintes et les tensions qui s'exercent sur le sol. La fissuration sera ainsi réduite et la résistance mécanique améliorée.

- **Stabilisation par modification de la granulométrie :**

Dans certains cas, la terre que l'on désire utiliser ne convient pas à cause de sa composition granulométrique : il y a trop de petits graviers par exemple. On pourra alors améliorer cette terre soit par tamisage (éléments à supprimer), soit par adjonction d'un élément manquant (sable ou argile par exemple). Ce type de démarche est particulièrement indiqué pour les sols dont on connaît la courbe granulométrique qui permet de déterminer avec précision les défauts de composition granulométrique du sol. [14]

- **Stabilisation par incorporation de fibres :**

- **Rôle des fibres :**

- Améliorer la résistance à la traction.
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.
- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- Alléger le matériau. Le volume des fibres est souvent important (mais limité), allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.

- **Mécanisme:**

Les fibres agissent en s'opposant aux fissures. Au niveau d'un plan de clivage potentiel, les fibres résistent au clivage au fur et à mesure de l'augmentation de la contrainte. Le degré de résistance au cisaillement dépend de la résistance à la traction des fibres. En outre, une bonne résistance à la compression peut être obtenue grâce à une armature de fibres, qui dépend à la fois de la quantité de fibres employée et de la résistance à la compression initiale de la terre, de la résistance à la traction initiale des fibres et de la friction interne entre les fibres et la terre.

**- Techniques de mise en œuvre:**

La résistance des blocs armés dépend de la quantité de fibres ajoutées mais il y a une quantité optimale à ne pas dépasser. Car une quantité trop importante allège trop la masse volumique. Le nombre de points de contact entre les fibres et la terre, qui transmettent les déformations, est alors très réduit, diminuant la résistance du bloc. On commence à obtenir des résultats satisfaisants à partir d'un dosage à 4% en volume. Des quantités de 20 à 30 kg/m<sup>3</sup> sont très courantes. [13]

**Types de fibres:****• Fibres végétales:**

Plusieurs sortes de fibres végétales peuvent être utilisées, on cite par exemple: les écorces, copeaux, sciure de bois, aiguilles de pin, balles de riz, de mil, fibres de sisal, paille de toutes espèces: orge, seigle, blé, froment, escourgeon, lavande, foin, chanvre, bagasse, fibres de noix de coco, manille, herbe d'éléphant, fibres de palmier, de bambou, d'hibiscus, débris du teillage du lin ou de chanvre, etc.

La plus courante étant la paille. La paille présente l'avantage d'alléger le produit et donc d'en améliorer les qualités d'isolation thermique. Ce type de stabilisation n'est guère employé pour la fabrication de briques de terre compressée. Il l'est par contre pour l'adobe, le torchis. La paille est de préférence coupée en brins de 4 à 6 cm.

L'utilisation de la paille présente cependant de nombreux inconvénients : elle augmente la perméabilité (canaux qui permettent dans un premier temps à la terre de sécher, mais qui subsistent ensuite), elle attire et abrite des parasites (insectes, rongeurs,...) et elle peut pourrir.

Un pourrissement préalable de la paille dans la terre, pourrait produire de l'acide lactique qui agit secondairement sur l'efficacité de la stabilisation. Enfin, il faut veiller à ce que son utilisation comme stabilisant n'entre pas en concurrence avec d'autres utilisations possibles et plus fondamentales (animaux)

- Fibres animales: poils et crins du bétail.
- Fibres synthétiques: cellophane, acier, ....

Très peu d'organismes étudient scientifiquement le comportement de la terre stabilisée aux fibres. Quelques recherches ont été faites à l'Université de Téhéran (Iran), au C.S.T.B. (centre scientifique et technique du bâtiment, France), à l'Université d'Ife (Nigeria) et à l'université de M'sila (Algérie) (stabilisation à la paille et à la filasse [13]).

**c- Stabilisation physico-chimique:**

L'utilisation de stabilisants physico-chimiques vise, d'une part, à rendre irréversibles les améliorations obtenues par la stabilisation par compactage et, d'autre part, à obtenir des qualités que le compactage n'a pas (ou peu) procuré à la terre (insensibilité à l'eau et imperméabilisation). La stabilisation physico-chimique se fait par le biais d'hydrophobants et de liants.

- **Les hydrophobants :**

Ce sont des produits dérivés amines des composés cationiques (par exemple : les amines aromatiques, les amines aliphatiques,...).

Les caractéristiques des hydrophobants permettent les variations de la teneur en eau en rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobant se traduit par deux effets : diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol, réduire le gonflement, diminuer la structure microscopique du sol [25].

De nombreuses substances naturelles ont des propriétés hydrophobantes mais celles-ci sont relativement peu connues. On peut citer la sève des arbres ou de plantes, l'huile de noix de coco, la gomme arabique, l'acide tanique, etc. Des essais sont indispensables pour déterminer leur action réelle et leur dosage.

Il existe également quelques hydrophobants synthétiques (Aliquat H226, par exemple) efficaces mais relativement chers. D'autres produits chimiques servent également, tel le silicate de sodium qui est utilisé plutôt sous forme de bain dans lequel sont trempées les briques de terre (1 part de silicate pour 3 parts d'eau claire, 2 immersions d'environ 1 minute; cure d'au minimum 7 jours dans un endroit protégé). [13]

Certains liants ont aussi des propriétés hydrophobantes : les dérivés du pétrole sont même parfois classés comme hydrophobants, de même que les résines. Les liants minéraux ont des propriétés hydrophobantes également. Les liants minéraux sont des matériaux moulus d'une façon très fine. Malaxés à l'eau, ils donnent une pâte collante qui durcit graduellement pour devenir une sorte de pierre artificielle. Dans les travaux de construction, les liants minéraux sont mélangés avec l'eau et/ou les granulats (sable, gravillon, gravier), pour devenir une pâte de ciment ou mortier ou encore béton). [14]



- **Les liants :**

Les liants sont des matières qui, ajoutées à un sol, du sable ou du gravier fin, et en présence d'une certaine quantité d'eau, lient ces matériaux et durcissent (se pétrifient) après quelque temps pour former une masse dure et résistante. Selon la pétrification, on distingue :

**1. Les liants hydrauliques :** Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ces liants sont tous à base de chaux. Ils comprennent la chaux hydraulique, le ciment, les pouzzolanes, etc.

Les liants hydrauliques sont constitués d'un mélange d'un ou plusieurs constituants qui présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- des propriétés hydrauliques, ils forment par réaction avec de l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- des propriétés pouzzolaniques, ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...)

**2. Les liants aériens :** ce sont des liants qui ne se pétrifient qu'au contact de l'air, ils comprennent la chaux aérienne (ou chaux grasse) et le plâtre; le plâtre est du gypse calciné et broyé en fine poudre; il est soluble dans l'eau, même après son application, et ne doit donc pas être utilisé à l'extérieur dans les régions humides.

**3. Les liants carbonés :** dérivés du pétrole : asphalte, bitume (qui peut être naturel), goudron. L'asphalte ou le bitume peut être émulsionné pour former des "cut-backs".

En dehors des résines naturelles, qui peuvent avoir des qualités de liants, il existe aussi des résines synthétiques qui agissent par polymérisation. Leur prix est souvent élevé.

Enfin, certains sous-produits d'industries peuvent également servir de liants : molasse (industries sucrières), lignosulfites (industries des pâtes à papier), etc.

Certains sels ont une action chimique. Ils présentent l'avantage d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire le phénomène d'échange, mais qui ont un inconvénient concernant le choix du type de dosage et de la méthode d'addition du produit [25].

Les stabilisants qui ont une action chimique ont besoin de temps pour agir (temps de cure) : leurs effets ne deviennent sensibles qu'au bout de quelques jours ou de plusieurs semaines et nécessitent pour se réaliser des conditions particulières : ombre, humidité, etc. Il ne faut donc

jamais employer une brique compressée stabilisée trop rapidement après sa fabrication (ce temps de cure est fonction du stabilisant [14].

**d- Stabilisation par cuisson :**

Les briques sont issues d'un mélange de terre et d'eau, dans lequel on ajoute pour certains modèles isolants des grains combustibles, tels que la sciure de bois. Lors de la cuisson dans des fours au gaz naturel, la sciure se consume et disparaît en créant de petites bulles d'air qui améliorent l'isolation thermique. La brique de terre cuite est un matériau qui permet d'évacuer efficacement l'humidité vers l'extérieur. Cette maîtrise essentielle de l'hygrométrie et de la ventilation est un avantage que possède la terre cuite [8].

Elle nécessite par contre de l'énergie pour la cuisson et par conséquent coûte plus chère que la brique de terre stabilisée au ciment ou à la chaux...

**I-4-2-3-Mécanismes observés lors de la stabilisation :**

Durant de la stabilisation, nous nous trouvons en présence de trois mécanismes principaux :

- **La floculation :**

C'est la formation de ponts rigides entre les particules du sol ; elle produit lorsque les minéraux du sol se trouvent attaqués par un liant. L'endommagement permet à des forces ioniques de se développer entre les particules (pour échange ionique) pour donner un gel, et éventuellement des composés nouveaux plus compactés.

- **Le rapprochement des grains :**

Dans ce cas, les minéraux ne sont pas attaqués chimiquement. L'action se fait sur la double couche d'eau entourant le grain.

L'action du compactage se manifeste par l'élimination de la deuxième couche d'eau absorbée (la main rigide liée) d'où le rapprochement des grains.

L'eau, suivant sa position, joue plusieurs rôles ; elle peut :

- Faire partie de la structure et se situer entre les feuillets des matériaux argileux (s'éliminera à 100 °C)
- Être absorbée sous forme d'une première enveloppe pratiquement continue moléculaire autour des grains. Cette première couche est recouverte d'une seconde couche moins rigide triée par les forces électrostatiques.

- Remplir plus au moins les vides entre grains, cette eau est mobile et peut s'écouler plus ou moins rapidement sous l'action de forces gravitaires ou de forces de capillarité.
- On comprend par cette affaire qu'il existe une teneur en eau optimale.

- **L'auto cimentation :**

C'est une technique qui fait créer des liaisons potentielles entre les grains du sol par l'introduction d'un catalyseur ; ce dernier va faire réagir entre les grains des éléments du sol pour donner naissance à un ciment reliant les autres particules restées inertes.

En compactant fortement les blocs de terre nous contribuons au rapprochement des grains, donc au renforcement de ces liaisons installées surtout aux températures un peu élevées (40 à 60 C°) ou la croissance de ces dernières est importante. [24]

## **Chapitre II : caractéristiques des blocs de terre stabilisée**

### **II-1- Introduction**

Le béton de terre stabilisée particulièrement les blocs de terre stabilisée doivent présenter un certain nombre de qualités, répondre à des performances minimales, pour pouvoir être utilisées comme matériau de construction valable.

Les essais de contrôles consistent à vérifier : l'aspect, la résistance mécanique et la durabilité. Ils permettent de s'assurer de la qualité du produit et de remédier aux éventuelles défaillances du processus de fabrication.

Il existe très peu de normes concernant les blocs de terre stabilisée. On évoquera dans cette partie quelques essais cités dans la littérature qui caractérisent les performances minimales auxquelles doivent répondre les blocs.

### **II-2- L'Aspect**

L'aspect extérieur permet une première appréciation de la qualité des briques (forme, présence de fissurations, effritement, irrégularités...). Les blocs ne devraient pas présenter des défauts systématiques tels que : fissures ou épaufrures importantes de nature à nuire à une bonne exécution et à la stabilité de la maçonnerie.

Par ailleurs, ils ne devraient pas présenter des efflorescences couvrant plus du 1/3 de leur surface. Un léger voile blanchâtre ou un mince liseré ne sont pas pris en considération. [22]

### **II-3- Résistance mécanique**

La résistance mécanique des blocs de terre stabilisée représente leur capacité à supporter les efforts de compression, cisaillement et de flexion auxquels ils doivent être soumis. Seuls les efforts de compression sont importants. [17]

La résistance des blocs est en relation directe avec leur densité sèche : plus élevée sera-t-elle, meilleure sera la résistance. Cette densité devrait atteindre si possible 1900 à 2000 kg /m<sup>3</sup>. [14]

#### **II-3-1- Résistance à la compression**

La résistance à la compression semble être la valeur la plus acceptée universellement pour la détermination de la qualité des blocs. [25] Elle est fonction du type de sol et de sa minéralogie, du dosage en stabilisant, de la teneur en eau et de la méthode de compactage et de cure. Une bonne résistance ne peut être obtenue qu'avec des mélanges adéquats de matières convenables, des teneurs en eau optimales et des conditions de moulage et de cure appropriées.

La résistance à la compression (exprimée en MPa) est mesurée au laboratoire par essai d'écrasement. Il s'agit de soumettre les blocs à une force axiale, en les plaçant entre les plateaux d'une presse. Il existe plusieurs procédures d'essais décrites dans la littérature, les figures ci-dessous regroupent quelques unes :

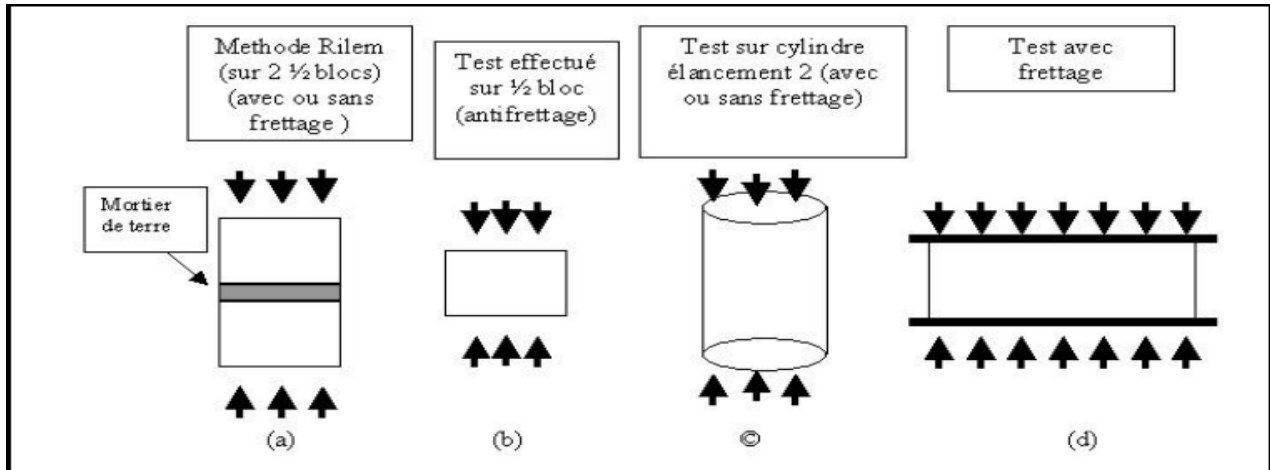


Fig. II-1: Procédures d'essais sur BTC. [8]

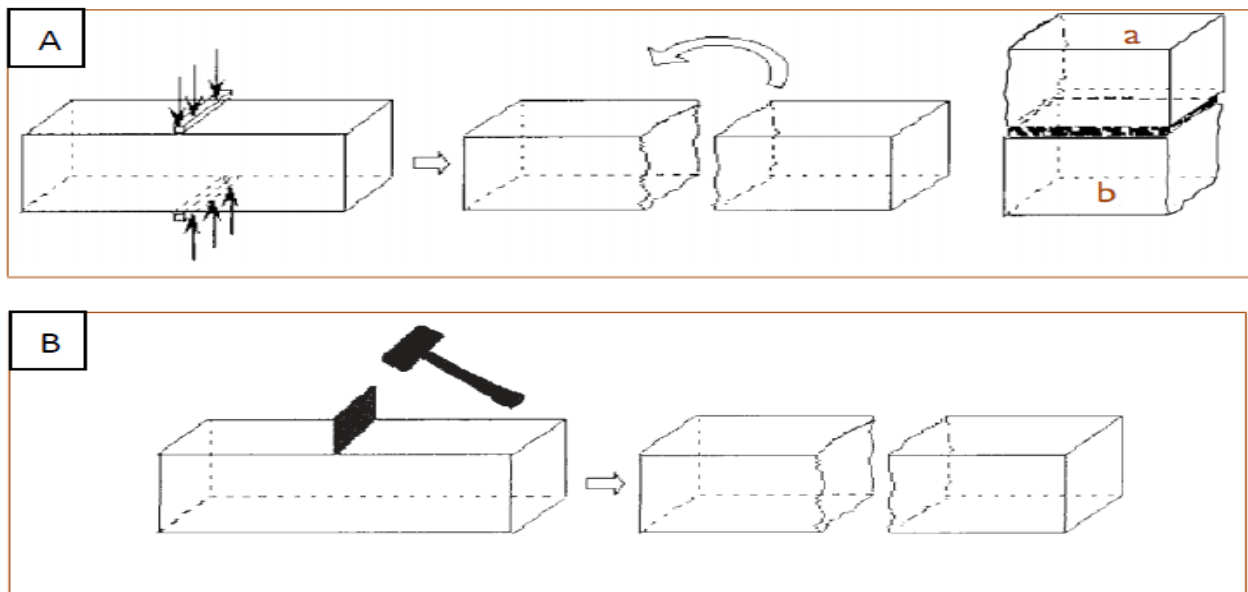


Fig. II-2 : A et B Préparation des demi-blocs à tester soit par essai Brésilien fig. A Ou bien en coupant les blocs en deux demi-blocs fig. B [16]

L'essai de résistance à la compression doit être réalisé à un moment opportun, représentatif de la qualité de la brique à cet égard. C'est pourquoi on mesure la résistance à la compression d'une brique stabilisée au ciment à 28 jours, délai de cure au-delà duquel on suppose que la brique atteint ou approche sa résistance finale. En revanche, si la brique testée est stabilisée à la chaux, ce délai de 28 jours s'avère insuffisant. Il est nécessaire dans ce cas d'allonger le délai de cure du

matériau d'au moins trois semaines, sous risque d'établir des comparaisons et interprétations erronées. [13]

### **II -3-2 Résistance à la compression humide**

L'essai de résistance à la compression humide se déroule avec blocs ayant passé un test d'absorption [18] ou ayant subi une immersion dans l'eau pendant 24h. [20]

Dans la pratique, la détermination de la résistance à la compression à l'état humide donne des valeurs de résistance faible. La diminution de la résistance à la compression dans des conditions humides peut être attribuée au développement de pressions d'eau contenue dans les pores et de la liquéfaction des minéraux argileux dans la matrice de la brique. Les facteurs affectant la résistance humide des briques sont le dosage en ciment, l'indice de plasticité du sol, l'effort et le type de compactage. [18]

Le rapport entre la résistance à la compression humide et la résistance à la compression à sec donne une bonne mesure de l'efficacité de la stabilisation.

### **II-3-3- Résistance à la traction**

Elle peut être mesurée grâce à un procédé de chantier mis au point par le I.I.H.T de Californie (USA). Une brique de terre échantillon est posée (sur une de ses grandes faces) sur 2 tubes de  $\varphi=2.5\text{cm}$  espacés de 21cm et perpendiculaires à la grande longueur de la brique. Dans l'axe du dessus de la brique, on pose un autre tube, identique aux précédents, qui est surmonté d'un plateau en équilibre. On charge soigneusement ce plateau au rythme de 251 kg/mn avec d'autres briques, jusqu'à la rupture de la brique testée. Le but n'est pas de connaître la résistance exacte mais le dépassement d'un seuil limite que l'on détermine à l'avance. [13]

## **II-4- Durabilité**

Tout comme dans la plus part des matériaux de construction, le mécanisme de détérioration des blocs de terre stabilisée est complexe. Les principaux modes de détérioration cités dans la littérature peuvent être identifiés comme suit :

Détérioration relative à l'eau.

Détérioration relative à la température.

Détérioration chimique. [26]

### **II-4-1- Sur pisé**

- Tadanier 1985 a fait un trou au centre d'un échantillon compacté et l'a rempli d'eau pour ensuite déterminer son temps de délitage.

- Azzouz 1983 a suivi la dégradation d'un échantillon soumis à une lame d'eau verticale continue jusqu'à sa totale dégradation.
- Leroux 1978, Mariotti 1983 ont proposé de soumettre l'échantillon à l'action cyclique de séchage, mouillage, rayonnement.
- Auger 1987 a simulé la dégradation d'un échantillon sous l'action d'une ambiance marine.
- Didier et Ghomari 1989 ont simulé au laboratoire à l'aide d'un essai de vieillissement accéléré permettant d'apprécier globalement la durabilité du matériau terre l'action destructrice de la battance : chocs répétés de gouttes de pluie dites battantes. [7]

#### **II-4-2- Sur blocs de terre stabilisée**

Les essais de durabilité sur blocs de terre stabilisée relatés dans la littérature sont relatifs pour la plus part d'entre eux aux attaques à l'eau. On peut citer à titre d'exemple les essais décrits dans la norme (ASTM 1993).

Parfois les essais ne sont pas normalisés et sont simplement réglementés, ayant pour objectif principal construire avec la terre et limiter ainsi la procédure d'analyses à son minimum nécessaire mais suffisant pour garantir.

##### **a- Essai de mouillage/séchage :**

Le matériau est soumis à 12 cycles de séchage et de mouillage successifs. Après chaque cycle, on brosse l'échantillon et l'on détermine par pesée, la variation en poids. Les durées des différentes phases varient selon les normes. Selon la norme ASTM D559, l'immersion dure 5 heures, le séchage dure 42 heures à l'étuve à 70°C, le refroidissement, dure 1 à 2 heures.

Les exigences pour les limites sur perte en poids admissibles ont été spécifiées par différents chercheurs pour s'adapter aux conditions de l'environnement local et exigences. [1] Dans le guide technique édité par le CNERIB, la perte en poids maximale tolérée est fixée à 5% du poids sec. Elle est de 01% de ce dernier, en climat sec.

##### **b- Absorption d'eau**

L'absorption d'eau est fonction de la teneur en argile et du dosage en liant. Un taux élevé d'absorption peut causer un gonflement de la fraction argileuse stabilisée et une perte de résistance avec le temps. D'après Walker, l'absorption d'eau autant que la porosité, augmentent avec la teneur en argile et les faibles dosages en ciment. Entre la stabilisation au ciment, à la chaux, au ciment-chaux et ciment-résine, la combinaison ciment résine présente la plus faible absorption d'eau par capillarité et par absorption totale. La teneur en sable peut diminuer l'absorption d'eau et la perte en poids bien qu'elle n'affecte pas significativement la résistance à la compression. Par

ailleurs, Oti a révélé que l'absorption d'eau décroît avec l'âge des blocs [25]. Les normes utilisées pour déterminer l'absorption d'eau sont ASTM C 140, BS EN 771-2, Australien Standards 2733...

**c- Test de gel/dégel**

Suivant la procédure décrite par la norme ASTM D560, l'essai de gel/dégel consiste à placer l'échantillon testé sur un matériau absorbant saturé en eau dans un réfrigérateur à la température - 23°C pendant 24h puis l'enlever. L'échantillon est alors dégelé dans un environnement humide à la température 21°C pendant 23 h, puis brossé. Le test est répété 02 fois. L'échantillon est ensuite séché dans une étuve jusqu'à poids constant. La perte en poids est calculée.

**d- Test d'érosion**

Doat et al cités dans [18] ont proposé un test par lequel un bloc de terre est placé sur une grille face à un jet d'eau horizontal de pression 0.6 kg/cm<sup>2</sup>. La brique verticalement positionnée est placée à 17 cm du jet pendant 2 heures. La résistance à l'érosion est évaluée en mesurant la profondeur des trous ou bien la perte en poids. Le taux max d'érosion (mm/h) est donné simplement par la profondeur maximale d'érosion. Dans le cas d'échantillons corrodés complètement en moins d'une heure, la profondeur est donnée par le rapport entre l'épaisseur de la brique et le temps de jaillissement.

Le test conçu par Middleton cité dans [9], consiste à soumettre les échantillons à un jet d'eau pendant 0 heure. Les échantillons sont examinés toutes les 15 minutes.

**e- Test d'abrasion**

Le test d'abrasion consiste à frotter la face exposée prévue du bloc à l'aide d'une brosse métallique lestée d'un poids de 6 kg. Un aller-retour de la brosse constitue un cycle d'abrasion, le brossage est répété 51 fois. [13] Le matériau détaché par le brossage est ensuite pesé. Le coefficient d'abrasion (Ca) exprime le rapport entre la surface brossée S (en cm<sup>2</sup>) et la masse du matériau détaché par le brossage m<sub>1</sub>-m<sub>2</sub> (en g). [16]

$$C_a \text{ (cm}^2 \text{ /g)} = \frac{S}{m_1 - m_2}$$

[16]



**Conclusion**

Les essais sus-décrits simulent de manière générale les épreuves que peut subir le matériau au cours de sa vie et permettent de prédire son comportement dans des conditions réelles. Les essais d'écrasement sont les plus déterminants du point de vue comportement mécanique. Mais le comportement des blocs est principalement influencé par la porosité, celle-ci détermine directement l'ampleur à laquelle l'eau est absorbée, ce qui permet d'adopter les mesures appropriées pour faire face au problème de durabilité du matériau.

## **Chapitre III : matériaux, matériels et méthodes**

### **III-1-Introduction**

Les essais d'identification ont été effectués au niveau du laboratoire de la faculté

### **III-2-Matériaux utilisés**

#### **III-2-1-Eau de gâchage**

Le mélange des composants d'un B.T.S ne peut se transformer en matériau béton que par l'addition d'eau, cette quantité d'eau ajoutée s'appelle eau de gâchage. Il faut faire la distribution entre :

- Eau de gâchage : eau totale ajoutée au mélange.
- Eau de prise : eau absorbée par le ciment lors de sa prise c'est-à-dire l'eau d'hydratation équivalent à l'optimum Proctor.

A noter que la formation d'hydrate pour le C.P.A absorbe environ 20% en poids du ciment.

Il est évident que l'eau de gâchage doit toujours être supérieure à l'eau de prise, car une quantité « partie » de l'eau ajoutée se perd au cours des différentes opérations de mise en œuvre du B.T.S.

#### **III-2-2-Ciment**

Le ciment utilisé est le ciment portland artificiel C.P.A de classe 325, sa composition chimique est donnée par le tableau ci-après.

date	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	PAF	Blaine	45u	90u
26/02/2014	20,57	3,43	5,61	56,28	1,27	2,22	0,47	0,15	3,01	4300	8,70	0,70

**Tableau III-1** : Caractéristiques du ciment C.P.A de classe 325.

**III-2-3-Les fibres**

**III-2-3-1-les fibres végétales**



**Fig. III-1 : les fibres de Palmier dattier**



**fig. III-2 : les fibres de paille**

**III-2-3-2-Les fibres synthétiques**



**Fig. III-3 : les fibres synthétiques**

**III-2-4-Le sol**

Les essais d'identification ont été effectués au niveau du laboratoire de la faculté.

**III-2-4-1-Analyse granulométrique Par tamisage (NF P 94-056)**

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser

successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.



**Fig. III-4 :** Appareillage d'analyse granulométrique

- **Résultats da l'analyse granulométrique :**

Les résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau suivant :

	Ouverture des passoires	Refus (g)	Tamisat (g)	Tamisat (%)
1	5	0	2000	100
2	2	301	1699	84,95
3	1	238	1461	73,05
4	0,4	265	1196	59,80
5	0,1	864	332	16,60
6	0,08	180	152	7,60

**Tableau III-2 :** Granulométrie par tamisage.

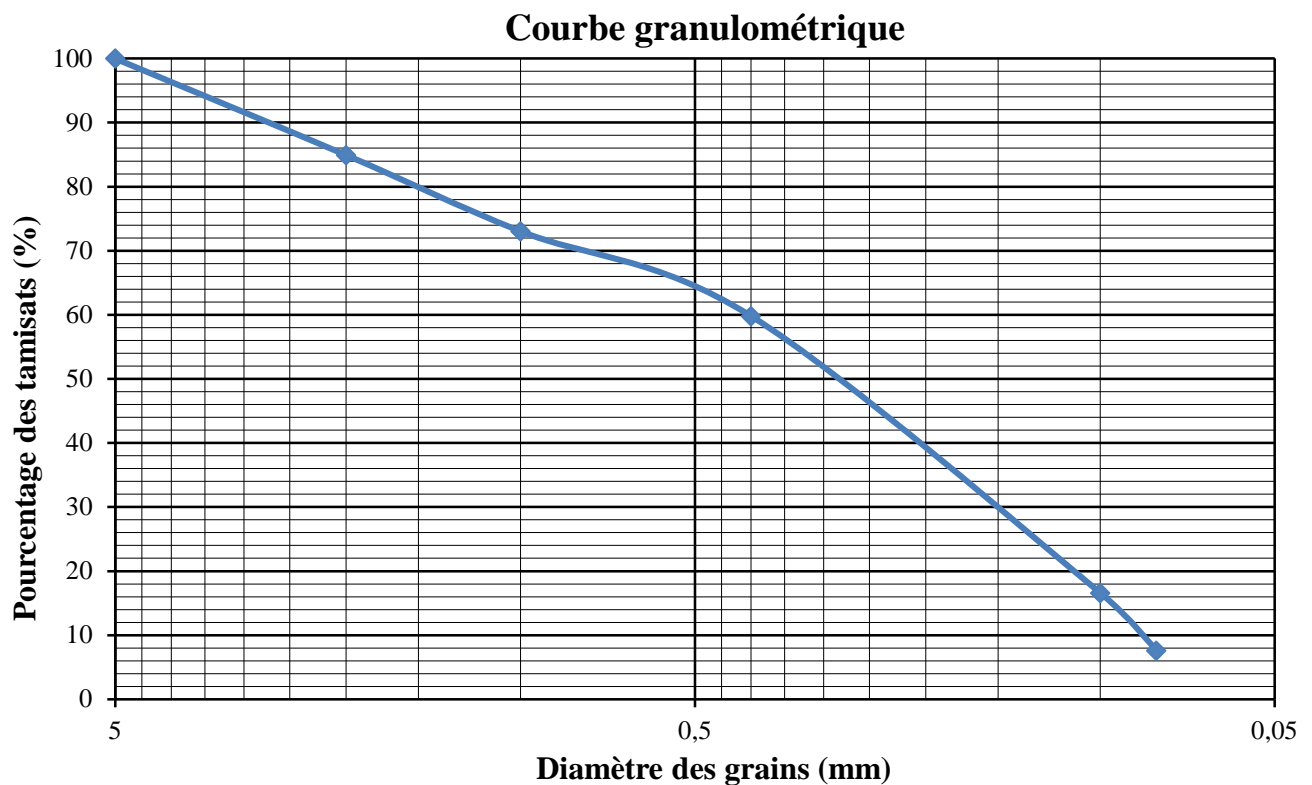


Fig. III-5 : la courbe granulométrique

#### III-2-4-2-Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)

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

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

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence  $I_p = W_L - W_p$  qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

- **Matériels spéciales :**

- ❖ **Pour la limite de liquidité et de plasticité :**

- Appareil de casagrande.
    - Outil à rainurer.
    - Une spatule.
    - Surface lisse non absorbante.



**Fig. III-6 :** Matériels spéciaux Pour la limite de liquidité.

**a- Détermination de la limite de liquidité selon la norme NF P94-051**

• **Exécution de l'essai :**

- Prendre environ 200g de sol.
- Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de casagrande à l'aide de la spatule.
- Pratiquer une rainure dans cette pâte de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle.
- Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés.
- Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 2 cm, noter le nombre de coups N correspondant.
- Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 grammes de sol afin d'en déterminer la teneur en eau.
- Réhomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalée entre 15 et 35.

**b- détermination de la limite de plasticité la norme NF P94-051**

• **Exécution de l'essai :**

- Former une boulette à partir de pâte préparée de la limite de liquidité.
- Rouler la boulette sur plaque lisse de façon obtenu un rouleau de 10cm de longueur et 3.0mm à  $\pm 5$  de diamètre.

- La limite de plasticité est obtenue lorsque le rouleau se fissure.
- Prélever la partie fissurée du rouleau et l'introduire dans l'étuve pour déterminer sa teneur en eau.
- Effectuer plusieurs essais avec des nouvelles boulettes.

• Les résultats obtenus :

Nombre de coups	19		23		29		33	
Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse de la tare	20,5	20,7	19,7	20,6	28,8	8,6	20,7	21,1
Masse du sol humide+la tare	29,6	31,2	26,9	29	33,4	14,4	25,6	26,1
Masse du sol sec+la tare	27,6	29	25,2	27,2	32,6	13,2	24,6	25,2
Masse du sol sec	7,1	8,3	5,5	6,6	3,8	4,6	3,9	4,1
Masse d'eau	2	2,2	1,7	1,8	0,8	1,2	1	0,9
Teneur en eau	28,17	26,50	30,91	27,27	21,05	26,09	25,64	21,95
Moyenne	27.34		29.09		23.57		23.80	
W <sub>L</sub>	25.95							

Tableau III-3: détermination de la limite de liquidité.

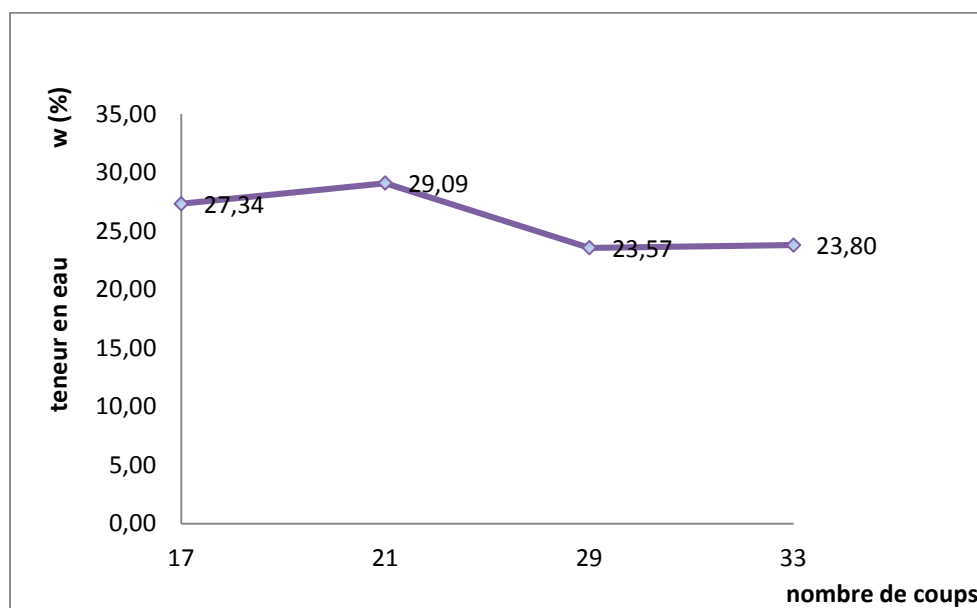


Fig. III-7 : la courbe de la limite de liquidité.

Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse de la tare	21,1	21	20,9	21,5	21	21	21,1	23,5
Masse du sol humide+la tare	23,4	22,8	22,4	23	22,5	22,5	22,9	25,5
Masse du sol sec+la tare	23,1	22,3	22	22,7	22,3	22,2	22,7	25,2
Masse du sol sec	2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,2	1,6	1,7
Masse d'eau	0,3	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
Teneur en eau	15	38,46	36,36	25	15,39	25	12,5	17,65
Moyenne	26,73		30,68		20,192		15,07	
W <sub>P</sub>	23.17							

**Tableau III-4** : détermination de la limite de plasticité.

L'indice de plasticité :  $I_P = W_L - W_P = 2.78$

On rappelle que les valeurs limites exigées par le règlement sont :

$$25\% < W_L < 50\%$$

$$10\% < W_P < 25\%$$

D'une manière générale on peut dire que les limites d'ATTERBERG sont voisines aux valeurs données par le règlement pour obtenir un bon béton de terre.

### **III-2-4-3-Masse volumique apparente : NF P 18-554**

#### **a- Masse volumique apparente à l'état lâche :**

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

Volume de récipient  $V_r = 1000 \text{ cm}^3$ .

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$



N° d'essai	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app\ moye}$ (g/cm <sup>3</sup> )
01	286	1551	1.265	1.257
02	286	1541	1.255	
03	286	1539	1.253	

Tableau III-5 : Masse volumique apparente

**b- Masse volumique apparente à l'état compact :**

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est Supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_c = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Où :

M<sub>1</sub> : Masse du récipient à vide.

M<sub>2</sub> : Masse du récipient plus le sable.

V<sub>r</sub> : Volume du récipient.

N° d'essai	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
01	286	1697	1.411	1.405
02	286	1688	1.402	
03	286	1688	1.402	

Tableau III-6 : Masse volumique apparente

**III-2-4-4-Masse volumique (absolue) : NF P 18-555**

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

La masse volumique absolue est déterminée par la formule:

$$\rho = \frac{M}{V_1} \quad \text{Avec } M = 60 \text{ g}$$

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau suivant :

<i>N° d'essai</i>	M (g)	$V_e (cm^3)$	$V_1 (cm^3)$	$\rho (g / cm^3)$	$\rho_{moy} (g / cm^3)$
<b>1</b>	60	238	12	5	5.14
<b>2</b>	60	238.5	11.5	5.22	
<b>3</b>	60	238.5	11.5	5.22	

**Tableau III-7 : Masse volumique absolue**

### **III-2-4-5-Porosité : (NF P 18-554)**

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$$P (\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) \times 100$$

$$P(\%) = \left[ 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

On distingue deux cas :

- Etat lâche :  $P(\%) = \left[ 1 - \frac{1.257}{5.14} \right] \times 100 = 75.54 \%$
- Etat compacte :  $P(\%) = \left[ 1 - \frac{1.405}{5.14} \right] \times 100 = 72.66 \%$

### **III-2-4-6-Compacité :**

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume Réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

On distingue deux cas :

- Etat lâche :  $C_L = 24.46\%$ .
- Etat compacte :  $C_c = 27.34\%$ .

**III-2-4-6-L'indice des vides :**

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = P / (100 - P).$$

Avec P en pourcent (%).

- Etat lâche :  $e = 3.08 \%$
- Etat compacte :  $e = 2.65\%$

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans les tableaux suivants :

Porosité P%		Compacité C%		Indice des vides e	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
75.54	72.66	24.46	27.34	3.08	2.65

**Tableau III-8 :** la porosité, la compacité et l'indice de vide

**III-2-4-7-Essai Proctor normal (NF P 94-093)**

Cet essai consiste à compacter l'échantillon dans le moule Proctor normal, avec une certaine énergie fournie par une dame d'un poids déterminé, tombant d'une hauteur constante.

Après le compactage, on pèse le moule et on détermine la teneur en eau du matériau, ce qui permet de calculer son poids volumique sec.

Le résultat de l'essai se traduit par un point de la courbe.

On recommence l'opération, tout en augmentant chaque fois la teneur en eau.

% d'eau ajouté	8%	10%	12%	14%	16%
masse total humide	3401,7	3626	3663,62	3615,71	3563,15
masse du moule	1713	1713	1713	1713	1713
masse du sol humide	1688,7	1913	1950,62	1902,71	1850,15
masse du sol sec	15,17	16,48	16,47	15,81	15,06
volume moule	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56
masse volumique humide	1,765	1,999	2,038	1,987	1,932
masse volumique sèche	1,587	1,723	1,723	1,654	1,575
tare N°	1	2	3	4	5
masse de la tare	50,20	50,88	51,54	50,30	49,64
masse (sol humide+tare)	117,00	149,45	204,39	159,16	191,05
masse (sol sec+tare)	110,20	135,77	180,58	140,75	164,75
masse d'eau	6,80	13,68	23,81	18,41	26,30
masse du sol sec	60,00	84,89	129,04	90,45	115,11
teneur en eau W	11,33	16,11	18,45	20,35	22,85

Tableau III-9 : Essai de Proctor

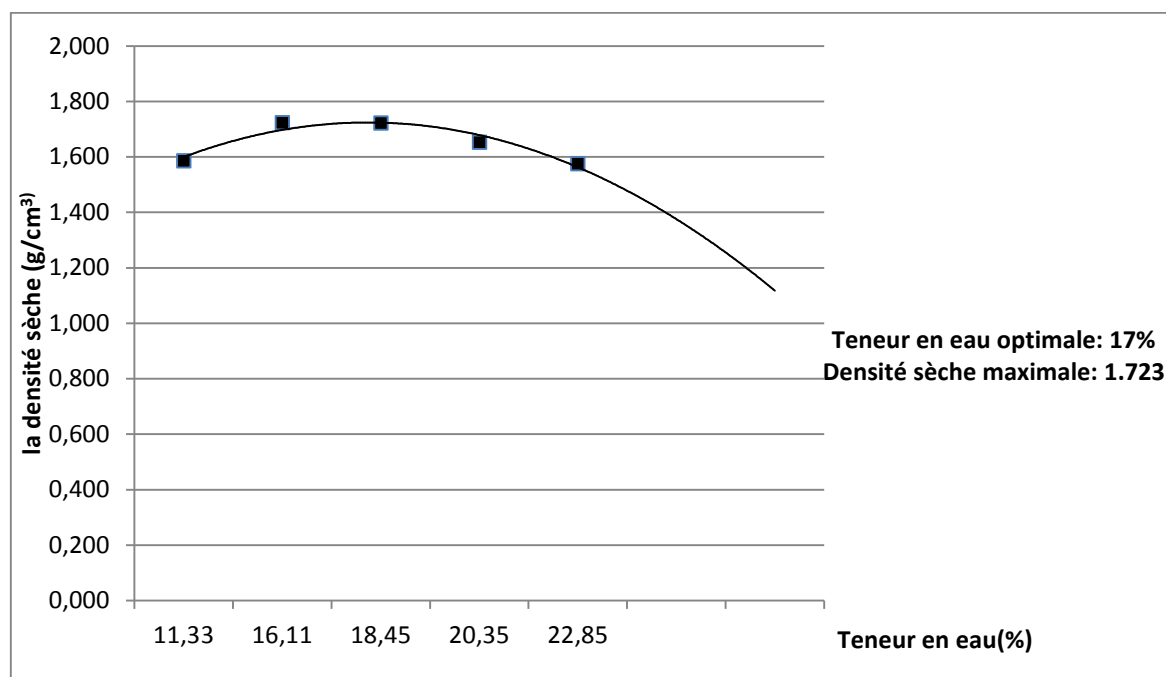


Figure III-8 : la courbe de Proctor

**III-3-Formulation :**

Les éprouvettes du B.T.S destinées aux différents essais peuvent être confectionnées à base de plusieurs facteurs tels que : le rapport E/C, mode de compactage et la variation du pourcentage du ciment.

Dans notre étude nous avons choisi d'extraire la terre destinée à la fabrication des éprouvettes du B.T.S à base de sol de la région de M'Sila.

**III-3-1-Fabrication des éprouvettes :**

- **tamissage et étuvage :**

Le sol a été extrait de la couche qui se trouve en dessous de la terre végétale, puis séché à l'étuve à 105°C, puis tamiser à l'aide d'un tamis de 5mm de maille.



**Fig. III-9 :** Etapes de préparation de la terre.

- **Préparation du mélange (sol/stabilisant/eau de gâchage) :**

Le mélange (sol plus stabilisant) à l'état sec est pris égale à 2000g, on fait un malaxage mécanique lent pendant (90) secondes qui permet la bonne répartition du mélange. tout on maintenant le malaxeur en marche on humidifie progressivement le mélange homogénéisé avec la proportion d'eau précisée, qui correspond à la teneur en eau optimale " T.E.O", après un malaxage lent et un autre mécanique énergétique (90 secondes chacun), on passe à un malaxage manuel final pour séparer les boulettes qui se sont formées, et homogénéiser le mélange parfaitement.

- **Compactage :**

Pour les éprouvettes cylindriques on utilise le moule destiné à l'essai Proctor normal de dimensions normalisées.

Le compactage des éprouvettes est effectué manuellement en trois couches avec une énergie fournie par une dame de 2.49 Kg de masse tombant d'une hauteur de 56 cm.

- **Démoulage et séchage :**

Le démoulage est effectué par un dispositif mécanique spécial pour les éprouvettes du moule Proctor normal .après chaque démoulage on fait passer à l'aide d'un pinceau une couche d'huile sur les parois du moule, pour éviter toute adhésion du sol et afin de permettre un démoulage facile et l'obtention d'éprouvettes bien façonnés.

A noter enfin que la durée du séchage dépend de l'essai au quel seront soumises les éprouvettes.

- **Cure :**

Après démoulage, les éprouvettes ont subi une cure humide pour éviter un assèchement prématuré. La cure consiste à arroser les éprouvettes pendant une semaine et de les couvrir d'une bâche en plastique pendant 14 jours. Cette période de cure permet au stabilisant de durcir. Le séchage s'est effectué à la température ambiante du laboratoire

## **Chapitre IV : Caractérisation**

### **IV-1- Technologie de production :**

Les deux grands modes d'utilisation de la terre pour la construction que ce soit en technique traditionnelle ou moderne.

#### **IV-1-1-Technique traditionnelle :**

La brique de terre crue, composée de terre argileuse avec un pourcentage d'eau élevé (pour permettre un malaxage manuel aisé) est généralement obtenue en tassant la terre à la main dans un moule simple en bois (rarement en tôle) puis en la séchant au soleil.

Des fibres végétales (paille, palmier) et les fibres synthétique sont parfois ajoutées à la terre. [2]



**Fig. IV-1 :** Un malaxage manuel



**fig. IV-2 :** Les éprouvettes cubiques

#### **IV-1-1-1-Présentation des essais :**

##### **a- Durabilité:**

L'essai type recommandé conformément à la norme américaine ASTM-559-44 est l'essai de mouillage-séchage.

- **But :**

Cet essai permet de déterminer les pertes des matériaux, les variations d'humidité et les changements de volume (contraction-dilatation) qui se produisent à la suite de mouillage et séchage.

• **Mode opératoire :**

On prend des éprouvettes conservées dans une ambiance humide pendant 7 jours puis pesées, ensuite elles sont soumises à une série de quatre cycles identique de mouillage et séchage, Comprenant chacun (5) heures d’immersion totale, 42 heures d’étuvage puis une heure dans l’air ambiant du laboratoire. Après chaque cycle les éprouvettes sont brossées et la perte de poids est mesurée. Ce qui permet d’établir une courbe donnant la perte de poids en fonction du dosage en stabilisateur.

Les résultats de cet essai sont portés dans les tableaux suivants :

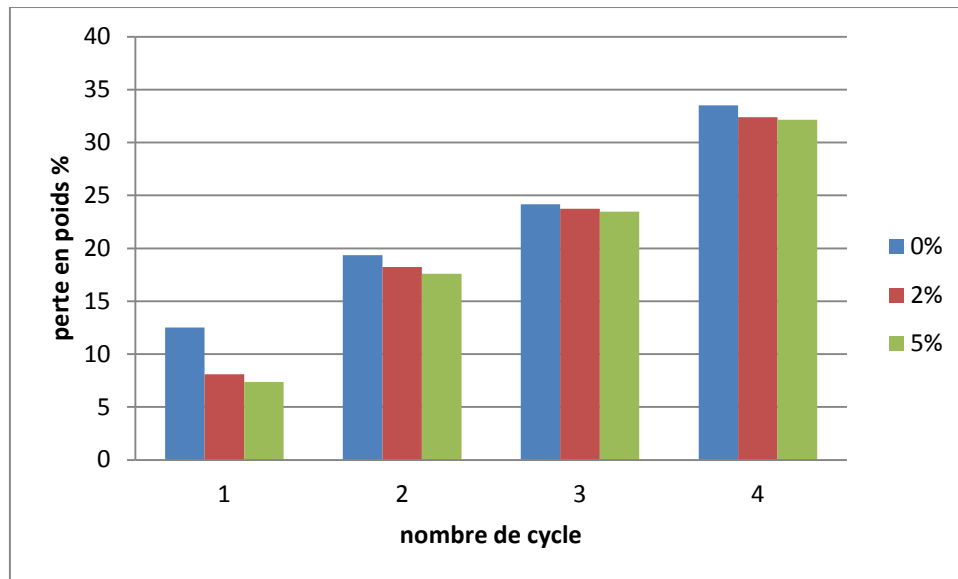
	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
0 %	241.5	211.3	170.4	129.2	85.9
2%	232.3	214.6	176.8	135.3	91.8
5%	234.4	215.4	176.1	134.3	90.8

**Tableau IV-1 :** poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque Cycle de mouillage-séchage.

Perte (%) Dosage en ciment (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
0%	12.51	19.35	24.17	33.51
2%	8.1	18.24	23.73	32.39
5%	7.36	17.61	23.47	32.15

**Tableau IV-2 :** la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment Après chaque cycle de mouillage-séchage.





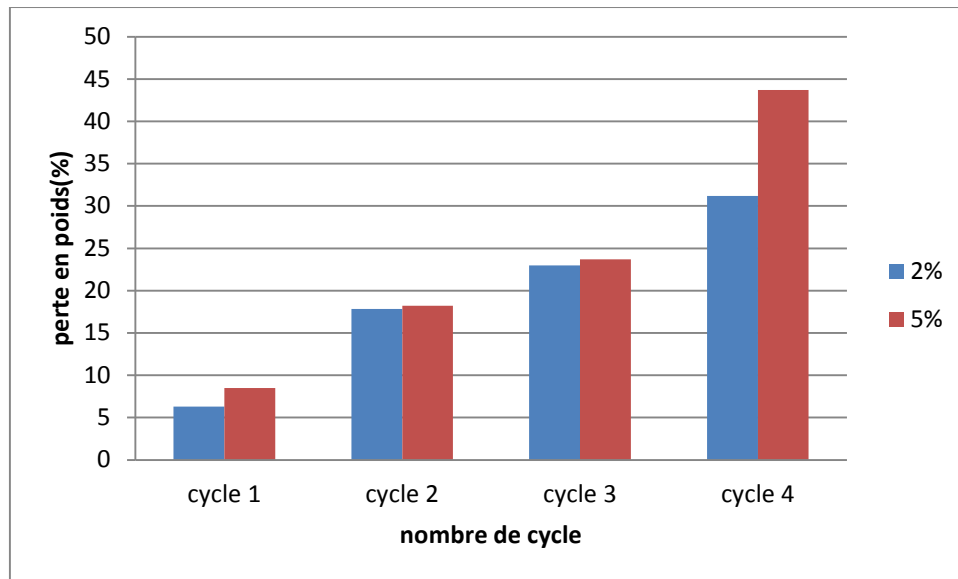
**Fig. IV-3 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en chaux	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	236.3	221.4	181.9	140.1	95.4
5%	241	220.5	180.3	137.6	93.9

**Tableau IV-3:** poids des éprouvettes stabilisées à la chaux après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	6.31	17.84	22.97	31.9
5%	8.5	18.23	23.68	43.7

**Tableau IV-4:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux après chaque cycle de mouillage-séchage.



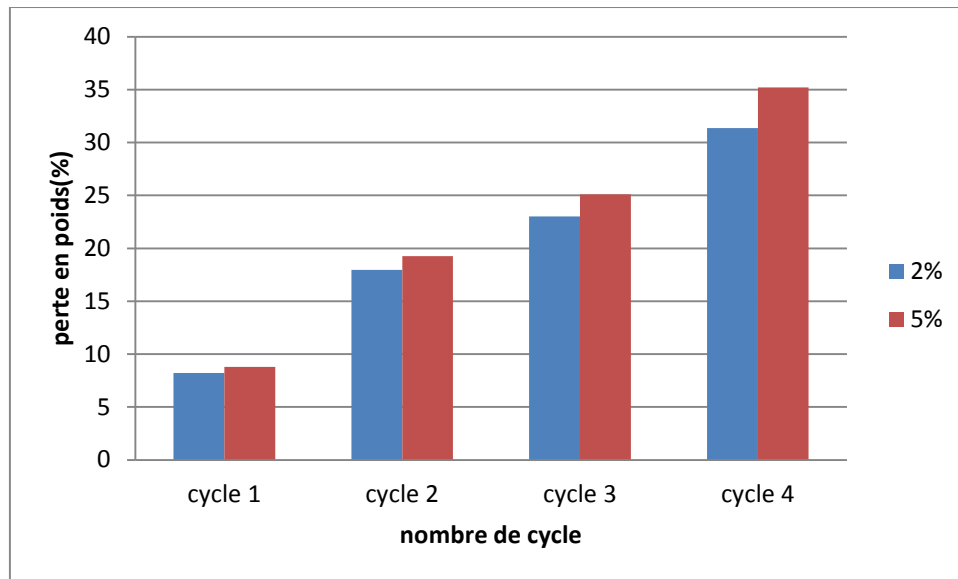
**Fig. IV-4 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en chaux	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	241.3	221.5	181.7	139.9	96
5%	226.6	206.7	166.9	125	81

**Tableau IV-5:** poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétiques après chaque cycle de mouillage-séchage

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.21	17.96	23	31.37
5%	8.80	19.25	25.1	35.2

**Tableau IV-6 :** la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétiques après chaque cycle de mouillage-séchage.



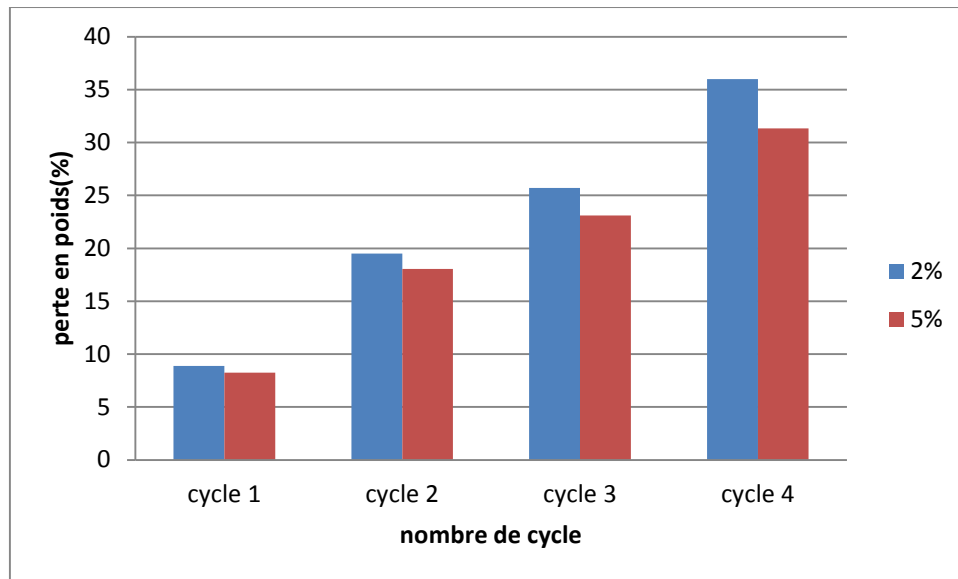
**Fig. IV-5 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en chaux	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	227.6	207.4	166.9	124	79.4
5%	240.3	220.5	180.7	138.9	95.4

**Tableau IV-7:** poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.89	19.49	25.69	35.99
5%	8.25	18.04	23.11	31.33

**Tableau IV-8:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage.



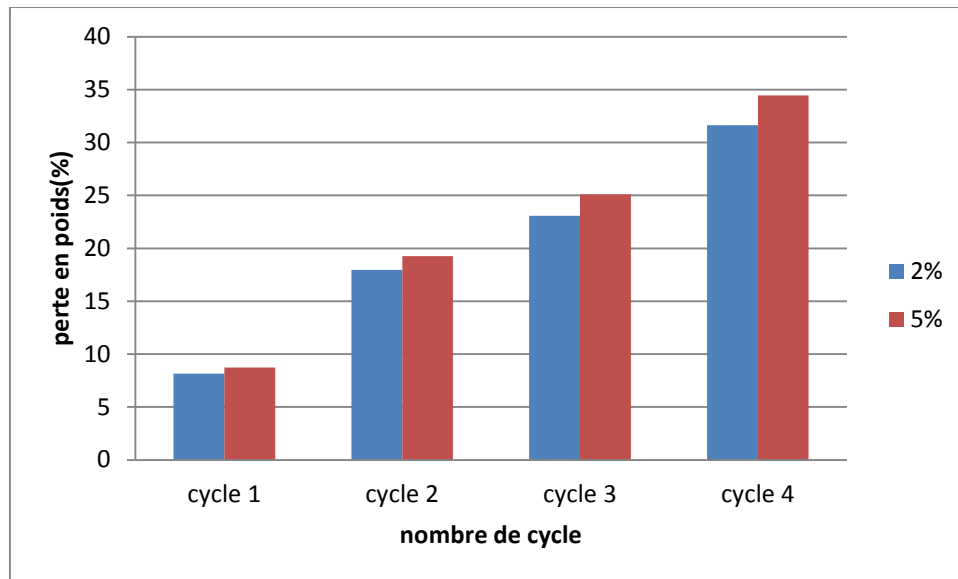
**Fig. IV-6 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en chaux	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	240	220.4	180.8	139.1	95.1
5%	230.3	210.2	169.7	127.1	83.3

**Tableau IV-9 :** poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.16	17.96	23.06	31.63
5%	8.73	19.26	25.1	34.46

**Tableau IV-10 :** la perte de poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.



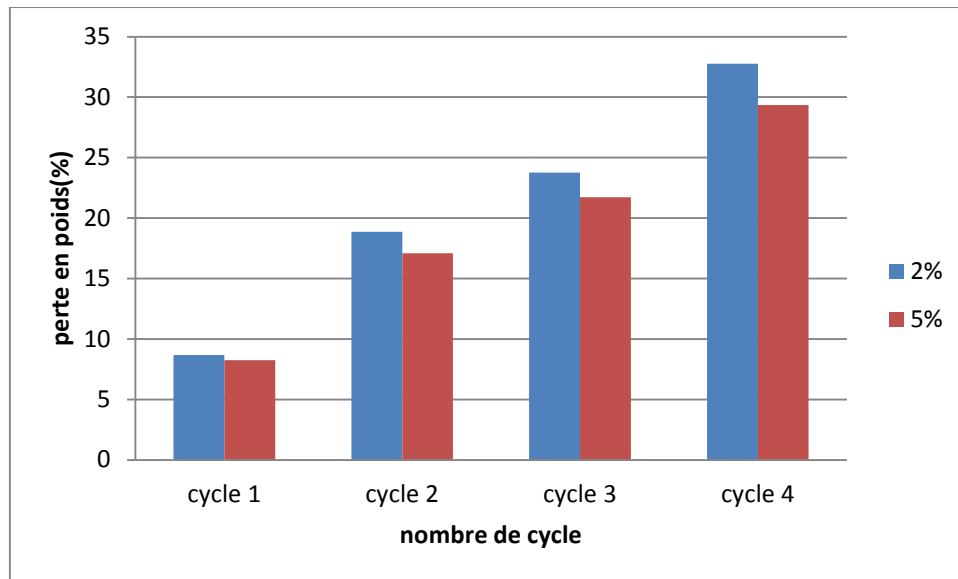
**Fig. IV-7 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	237.3	216.7	175.8	134	90.1
5%	252.3	231.5	191.9	150.2	106.1

**Tableau IV-11:** poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.68	18.87	23.77	32.76
5%	8.25	17.10	21.73	29.36

**Tableau IV-12:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage



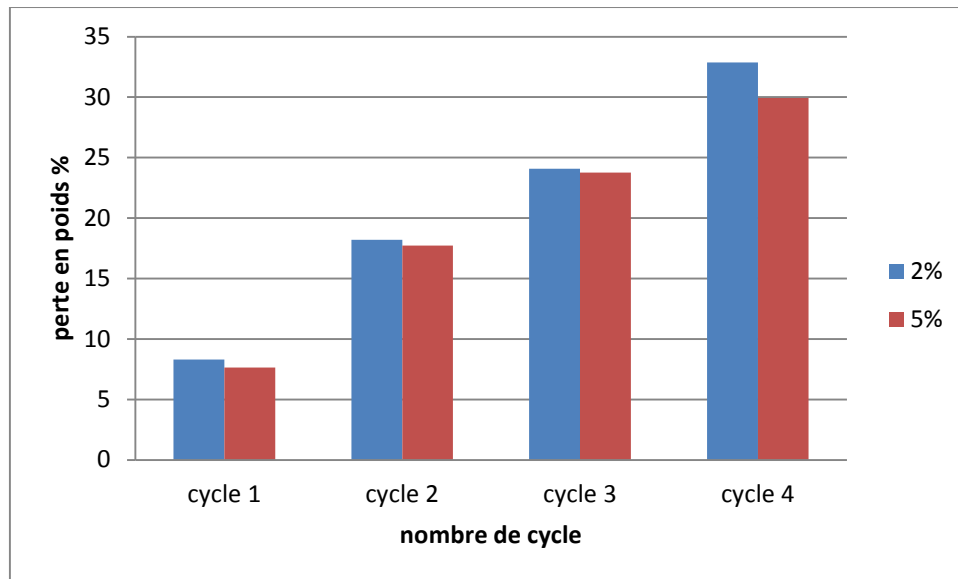
**Fig. IV-8 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	243	222.9	182.3	139.4	95.7
5%	237.6	219.4	180.5	137.6	96.4

**Tableau IV-13 :** poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.29	18.21	24.07	32.88
5%	7.65	17.73	23.76	29.94

**Tableau IV-14:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage



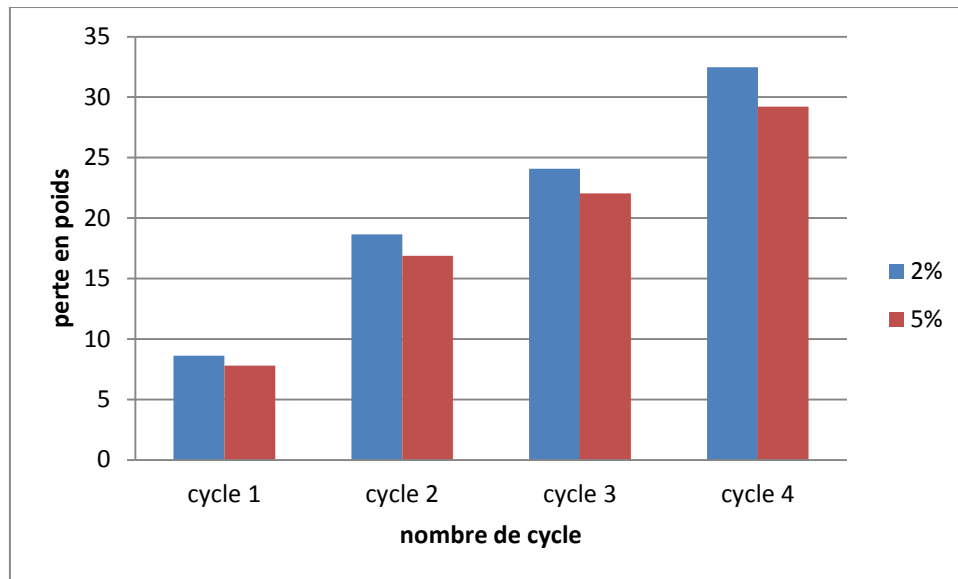
**Fig. IV-9 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	238	217.5	176.9	134.3	90.7
5%	253.3	233.5	194.1	151.3	107.1

**Tableau IV-15 :** poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	8.61	18.66	24.08	32.46
5%	7.81	16.87	22.05	29.21

**Tableau IV-16:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.



**Fig. IV-10 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle de mouillage-séchage.

#### b- Essai de compression par écrasement :

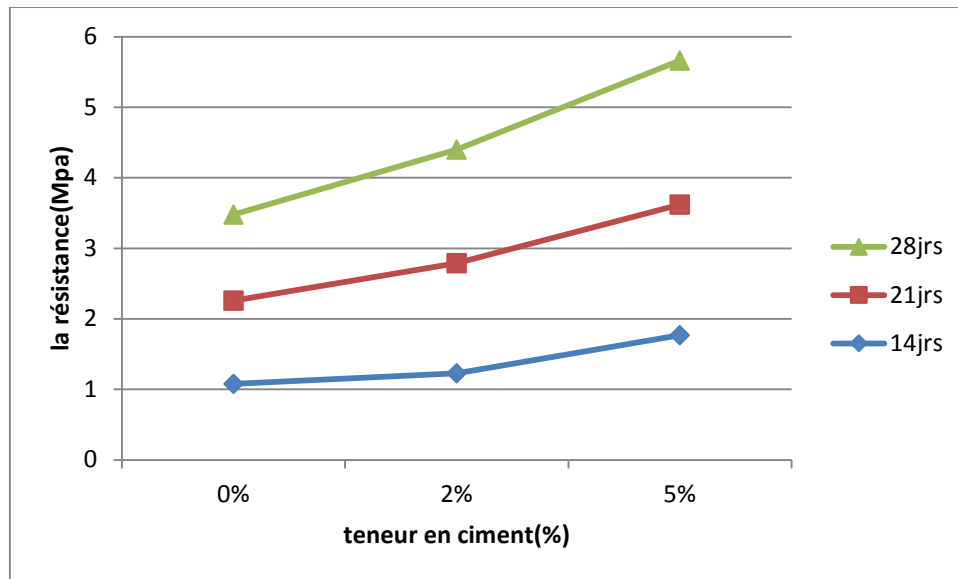
Cet essai est conforme à la norme ASTM D 2166 66 la machine d'essai est une presse mécanique fonctionnant manuellement, si l'âge de cure est atteint, l'éprouvette est bien centrée sur la base de la machine "plateau inférieur" jusqu'à ce que le plateau supérieur modifié soit en contact avec la face de l'éprouvette, puis on procède à un écrasement avec une vitesse moyenne maintenue constante pendant tous les essais.

Les résultats de cet essai sont portés dans les tableaux suivants :

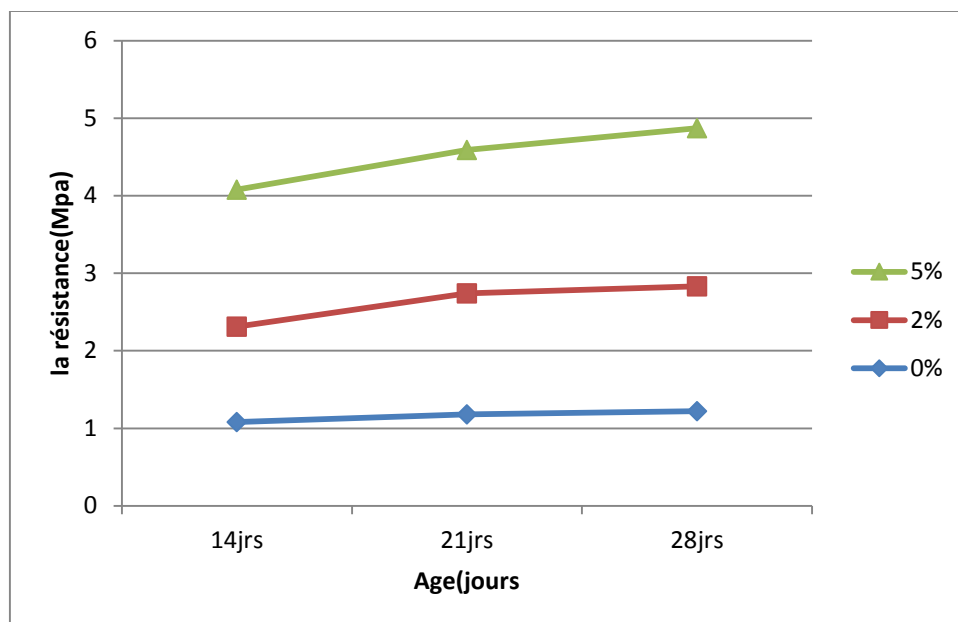
Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
0%	1.08	1.18	1.22
2%	1.23	1.56	1.61
5%	1.77	1.85	2.04

**Tableau IV-17:** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment.





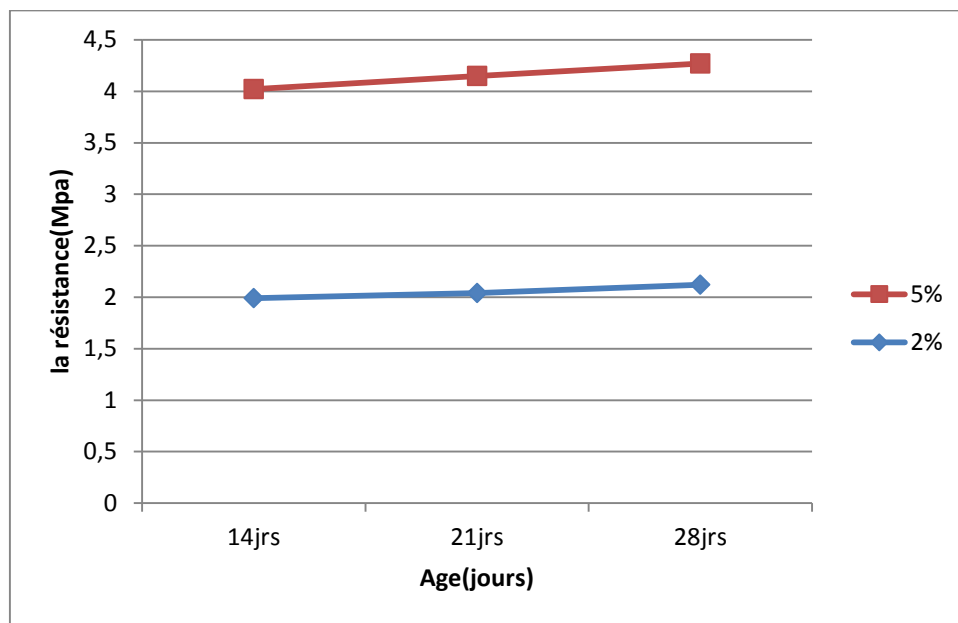
**Fig. IV-11 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment en fonction de la teneur en ciment.



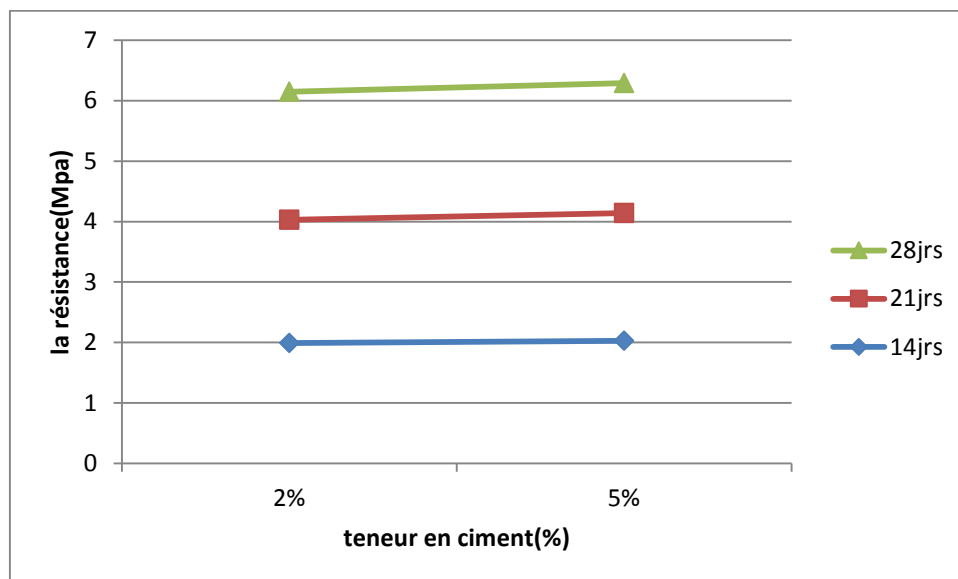
**Fig. IV-12 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment en fonction de l'âge de cure.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.99	2.04	2.12
5%	2.03	2.11	2.15

**Tableau IV-18 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille.



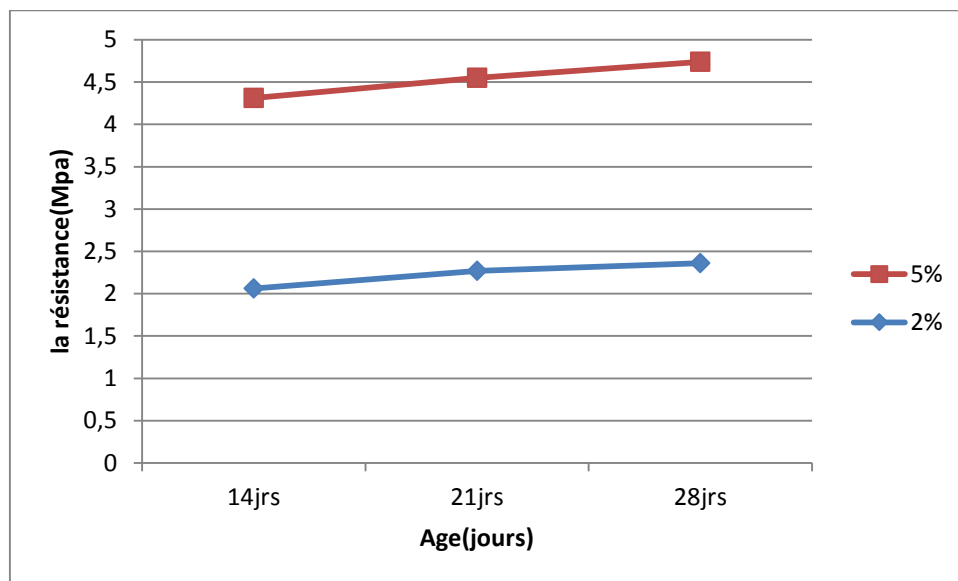
**Fig. IV-13 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille en fonction de la teneur en ciment.



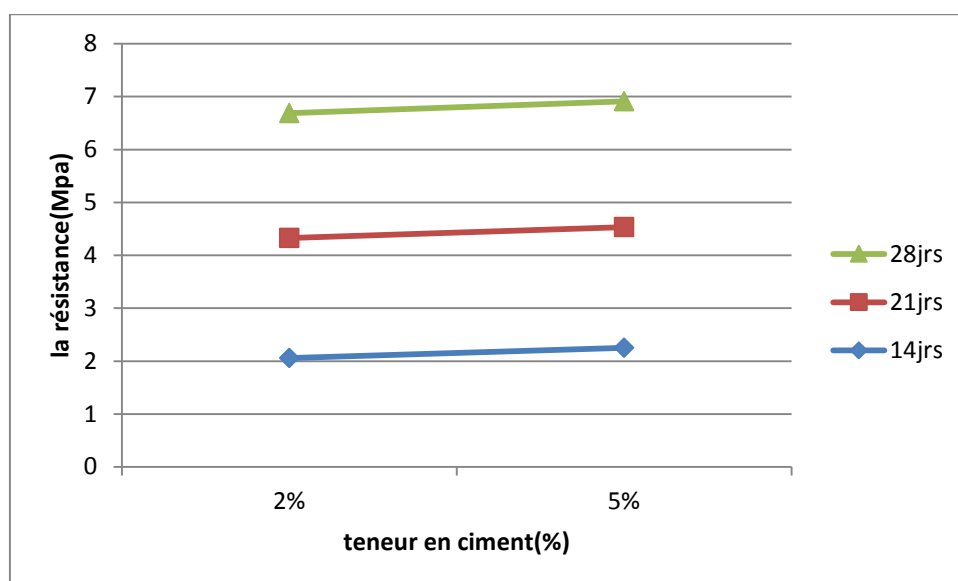
**Fig. IV-14 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille en fonction de l'âge de cure

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	2.06	2.27	2.36
5%	2.25	2.28	2.38

**Tableau IV-19 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier.



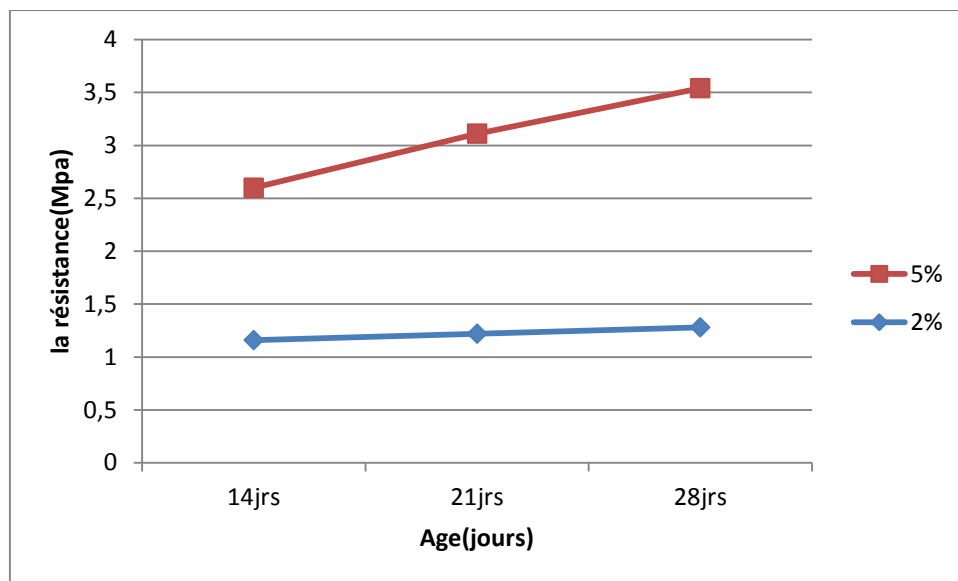
**Fig. IV-15 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier en fonction de la teneur en ciment.



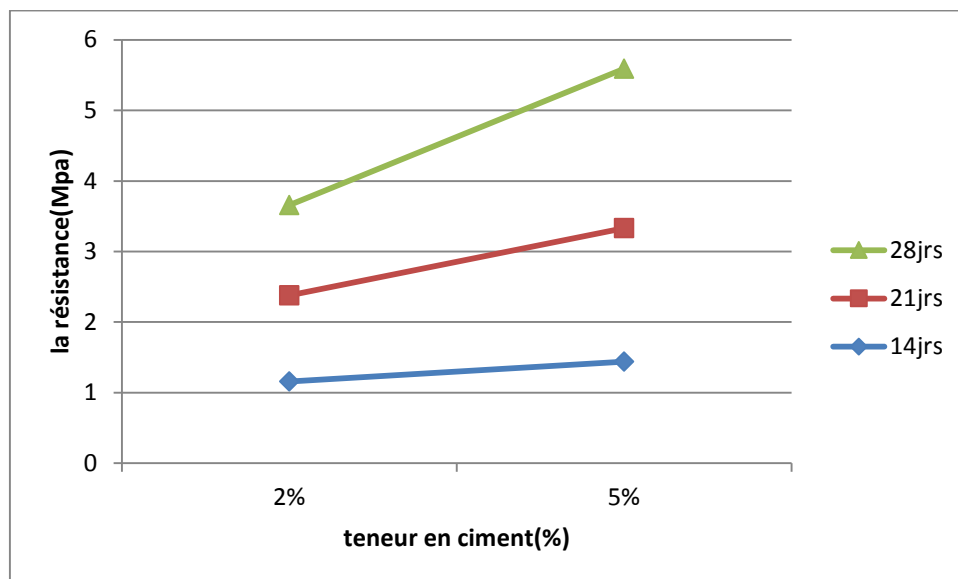
**Fig. IV-16 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier en fonction de l'âge de cure.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.16	1.22	1.28
5%	1.44	1.89	2.26

**Tableau IV-20:** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique.



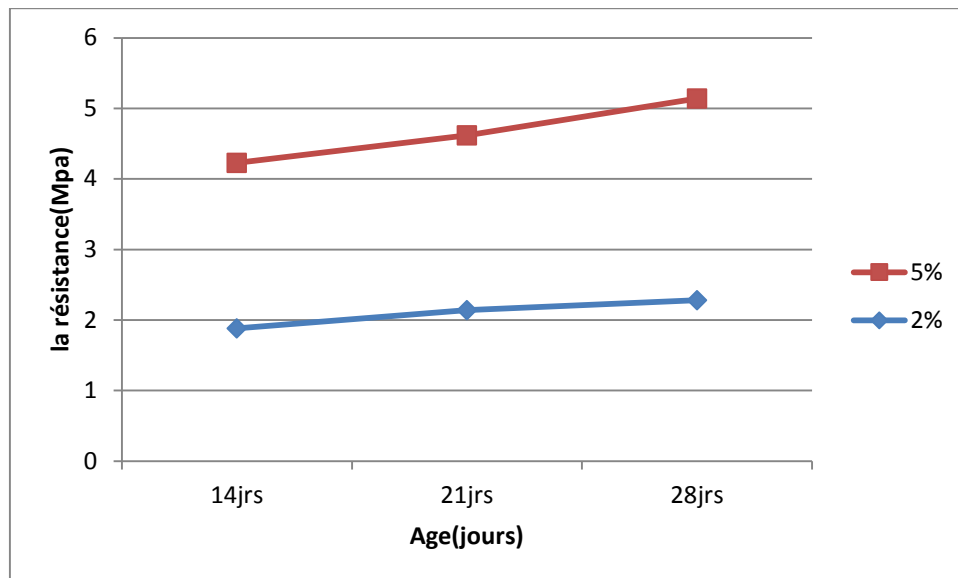
**Fig. IV-17 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique en fonction de l'âge de cure



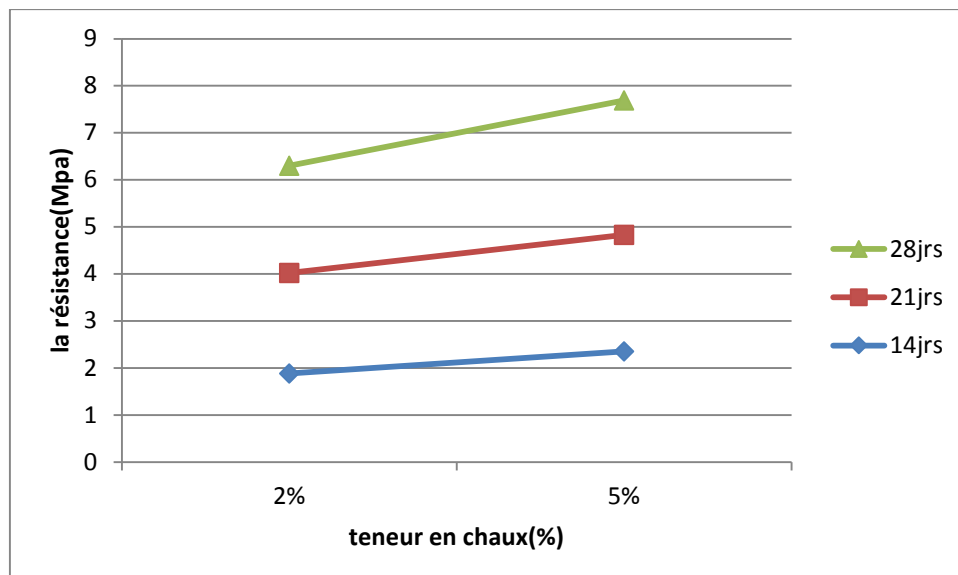
**Fig. IV-18 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.88	2.14	2.28
5%	2.35	2.48	2.86

**Tableau IV-21 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées a la chaux.



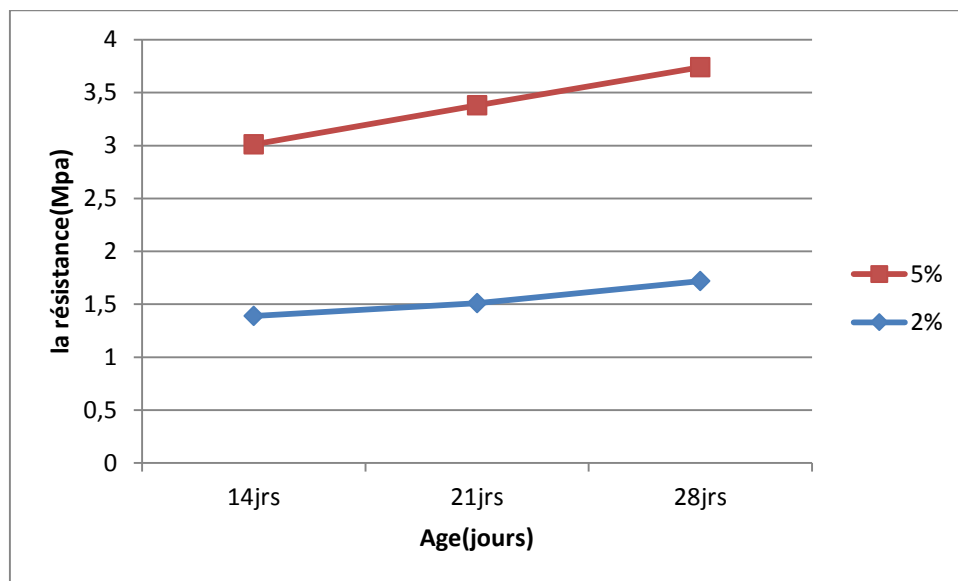
**Fig. IV-19:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées a la chaux en fonction de l'âge de cure



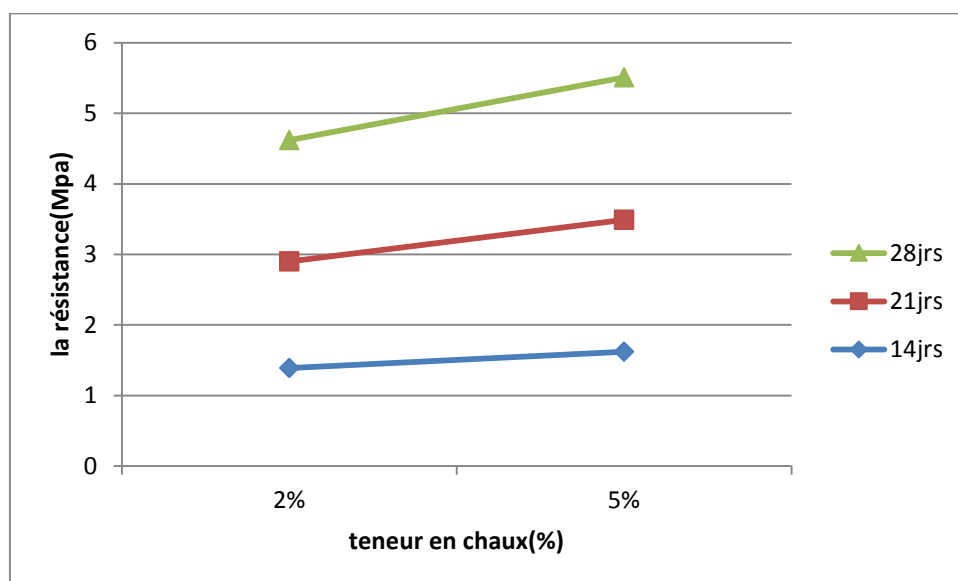
**Fig. IV-20:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées a la chaux en fonction de la teneur en chaux.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.39	1.51	1.72
5%	1.62	1.87	2.02

**Tableau IV-22 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de paille.



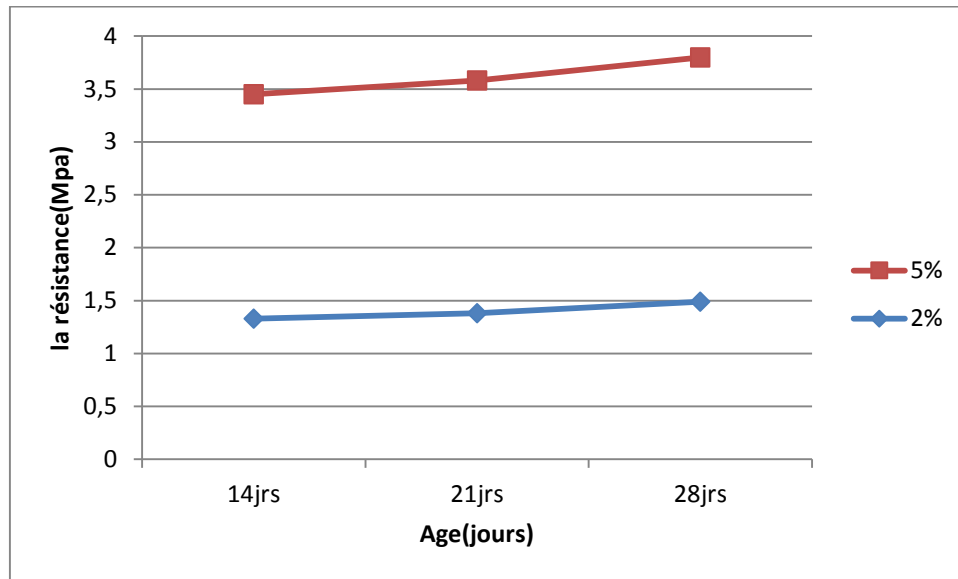
**Fig. IV-21:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de paille en fonction de l'âge de cure



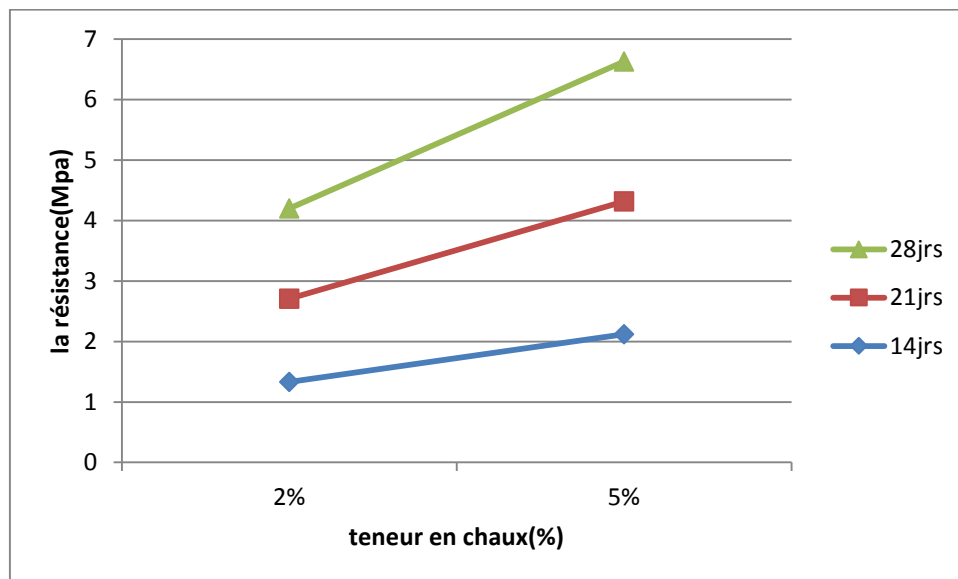
**Fig. IV-22:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de paille en fonction de la teneur en chaux.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.33	1.38	1.49
5%	2.12	2.20	2.31

**Tableau IV-23:** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de palmier



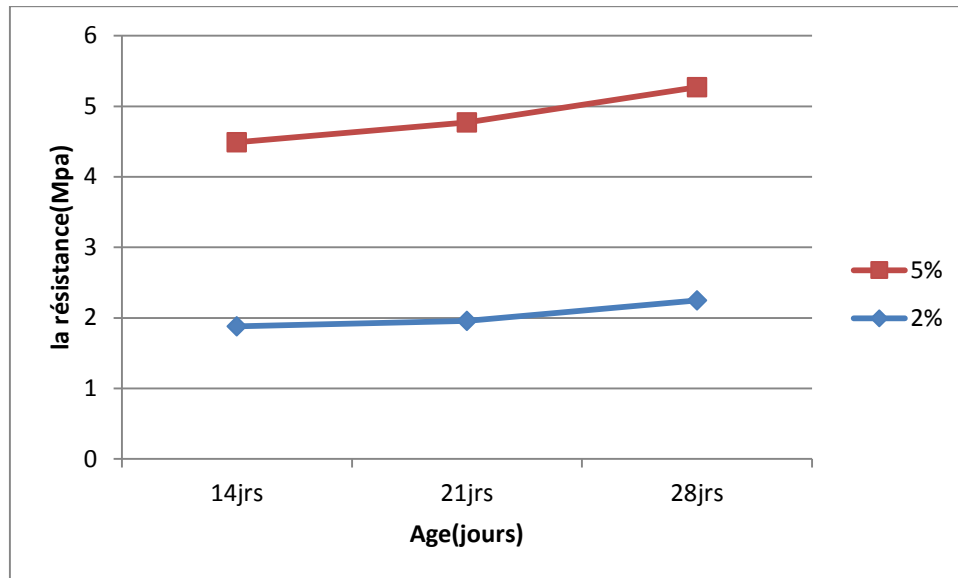
**Fig. IV-23:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de palmier en fonction de l'âge de cure.



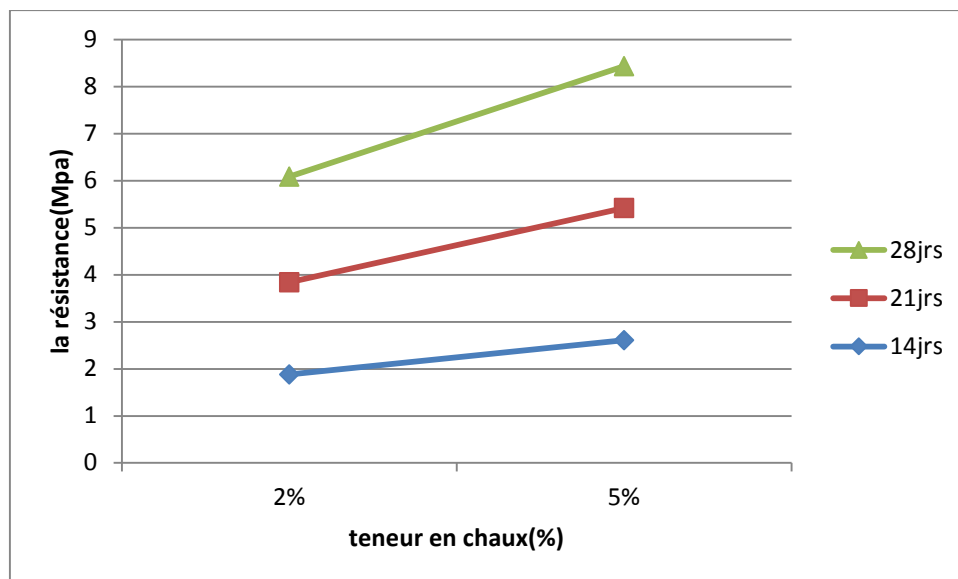
**Fig. IV-24:** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres de palmier en fonction de la teneur en chaux.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	1.88	1.96	2.25
5%	2.61	2.81	3.02

**Tableau IV-24 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres synthétique.



**Fig. IV-25 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres synthétique en fonction de l'âge de cure



**Fig. IV-26 :** l'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées à la chaux et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en chaux.



**IV-1- 2-Techniques améliorées :**

L'amélioration consiste à assurer un certain compactage du bloc. Ce compactage permet l'augmentation de la densité sèche du matériau et par voie de conséquence sa résistance mécanique. On obtient ainsi des blocs dont l'aspect et la forme géométrique sont réguliers. Un avantage important est l'utilisation rendue possible d'un assez grand nombre de sols qui ne conviendraient pas à la technique de l'adobe ou du toub. [2]



**Fig. IV-27: Les éprouvettes cylindriques.**

**a- durabilité :**

Dans notre étude nous avons travaillé avec des éprouvettes cylindriques dosées à 0%, 2% et 5% en ciment et renforcée par des fibres



**Fig. IV-28 : Essai de mouillage-séchage.**

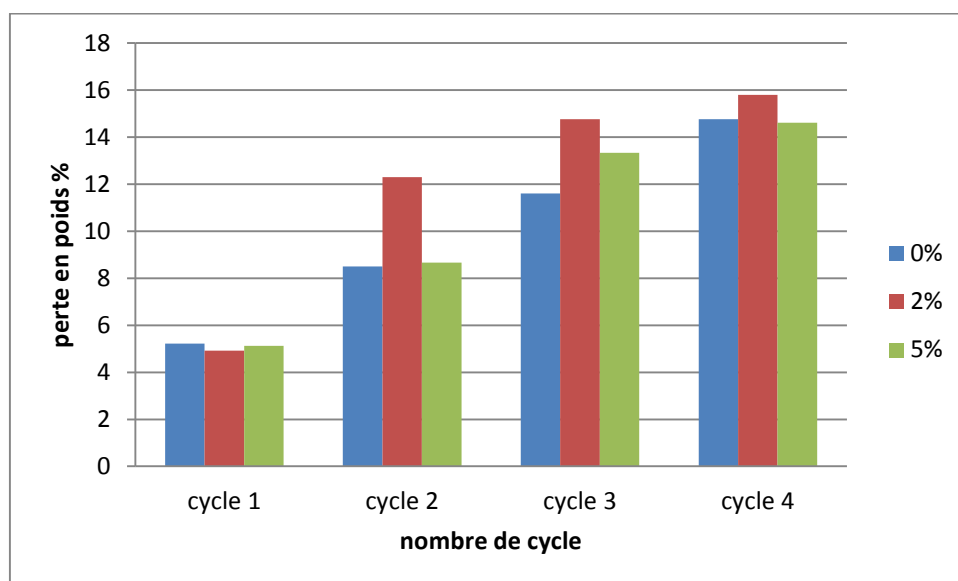
Les résultats de cet essai sont portés dans les tableaux suivants :

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
0 %	1856.2	1759.3	1609.7	1422.8	1212.6
2%	1862.4	1770.6	1552.8	1323.4	1114.2
5%	1868.2	1772.4	1618.7	1402.8	1197.8

**Tableau IV-25 :** poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
0%	5.22	8.50	11.61	14.77
2%	4.92	12.30	14.77	15.80
5%	5.12	8.67	13.33	14.61

**Tableau IV-26 :** la perte en poids des éprouvettes stabilisées au ciment après chaque cycle de mouillage-séchage



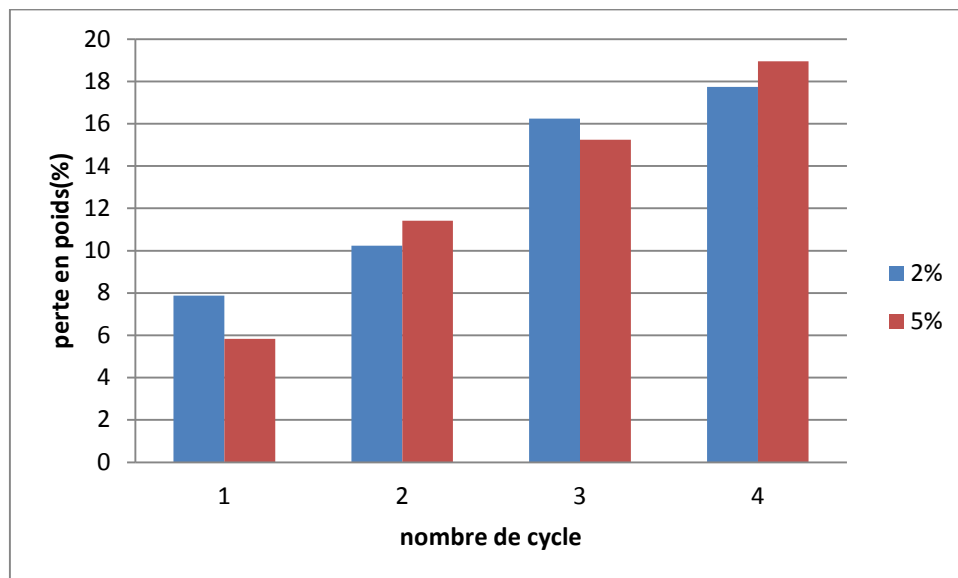
**Fig. IV-29 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment en fonction du nombre de cycle

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	1763.7	1624.8	1458.3	1221.4	1004.7
5%	1808.4	1702.8	1508.3	1287.4	1043.4

**Tableau IV-27:** poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	7.87	10.24	16.24	17.74
5%	5.83	11.42	15.24	18.95

**Tableau IV-28:** la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de paille après chaque cycle de mouillage-séchage



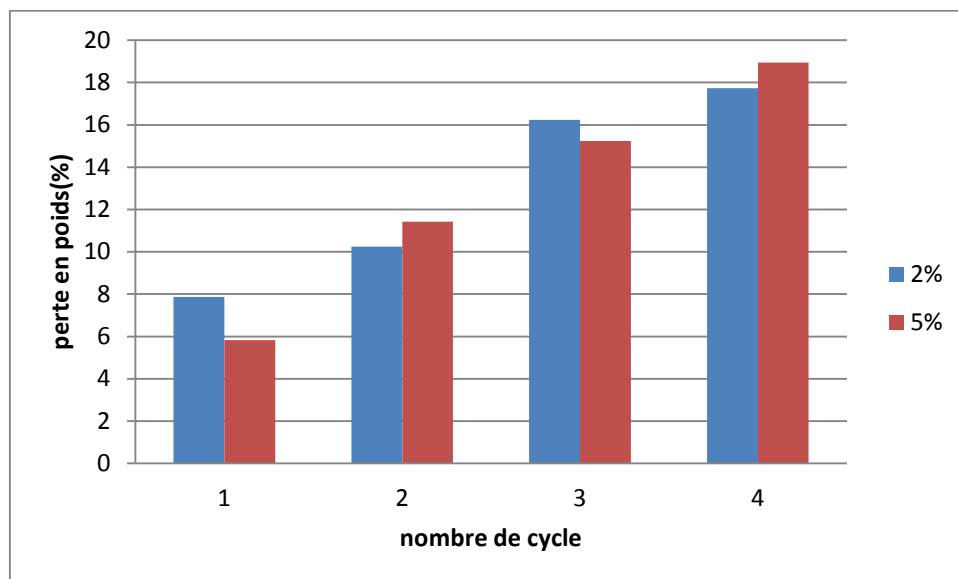
**Fig. IV-30 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment et renforcée par les fibres de paille en fonction du nombre de cycle.

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	1874.8	1780.7	1620.8	1433.2	1218.8
5%	1849.5	1756.4	1583.2	1382.8	1188.2

**Tableau IV-29:** poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	5.01	8.97	11.57	14.95
5%	5.03	9.86	12.71	14.07

**Tableau IV-30 :** la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres de palmier après chaque cycle de mouillage-séchage.



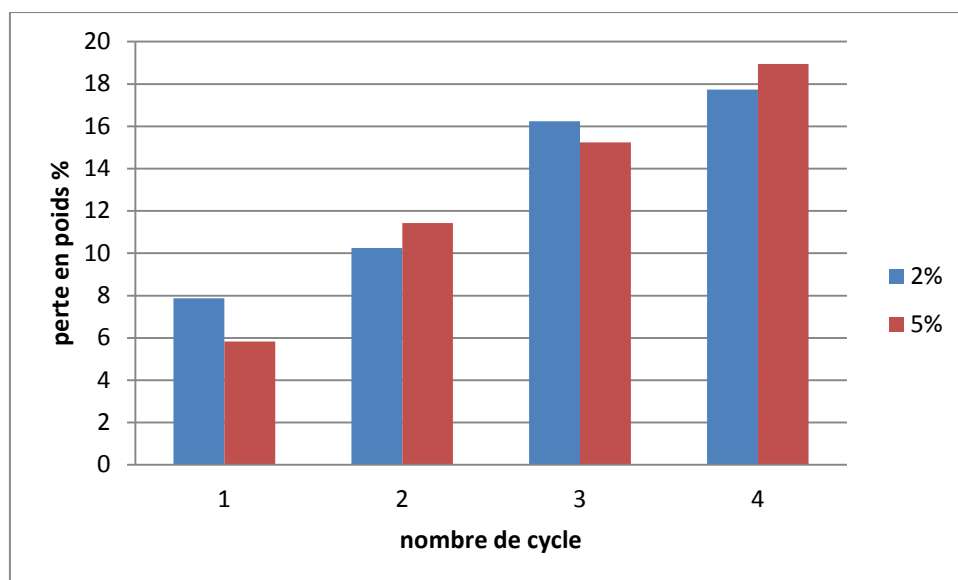
**Fig. IV-31 :** courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment et renforcée par les fibres de palmier en fonction du nombre de cycle

	Poids des éprouvettes				
Dosage en ciment	Poids initiaux	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
2%	1843.9	1759.8	1604.8	1397.4	1124.7
5%	1866.3	1784.2	1598.9	1394.8	1180.7

**Tableau IV-31** : poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage.

Perte (%)	1 <sup>er</sup> cycle	2 <sup>ème</sup> cycle	3 <sup>ème</sup> cycle	4 <sup>ème</sup> cycle
Dosage en ciment (%)				
2%	4.56	8.80	12.92	19.51
5%	4.39	10.38	12.76	15.34

**Tableau IV-32**: la perte de poids des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par les fibres synthétique après chaque cycle de mouillage-séchage



**Fig. IV-32** : courbe donnant la perte en poids des éprouvettes stabilisée au ciment et renforcée par les fibres synthétique en fonction du nombre de cycle.

## b- Essai de compression par écrasement :



Fig. IV-33 : Etats des éprouvettes après l'écrasement .

Les résultats de cet essai sont portés dans les tableaux suivants :

- Résultats d'essais :

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
0%	1.92	2.04	2.51
2%	2.07	2.32	2.48
5%	2.52	2.63	2.87

Tableau IV-33 : les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment.

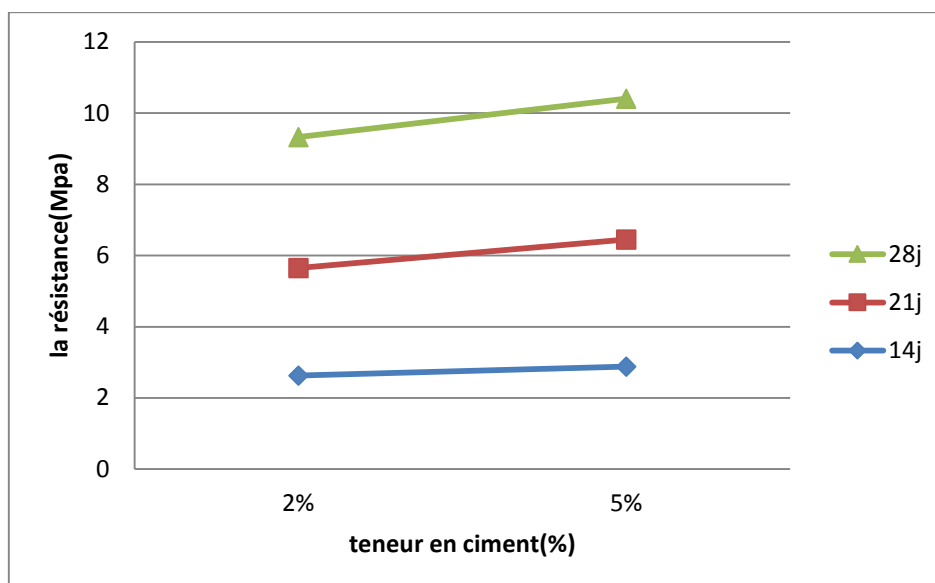
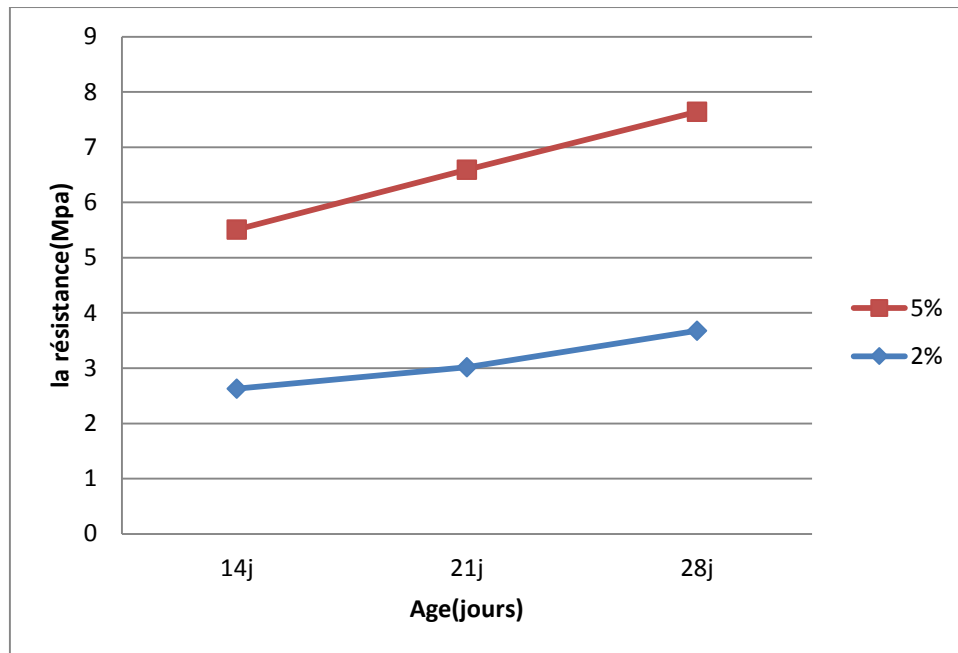


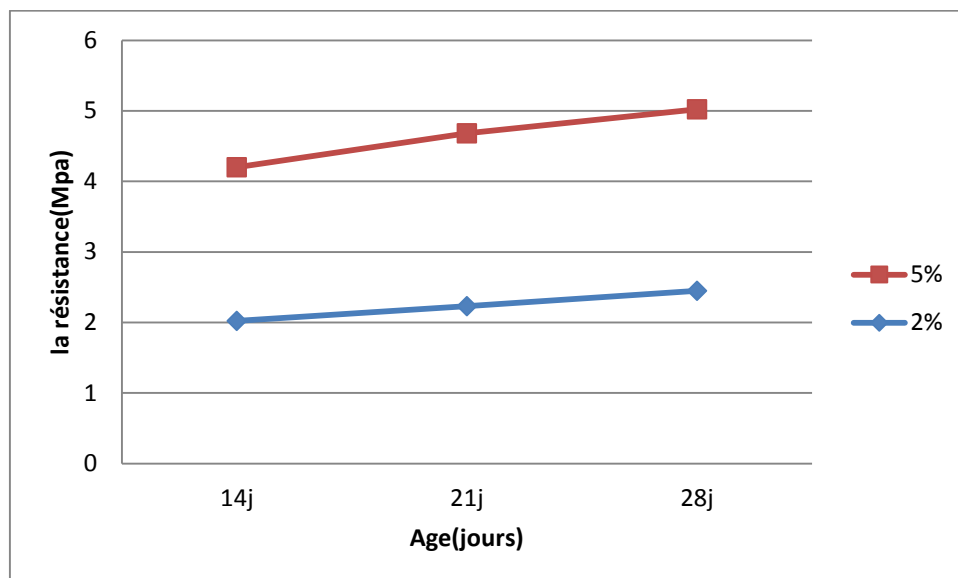
Fig. IV-34 : L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment en fonction de la teneur en ciment



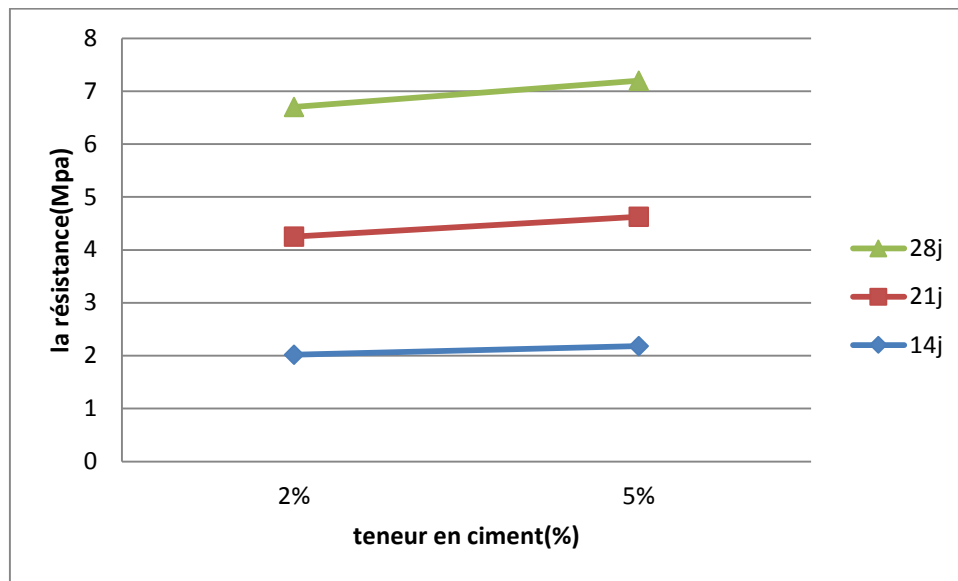
**Fig. IV-35:** L'évolution de la des échantillons stabilisés au ciment résistance en fonction de l'âge de cure.

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	2.63	3.02	3.68
5%	2.88	3.57	3.96

**Tableau IV-34 :** les résultats de l'essai d'écrasement des échantillons stabilisés au ciment et renforcée par des fibres de paille



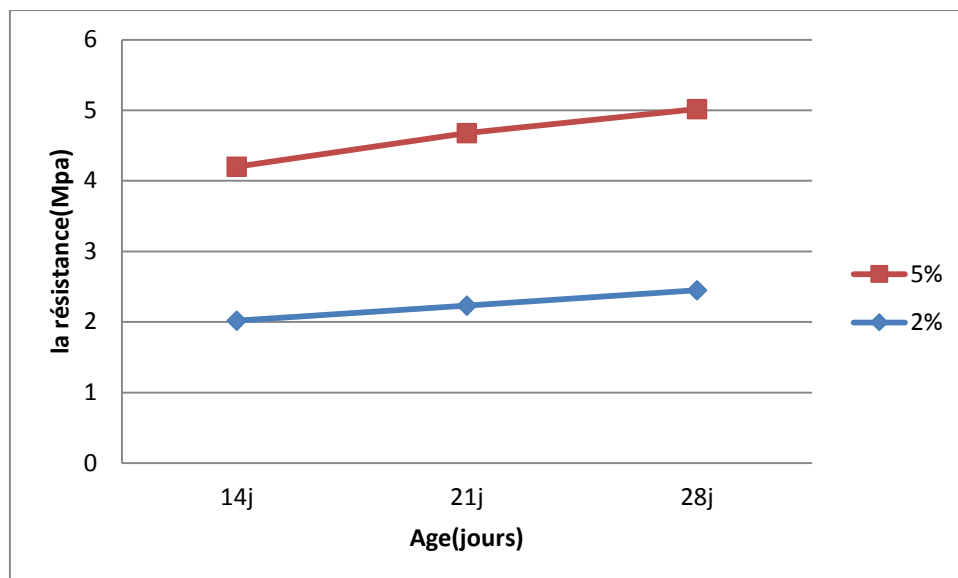
**Fig. IV-36 :** L'évolution de la résistance des échantillons stabilisés au ciment et renforcée par des fibres de paille en fonction de la teneur en ciment



**Fig. IV-37 :** L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de paille en fonction de la teneur en ciment.

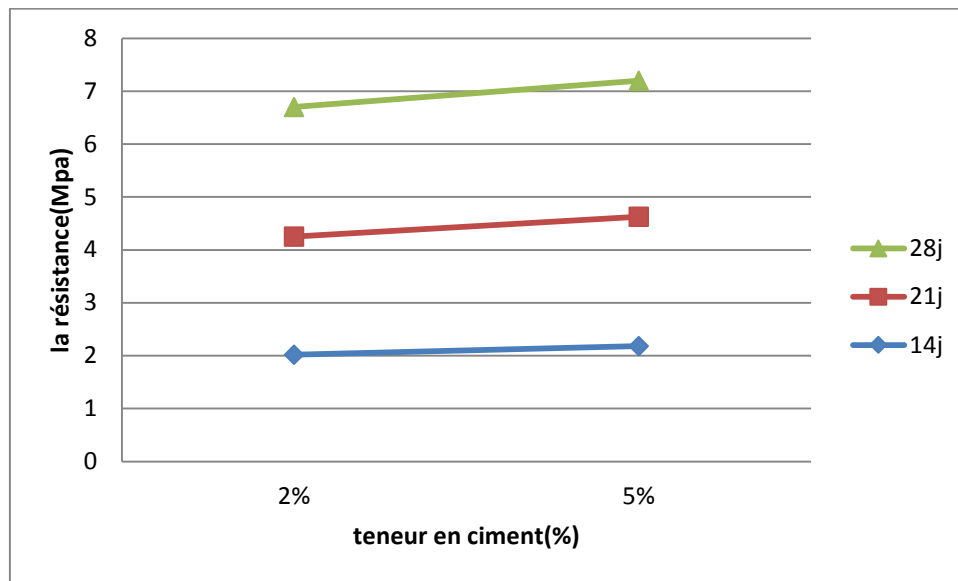
Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	2.58	3.18	3.45
5%	2.63	3.42	3.73

**Tableau IV-35 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier.



**Fig. IV-38 :** L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier en fonction de la teneur en ciment

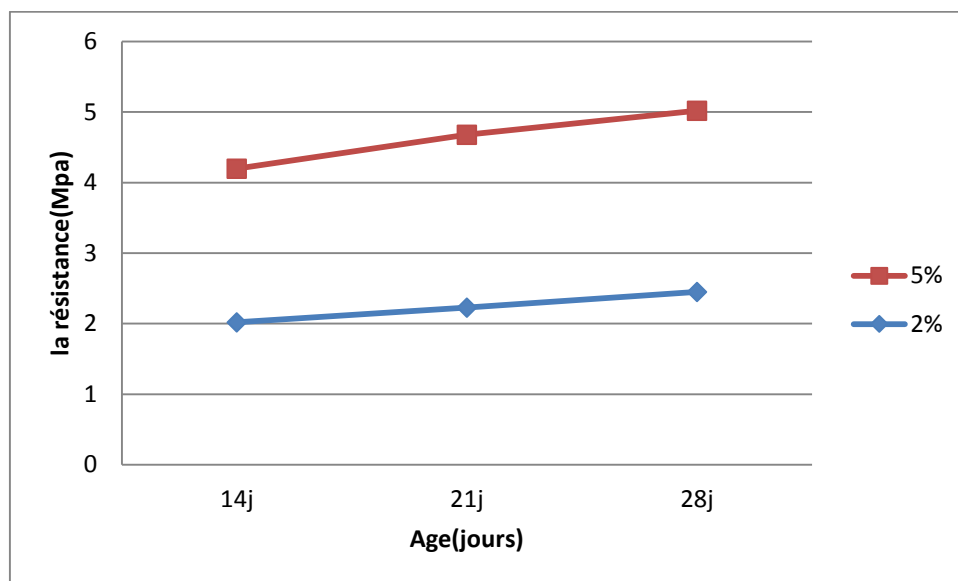




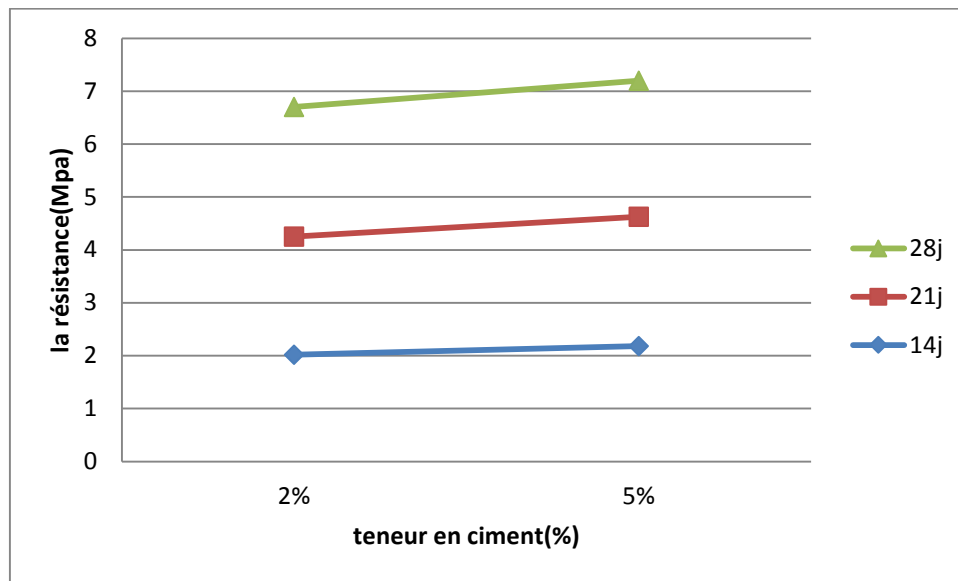
**Fig. IV-39 :** L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres de palmier en fonction de la teneur en ciment

Dosage en ciment	Résistance à la compression en Mpa		
	14 jours	21 jours	28 jours
2%	2.02	2.23	2.45
5%	2.18	2.45	2.57

**Tableau IV-36 :** les résultats de l'essai d'écrasement des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique.



**Fig. IV-40 :** L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment



**Fig. IV-41 :** L'évolution de la résistance des éprouvettes stabilisées au ciment et renforcée par des fibres synthétique en fonction de la teneur en ciment



**Fig. IV-42 :** Essai de compression par écrasement.

**IV-2-Discussion des résultats et interprétations:****IV-2-1- Interprétation de l'essai de durabilité :**

D'après les résultats obtenus, nous on conduit à déduire les conclusions suivantes :

- Dès le premier cycle de mouillage-séchage, nous avons remarqué une altération majeure (fissuration et diminution des dimensions) des éprouvettes cubiques et cylindriques.
- Le taux de perte en poids (dégradation) augmente d'une manière importante ; et plus le dosage en liant (ciment ou chaux) augmente plus le taux de perte diminue.
- Les pertes dans les éprouvettes cubiques sont plus grandes que celles des éprouvettes cylindriques (dû à la différence de la technologie de production « compacté ou non compacté »).

On peut constater que les éprouvettes sont très vulnérables, les épreuves sévères d'immersion-séchage dans l'eau est mauvais, mais n'entraîne pas la ruine totale des éprouvettes, si ce n'est que la perte en poids importantes due à la désintégration des particules.

Les éprouvettes stabilisées à la chaux ont un comportement légèrement meilleur par rapport aux éprouvettes stabilisées au ciment, ce qui permet de déduire que la chaux a un effet favorable sur la résistance à l'érosion des éprouvettes, en effet les pertes en poids des éprouvettes stabilisées à la chaux sont plus faible par rapport aux éprouvettes stabilisées au ciment.

Nous pouvons interpréter tous ceci comme suit :

La composition de la matrice du bloc stabilisée peut contribuer à sa vulnérabilité, en effet, au moins 90% du bloc constitue du sol et avec 10% au moins du liant.

Le processus de stabilisation au ciment n'affecte pas tous les constituants du bloc (Herzog & Mitchell, 1963 ; Houben & Guillard, 1994) dans [26],

la finesse des particules d'argile, de limon, entravent le processus de stabilisation, de part leur avidité d'eau, ces particules consomment une partie de l'eau de malaxage nécessaire à l'hydratation du ciment (Van Olphen, 1977) dans [26]. De plus elles couvrent la surface de la fraction grossière du sol (gravier fin et sable) inhibant ainsi l'effet du ciment sur ces particules.

D'autre part, la réaction d'hydratation entre le ciment portland et l'eau qui est responsable de la liaison crée dans le bloc, produit également des produits solubles tels que l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  (ILLSTON, 1994) dans [26], celui-ci peut facilement contribuer à la désintégration du bloc humide dans le temps.

**IV-2-2- Interprétation de l'essai d'écrasement :**

Les graphes précédents montrent que les résistances à la compression des éprouvettes cubiques et cylindriques augmentent avec le dosage en stabilisant et ce quelque soit sa nature : ciment, chaux.

- Les meilleures résistances sont obtenues pour les éprouvettes cubiques stabilisées à la chaux et renforcée par les fibres synthétiques; ou elles varient entre 1.33 et 3.02 Mpa.
- Pour les blocs stabilisés au ciment les résistances varient entre 1.16 et 2.38 quand le dosage du ciment varie entre 2 à 5%.
- On peut conclure que les blocs stabilisés à la chaux présentent un meilleur comportement mécanique par rapports aux blocs stabilisés au ciment.
- Les meilleures résistances à la compression des éprouvettes cylindriques sont obtenues pour les éprouvettes stabilisés au ciment et renforcés par les fibres de paille, ou elles varient entre 2.63 et 3.96 Mpa.
- Les résistances à la compression augmentent avec le dosage en stabilisant pour les variant de 2 à 5% de ciment et de chaux.

**Conclusion :**

Notre travail étudié les caractéristiques du béton de terre stabilisée.

Les essais d'identification, essentiels dans ce type d'étude, ont permis de définir les caractéristiques de la terre afin de les situer par rapports aux critères de convenance pour la construction et par conséquent orienter vers le choix du stabilisant.

Les différentes formulations basées sur les dosages différents d'ajouts de ciment, de chaux, et des fibres ont permis de déterminer le traitement le mieux adapté à la terre.

Les types de traitement essayés se sont avérés généralement bénéfiques. En effet les résistances à la compression des éprouvettes augmentent avec le dosage en liant. Les meilleures résistances ont été obtenues avec les éprouvettes cylindriques stabilisées au ciment et renforcées par les fibres de paille. Les plus faibles valeurs de résistance ont été obtenues pour les éprouvettes cubiques stabilisées au ciment. Ce qui permet de déduire que ces derniers sont les plus sensibles à l'eau.

En définitive, nous pouvons conclure qu'en utilisant des terres disponibles dans l'environnement et qui n'ont pas forcément les propriétés idéales pour la construction, il peut toujours y avoir un traitement adéquat qui permette d'obtenir des résultats assez satisfaisants, à condition de respecter les bonnes règles de mise en œuvre et de tenir compte du coût de revient des produits stabilisants.

## *Références bibliographiques*

- [1] Guettala.A, Abibsi.A and Houari.H (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. Construction and Building materials. p119-27.
- [2] CNERIB (1993). Guide technique du béton de terre stabilisée.
- [3] Earthen architecture in the world. PDF [www.earth-auroville.com](http://www.earth-auroville.com).
- [4] Agguerabi.B (2009). Architecture : De la terre à la terre - L'avenir salubre. Article paru au supplément Immobilier du journal El Watan d'Alger du 15 Fév. p4.
- [5] Makri.M, Guedira M(2007) projet construire en terre. p4-11.
- [6] Maïni.S (2005). Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology, UNESCO CHAIR - Auroville Building Centre-INDIA, p7.
- [7] CHAIBEDRA.S(2012).durabilité du béton de terre stabilisée. Mémoire de magister.
- [8] P'kla.A (2002). Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée BTC : application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre ». Thèse de doctorat, France INSA de Lyon.
- [9] Morris.J and Booyesen.Q (2000). Earth construction in Africa, Strategies for a Sustainable Built Environment, Pretoria, 23-25 August 2000 p1-6.
- [10] Makri M, Masson.C, Verdan.M, Guedira.M et Boissard.J-B (2008). Projet GE12 Construire en terre, Université de Technologie Compiègne, p13.
- [11] Wikipédia, l'encyclopédie libre.
- [12] Plumelle.C (2002), Chapitre2 : Identification et classification des sols, CNAM Paris-géotechnique, p4.
- [13] Noui.A (2009). Amélioration de la durabilité de la brique de terre séchée. Thèse de Magistère, Université MB M'sila.
- [14] Guérin.L (1985). Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue, publication du Bureau international du Travail BIT, Genève.
- [15] B.T.S. Bâtiment (2010). Identification, Classification et Compactage des sols.  
[www.scribd.com/doc/44799159/Prsentation1](http://www.scribd.com/doc/44799159/Prsentation1)

- [16] Adam.E.A in collaboration with Professor A.R.A.Agib (2001). Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO.
- [17] Note sur la stabilisation des argiles en vue de la fabrication des parpaings de terre, Tananarive, Madagascar 1964.
- [18] Fetra Venny Riza, Ismail AR, Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi (2010). A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). 2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010), December 5 - 7, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [19] Nasly M.A, Yassin A.A.M, Zahrizan.Z, Khairunisa.A (2009). Compressed stabilized earth as load bearing interlocking block. RCER'19, Conservation and Sustainability, pp 274-82.
- [20] CNERIB (1993). Recommandations pour la production et la mise en oeuvre des bétons de terre stabilisée. CNERIB - CRATerre.
- [21] Meukam.P (2004). Valorisation des briques de terre stabilisée en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse de doctorat en co-tutelle entre l'Université de Cergy Pontoise et l'Université de Yaoundé I.
- [22] Doat.P, d'Ornao.S, Douline.A, Garnier.Ph, Guillaud.H, Joffroy.Th, Rigassi (0998) Guide de Blocs de terre comprimée normes. CDI – CRATerre.
- [23] Bahar.R, Benazzoug.M, Kenai.S.(2004). Performance of compacted cement-stabilised soil, Cement & Concrete Composites 26, pp 81–82.
- [24]MEZHOUD Lattamene, MEBARKI Ahcène.(1993). Formulation et caractérisation d'un béton de terre stabilisée.
- [25] Babouri.R (2008). Stabilisation des sols argileux par la chaux. Cas du kaolin du gisement de djebel Debagh-Guelma. Thèse de Magistère. Université MB M'sila.
- [26] Kerali A-G (2001). Durability of compressed And cement-stabilised building blocks. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering. University of Warwick, School of Engineering.