

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



**Mémoire de Master**

**Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de : Génie Civil & Hydraulique**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : GEOTECHNIQUE**

---

**Thème : Etude expérimentale de la fissuration par dessiccation dans une argile traitée par des fibres végétales**

---

**Sous la direction du : Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah**

**Présenté par : Friekh Ibrahim**

**Malek Anis**

**2023/2024**

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# *Remerciement*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master.*

*Tout d'abord, nous voudrions remercier sincèrement notre directeur de mémoire, Pr .**NOUAOURIA Mohamed Salah**, pour son soutien constant, ses conseils éclairés et son expertise précieuse tout au long de ce processus. Sa patience, sa disponibilité et son engagement ont été inestimables.*

*Nous souhaitons également adresser nos remerciements à **Monsieur NOUAOURIA Abdessalam** pour ses précieuses contributions, ses discussions stimulantes et son encouragement constant. Ses idées et ses commentaires ont grandement enrichi ce travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers les responsables de l'université du 8 mai 1945 Guelma, précisément le chef de département **Génie Civil &Hydraulique, Dr. Himeur Mohamed**, et le directeur de Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique, **Pr. Nouaouria Mohamed Salah**, pour avoir offert un environnement propice à l'apprentissage et à la recherche.*

*Ce mémoire représente le fruit d'un travail acharné et de nombreuses heures de réflexion, mais il n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de ces personnes exceptionnelles. Merci infiniment à tous ceux qui ont contribué à cette réalisation.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à ceux qui ont été ma source inépuisable de soutien et  
d'inspiration tout au long de ce parcours :*

*À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur foi  
en moi. Votre soutien a été ma force motrice.*

*À ma femme, pour sa patience, sa compréhension et son encouragement  
constant. Tu as été mon pilier dans les moments de doute.*

*À mon fils, Med Zayn, pour la joie et la motivation que tu m'apportes  
chaque jour. Que ce travail soit un témoignage de l'importance de la  
persévérance et de l'éducation.*

*Merci à vous tous, de tout cœur*

*F. Ibrahim*

# *Dédicace*

*À mes parents,*

*Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible, et leur confiance en mes capacités. Merci pour tous les sacrifices que vous avez faits pour me permettre de réaliser mes rêves. Sans vous, ce chemin n'aurait pas été possible.*

*À mes sœurs,*

*Pour leur affection, leur encouragement et leur inspiration. Vous êtes des piliers de ma vie, et votre présence m'a toujours motivé à donner le meilleur de moi-même. Merci d'être là, à chaque étape de mon parcours.*

*Avec toute mon affection et ma gratitude.*

*A Ma Tante et au cher membre de ma famille*

*Merci pour vos conseils avisés et votre soutien constant. Votre générosité et votre bienveillance ont été des phares guidant mon chemin*

*M. Anis*

**Résumé :** Etude expérimentale de la fissuration par dessiccation dans une argile traitée par des fibres végétales

La terre crue présente une alternative comme matériau de construction non énergivore pour faire face aux enjeux climatiques et environnementaux. L'objectif principal de ce travail est de contribuer au développement d'un matériau de construction conforme aux exigences réelles des utilisateurs concernant les impacts environnementaux et sanitaires ainsi que le confort thermique ou hygroscopique. Un programme expérimental sera entrepris pour étudier l'effet des fibres végétales (fibres de Diss) sur le comportement mécanique d'un sol cohésif. L'effet des fibres végétales sera étudié sur la résistance à la compression non confinée et la fissuration des sols cohésifs.

**Keywords :** Fibres végétales, Diss, sols cohésifs, compression non confinée, fissuration.

**Abstract:** Experimental study of desiccation cracking in clay treated with plant fibers.

Raw earth presents an alternative as a non-energy-intensive construction material to address climatic and environmental challenges. The main objective of this work is to contribute to the development of a construction material that meets real user requirements regarding environmental and health impacts as well as thermal or hygroscopic comfort. An experimental program will be undertaken to study the effect of plant fibers (Diss fibers) on the mechanical behavior of a cohesive soil. The effect of plant fibers will be studied on the unconfined compressive strength and cracking of cohesive soils.

**Keywords:** Plant fibers, Diss, cohesive soils, unconfined compression, cracking.

## **ملخص :** دراسة تجريبية للتشقق الجفافي في الطين المعالج بالألياف النباتية

تقدم الأرض الخام بديلاً كمواد بناء غير كثيفة الاستهلاك للطاقة لمواجهة التحديات المناخية والبيئية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المساهمة في تطوير مادة بناء تلبي متطلبات المستخدم الحقيقية فيما يتعلق بالتأثيرات البيئية والصحية بالإضافة إلى الراحة الحرارية أو الاسترطابية. سيتم تنفيذ برنامج تجريبي لدراسة تأثير الألياف النباتية (Diss Fibers) على السلوك الميكانيكي للتربة المتماسكة. سيتم دراسة تأثير الألياف النباتية على مقاومة الضغط غير المحصور وتشقق التربة المتماسكة

**الكلمات المفتاحية:** الألياف النباتية، الديس، التربة المتماسكة، الضغط غير المحصور، التشقق.



# Sommaire

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS ARGILEUX .....	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition des sols fins.....	5
I.2.1. Quelques caractéristiques des sols fins.....	5
I.2.2. Différents types des sols fins.....	5
• <b>Les argiles</b> .....	6
• <b>Les limons</b> .....	6
• <b>Les marnes</b> .....	6
• <b>Les vases</b> .....	6
• <b>Les tourbes</b> .....	7
I.2.3. Problèmes liés aux sols fins .....	7
I.3. Généralités sur les argiles.....	8
I.3.1. Définition des argiles.....	8
I.3.2. Formation des argiles .....	10
I.3.3. Composition des sols argileux .....	11
I.3.4. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux .....	12
I.3.5. Structure moléculaire des argiles.....	14
I.4. Classification des argiles.....	14
a. <b>Les minéraux à 7 Å°</b> .....	15
b. Les minéraux à 10 Å° .....	15
<b>C. Le type de minéraux à 14 Å°</b> .....	15
d. Minéraux inters stratifiés .....	16
I.5. Types d'argile.....	17
I.5.1. Kaolinite.....	17
I.5.2. Montmorillonite .....	17
I.5.3. Illite.....	18
I.5.4. Bentonite .....	19
I.5.5. Smectites .....	19
I.5.6. Chlorite .....	20
I.5.7. Vermiculite .....	21
I.6. Propriétés des argiles .....	21

I.7. Les problèmes des sols argileux .....	22
I.7.1. Phénomène de tassement .....	22
I.7.2. Phénomène gonflement-retrait .....	22
I.7.3. Phénomène de glissement .....	22
I.7. Conclusion .....	23
CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE.....	24
II.1. Introduction.....	25
II.2. Les constructions en terre crue dans le monde .....	26
II.3. Les Différentes Techniques de Construction.....	28
II.4. Briques de terre crue.....	29
II.4.1. Composition de la brique terre crue .....	29
II.4.2. Fabrication de la brique terre crue .....	30
II.4.3. Les types de constructions en terre crue .....	31
II.4.3.1. L'adobe .....	31
II.4.3.2. Le pisé (Terre Comprimée).....	32
II.4.3.3. La bauge (terre-paille).....	32
II.4.3.4. Le torchis .....	33
II.4.3.5. Terre Coulée .....	33
II.4.3.6. La brique de terre crue compressée (BTC).....	34
a. Production des blocs de terre comprimée .....	34
b. Techniques de constructions.....	35
c. Avantage .....	35
<b>d. Inconvénients</b> .....	35
II.4.3.7. Les sacs de terre .....	35
II.4.3.8. Terre Excavée .....	36
II.4.3.9. Mottes De Terre .....	36
II.4.3.10. Terre Façonnée.....	37
II.4.3.11. Blocs Découpés.....	37
II.4.4. Les Caractéristiques des briques en terre crue : .....	38
II.5. La construction en terre en Algérie.....	38
II.6. Impact environnemental, avantage et inconvénient de la construction en terre crue .....	39
II.7. Normes et Critères de choix des matériaux .....	40
II.7.1 Introduction.....	40
II.7.2. Utilisation des normes.....	41
II.8. La stabilisation des briques .....	43
II.8.1. Définition de la stabilisation.....	43

II.8.2. Procédés de stabilisation.....	43
A. Stabilisation mécanique .....	44
B. Stabilisation chimique .....	45
<b>c. Stabilisation physique.....</b>	<b>46</b>
II.8. Conclusion .....	46
CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES .....	47
III.1. Introduction.....	48
III.2. Généralités .....	48
III.2.1. Avantages techniques utilisées pour traiter les sols .....	48
III.2.1.1. Avantages techniques .....	48
III.2.1.2. Avantages économiques .....	49
III.2.1.3. Avantages écologiques et environnementaux .....	49
<b>III.2.2. Les outils qui permettent de caractériser les sols.....</b>	<b>49</b>
III.2.2.1. L'argilosité $I_p$ et VBS.....	49
III.2.2.2. La granularité $D_{max}$ et $C_u$ .....	50
III.2.2.3. Teneur en composants chimiques .....	51
III.2.2.4. Etat hydrique .....	51
III.2.2.5. L'essai Proctor .....	52
<b>III.2.3. Caractéristiques des sols .....</b>	<b>53</b>
III.3. Une clarification conceptuelle.....	53
III.3.1 Liant.....	53
III.3.2. Caractéristiques des liants.....	54
III.3.2.1. Prise du liant.....	54
III-3-2 2. Essais des liants :.....	54
III.4 Les chaux .....	55
<b>III.4.1. Les chaux aériennes.....</b>	<b>56</b>
III.4.1.1. La chaux grasse.....	56
III.4.1.2. La chaux maigre.....	56
III.4.1.3. Les chaux hydrauliques .....	57
III.4.2. Modifications des caractéristiques par le traitement.....	59
III.4.2.1. La chaux.....	59
III.4.2.2. Ses actions immédiates .....	59
III.4.2.3. Ses actions à long terme.....	59
III.4.2.4. Les liants hydrauliques .....	60
III.5. Les ciments .....	62
III.5.1. Historique .....	62

III.5.2. Définition .....	62
III.5.2. L'hydratation du ciment .....	65
III.5.3. Eau de gâchage .....	66
III.5.4. L'adjuvant .....	66
III.5.5. Classification des ciments : .....	67
III.5.6. Classes de résistance des ciments .....	67
III.6. Les fibres .....	68
III.6.1.1. Définition de fibre .....	68
III.6.1.2. Différents types de fibres .....	68
III.6.1.2.1. Fibre non organique .....	68
III.6.1.2.2. Fibre organique .....	69
III.6.1.2.2.1. Fibre animales .....	69
III.6.1.2.2.1.1. Propriétés générales des fibres .....	70
III.6.1.2.2.2 Les fibres végétales .....	70
III.6.1.2.2.2.1. Les fibres de feuilles .....	71
III.6.1.2.2.2.2. Les fibres de tiges .....	72
III.6.1.2.2.2.3. Les fibres de bois .....	72
III.6.1.2.2.2.4. Les fibres de surface .....	72
III.6.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales .....	72
III.6.4 Caractéristiques chimiques des fibres végétales .....	73
III.6.4.1. Cellulose .....	73
III.6.4.2. Hémicellulose .....	73
III.6.4.3. Lignine .....	73
III.6.5. Rôle des fibres .....	73
III.6.5.1. Processus de couture des fissures .....	74
III.6.6. Le Fibre de diss .....	75
III.6.6.1. Traitement des fibres de diss .....	77
III.6.6.2. Microstructure et caractéristiques des fibres de diss .....	77
III.7. Conclusion .....	80
CHAPITRE IV : ESSAIS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE DES RESULTATS .....	81
IV.1. Introduction .....	82
IV.2. Situation géographique et caractéristiques du sol utilisé .....	82
IV.3. Matériaux .....	82
IV.3.1 Procédure de traitement de fibre .....	82
IV.3.2. L'alcool polyvinylique (PVA) .....	83
IV.3.3. Acétate de Polyvinyle (PVA) .....	84

IV.3.4. Préparation de la solution de PVA .....	85
IV.3.5. Le ciment.....	86
IV.3.6. Effet de l'Ajout de PVA et de Ciment sur les Propriétés Mécaniques des Sols.....	86
IV.4. Essais d'identification.....	86
IV.4.1. Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057 .....	86
IV.4.2. Essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068 .....	90
IV.4.3. Limites d'Atterberg (NORME NF P 94-051).....	92
IV.5. Classification du sol étudié.....	96
IV.5.1. Selon GTR selon NF P11-300 .....	96
IV.5.2. Selon AASHTO .....	97
IV.5.3. Essai Proctor normal selon la norme NF 94-093.....	98
IV.5.4 Essai de Proctor modifié .....	99
IV.6. Positionnement du sol naturel (SN) par rapport aux recommandations pour les BTC .....	100
IV.6.1. Vis-à-vis de la granulométrie .....	100
IV.6.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg .....	101
IV.6.3. Vis-à-vis du compactage.....	102
IV.7. Essai de compression simple (ISO 17892-7:2017) .....	103
IV.7.1. Mode opératoire et procédure d'essai .....	104
IV.7.2. Résultats des essais de compression .....	105
IV.7.3. Prévision pour la résistance à la compression simple.....	107
IV.8. Conclusion .....	109
Conclusion générale et perspectives.....	110
Références Bibliographiques.....	113

# Liste des Figures

## Chapitre I

Figure I. 1 : Différentes couleurs d'argiles. ....	9
Figure I. 2 : Sol argileux. ....	9
Figure I. 3 : Processus de formation de l'argile.....	10
Figure I. 4 : Propriété physico-chimique d'un sol argile.[ 5] .....	11
Figure I. 5 : Représentation a d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique Et b d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.....	13
Figure I. 6 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates.....	13
Figure I. 7 : Représentation polyédrale d'un feuillet trioctaédrique (a) et dioctaédrique. ....	14
Figure I. 8 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 1:1 .....	15
Figure I. 9 : Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1. ....	15
Figure I. 10 : Structure des minéraux inters stratifiés [Bouziane.R & Nessaib.S (2023)]. ....	17
Figure I. 11 : Structure de la kaolinite. ....	17
Figure I. 12 : Structure de la Montmorillonite.....	18
Figure I. 13 : Structure de l'illite. ....	19
Figure I. 14 : Feuillet de la Smectites. ....	20
Figure I. 15 : Feuillet de la Chlorite. ....	21

## Chapitre II

Figure II. 1 a) Arche de Ctésiphon en Irak;b) Ville de Shibam au Yémen; c)Palais du Potala;d) Cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou	25
Figure II. 2 Architecture en terre crue dans le monde.	26
Figure II. 3 "Roue" des techniques de construction en terre [11]	29
Figure II. 4 Fabrication de la brique terre crue.	30
Figure II.5 Brique adobe.	31
Figure II. 6 Les Étapes De Construire Un Mur En Pisé	32
Figure II. 7 Construction en bauge : (a) Maison à Sa'dah Yémen, (b) Bourrine de Vendée ; (c) Mosquée de Bobo Dioulasso [13]	33
Figure II. 8 Exemple de Mur En Terre Coulée.[14]	34
Figure II. 9 Une presse manuelle et Hydraulique.	34
Figure II. 10 Habitat Troglodytique Habitation De Matmata, Tunisie.[16]	36
Figure II. 11 Maisons Islandaises Médiévales, En Bois, Incrustées Dans Des Mottes De Terre. [16]	36
Figure II. 12 Construction En Terre Façonnée. [18]	37
Figure II. 13 BLT et Construction en BLT, Burkina Faso.[18]	38

## Chapitre III

Figure III. 1 Figure synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme NF P 11-300	53
Figure III. 2 Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol	60
Figure III. 3 Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive	61

Figure III. 4 Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2% de chaux vive	61
Figure III. 5 Fabrications du ciment	63
Figure III. 6 Du calcaire argileux au ciment	65
Figure III. 7 Les différents types des fibres	68
Figure III. 8 Exemples des fibres d'acier, de carbone et de polypropylène.	70
Figure III. 9 Exemples des fibres végétales	71
Figure III. 10 Présentation de l'apport du renfort par des fibres [19].	74
Figure III. 11 Processus de couture	75
Figure III. 12 Fibre de diss après concassage et découpage.	76
Figure III. 13 : Surface de la fibre de diss [33]	77
Figure III. 14 Présente le comportement de la fibre en traction directe.	78
Figure III. 15 Morphologie de fibre de diss	79
Figure III. 16 Méthode d'extraction manuelle des fibres de Diss	79

## *Chapitre IV*

Figure IV. 1 Gisement de Kaolin de Bendjerrah	82
Figure IV. 2 Les fibres avec NAOH	83
Figure IV. 3 Hydroxyde de sodium(NAOH)	83
Figure IV. 4 L'alcool polyvinylique (PVA)	84
Figure IV. 5 La fiche technique de PVA	84
Figure IV. 6 Méthode de préparation de PVA	85
Figure IV. 7 Solution de PVA avec différent dosage	85
Figure IV. 8 Le ciment	86
Figure IV. 9 Lavage du sol étudié	87
Figure IV. 10 Tamisage du sol étudié	87
Figure IV. 11 Les particules fines dans un l'étuve	88
Figure IV. 12 Les particules fines sèches	88
Figure IV. 13 Essai de sédimentation	88
Figure IV. 14 Courbe granulométrique du sol étudié	90
Figure IV. 15 Equipement pour l'essai VBS	90
Figure IV. 16 : Résultats de VBS	91
Figure IV. 17 La classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène	91
Figure IV. 18 Diagramme variation de la consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau.	92
Figure IV. 19 Sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après être tombé 25 fois.	93
Figure IV. 20 Détermination de la limite de liquidité	93
Figure IV. 21 Détermination de la limite de plasticité	94
Figure IV. 22 Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité	95
Figure IV. 23 Seuils d'Argilosité	95
Figure IV. 24 Abaque de Casagrande	95
Figure IV. 25 Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor normal.	98
Figure IV. 26 Vue générale de l'équipement de l'essai proctormodifié.	99
Figure IV. 27 Courbes de l'essai Proctor normal et modifié	100
Figure IV. 28 Distribution granulométrique du sol naturel et le fuseau recommandé pour le BTC	101
Figure IV. 29 : Limites d'Atterberg du sol naturel et le fuseau recommandé pour BTC	102
Figure IV. 30 Essais de compactage (PN et PM) du sol naturel (SN) et la zone recommandée pour les BTC.	103

<b>Figure IV. 31 L'équipement de l'essai de compression</b>	<b>103</b>
<b>Figure IV. 32 Machine de compactage uniframe</b>	<b>105</b>
<b>Figure IV. 33 Les éprouvettes de compression</b>	<b>105</b>
<b>Figure IV. 34 Fuzzification de l'éprouvette</b>	<b>105</b>
<b>Figure IV. 35 Courbes des interactions de la résistance moyenne à la compression en fonction de temps pour différents dosages.</b>	<b>106</b>



## *Liste des Tableaux*

### *Chapitre I*

Tableau I. 1 Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces.[2].....	18
Tableau I. 2 Synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles. ....	19
Tableau I. 3 Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques. ....	21

### *Chapitre II*

Tableau II. 1 Repères chronologiques de la construction en terre .....	27
Tableau II. 2 Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970.....	28
Tableau II. 3 Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) .....	38
Tableau II. 4 Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019).....	42

### *Chapitre III*

Tableau III. 1 La classification des ciments en fonction de leur composition : .....	64
Tableau III. 2 Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres .....	70
Tableau III. 3 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales .....	72
Tableau III. 4 Résume la composition chimique des fibres végétales reproduit selon [23]. .....	73
Tableau III. 5 Caractéristiques des fibres de diss [34].....	78

### *Chapitre IV*

Tableau IV. 1 Données des essais d'analyse granulométrique et la sédimentométrie .....	89
Tableau IV. 2 Tableau récapitulatif de l'essai VBS .....	91
Tableau IV. 3 Résultats de la limite de liquidité.....	93
Tableau IV. 4 Résultats de la limite de plasticité .....	94
Tableau IV. 5 Limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (MONACO A. ET CHASSEFIERE B.1976).....	96
Tableau IV. 6 Classification des sols fins selon GTR.....	96
Tableau IV. 7 Tableau de classification AASHTO.....	97
Tableau IV. 8 Résultats de l'essai Proctor Normal .....	98
Tableau IV. 9 Résultats de l'essai Proctor modifié. ....	99
Tableau IV. 10 : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai.....	100
Tableau IV. 11 : Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC ([Moëvus et al. 2012], [Jiménez et al. 2007], [Houben and Guillaud, 1994]) .....	102
Tableau IV. 12 Résultats finaux de la résistance à la compression simple .....	105

# *Introduction Générale*

# INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction générale

La croissance démographique dans les zones urbaines s'accompagne d'une forte demande de logements. En Algérie, le secteur du bâtiment a connu des problèmes de logements, afin de fournir le nombre requis pour couvrir les besoins nécessaires. Ce besoin de la construction rapide est lié à la consommation des matériaux courants comme l'acier et le béton. La capacité de durcissement en un temps record, les résistances mécaniques élevées, la flexibilité d'un point de vue architectural ainsi que son excellente durabilité ont fait du béton un matériau de référence de la construction. Glavind et al, 2009 ont estimé qu'avec près de 10 milliards de tonnes chaque année, le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde. Cette importante consommation de béton s'accompagne d'une forte demande en ciment qui en est le constituant essentiel. Pacheco-Torgal et al, 2011 ont estimé la consommation mondiale en ciment à peu près de 6 milliards de tonnes dont environ 50% reviennent aux pays en voie de développement et notent une baisse de la demande dans les pays développés par apport aux pays en voie de développement. Ceci traduit le fait que, dans les prochaines décennies, les pays en voie de développement feront face à un défi croissant en matière de construction notamment de logements à cause de leur croissance démographique et les auteurs ont envisagé le béton comme le principal matériau qu'utiliseront ces pays pour répondre à ce défi.

Or, la prise de conscience des conséquences de l'activité humaine sur le réchauffement climatique conduit à remettre en question le modèle de croissance de l'ensemble de l'industrie, y compris la construction. En fait, Taylor et al, 2006 ont rapporté que la part de la production du ciment dans les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> a été estimée à 9-10 %, ce qui représenterait 74-81 % des émissions de CO<sub>2</sub> du béton (Pacheco-Torgal et al., 2011). A cela s'ajoute désormais une consommation importante de certains composants de base du béton, en l'occurrence le sable dit constructible. Tout cela conduit aux limites du modèle de construction popularisé jusqu'à présent : tout construire en béton de ciment.

En raison de ce contexte, l'accent a été renouvelé sur le développement de matériaux de construction alternatifs qui respectent l'environnement et surtout s'adaptent aux typologies de construction et sont disponibles localement.

La terre crue s'impose alors comme un candidat sérieux. Un coup d'œil sur le patrimoine construit en terre vierge montre qu'il a une histoire et une culture riches qui peuvent inspirer l'architecture moderne.

# INTRODUCTION GENERALE

---

En dépit de tous ses avantages, le matériau en terre crue doit surpasser l'obstacle d'une réglementation limitée, de résistances mécaniques et d'une tenue à l'eau faibles vis-à-vis des matériaux cimentaires pour passer le cap de l'industrialisation (Morton et al., 2008). Sur le plan des résistances mécaniques, bien qu'elles soient de loin inférieures au béton, la stabilisation n'est pas absolument nécessaire pour que les choix architecturaux s'adaptent aux limites du matériau. Certaines pratiques traditionnelles, notamment dans les pays en voie de développement, et quelques récentes études scientifiques ont montré que l'utilisation de liants organiques d'origine naturelle pouvait être une alternative plus prometteuse du point de vue environnemental aux liants minéraux. Ces produits organiques présentent une très grande diversité et donc un potentiel important d'étude scientifique à l'image de la variété de pratiques selon l'endroit du globe.

L'objectif de notre travail est de proposer une méthode de stabilisation de la terre crue à faible impact environnemental et économique utilisant un matériau de terre locale (le gisement d'argile de BenDjerrah et une fibre végétale (Fibre de Diss), en association avec l'alcool Polyvinylique (PVA). Ce travail est mené dans le cadre du projet de fin d'étude de Master au sein du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

## **Le mémoire est scindé en quatre chapitres :**

Dans le chapitre 1, des généralités sur les sols argileux sont présentées en détails.

Le chapitre 2 est dédié à la présentation de l'état de l'art sur la construction en terre crue sur toute la technique de la brique en terre compressée BTC.

Le chapitre 3 expose des généralités sur les différents liants utilisés dans la stabilisation des sols, avec les liants classiques le ciment et la chaux, les fibres artificiels et organiques, des liants bio-sources.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais d'identification du sol utilisé (argile de Bendjerrah) et la vérification vis-à-vis des normes de BTC recommandées. Enfin, nous nous intéresserons aux résultats des essais Proctor sur les terres stabilisées que nous utiliserons pour formuler les éprouvettes en BTC stabilisées pour étudier les paramètres mécaniques de ce matériau.

Enfin, ce manuscrit se terminera par une conclusion générale de nos travaux et une présentation de nombreuses perspectives possibles.

***CHAPITRE I :***  
***GENERALITES SUR LES***  
***SOLS ARGILEUX***

### I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons un genre de sol fin connu sous le nom de sol argileux, ainsi que ses diverses catégories. Les sols sont des matériaux variés qui possèdent des caractéristiques très différentes. Grâce aux avancées de la mécanique des sols et à la recherche en techniques géotechniques, il a été possible d'approfondir notre compréhension des sols grâce à des essais de caractérisation, ce qui a permis de développer des méthodes pour améliorer les sols à faibles caractéristiques mécaniques.

### I.2. Définition des sols fins

Les sols fins sont constitués de deux groupes d'éléments fins, l'argile et le limon. Les particules de 75 $\mu$ m à 2 $\mu$ m de diamètre sont désignées sous le nom de limon et les particules ayant un diamètre inférieur à 2 $\mu$ m sont désignées sous le nom d'argile. [1]

#### I.2.1. Quelques caractéristiques des sols fins

- On distingue les sols fins en fonction de leur plasticité.
- On ne voit pas les particules individuelles à l'œil nu.
- Les sols fins sont caractérisés par leur résistance à la sécheresse, leur dilatation, leur dispersion et leur plasticité.
- Les sols fins ont une capacité portante limitée. En raison de la petite taille de leurs particules, les sols fins sont presque imperméables par nature.
- Des facteurs minéralogiques régulent les caractéristiques techniques.
- La résistance varie en fonction de la variation de l'humidité. Le sol mince peut être exposé au gel.
- La variation de volume se produit lorsque la teneur en eau change. [2]

#### I.2.2. Différents types des sols fins

Il est évident que les sols à grains fins sont tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu. Le diamètre de ces particules équivalentes peut fluctuer entre environ 1nm (10<sup>-6</sup>) et 0,08mm. En général, on distingue les sols à grain fin en fonction de leur plasticité.

- **Les argiles**

Le terme argile est généralement utilisé pour désigner toutes les particules de taille inférieure à  $2\mu\text{m}$ . En ce qui concerne la taille des grains, le terme argile a deux sens. Il fait référence tout d'abord aux particules composées de minéraux argileux dont les cristaux peuvent parfois dépasser  $2\mu\text{m}$ . Les minéraux argileux sont principalement issus de l'oxydation chimique de certains minéraux présents dans la roche.

- **Les limons**

Les limons ont un squelette siliceux à silicocalcaire à grains minces. Ils ont une taille comprise entre celle des sables et celle des argiles (la quantité d'argile varie). Ils se composent d'éléments ayant des dimensions allant de 2 à  $20\mu\text{m}$ . Le quartz est le minéral principal qui est généralement associé à l'argile, à la calcite, aux feldspaths, aux oxydes des hydroxydes de fer, au mica ou aux minéraux lourds. Le limon peut provenir de sources fluviales ou éoliennes ; dans ce dernier cas, on lui attribue souvent le nom de lœss. Il renferme une proportion plus faible de sables et d'argile (celles-ci pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Il est possible que les limons renferment des graviers, des galets et des concrétions. Un sol jaunâtre ou brun se distingue par un tri granulométrique très élevé en raison de son origine éolienne, avec principalement des grains de 10 à  $50\mu\text{m}$ .

- **Les marnes**

Les marnes sont des sédiments solides, stables, qui se forment dans un environnement marin peu profond. Les marnes sont principalement composées d'un mélange de calcaires et d'argile, dont la proportion varie de 30 % à 70 %.

Les marnes, tout comme les argiles, sont tendres, très poreuses, friables lorsqu'elles sont sèches, et plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Cependant, contrairement aux argiles, elles sont sensibles aux acides en raison de la présence de calcaire. Les marnes sont classées dans le groupe des lutites ou pélites en raison de la finesse des particules constitutives (minéraux argileux, carbonates et, parfois, une faible quantité de silice).

- **Les vases**

Les vases sont des formations marécageuses ou qu'on trouve dans les lits des lacs et des rivières. Ils sont très divers en composition et dépendent plus ou moins de leur mode de formation. Ces formations sont principalement constituées de roches broyées, d'argile et de sable, accompagnées de coquillages (en partie brisés) et de

débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Il y a différents types de vases, notamment :

- Vases marines
- Vases de moules et de coquillage d'huitres
- Vases d'étangs, de lacs et de rivières

- **Les tourbes**

La tourbe est le résultat de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, humains, champignons, microfaune) dans des environnements humides et pauvres en oxygène, appelés tourbières, sur une période de 1 000 à 7 000 ans. Les tourbes sont un matériau à texture fibreuse, qui se forme dans le fond des vallées humides et des dépressions. Elles ont la capacité de renfermer des composés détritiques : Le sable, le gravier, le vase. Elles renferment une grande quantité d'eau. Lorsque la tourbe est exposée à des conditions de pression et de température spécifiques liées à son enfouissement, elle devient, au bout d'un million d'années, du charbon. Il y a différents types de tourbe disponibles.

- La tourbe blonde
- La tourbe brune
- La tourbe noire

### **I.2.3. Problèmes liés aux sols fins**

En raison de leur composition et de leurs caractéristiques physiques et mécaniques, les sols fins, comme les argiles et les limons, peuvent causer divers problèmes en ingénierie et en construction. Voici certains des soucis fréquents associés aux sols fins :

1. La plasticité des sols fins est très élevée, ce qui implique qu'ils peuvent facilement se déformer lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. Cela peut conduire à une instabilité et à une diminution de la force sous des charges considérables, comme les constructions et les routes.
2. Les sols fins présentent également une faible densité relative, ce qui les rend ainsi compressibles lorsqu'ils sont soumis à des charges. Il est possible que cela provoque un tassement excessif et des dégâts aux structures édifiées sur ces sols.
3. Les sols fins sont susceptibles de gonfler et de se rétracter en réponse aux fluctuations de l'humidité. Il est possible que ce gonflement et cette rétraction causent des fissures et des dégâts aux fondations des bâtiments et des structures.



4. Il y a une faible perméabilité des sols fins, ce qui implique qu'ils ont une capacité restreinte à drainer l'eau. Il est possible que cela provoque une accumulation d'eau et une saturation du sol, ce qui peut avoir un impact sur la stabilité des structures édifiées sur ces sols.

5. Les sols fins sont fréquemment très sujets à l'érosion en raison de leur composition fine et de leur faible capacité à résister à l'eau. Ceci peut conduire à une diminution de la surface du sol et à une instabilité des pentes, des talus et des remblais.

Il est essentiel de prendre en compte les caractéristiques des sols fins lors de la conception et de la construction des infrastructures en raison de ces difficultés. La qualité des sols peut être améliorée par des techniques de traitement et de renforcement des sols.

### **I.3. Généralités sur les argiles**

L'argile est l'un des premiers matériaux employés par l'homme. Récoltée directement sur le sol dans des carrières, il n'y a pas d'argile. En raison de leur structure particulière et de leurs nombreuses propriétés, les argiles répondent à de nombreuses indications. L'argile est capable de se déformer, de se transformer, d'adhérer, de couler, de glisser, de fixer et possède ainsi de multiples capacités, telles que le transport, la capture et la libération de substances liquides, gazeuses, ainsi que solides, vivantes et mortelles.

#### **I.3.1. Définition des argiles**

En général, lorsque le sol contient plus de 30% de particules argileuses, il est considéré comme argile.

Les particules d'argile ont une taille inférieure à  $2\mu\text{m}$  en matière minérale. Parce qu'elle est presque imperméable, l'argile est fréquemment utilisée comme matériau d'étanchéité dans les noyaux de barrage en terre ou de digues. Cependant, elle est très comprimable et, en général, les charges qu'elle peut supporter sont bien inférieures à celles que supportent les graviers et les sables. 3. À la différence des autres types de sol, les particules d'argile sont attirées les unes vers les autres et se confondent. Cette attraction, connue sous le nom de cohésion, est responsable de la cohérence. Lorsque l'humidité est élevée, la consistance de l'argile est telle que celle-ci devient plastique. [3].



**Figure I. 1** Différentes couleurs d'argiles.

En ce qui concerne la définition granulométrique, il existe de nombreuses échelles granulométriques qui définissent les particules constitutives des roches sédimentaires en fonction de leur taille. Cependant, elles considèrent généralement les argiles comme les particules les plus fines, avec plus de 50 % du poids sec. Composé de particules de plus de 0,075 mm de grosseur. Leur texture peut fluctuer de très légère à très solide.

Différents types d'argiles sont présents, notamment. Figure suivante I.2 :

-Les argiles douces : elles ont une consistance légère.

-Les argiles raides présentent des propriétés mécaniques extrêmement élevées.[4]



**Figure I. 2** Sol argileux.

### I.3.2. Formation des argiles

Les argiles sont issues de la fragmentation de roches silicatées telles que le granite (mica et feldspath), le gneiss et les schistes. On transporte ces particules par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves apportent des éléments. L'argile finit par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts ont la capacité de se sédimenter et de former une roche argileuse.

Les argiles se forment du sol en mouvement constant. Elles se manifestent selon trois principaux processus de formation, qui peuvent être juxtaposés. Le premier concerne la dégradation des roches par érosion. Il existe de nombreux phénomènes qui caractérisent l'érosion des sols. Les précipitations, le vent, le gel, le dégel, Les vagues et d'autres phénomènes naturels sont autant de facteurs qui contribuent à la création des argiles. La seconde étape est connue sous le nom de néoformation. Il s'agit de la formation du minéral. Des substances transportées par l'eau du sol vont se combiner pour créer une structure minérale par combinaison. Le troisième processus implique la modification des minéraux qui se dégradent par dégradation (perte d'équilibre du sol) ou aggradation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau en raison d'un déficit de transport par l'eau) d'ions minéraux argileux.

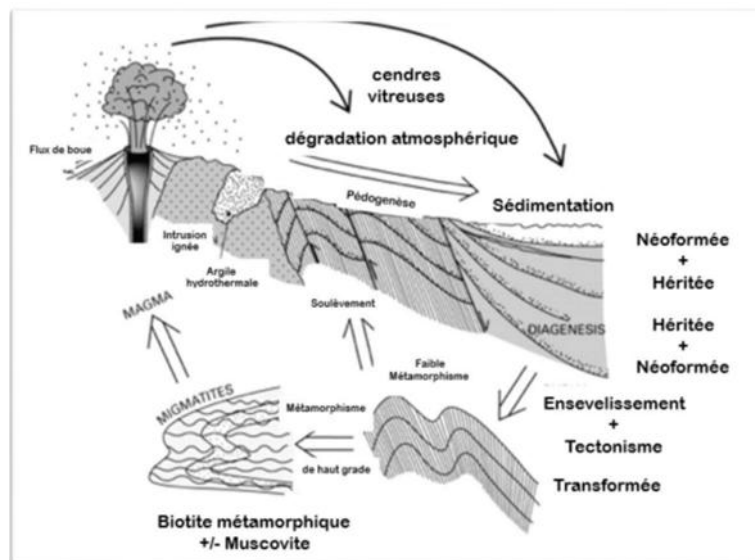


Figure I. 3 Processus de formation de l'argile.

### I.3.3. Composition des sols argileux

Les dimensions des grains des sols que l'on trouve dans la nature sont très différentes. Ces sols, à l'état naturel, sont généralement constitués de sable, d'argile et d'autres minéraux (alumine, sulfures, oxydes et hydroxydes, feldspaths, etc.).

Les carbonates, la matière organique, etc., jouent tous un rôle important dans les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Le plus souvent, l'argile est produite par la transformation chimique des roches qui se dévoilent à la surface de l'écorce terrestre sous l'influence des eaux. Ainsi, l'argile est principalement présente dans les zones superficielles, où elle est liée à des dépôts sédimentaires, issus des roches.

La présence de magmas, de métamorphies ou de sédiments dans le substratum régional. Les origines initiales des argiles sont trois.

- L'héritage consiste en l'apport de minéraux qui ont été formés ailleurs sur le continent et qui ont été transportés par l'eau ou le vent. Pendant le transport, les argiles déjà formées ne connaissent que de légères altérations de forme et de formule. Elles se retrouvent généralement ensuite en mer ou dans les bassins lacustres.
- Les minéraux argileux conservent certains éléments structuraux des matériaux originels lors de leur transformation, mais ils font face à des transformations importantes lors du transport, qui les font passer d'un type minéralogique à un autre en éliminant certains cations ou en fixant des ions.
- Lorsqu'ils sont mis en contact par diffusion ou mélange, les minéraux argileux néogènes sont constitués par la précipitation d'ions en solution ( $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{K}^{+}$ ) qui peuvent réagir entre eux. Les composés obtenus sont stables dans les conditions physicochimiques de l'environnement dans lequel ils ont été créés.

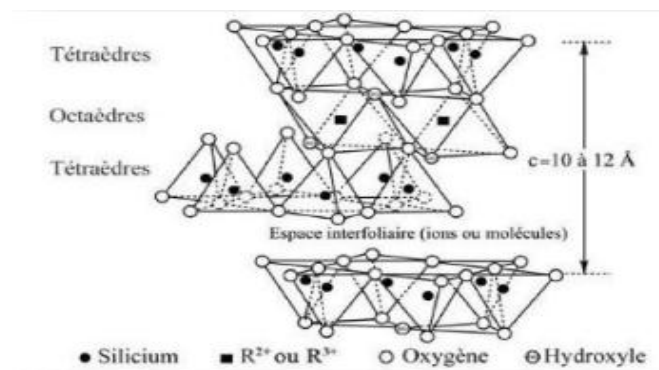


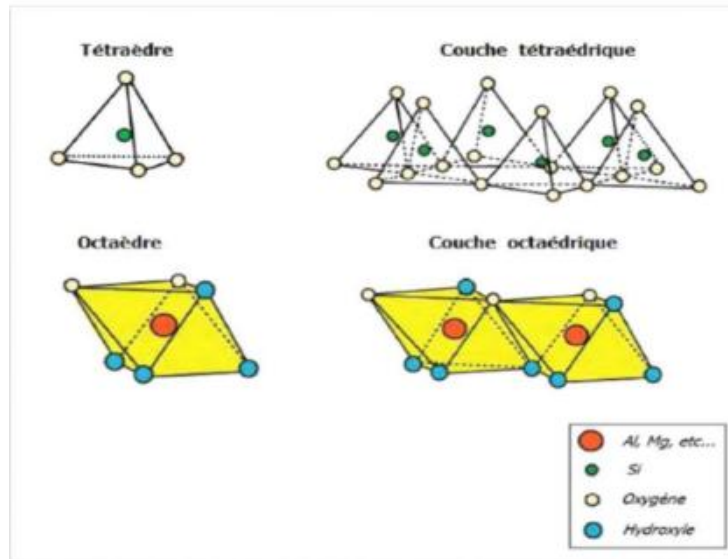
Figure I. 4 Propriété physico-chimique d'un sol argile. [ 5]

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur Composition diffèrent selon les conditions dans lesquelles elles se sont formées. L'altération de diverses Roches, de par les temps géologiques, sont à l'origine des différentes argiles. C'est un ensemble qui Caractérise l'argile, le type de roche dont elle est issue, le climat, la topographie du sol, & Un climat froid Provoquera une altération faible de la roche. Les minéraux argileux auront donc une composition similaire à Celle des minéraux provenant de la roche d'origine. C'est le cas des illites et des chlorites. Un climat à la Fois chaud et humide va entraîner une forte hydrolyse voyant l'obtention des kaolinites et des smectites. Un climat tempéré verra un processus d'altération dit modérer s'opérer sur la roche. Il en résultera la Création d'argiles de types illites, chlorites ou encore vermiculites. La topographie des sols peut également Jouer un rôle dans la composition de l'argile. Une zone pentue prévoit un fort drainage de l'eau, entraînant La formation de kaolinite. Inversement, un milieu confiné, comme retrouvé dans les cuvettes, produira des Smectites par phénomène de concentration. Ces différents processus de formation des argiles sont dits D'altération. Les argiles provenant de la dégradation des roches sont des argiles résiduelles. Les roches vont s'accumuler par érosion éolienne ou hydrique entraînant la formation des argiles. Les argiles fibreuses quant à elles proviennent de crottes de calcaires. Ces zones présentant un climat sec, Sont riches en sels. Elles peuvent se former en solution, par une richesse ionique. Une argile néoformée peut évoluer avec son milieu. La transformation va se réaliser par soustraction ou Fixation d'ions. Une kaolinite peut donc devenir un chlorite et des smectites, des illites [6].

### **I.3.4. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux**

Les phyllosilicates sont des minéraux argileux qui se composent de couches de différents types : une couche tétraédrique et une couche octaédrique.

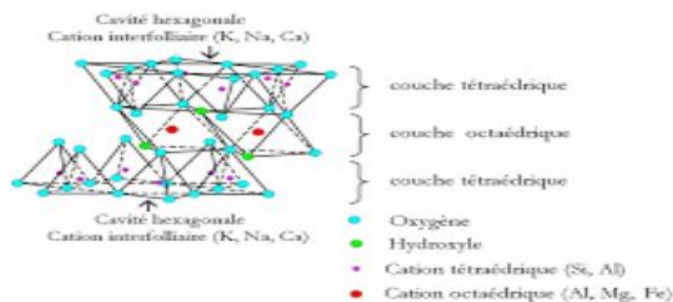
Deux éléments fondamentaux composent le réseau cristallin : le silicium et l'aluminium, entourés d'oxygène et/ou d'hydroxydes.



**Figure I. 5** Représentation a d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique Et b d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.

Le silicium occupe le centre d'un tétraèdre et l'aluminium celui d'un octaèdre. L'accolement de plusieurs Tétraèdres ou de plusieurs octaèdres constitue une couche correspondante (Figure I.5). L'identification des différents groupes de minéraux argileux est fonction de l'arrangement de ces deux couches. L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions  $O^{2-}$  et  $OH^-$ . Des cations de Taille variable ( $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$ ;  $Fe^{3+}$ ;  $Fe^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ ) viennent se loger dans les cavités de ces unités structurales Élémentaires en position tétraédrique ou octaédrique. Le nombre de couches octaédriques et tétraédriques constitué, permet de déterminer l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets successifs s'appelle espace interfoliaire. **Oa** = oxygène apical et **Ob** = oxygène basale **M** = cation octaédrique ( $R^{3+}$  ou  $R^{2+}$ ) et **Z** = cation tétraédrique ( $Si^{4+}$ ...).

- couche tétraédrique.
- couche octaédrique.
- couche tétraédrique.

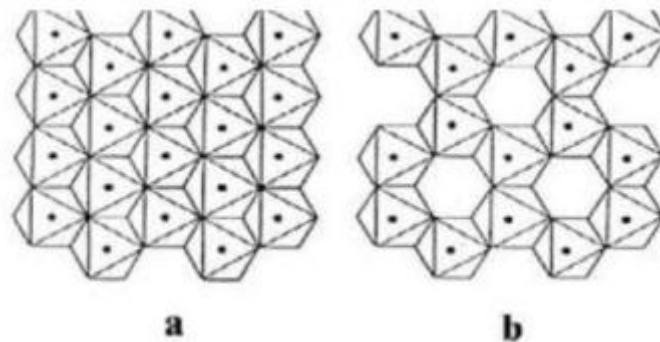


**Figure I.6** Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates.

Une structure di octaédrique est formée lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par AJH (ou un autre ion métallique trivalent).(figure I.7-b).

Quand la totalité des cavités de la cavité octaédrique est occupée par les ions métalliques bivalents, la structure Est dite tri octaédrique (figureI.7-a)

Des substitutions isomorphes peuvent également se produire dans les couches tétraédriques ( $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ ) et/ou octaédriques ( $\text{Al}^{3+}$  par  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$ , ou  $\text{Mg}^{2+}$  par  $\text{u}^{+}$ ). Ces changements provoquent un manque de charge qui est compensé à l'extérieur du feuillet par des cations compensatoires.[6].



**Figure I.7** Représentation polyédrique d'un feuillet trioctaédrique (a) et dioctaédrique.

### I.3.5. Structure moléculaire des argiles

Tous les minéraux argileux se composent d'un amas de feuillets tétraédriques et octaédriques séparés par un espace appelé espace interfoliaire. Le feuillet 1:1 est une structure formée par la fusion d'une couche tétraédrique avec une couche octaédrique, avec une épaisseur d'environ 0,7 nm. Le feuillet 2:1 est formé en liant une couche tétraédrique de part et d'autre d'une couche octaédrique, dont l'épaisseur est d'environ 0,9 nm.

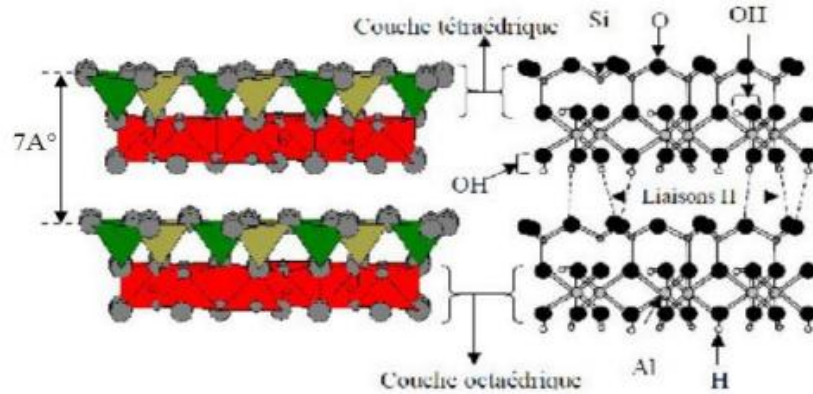
La structure solide du feuillet élémentaire est assurée par les liens de covalence et les liaisons ioniques, tandis que des liaisons moins fortes mais essentielles permettent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former la particule d'argile.

### I.4. Classification des argiles

On a proposé plusieurs classifications d'argiles. Selon Pedro (1994), une classification peut être réalisée en prenant en considération : le type de feuillet 2.1 ou 1.1, leur charge globale et la nature des cations inter foliaires. La plus traditionnelle classification des argiles repose sur l'épaisseur et la structure du feuillet, ce qui permet de distinguer 4 groupes :

**a. Les minéraux à 7 Å°**

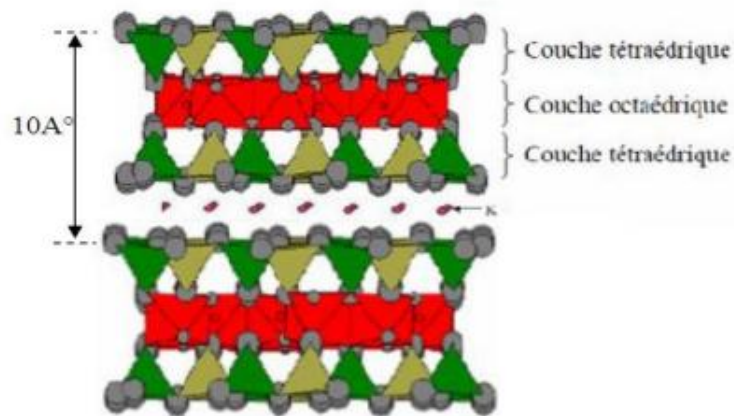
se composent de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique dans le feuillet. On l'appelle T.O ou type 1.1



**Figure I.8** Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 1:1

**b. Les minéraux à 10 Å°**

Sont composés de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique dans le feuillet. On le nomme T.O.T ou type 2.1. Les feuillets sont dépourvus de charges positives.

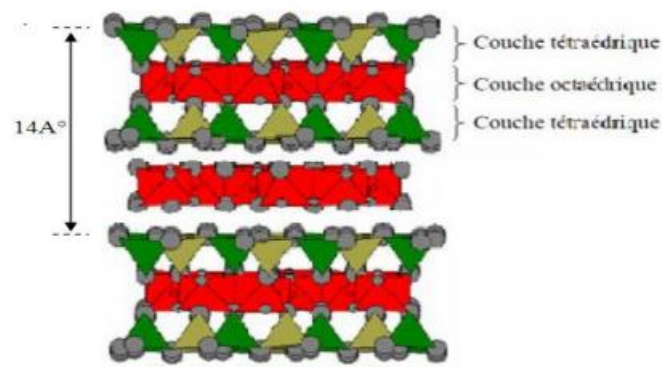


**Figure I. 9** Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1.

**C. Le type de minéraux à 14 Å°**

Se compose de feuillets T.O.T.O alternant avec des couches octaédriques inter foliaires, suivies de deux couches tétraédriques. On le classe de type 2.1.1





**Figure I. 10 :** Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 2:1:1

### d. Minéraux inters stratifiés

Minéraux de différentes roches : Le feuillet a une épaisseur variable. Ces minéraux proviennent de la combinaison régulière ou irrégulière d'argiles des groupes mentionnés précédemment.

Les similitudes à micro échelle entre les différentes argiles permettent la stratification inter-échelle de différents types de feuillets. Parmi les inters stratifiés les plus courants, on peut citer les interactions entre illite et smectites, entre argiles T-O-T, ainsi que les inters stratifiés entre argiles T-O-T et argiles T-O, comme les smectites et la kaolinite. Il existe différents degrés d'ordre dans ces inters stratifiés, allant de la distribution parfaitement régulière à la distribution totalement aléatoire des différents types de feuillets.

Un minéral régulier inter stratifié est constitué d'un empilement régulier de feuillets de minéraux argileux élémentaires de différentes natures, en proportions différentes. Dans cette situation, les diverses catégories de feuillets sont empilées en suivant des séquences répétitives (par exemple : A-B-A-B-A-B).

On qualifie un inter stratifié d'irrégulier si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire si aucune séquence répétitive ne se forme. [7]

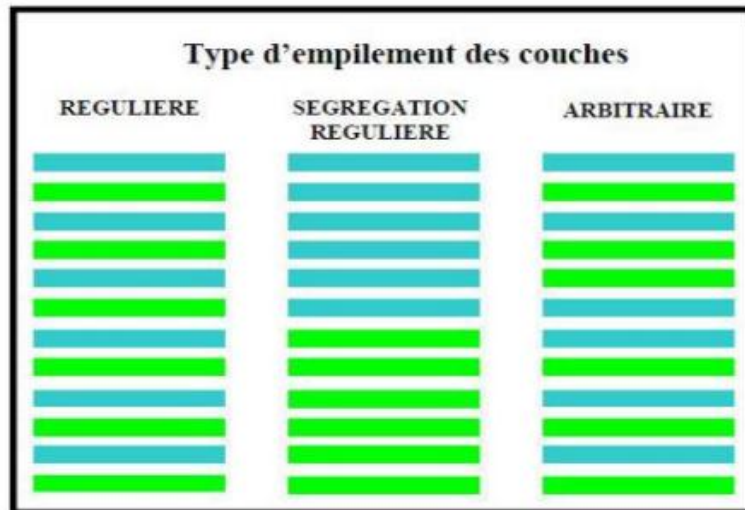


Figure I. 11 Structure des minéraux inters stratifiés [7].

## I.5. Types d'argile

On peut distinguer les types d'argiles suivants:

### I.5.1. Kaolinite

Kaolinite, halloysite, dickite et nacrite sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique à cœur de silicium et une couche octaédrique à cœur d'aluminium. La formule chimique structurale est  $\text{SO}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$ . L'équidistance inter-foliaire est de 7 Å (Konesshloo, 2007). La kaolinite est utilisée pour blanchir le papier et pour la fabrication de la porcelaine.

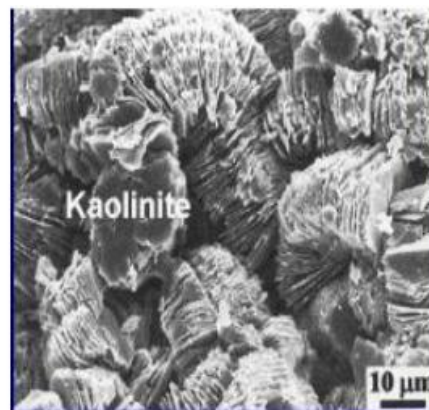
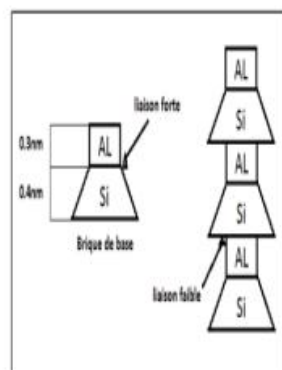


Figure I. 12 Structure de la kaolinite.

### I.5.2. Montmorillonite

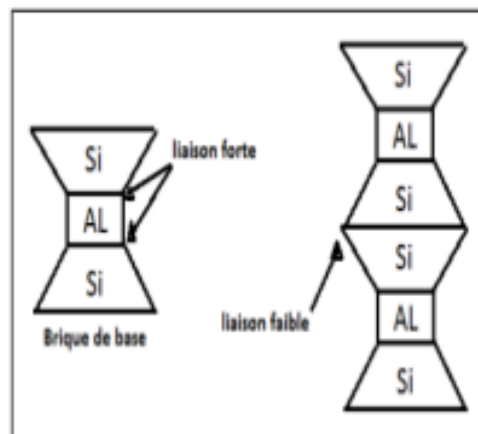
La montmorillonite, également connue sous le nom de smaltite, est un minéral argileux essentiel qui se compose de deux feuillets de silicium et d'un feuillet d'alumine (gibbsit). Entre les deux feuillets de Silice, les feuillets en octaèdres sont situés et les sommets des

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS ARGILEUX

tétraèdres se mêlent aux hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Lorsque la teneur en eau des sols contenant de la montmorillonite augmente, les pressions de gonflement peuvent entraîner la dissociation complète des feuillets, ce qui peut causer des dommages aux structures légères et aux pavages.

**Tableau I. 1** Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces.[2]

Groupe de Minéraux Argileux	Espèce Minérale	Structure T= couche de tétraèdre O= couche d'octaèdre
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites Micas	Illite Vermiculite Muscovite Biotite	H <sub>2</sub> O, cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Sépiolites Palygorskites	Sépiolite (écume de mer) Attapulgitite	Minéraux en lattes T-O-T T-O-T T-O-T



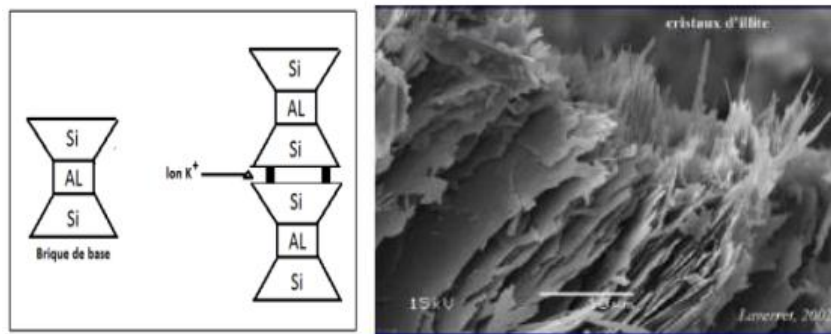
**Figure I. 13** Structure de la Montmorillonite.

### I.5.3. Illite

Les illites (du nom de l'État américain de l'Illinois) sont des minéraux composés de trois couches d'octaèdres constituées d'aluminium, situées entre deux couches tétraédriques constituées de silicium.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS ARGILEUX

Les illites ont la formule chimique structurale  $KAl_2(OH)_2(AlSi_3(O.OH)_{10})$ . La distance entre les feuilles est de 10 Å.



**Figure I. 14** Structure de l'illite.

**Tableau I. 2** Synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles.

Type d'argile	Feuillets Elémentaires	Nombre de feuillets par particule	Dimensions d'une particule	
			largeur en $\mu m$	épaisseur en $\mu m$
<b>Kaolinite</b>		100-150	1	0,1
<b>Illite</b>		10	0,3	0,01
<b>Montmorillonite (Na)</b>		1	0,1	0,001

### I.5.4. Bentonite

La bentonite possède des caractéristiques de surface telles que son caractère, son affinité pour l'eau et sa capacité à adsorber des composés électropositifs. De nombreuses études ont été menées sur les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés clarifiantes des bentonites d'origines différentes. Les principaux gisements de bentonite économiquement importants en Algérie se situent dans l'Oranie (ouest algérien). Les carrières les plus importantes sont celle de Maghnia (Hammam Boughrara) avec un million de tonnes de réserves et celle de Mostaganem (M'zila) avec deux millions de tonnes de réserves.

### I.5.5. Smectites

La structure des smectites (du grec mectos « je nettoie »), ou la famille des montmorillonites (de Montmorillon, dans le département de la Vienne), est similaire à celle

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS ARGILEUX

des illites, avec trois couches. Les smectites ont une formule chimique de  $Si_8Al_4O_{22}(H_2O)_2(H_2O)_n$ .

L'espace entre les feuilles varie de 14 à 17 Å. Les feuillets de ce groupe sont minces et peu liés entre eux, ce qui permet leur association avec l'eau et la matière organique dans l'espace interfoliaire, d'où le terme d'argile gonflant.

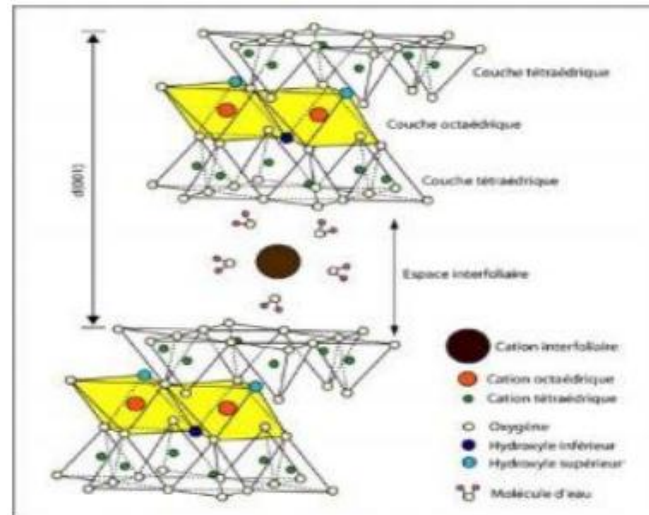
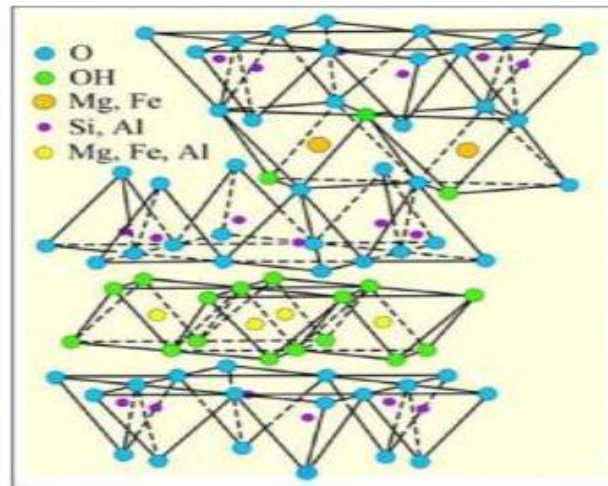


Figure I. 15 Feuillet de la Smectites.

### I.5.6. Chlorite

Les chlorites (du grec chlore signifie « vert-jaune pâle ou jaune clair », c'est-à-dire la couleur du chlore en tant que gaz). Il s'agit des argiles vertes utilisées dans différents domaines médicaux. Des groupements hydratés de magnésium, d'aluminium et de fer rattachent les feuillets les uns aux autres. L'espace entre les feuilles est de 14 Å ;



**Figure I. 16** Feuillet de la Chlorite.

**I.5.7. Vermiculite**

Leur nom provient de leur apparence de petits vers, après avoir été chauffés (vermiculas, « petit vers » en latin). On peut éliminer l'eau présente entre leurs feuillets en chauffant à plus de 300°C. L'espace entre les feuilles diminue ainsi de 14 à 10 Å. Les argiles sont employées dans le bâtiment en tant qu'isolants.

**Tableau I. 3** Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques.

Espèce minérale	Formule chimique	Nombres de couches	Taille de l'espace interfoliaire	Type
Kaolinite	$Si_2Al_2O_5(H_2O)_2$	Minéraux à 2 couches	7 Å	non gonflante
Illite	$KAl_2(OH)_2.(AlSi_3(O.OH)_{10})$	Minéraux à 3 couches	10 Å	non gonflante
Smectite ou montmorillonite	$Si_3Al_4O_{22}(H_2O)_2 (H_2O)_n$	Minéraux à 3 couches	10 et 17,5 Å	gonflante
Bentonite	$(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2(H_2O)_n$	Minéraux à 3 couches		gonflante
Chlorite	$(Fe,Mg,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Minéraux à 3 couches	14 Å	gonflante
Vermiculite	$(Mg,Ca)_{0.7}(Mg,Fe,Al)_3(Al,Si)_5O_{22}(OH)_4.8H_2O$	Minéraux à 2 couches	14 à 10 Å	gonflante

**I.6. Propriétés des argiles**

Différentes caractéristiques physicochimiques distinguent les minéraux argileux, telles que leurs formes et leurs surfaces spécifiques, ainsi que leurs capacités d'adsorption d'eau et

de gonflement. La capacité d'échange de cations. Les caractéristiques de certains sols seront mentionnées :

-Dans le domaine plastique, le **limon** présente une faible cohésion  $C$ , qui est inversement proportionnelle à sa teneur en eau  $w$ . De plus, il présente un faible angle de frottement interne  $\varphi$ .

- **L'argile** est un matériau extrêmement solide, avec une cohésion supérieure à celle du limon, mais par contre, elle présente un frottement interne très faible. Les propriétés mécaniques de l'argile varient considérablement au fil du temps, tout comme pour le limon.

### I.7. Les problèmes des sols argileux

Les sols argileux peuvent évoluer selon les fluctuations de l'eau du sol. Le manque d'eau provoque un tassement irrégulier du sol en surface lors des périodes de sécheresse : on parle de retrait. En revanche, une nouvelle injection d'eau dans ces terrains entraîne un phénomène de dilatation. En outre, le glissement représente l'un des défis des sols fins, car il représente un mouvement généralement lent sur une pente, le long d'une surface de rupture (cisaillement) visible, d'une masse de terrain cohérente, d'un volume et d'une épaisseur variable[4].

#### I.7.1. Phénomène de tassement

Il est question de la réduction du volume de certains sols très compressibles en raison des charges appliquées, ainsi que de l'abaissement du niveau des nappes aquifères en raison de l'exploitation excessive.

#### I.7.2. Phénomène gonflement-retrait

Ce phénomène est associé à la variation de l'humidité de certains sols très argileux tels que les montmorillonites ou les tourbeux, qui peuvent accumuler de l'eau disponible tout en la perdant en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement correspond à une variation de volume du sol qui se produit dans les terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau). Cette variation de volume est due à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation).

#### I.7.3. Phénomène de glissement

Ces mouvements, dans son sens général, sont le mouvement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. L'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites entraîne le

mouvement. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache en suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui sont souvent des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de différentes formes.[4].

### **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude bibliographique a été réalisée sur les divers types de sols argileux, leur nature et leur structure, ainsi que leurs caractéristiques les plus significatives. La première partie est consacrée pour la description générale de l'argile, en particulier les différents types d'argile et leurs liaisons structurelles. Cependant, Phénomène de gonflement, glissement et tassement de l'argile.



***CHAPITRE II :***  
***CONSTRUCTION EN***  
***TERRE CRUE***

### II.1. Introduction

La construction en terre demeure l'une des techniques de construction les plus anciennes utilisées par l'être humain. Si aujourd'hui on estime que 30% de la population mondiale habite dans une construction réalisée en terre crue, il est intéressant de constater les évolutions que ce type d'architecture ont pu connaître à travers l'histoire. [8]

Il est indéniable que la terre est le matériau naturel le plus accessible et inépuisable au niveau mondial. La terre crue, utilisée par des générations entières pour la construction, est aujourd'hui l'un des matériaux oubliés. Cependant, la construction en terre crue présente de multiples bénéfices et peut être réalisée selon diverses méthodes. La terre crue, comme son nom l'indique, est une construction dont la terre est le matériau de base, qui peut être mélangée avec du sable ou de la paille, par exemple. La construction en terre crue ne se limite pas à une seule région du globe. Ce matériau a été utilisé par les habitants de vastes régions des pays arabes, d'Asie, d'Afrique et d'Europe pour la construction de leurs maisons et de leurs abris.

L'utilisation de la terre, qui remonte à des millénaires, est donc indéniablement l'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'homme. Effectivement, les recherches archéologiques ont révélé que les sociétés perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes construisaient déjà de nombreux édifices à partir de ce matériau. Certains étaient même des monuments tels que l'arche de Ctésiphon en Irak, le palais du Potala au Tibet en Chine, la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou, et bien d'autres encore (figure II.1). On trouve donc des sites archéologiques en terre sur tous les continents habités. Cela s'explique par le fait que "la terre fait partie des trois premiers matériaux, tout comme la pierre et le bois". [9]



**Figure II. 1** a) Arche de Ctésiphon en Irak;b) Ville de Shibam au Yémen; c)Palais du Potala;d) Cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou

### II.2. Les constructions en terre crue dans le monde

Au sein de tous les pays, les individus ont transmis les techniques, les compétences et la culture de la construction en boue, les ont partagées et ont chacun contribué à faire fusionner, développer et partager ces expériences, figure II.2.

Toutefois, ce qui est remarquable dans cette construction en boue, c'est sa solidité et sa puissance à faire face aux conditions climatiques et aux phénomènes d'érosion, ainsi que sa conception technique raffinée et merveilleuse, ainsi que l'organisation sociale étroite qui la gère.



**Figure II. 2** Architecture en terre crue dans le monde.

Les résidents ont mis à profit leurs connaissances antérieures pour favoriser le développement économique, maintenir la stabilité sociale, renforcer la cohésion de la population et assurer la sécurité spirituelle et physique des résidents de la région. Cette architecture est maintenant un document qui aborde le sujet. Au fil du temps et de l'âge, la culture, les coutumes et les origines de la population fournissent un aperçu précis de la manière dont ils vivaient et gèrent leur environnement physique, leur environnement politique, leurs aspirations économiques, leurs croyances et leurs interactions avec les autres, tableau 4.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

Tableau II. 1 Repères chronologiques de la construction en terre

Temps	Événement
11 000 ans	Premières traces de la construction en terre en Amérique du sud.
10 000 ans	En Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main.
8 500 ans	Apparition de la brique de terre en Turquie.
8 000 ans	Apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale.
5 000 ans	Apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.
1860	Apparition des fours à feux continus qui permettent une production plus industrielle de la brique.
1918 et 1945	Début des reconstructions suite aux conflits mondiaux et abandon de la terre crue en milieu urbain.
A partir de 1980	Redécouverte de la terre crue pour la sauvegarde du patrimoine dans un premier temps puis pour ses qualités environnementales.

De nos jours, ce patrimoine majeur est en danger de disparition, même si il revêt une importance économique, sociale et environnementale, et contribue à la promotion d'un développement durable et à la préservation des ressources naturelles contre le gaspillage et la pollution. Dans toutes ces régions, la construction contemporaine en béton s'est étendue et expose ses éléments naturels à des actes de vandalisme et de destruction.

De nos jours, de nombreux projets ont été réalisés dans notre pays, en particulier dans les années 70. Le centre algérien du patrimoine culturel bâti en terre (CAP terre) est également responsable de la promotion des architectures de terre en Algérie, et il est basé à Timimoune (Adrar). Le centre est organisé en deux services techniques, dont l'un sera chargé de la recherche sur les matériaux et les techniques de construction, tableau II.2[9]

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

**Tableau II. 2** Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970.

Date	Techniques	Nombre	lieu
1969-1970	Terre coulée	02	Zéralda
1971-1973	Terre remplissante	/	Abadla
1972	Pisé	136	Batna
1973-1975	Pisé (R+2)	30/300	Sdi Bel Abbes
1976	Toub	100	Felliache (Biskra)
1980	Bloc de terre compressée	120	Madher (Boussaâda)
1981	Bloc de terre compressée	40	Chéraga
1984	Bloc de terre compressée	20	Tamanrasset
1984	Bloc de terre compressée	02	Tamanrasset et Souidania
1986	Bloc de terre compressée	10	Reggane (Adrar)
1993	Bloc de terre compressée	68	Tamanrasset
1999	Pisé	01	Souidania (Alger)
2007	Bloc de terre compressée (panneaux solaire, énergétique)	01	Souidania (Alger)

### II.3. Les Différentes Techniques de Construction

Il y a diverses méthodes pour mettre en place la terre crue. Chacune de ces méthodes est issue de différents environnements géographiques, de modes de vie spécifiques, de coutumes variées, de climats variés ou encore en fonction des matériaux disponibles. Le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC) sont les cinq techniques de construction les plus couramment utilisées, mais il existe de nombreuses autres. Chaque méthode possède ses propres particularités et utilise une terre spécifique. Effectivement, chacune d'entre elles nécessite une courbe granulométrique distincte ainsi que des états d'eau et d'humidité distincts. Les douze techniques principales ont été schématiquement répertoriées par H. Guillaud et H. Houben (1995) dans une « roue » des techniques (Figure II.3). Cependant, ils soulignent qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. Outre son caractère simplifiant, ce tableau circulaire ne distingue pas non plus les techniques classiques des techniques modernes.

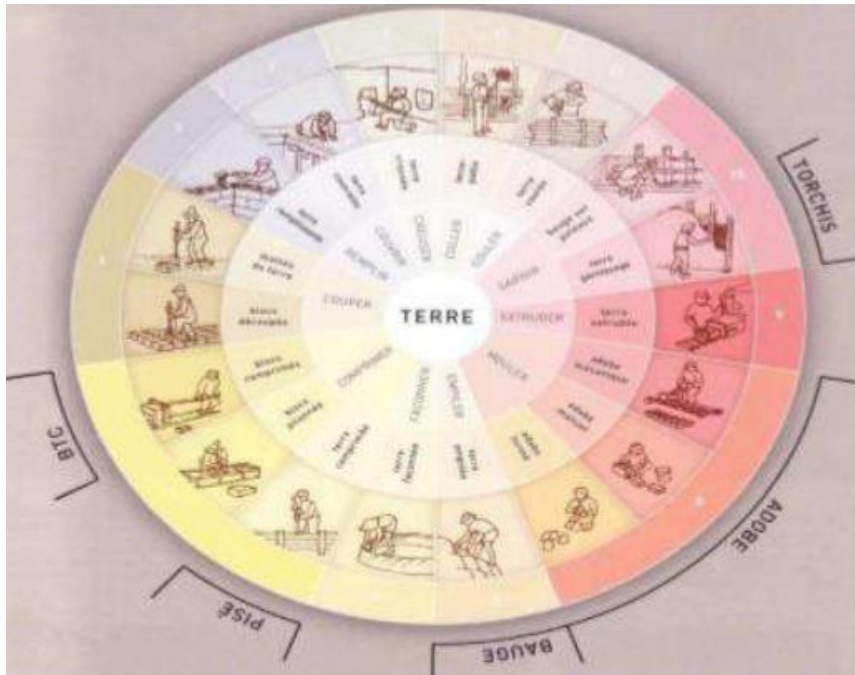


Figure II. 3 "Roue" des techniques de construction en terre [11]

### II.4. Briques de terre crue

La terre, appelée banco ou adobe, est souvent utilisée comme matériau de construction avec le moins de transformations possibles. Le mot terre crue est principalement utilisé pour distinguer la terre cuite : en effet, le matériau terre est actuellement le plus souvent présent sous sa forme cuite (briques, tuiles).

#### II.4.1. Composition de la brique terre crue

Le matériau minéral granulaire de la terre crue est constitué de matière solide, liquide et gazeuse.

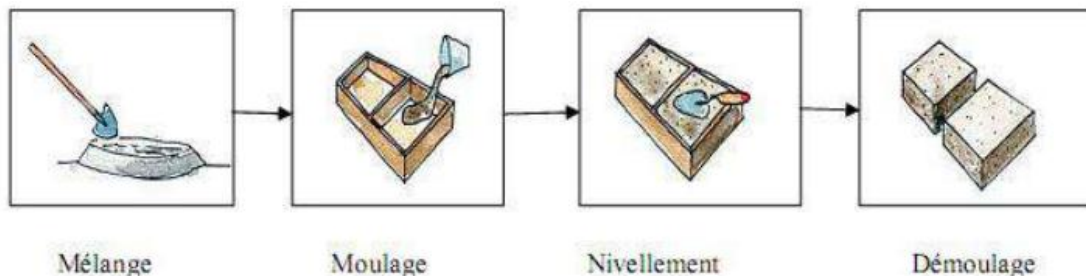
- **La matière solide** se compose de grains, de cailloux (mesurés en centimètres), de graviers (20 mm à 5 mm), de sables (5 mm à 0,06 mm), de silts (0,06 mm à 2  $\mu\text{m}$ ), d'argiles, qui sont des plaquettes plutôt que des grains (taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) et d'oxydes métalliques qui ont des propriétés colorantes (taille également inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ).
- **La matière liquide** est composée d'eau et de substances organiques et minérales dissoutes dans cette eau.
- **La matière gazeuse** est composée d'azote, d'oxygène, de gaz carbonique et de gaz provenant de la vie présente sur la terre.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

### II.4.2. Fabrication de la brique terre crue

Les principales étapes de la fabrication d'une brique en terre crue sont les suivantes :

- a) Il est nécessaire de creuser une fosse dans le terrain afin de remplir le récipient avec la terre, la paille et l'eau. Avec une pelle, mélanger les ingrédients et laisser reposer pendant deux jours.
- b) Le mélange doit être remué une fois pendant les deux jours, en marchant les pieds nus sur la pâte obtenue.
- c) Construire des moules en bois.
- d- Déposer la pâte préparée dans chaque compartiment, faire bouger les moules afin de renforcer la compaction de la pâte. Il est nécessaire que le moule soit propre et préalablement mouillé afin de faciliter le démoulage. Enfin, appliquer une truelle pour niveler la surface. Les briques ont un retrait assez élevé et il est nécessaire de veiller à leur qualité.
- e) Laisser sécher pendant une période de 5 à 10 jours.
- f) Déplacer les moules sur le sol afin de détacher les briques. Si besoin, appuyer sur le dos des moules.



**Figure II. 4** Fabrication de la brique terre crue.

La terre crue est le premier type de brique fabriqué par les êtres humains. Cela en raison de divers bénéfices :

- L'humidité est absorbée et renvoyée par la terre.
- La température est régulée par l'inertie thermique de la terre.
- La terre offre un isolant phonique et acoustique exceptionnel.
- En phase de transformation, la terre consomme peu d'eau.
- La terre est une ressource naturelle riche et durable.
- La terre possède des propriétés curatives, guérit les maladies de la peau, élimine les bactéries et les acariens.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

- La réalisation d'une construction en terre crue ne nécessite que 3% de l'énergie nécessaire pour la construction en béton.

Cependant, les briques en terre crue ont un désavantage majeur : la main-d'œuvre requise pour toute construction en terre est souvent considérable : même une petite structure nécessite 15 tonnes de terre à mouler. et ces bâtiments requièrent des travaux d'entretien réguliers.

### II.4.3. Les types de constructions en terre crue

#### II.4.3.1. L'adobe

L'adobe est une matière première composée d'un mélange de terre, d'eau et de chaume. Il est nécessaire que le sol utilisé renferme une proportion spécifique d'argile et de sable. Chaque composant du mélange a sa fonction. Le sable diminue les risques de microfissures dans le bloc de terre, tandis que l'argile rassemble les particules et le chaume de blé apporte une certaine flexibilité à l'ensemble.

De nos jours, il y a des usines industrialisées qui génèrent jusqu'à 20 000 blocs par jour.



**Figure II.5** Brique adobe.



## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

### II.4.3.2. Le pisé (Terre Comprimée)

Le pisé, une méthode ancestrale de construction de terre crue, présente des caractéristiques d'habitabilité et d'adaptation remarquables, mais demande une attention et un suivi réguliers. La construction en pisé, bien protégée et construite, traverse les siècles et s'ajuste naturellement aux différentes exigences des hommes.

Les bâtiments en pisé sont traditionnellement chaussés de « bonnes bottes » et d'un « bon chapeau ». En d'autres termes, le soubassement est traité de manière à prévenir les remontées capillaires (généralement en galets, en pierre ou en briques de terre cuite maçonnées) et le débord de toiture est adéquat pour maintenir l'eau hors de la façade.

Le pisé, de son côté, consiste en la compaction manuelle d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage à l'aide d'un pilon ou d'une machinerie spécialisée. (Figure II.6) présente une illustration d'un coffrage qui peut servir à la construction de murs en pisé.



**Figure II. 6** Les Etapes De Construire Un Mur En Pisé

### II.4.3.3. La bauge (terre-paille)

La construction d'un mur de bauge se fait en posant de la terre crue avec de la paille, cette dernière améliorant sa solidité et sa résistance. C'est une paroi solide.



**Figure II. 7** Construction en bauge : (a) Maison à Sa'dah Yémen, (b) Bourrine de Vendée ; (c) Mosquée de Bobo Dioulasso [13]

### II.4.3.4. Le torchis

Il s'agit d'un mélange de terre, de paille ou de chanvre, mélangé entre des banches. Il est nécessaire de placer la pâte obtenue entre les éléments d'une structure en bois ou en brique (à la main ou à la truelle) et équipée d'une armature interne (planchettes, rameaux).

### II.4.3.5. Terre Coulée

On peut comparer la méthode de la terre coulée à celle du béton maigre coulé. Elle utilise la terre sous forme de boue liquide avec une granularité préférée sableuse ou graveleuse. Les bénéfices de cette méthode sont nombreux : préparation facile du matériau, mise en œuvre facile et large éventail d'applications, mais elle présente également un important inconvénient : le retrait au séchage est élevé.

Cependant, la stabilisation peut trouver une solution à ce problème. (Figure II.8).Le retrait peut également être réduit en divisant les constructions en compartiments ou en bouchant les fissures après séchage lorsque celles-ci ne présentent pas de problèmes structurels. Les instruments employés pour cette méthode sont similaires à ceux employés habituellement pour le béton. Selon Guillaud et Houben (1995), la terre coulée est utilisée pour créer des briques, des pavés et des murs, qu'ils soient armés ou non.



**Figure II. 8** Exemple de Mur En Terre Coulée.[14]

### II.4.3.6. La brique de terre crue compressée (BTC)

La brique compressée de terre est un béton de terre qui est constitué de graviers, de sables et d'éléments fins tels que les limons et les argiles. Par la suite, on emploie des presses : manuelles ou motorisées, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique, pour comprimer la brique. Le joint utilisé pour l'assemblage des briques est un mortier de chaux, de sable et de terre (anhydrite). La charge de ce type de mur est d'environ 700 psi (48 bars) à sa finition, peut atteindre 1000 psi (68 bars) après avoir été séché, et varie entre 2500 et 3900 psi (172 à 268 bars) avec du ciment, étant donné que les normes recommandent une charge de 300 psi (20,6 bars).

#### a. Production des blocs de terre comprimée

On peut comparer la fabrication des blocs de terre comprimée à celle des blocs de terre cuite produits sans compactage, à l'exception de la phase de cuisson. La production sera organisée soit dans des petites unités de production artisanales (ou briqueteries), soit dans des unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les zones de production, de séchage et de stockage diffèrent également en fonction des méthodes de production utilisées et des conditions de production liées au climat, à la société, à la technique et à l'économie.



**Figure II. 9** Une presse manuelle et Hydraulique.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

### b. Techniques de constructions

Il existe différents types de presses disponibles à l'achat ou à la location pour la fabrication des BTC : De la presse manuelle adaptée à un usage personnel et aux auto constructeurs, à la presse motorisée, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique pour un usage professionnel intensif.

- Chaque brique doit être mouillée avant d'être installée.
- Ne vous empilez pas trop, préférez l'installation d'un rang ou deux sur une plus grande longueur.

Effectivement, le mur est extrêmement instable sous le poids des briques, du moins jusqu'à ce que le mortier soit séché. L'emploi du ciment en tant qu'additif peut diminuer la durée de séchage.

### c. Avantage

- La BTC est un matériau respectueux de l'environnement, constitué principalement d'argile, de sable et de gravillons, ainsi que d'un peu de ciment, et fabriqué sans cuisson.
- La BTC offre une excellente isolation thermique et phonique : grâce à son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC offre un confort thermique et une isolation phonique optimale.
- La BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en tant que cloison ou mur porteur, elle offre une grande diversité de formes et de motifs dans son utilisation.
- La BTC propose une résistance exceptionnelle : sa résistance à la compression dépasse les 60 bars (60kg/cm<sup>2</sup>).

### d. Inconvénients

La production de briques est longue et épuisante. Elles sont fragiles, car au moindre choc, elles se brisent ou s'effritent. Elles se détériorent également sous l'effet du gel.

#### II.4.3.7. Les sacs de terre

La technique de construction en sacs de terre s'inspire de la technique de pisé : on utilise de la terre compactée pour remplir des sacs en polyéthylène ou en polypropylène (utilisés principalement pour emballer les grains). On peut composer le mélange avec différents matériaux tels que de l'argile, du sable, du béton, etc.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

Une structure porteuse est ainsi obtenue où les rangées de sacs sont reliées entre elles par du fil barbelé et à laquelle on applique n'importe quel enduit. Cette méthode a été créée par Nader Khalili, un architecte américain.

### II.4.3.8. Terre Excavée

Cette méthode génère des habitats de type troglodytique qui s'ajustent au climat et à l'environnement. L'objectif est de creuser (à l'horizontale ou à l'horizontale) le sol argilo-sableux pour y aménager des logements. Prenons l'exemple de la ville tunisienne de Matmata (Figure II.10);



**Figure II. 10** Habitat Troglodytique Habitation De Matmata, Tunisie.[16]

### II.4.3.9. Mottes De Terre

Cette méthode est extrêmement ancienne et se rencontre surtout dans les grandes plaines. C'est en utilisant la terre de surface des sols, c'est-à-dire des mottes de gazon (Figure II.11), qu'il s'agit de construire. Ainsi, la terre est riche en racines et en plantes herbacées. Les racines lui donnent une résistance en raison de leur fusion. Les bénéfices de cette méthode réside dans sa mise en place rapide et relativement facile.



**Figure II. 11** Maisons Islandaises Médiévales, En Bois, Incrustées Dans Des Mottes De Terre. [16]

### II.4.3.10. Terre Façonnée

La méthode de la terre façonnée est utilisée pour fabriquer de la terre à l'état plastique, sans utilisation de moule ni de coffrage. Grâce à cette méthode, il est possible d'obtenir une variété de formes architecturales souvent très variées tout en diminuant la main-d'œuvre et les dépenses de construction. (Figure II.12)



**Figure II. 12** Construction En Terre Façonnée. [18]

### II.4.3.11. Blocs Découpés

Les blocs découpés sont taillés en carrière. Ces blocs sont extraits de la même manière que la pierre traditionnelle, c'est-à-dire à l'aide de pioches, burins, coins et scies. Ces carrières ont une terre assez uniforme et assez dure pour qu'on puisse y tailler directement des blocs utilisables pour la construction. En général, la terre de ces carrières contient une grande quantité d'éléments carbonatés ou issues d'une induration latéritique. Les blocs découpés sont utilisés de la même manière que les blocs traditionnels. Cette technique est appelée « tepate » au Mexique, « caliche » aux États-Unis, « mergel » en Hollande, « marl » en Angleterre et « tuf » dans les pays méditerranéens selon les régions.

La plinthite (une forme de latérite en induration) présente dans les sols du Burkina Faso et de la Libye, après un contact avec l'air de quelques mois, devient dure comme la roche et insensible à l'eau. De nombreuses constructions en blocs découpés sont donc présentes dans ces pays, telles que les bâtiments en BLT (blocs latéritiques taillés) au Burkina Faso (Figure II.13). [10]



Figure II. 13 BLT et Construction en BLT, Burkina Faso.[18]

### II.4.4. Les Caractéristiques des briques en terre crue :

Les caractéristiques des briques de terre crue sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 3 Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC)

Caractéristiques	Types de briques de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1200 – 1700	1700 – 2200	1700 – 2200
Résistance à la compression (MPa)	2 – 5	< 2,4	< 2,4
Résistance à la traction (MPa)	-	0,5 – 1	-
Conductivité thermique $\lambda$ (W/m°C)	0,46 – 0,81	0,81 – 0,93	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique (J/Kg°C)	900	850	
Capacité thermique (KJ/m <sup>3</sup> °C)	1350	510	
Absorption d'eau (%)	5	10 – 20	10 – 20
Isolation acoustique (dB)		50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1 – 2	0,2 – 1

### II.5. La construction en terre en Algérie

Les constructions réalisées en Algérie n'ont pas d'identité architecturale, comme l'a déjà expliqué le magazine de l'architecture en ligne Archi-Mag : La problématique de l'architecture en Algérie demeure insoluble près d'un demi-siècle après l'obtention de l'indépendance. Effectivement, les paysages urbains, les œuvres architecturales, qu'elles soient de commande publique ou d'initiatives privées, sont le signe d'une absence de repères historiques ou d'une incompréhension de ces repères. En l'absence de ces repères capables de garantir la perpétuation de signes identitaires architecturaux reconnaissables et leur perpétuation, les

## **CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE**

---

chances de poser les fondations d'une architecture algérienne contemporaine qui puisse s'inscrire dans l'universalité et permettre son établissement en tant que style architectural spécifique au pays et l'inscrire dans la durabilité sont réduites.

L'Algérie a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation des constructions en terre mais il reste insuffisant pour réduire ou même limiter l'obstacle psychologique des citoyens.

L'analyse de la restauration et de la rénovation de l'ancien hôpital d'Adrar, réalisé en 1942 par Michel Luyckx et inscrit en 2007 au patrimoine local, illustre l'importance de la construction en terre dans le sud algérien.

Au cours des trois dernières années, un festival international de promotion des architectures de terre, ArchiTerre, est organisé par le ministère de la Culture en partenariat avec l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger (EPAU). Le but principal de ce festival est de sensibiliser les futurs acteurs de la préservation du patrimoine et de la construction aux architectures de terre.

Le Décret exécutif n : 12-79 du 19 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 12 février 2012 portant création du Centre Algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre CAPTerre et fixant son organisation et son fonctionnement.[ 9].

Le CNERIB, regroupe plusieurs projets réalisés en terre crue ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit:

### **II.6. Impact environnemental, avantage et inconvénient de la construction en terre crue**

Les constructions antiques étaient construites à partir de matériaux simples. Lorsque les individus exploitaient les ressources naturelles, ils combinaient du sable, de la boue, de la paille et de l'eau afin de créer le matériau de construction. Les maisons construites de cette manière naturelle étaient durables et solides, et elles étaient en accord avec la nature. La disparition de ce mode de construction est due à l'industrie et à la modernisation des méthodes de construction. Cependant, on l'utilise toujours dans les régions défavorisées, où les ressources naturelles sont les seuls refuges pour les travaux de construction.

L'emploi de matériaux naturels présente des avantages non seulement économiques et respectueux de l'environnement, mais aussi pour la santé. Contrairement aux matériaux



## **CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE**

---

artificiels, les matériaux naturels possèdent des pores qui favorisent une circulation naturelle de l'air dans la maison, ce qui crée un environnement malsain.

Ainsi, il n'y a pas beaucoup de conséquences néfastes sur l'environnement, sauf pour certains qui utilisent le bulldozer pour extraire le sol utilisé dans leur production, ou pendant le processus de production, où la méthode de brûlage du sol est utilisée, ce qui entraîne des polluants environnementaux.

Les dépenses liées à la construction jouent un rôle crucial dans le processus de construction.

L'étude scientifique s'est concentrée sur l'analyse de l'utilisation de la terre et la recherche d'un matériau qui favorise la durabilité et préserve l'environnement en l'utilisant de manière efficace dans la construction des villes.

La contribution de la recherche dans ce domaine a été significative en raison de la disponibilité des matériaux et de leur prix abordable, ainsi que de la possibilité de construire une maison sans l'intervention de professionnels. Grâce à la facilité de maniement de la terre, nous pouvons réaliser des murs arrondis, des angles arrondis et des ouvertures qui sont charmantes dans les styles rustiques ou contemporains. Une durée de vie prolongée. La conductivité thermique de l'argile est faible, ce qui signifie que le bâtiment n'a pas besoin d'une isolation supplémentaire.

La brique de terre a un poids considérable en raison de sa densité élevée, ce qui entraîne une augmentation significative de la charge sur la base du bâtiment.

Par conséquent, la construction de bâtiments de grande hauteur ou la solidité et l'ampleur de la fondation sont difficiles, ce qui entraîne un coût supplémentaire en temps. Il est nécessaire de sécher entièrement le matériau avant de commencer les travaux de construction.

Comme on peut le constater, les imperfections sont réduites, ce qui nous permet d'affirmer avec certitude que la construction en terre crue est plus proche d'un matériau idéal que de nombreux autres.

### **II.7. Normes et Critères de choix des matériaux**

#### **II.7.1 Introduction**

Plusieurs normes et critères peuvent être employés afin de sélectionner les matériaux en terre crue pour la construction. Il est possible d'utiliser ces normes et critères afin de garantir

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

que les matériaux sont adaptés à l'utilisation prévue et qu'ils respectent les normes de performance requises.

Parmi les critères et normes les plus cruciaux pour sélectionner les matériaux de terre crue, on retrouve:

- Distribution granulométrique
- Plasticité
- Compressibilité
- Perméabilité
- Composition chimique

Outre ces normes et critères, il convient également de prendre en considération le climat local et l'usage prévu de la structure lors de la sélection des matériaux en terre crue. Par exemple, il est déconseillé d'utiliser des sols qui ont tendance à gonfler et à rétrécir dans des régions à climats extrêmes.

En prenant en compte les normes et les critères de sélection des matériaux de terre crue, il est envisageable de choisir des matériaux qui respecteront les normes de performance requises et qui conviendront à l'utilisation prév

### II.7.2. Utilisation des normes

Pour la construction de bâtiments en terre, La normalisation vise à établir une procédure valide et commune pour tous les produits de construction en terre, tels que les briques de terre comprimée (BTC), le mortier de terre (MT) et les maçonneries de bloc de terre comprimée (MBTC).

La plupart de ces normes portent sur les critères de choix des matériaux qui peuvent présenter les meilleures caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques. Finalement, il est nécessaire d'obtenir les valeurs appropriées pour garantir la résistance à la compression et la durabilité de la brique de terre comprimée.

Globalement, de nombreuses normes sont reconnues pour des usages courants et récurrents, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, assurant ainsi un niveau d'ordre optimal dans un contexte spécifique.

Les normes visent à atteindre des objectifs économiques et sociaux.

- ✓ rendre les échanges des biens et produits plus aisés.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

- ✓ La protection du citoyen (sécurité, qualité des produits, etc.) est essentielle. [19]

**Tableau II. 4** Les types de recommandations pour le choix des sols.

Pays	Document	Techniques	Approches pour le choix de sol
États-Unis	NMAC 14.7.4 (2000)	A, BTC, TE	Petites recommandations. Des unités de construction doivent être examinées.
Espagne	XP P 13-901 (2001)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature du sol
Nouvelle-Zélande	NZS 4297 (1998) 4298 NZD 1998) 4299 NZD 1998)	A, BTC, TE	Recommandations non quantitative au sujet des sols qui ne doivent pas être employés. Mouiller/essai sec nécessaire. Système pour l'essai des unités
Pérou	NTE E 080 (2000)	A	Les petites recommandations et ceux-ci sont pour la granularité
Afrique régionale	ARSO (1996)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature. Énumérer et classier les essais de sol, pas de procédures expliquées.
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	TE	Les recommandations pour la granularité, les sels, le contenu organique et le ruban examinant.
Espagne	Lehmbau Regeln (1999)	A, BTC, TE	Force de loi, plasticité et granularité d'essai essentiel. Énumérer et expliquer les essais en laboratoire simples et donnant des recommandations pour certains d'entre eux.
Australie	HB 195 (2002) Bulletin 51 992 EBAA (2001)	A, BTC, TE	Énumération de champs et d'essais en laboratoire, avec des procédures données pour certaines. Recommandations de granularité pour chaque technique *Recommandations générale qualitative pour la granularité. Conenance par l'essai des unités. Observation de l'exécution de l'héritage existant *recommandations non quantitatives au sujet des sols.

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

Espagne	MOPT (1992) IETcc (1971)	À, BTC, TE	Pour ne pas employer Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Essais en laboratoire recommandés, avec des recommandations pour la granularité.
CYTED international	CYTED (1995)	A, CEB, TE	Quelques dispositions pour des états généraux de sol Pas une approche directe pour le choix du sol. Recommandations selon des essais de force sèche
Houben et Guillaud (1994)		À, BTC, TE	Propriétés essentielles : granularité, plasticité, compactibilité et cohésion. Préliminaire et essai d'identification de laboratoire expliqué. Abaques pour la granularité, la plasticité et la compactibilité. Classification par la nature
Rigassi V (1995)		BTC	Granularité, plasticité et compactibilité essentielles. Des essais de sol d'identification de champ et de laboratoire sont expliqués.
Mc. Henry PG (1984)		À, TE	Offre les sols moyens qui ont montré la bonne exécution dans les bâtiments existants
Smith et Austin (1996)		A, BTC, TE	L'identification et le choix des sols ne sont pas donnés beaucoup d'importance. Dispositions très petites. Les unités d'essai sont la meilleure manière.
OIA (1970)		À, BTC, TE	Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Identification par des essais en laboratoire sans recommandations
Spencer et Cook (1983)		À, BTC, TE	Arrangement essentiel, les propriétés d'index : dimension particulière, limites d'Atterberg, tassement et classifications des sols bien que recommandations non données. L'essai des unités est essentiel.

### II.8. La stabilisation des briques

#### II.8.1. Définition de la stabilisation

Améliorer les propriétés d'une brique, notamment sa capacité à supporter, sa résistance à l'eau et sa longévité. Elle doit offrir :

- De diminuer la quantité de espace entre les particules solides.
- Pour combler les espaces qui peuvent être effacés.
- Pour établir des connexions ou renforcer les liens déjà existants entre les particules (résistance mécanique).
- Il est essentiel que l'amélioration de ces caractéristiques soit irréversible.

#### II.8.2. Procédés de stabilisation

Trois principaux procédés de stabilisation sont généralement identifiés :

### A. Stabilisation mécanique

L'utilisation de la stabilisation mécanique permet d'améliorer la brique en modifiant sa densité naturelle. On désigne cela sous le nom de densification. Le compactage implique principalement une diminution de la porosité du matériau grâce à la réduction des particules. Dans de bonnes conditions, les effets de compactage se manifestent par une réduction de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement.

Il y a une augmentation des résistances mécaniques initiales et à long terme. Seul le processus de compactage permet d'obtenir un matériau présentant des caractéristiques mécaniques appréciables. Toutefois, ces matériaux demeurent extrêmement vulnérables à l'eau.

Après avoir été exposée à l'eau, la brique reprend sa forme plastique et ne résiste plus du tout à la fusion.

La plongée d'une brique de terre dans un seau d'eau crée un tas de boue le lendemain au fond du seau. En cas de protection contre les intempéries des briques de terre (débords de toiture importants, protections contre le rejaillissement, soubassements convenables). Le drainage en pied de mur ne nécessite pas de stabilisation.

#### ▪ Ajouts des fibres

La stabilisation par incorporation de fibres est fréquemment utilisée dans les méthodes traditionnelles de construction en terre. La méthode implique principalement l'incorporation de paille dans les terres qui sont préparées par pétrissage, puis appliquées sur des clayonnages en bois ou moulées sous forme de blocs de terre séchés au soleil. La présence de fibres à diverses fonctions : diminution, voire élimination de la fissuration de retrait, accélération du séchage en drainant l'humidité vers l'extérieur du matériau, allègement du matériau, augmentation de la résistance à la traction, ce qui est probablement le meilleur avantage considéré.

D'autres fibres végétales sont utilisées, à l'exception de la paille qui est la plus répandue, comme la balle des céréales, les fibres de chanvre, de noix de coco, de sisal, les débris du teillage du lin ou du chanvre, ainsi que des charges végétales légères comme les sciures de bois et les copeaux. Certaines traditions utilisent également des fibres animales comme les poils, les crins ou la bourre d'animaux, et plus récemment des fibres de synthèse comme le cellophane, les fibres d'acier ou de verre.

### **B. Stabilisation chimique**

La stabilisation chimique entraîne une modification des caractéristiques d'une brique de terre grâce à l'utilisation de certains adjuvants. Pour réduire la sensibilité à l'eau, il est fréquent d'utiliser des produits (par exemple des liants hydrauliques) afin de rendre les sols traités moins sensibles à l'eau.

Les grains de sable sont liés par l'ajout de chaux ou de ciment contenant des liants hydrauliques, ce qui permet de stabiliser l'argile de terre.

Ainsi, les caractéristiques mécaniques et la sensibilité à l'eau sont améliorées. Il sera nécessaire de s'assurer que l'eau de gâchage ne renferme ni matière organique ni sulfates. Selon Remillon (1987), la méthode anglaise considère que tous les sols sont exploitables, à l'exception de ceux dont la nature est trop plastique, c'est-à-dire ceux dont l'indice de plasticité dépasse 20% et ceux contenant des sulfates nocifs pour le ciment, la chaux ou les matières organiques.

La liaison est le processus par lequel on ajoute d'autres matériaux à une terre, tels que des liants hydrauliques ou des produits chimiques. Cela modifie ses caractéristiques en provoquant des réactions physico-chimiques qui peuvent entraîner la formation d'une matrice d'enrobage ou de liaison des particules, voire la formation d'un autre matériau.

#### ▪ **Imperméabilisation**

On ajoute une substance imperméable à l'eau (bitume, bentonite, etc.) dans la terre afin de remplir les vides, les pores et les fissures, et de rendre la terre imperméable. Ce procédé favorise une meilleure résistance à l'érosion et stabilise le gonflement et le retrait.

#### ▪ **Ajout de chaux**

Dès le début du XXe siècle, les travaux routiers ont permis de stabiliser les terres à la chaux, ce qui suscite un intérêt grandissant dans le domaine du bâtiment.

##### **a) Mécanisme :**

Dans une terre humide, la chaux vive est soumise à une réaction d'hydratation qui se traduit par un dégagement de chaleur considérable.

La formation de ciments carbonates est due à la réaction de la chaux avec le dioxyde de carbone de l'air présent dans la terre. On considère que la réaction pouzzolanique est le mécanisme le plus crucial. Son rôle consiste à dissoudre les minéraux argileux dans un milieu

## CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

---

alcalin, puis à produire des silicates, de l'aluminium et du calcium (recombinaison de la silice et de l'alumine des minéraux argileux), ce qui renforce les grains entre eux.

### **b) Efficacité de dosage :**

La réaction d'hydratation exothermique de la chaux aide à assécher la terre. Lorsqu'on ajoute 2 à 3% de chaux, on constate une réduction de la plasticité. Les concentrations en chaux sont généralement de 6 à 12%.

### **c. Stabilisation physique**

La stabilisation physique modifie les propriétés des sols pour améliorer les caractéristiques du matériau en ajustant la granularité (correction de la texture). D'après les circonstances, le mélange obtenu peut soit diminuer la plasticité du matériau de base, soit lui conférer une certaine solidité. Sikali a réalisé une recherche sur la stabilisation granulaire d'une latérite en ajoutant des gravillons concassés (Ottou, 1987). Selon lui, lorsque le pourcentage du matériau d'apport est optimal, il a constaté une amélioration significative de la portance du matériau étudié.

Il s'agit principalement d'une modification de la texture de la terre en éliminant des fractions de grains supplémentaires ou en ajoutant des fractions de grains manquantes.[20]

## **II.8. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre des constructions en terre crue. L'histoire et ses méthodes, Les bénéfices et les désavantages, les méthodes et les standards qui peuvent être employés afin de sélectionner les matériaux et les techniques appropriés pour une construction en terre crue.

Les matériaux en terre crue sont généralement une option intéressante pour la construction lorsque les critères suivants sont remplis :

- Les matériaux sont facilement accessibles sur place.
- Les matériaux conviennent à l'utilisation prévue.
- Les matériaux sont de bonne qualité.
- Les matériaux sont solides et peuvent faire face aux conditions climatiques locales.
- Les matériaux en terre crue peuvent être une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux matériaux de construction traditionnels si ces conditions sont satisfaites.

***CHAPITRE III :***  
***GENERALITE SUR LES***  
***LIANTS***



### **III.1. Introduction**

Les liants jouent un rôle crucial dans le domaine de la géotechnique en améliorant les propriétés des sols et des matériaux de construction. Ils sont utilisés pour stabiliser les sols, renforcer les structures, et assurer la durabilité des ouvrages. Ce chapitre explore les différents types de liants, leurs applications en géotechnique, et les mécanismes par lesquels ils agissent.

Le traitement avec un liant vise à altérer l'état naturel d'un sol afin de lui conférer de nouvelles propriétés. Ce processus implique de mélanger le liant au sol, parfois avec de l'eau, jusqu'à obtenir une substance homogène. Il repose sur les réactions chimiques entre le sol et le liant, se différenciant ainsi du traitement mécanique, pouvant être utilisé simultanément. Cette méthode est couramment employée pour préparer des remblais et des couches de forme, transformant des sols initialement impropres en matériaux aptes à supporter des structures telles que des chaussées, des parkings ou des plateformes. Le traitement remplit deux objectifs principaux : d'une part, il permet d'améliorer la qualité de sols excessivement humides, que ce soit pour faciliter les travaux sur le chantier ou pour les réutiliser comme remblais ; d'autre part, il assure la création de plateformes solides et résistantes aux intempéries, nécessaires à la gestion du chantier et à la mise en place des fondations.

### **III.2. Généralités**

#### **III.2.1. Avantages techniques utilisées pour traiter les sols**

La perspective du traitement varie selon le contexte. D'une part, on vise à obtenir rapidement un effet satisfaisant pour faciliter la circulation, sans nécessairement rechercher des performances mécaniques élevées ultérieurement. D'autre part, dans le cas où une résistance mécanique est primordiale pour la plateforme, le choix du protocole est minutieusement étudié afin d'améliorer les caractéristiques du matériau initial. Le traitement des sols en utilisant des produits tels que la chaux, le ciment ou le liant hydraulique routier (LHR) présente divers avantages, à la fois techniques, économiques et écologiques.

##### **III.2.1.1. Avantages techniques**

Le traitement des sols en place avec de la chaux et/ou du liant hydraulique permet la création de couches homogènes, stables et durables pour les remblais et les couches de forme. Ces couches présentent des propriétés mécaniques comparables à celles des mélanges de grave-ciment ou de grave hydraulique. De plus, grâce à la rigidité du matériau traité, cette méthode assure une répartition efficace des charges sur le support, généralement avec une

## **CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES**

---

bonne performance par temps chaud. Elle se distingue par son absence de déformation ou d'orniérage, et sa résistance aux cycles de gel-dégel, grâce à sa rigidité et à l'effet de dalle induit. Enfin, cette approche de traitement est aisément adaptable aux contraintes opérationnelles, ce qui en facilite grandement la mise en œuvre.

### **III.2.1.2. Avantages économiques**

Le traitement des sols in situ avec de la chaux et/ou du liant hydraulique est une méthode à froid, nécessitant ainsi peu d'énergie. La réutilisation des matériaux existants constitue un avantage économique majeur, réduisant au minimum les déblais issus du décaissement, ainsi que les coûts liés au transport de granulats et à la mise en décharge. Cette approche contribue également à la préservation du réseau routier environnant en limitant le besoin de transport de matériaux vers les chantiers. Enfin, cette technique se distingue par sa rentabilité accrue, notamment grâce à sa durée de mise en œuvre plus courte par rapport aux solutions impliquant un décaissement.

### **III.2.1.3. Avantages écologiques et environnementaux**

Puisqu'il est réalisé à froid, ce traitement réduit considérablement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. Aussi, il permet une importante économie d'énergie globale, par la diminution des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des désagréments à l'usager et aux riverains ainsi qu'une faible détérioration du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui permet de préserver l'environnement.

## **III.2.2. Les outils qui permettent de caractériser les sols**

### **III.2.2.1. L'argilosité $I_p$ et VBS**

L'argilosité intervient dans le type d'application à envisager, dans le choix du produit de traitement, et dans les conditions de réalisation du mélange. A première vue, on peut considérer que plus l'argilosité n'est élevée, plus la chaux ne s'impose au choix des liants hydrauliques. L'argilosité s'exprime par l'indice de plasticité  $I_p$  ou par la valeur au bleu de méthylène du sol VBS.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

-  $I_p$  : c'est le paramètre le plus couramment utilisé, pour caractériser l'argilosité des sols. Il doit être déterminé par la valeur du tamisât à  $80\mu\text{m}$  (voir plus bas) pour pouvoir être le plus exploitable possible. Il définit l'intervalle de teneur en eau, parce que le sol soit souple et déformable, tout en conservant une certaine résistance au cisaillement.

- la valeur VBS : est un autre paramètre, plus récent que  $I_p$ , il représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol.

### III.2.2.2. La granularité $D_{\text{max}}$ et $C_u$

Dans le sol, les grains peuvent être de dimensions variables (des argiles jusques aux blocs). La granularité est déterminée par l'analyse granulométrique, et plus particulièrement par le  $D_{\text{max}}$ , le tamisât à  $80\mu\text{m}$ , et le coefficient d'uniformité  $C_u$ .

-Le  $D_{\text{max}}$ : est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Ce paramètre est déterminé pour préjuger des ateliers de terrassements utilisables, et notamment, pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires et les conditions de mélange éventuel avec un liant. C'est également un paramètre important à connaître, pour apprécier la validité des essais de laboratoire. Toutefois, sa détermination peut tolérer une certaine imprécision, (généralement, une estimation visuelle est suffisante).

-Le tamisât à  $80\mu\text{m}$  : cette caractéristique, exprime la finesse du matériau et oriente en grande partie le choix du produit du traitement, ainsi qu'il permet d'évaluer la sensibilité en eau du sol. Le tamisât à  $80\mu\text{m}$  est aussi appelé teneur en fines. Le tamisât à  $2\text{mm}$  permet, lui de séparer les sols à tendance sableuse d'une tendance graveleuse.

-Le coefficient d'uniformité  $C_u$  : cette caractéristique fournit, (dans le cas des matériaux possédant des granulats), une information qualitative sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre le niveau de résistance visé. En effet, lorsque tous les autres paramètres sont fixes, plus ce coefficient est faible, c'est-à-dire plus la granularité du matériau est holométrique (éléments de taille similaire), plus faible sera la masse volumique apparente pouvant être atteinte, et donc plus importante, devra être la quantité de produit de traitement à prévoir, pour atteindre le niveau de performance visé.

### III.2.2.3. Teneur en composants chimiques

Les teneurs en constituants chimiques particuliers, comme les matières organiques, les phosphates, les nitrates, les chlorures, les sulfates et les sulfures, peuvent être nuisibles ou empêcher la stabilisation du sol.

Les sols ou argiles peuvent contenir des matières organiques, surtout en surface. Celles-ci, consomment énormément de produit de traitement (éléments beaucoup plus réactifs que les éléments << classiques >> du sol) et diminuent l'acidité du milieu, la quantité de produit est des lors, perdue pour le traitement a proprement dit.

Les phosphates et les nitrates inhibent, ou retardent également la prise hydraulique ; cependant leur présence est rare.

Les chlorures, eux, sont des accélérateurs de prise, avec possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates. On confirme ou non la réalisation du traitement par une étude de la cinétique de prise. Quant aux sulfates et sulfures, ce sont les éléments les plus fréquents dans les sols. Ce sont les plus nuisibles pour le traitement, puisque même avec une teneur d'environ 1%, le traitement devient inefficace. Ils sont bénéfiques en tant que régulateur de prise au commencement du traitement, mais peuvent détruire la prise par la suite (formation d'ettringite, qui possède la propriété de gonfler facilement) si certaines conditions sont réunies. Une solution peut être un prétraitement à la chaux bien avant le traitement principal.

### III.2.2.4. Etat hydrique

L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération) pour la préparation du sol au traitement.

Il est aussi important pour le déroulement de l'ensemble du processus de traitement. Il influe sur le choix des produits, leur dosage, leur prise et les conditions de mise en œuvre. On le détermine par l'une ou l'autre des valeurs suivantes :

- le rapport  $W_N/W_{OPN}$
- l'indice portant immédiat  $I_{pi}$ , pour les états << humide >> et << très humide >>

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

- l'indice de consistance  $I_c$  : il situe la teneur en eau naturelle du sol  $W_N$  par rapport à ses limites d'Atterberg ( $W_L$  et  $W_P$ ). Il permet de caractériser l'ensemble des états hydriques mais son interprétation se limite à des sols répondant à des caractéristiques précises ( $I_p > 12$  par exemple).

$$I_c = (W_L - W_N) / (W_L - W_P)$$

### III.2.2.5. L'essai Proctor

La densité apparente d'un sol dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau, de l'énergie de compactage. Le compactage permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol en resserrant sa texture et en réduisant ses déformations. L'essai Proctor part du principe qu'il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité maximale. En effet s'il y a trop d'eau, les grains glissent entre eux et absorbent une partie de l'énergie de compactage, et s'il n'y a pas assez d'eau, la lubrification entre les grains n'est pas assurée. Il est utilisé pour étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol par rapport au poids volumique sec de cet échantillon, soumis à une énergie de compactage déterminée. On en déduit une relation expérimentale entre la densité sèche du sol étudié, et sa teneur en eau.

Le principe, consiste à compacter avec une énergie définie, un échantillon de sol remanié dans un moule normalisé, et à mesurer le poids volumique sec obtenu. L'essai est recommencé pour différents teneurs en eau. Il existe deux types d'essai d'usage courant : l'essai Proctor Normal et l'essai Proctor Modifié.

Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe, dont en abscisse : la teneur en eau et en ordonnée : la densité sèche. Cette courbe a un maximum dit "Optimum Proctor" normal ou modifié selon la nature de l'essai. Ce maximum définit la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Ainsi, même si ces valeurs peuvent être utilisées, pour valider la qualité d'un compactage sur

Un chantier ; elles sont surtout utilisées, lors de l'étude de formulation pour définir les modifications à apporter au sol, permettant de passer de son état naturel, à son état optimal de mise en œuvre.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

L'essai Proctor Modifié, se fait sur des matériaux destinés à la réalisation des couches de chaussée et prend en compte un poids plus important des engins de chantiers.

### III.2.3. Caractéristiques des sols

Toutes ces caractéristiques ont permis aux experts de classer les sols, en différentes classes et sous classes (Ai, Bi, Ci, Di, et R, i indice de sous classe) résumées dans la figure 1, et décrites dans le fascicule 1 de la « Réalisation des remblais et des couches de formes ».

Tableau 1 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme NF P 11-300 :

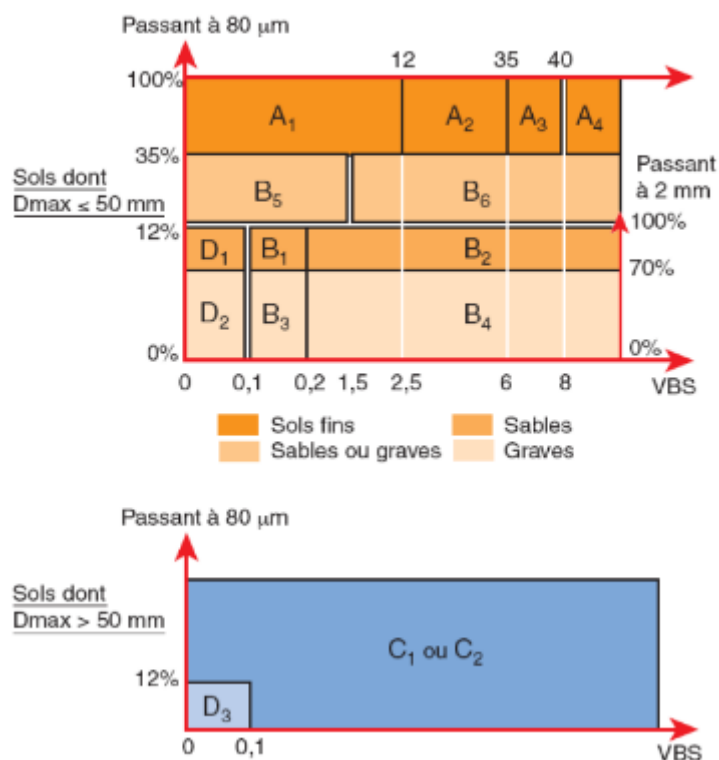


Figure III. 1 Figure synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme NF P 11-300

### III.3. Une clarification conceptuelle

#### III.3.1 Liant

Un matériau qui a la propriété de se solidifier puis de durcir en acquérant des caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression, à la traction et à l'adhérence. Ce matériau est destiné à lier par collage des éléments inertes tels que des granulats, des fibres de bois ou de métal. Dans les peintures, il forme le film protecteur.

## **CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES**

---

Il existe deux types principaux de liants :

**1. Les liants hydrauliques ou aériens**

(Comme le ciment, la chaux, etc.).

**2. Les liants hydrocarbonés**

(Utilisés dans la construction routière, tels que les bitumes et les goudrons).

**Liant hydrocarboné :** Un type spécifique de liant organique composé de carbures d'hydrogène, dont le durcissement est réversible et dépend de la température. Exemples : goudron, bitume.

Le terme "liant" désigne des produits qui, une fois mélangés à de l'eau, donnent une masse plastique facilement moulable, et qui avec le temps, se solidifient pour former une masse dure et compacte, similaire à la roche naturelle. Les liants ont une large gamme d'applications, utilisés notamment dans la fabrication du mortier, du béton, du béton préfabriqué, etc. Ils sont classés en deux catégories :

- Les liants aériens : qui ne se solidifient qu'au contact de l'air (par exemple, la chaux aérienne).
- Les liants hydrauliques : qui peuvent se solidifier même sous l'eau.

### **III.3.2. Caractéristiques des liants**

Les liants se distinguent par leur vitesse de prise et leur résistance mécanique.

#### **III.3.2.1. Prise du liant**

La prise du ciment est le processus de transformation de l'état plastique en état solide. Elle débute lorsque la pâte commence à perdre sa plasticité pour devenir rigide, et se termine lorsque la pâte est entièrement solide. En fonction de leur vitesse de prise, les liants sont classés en trois catégories : à prise rapide, à prise semi-lente et à prise pré-lente. Le temps de prise doit correspondre à la durée nécessaire pour le malaxage, le transport et la mise en œuvre. Si la prise commence avant la mise en place, la résistance diminue.

#### **III-3-2 2. Essais des liants :**

Avant leur mise sur le marché, les liants subissent différents types d'essais :

- a. Essais chimiques :** analyse des composants.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

b. Essais physiques : finesse de mouture, densité apparente, proportion d'eau de gâchage, durée de prise (essai à l'aiguille Vicat).

c. Essais mécaniques : essais de compression (le plus important), essais de traction jusqu'à rupture, essais de flexion (moins importants), essais d'adhérence, et essais de résistance aux eaux agressives.

### III.4 Les chaux

Dès l'antiquité, on combinait déjà les matériaux à base de silice avec de la chaux pour obtenir une pâte qui faisait prise, la réaction était appelée pouzzolanique. Aujourd'hui, lorsque l'on souhaite traiter un sol, on le fait soit à la chaux, soit au ciment ou au liant hydraulique routier, ou bien en les associant. En effet, chaque composant est complémentaire à l'autre, sans compter que leur dosage diffère.

La chaux est obtenue par décarbonatation du calcaire à 900°C suivant la réaction :



Dès lors, selon la constitution chimique de la roche d'origine et sa pureté, on peut aboutir à plusieurs sortes de chaux. Un calcaire pur donne une chaux dite aérienne, qui est calcique si elle contient de l'oxyde de calcium, elle sera dite magnésienne, si elle renferme de l'oxyde de magnésium. Ces chaux peuvent être vives, ou éteintes, c'est à dire déshydratées. La chaux aérienne calcique ou éteinte est parfois appelée « chaux grasse ». Elle peut se présenter sous différentes formes : roche ou poudre pour la chaux vive ; poudre, suspension dans l'eau (lait de chaux) ou pâte pour la chaux hydratée. Décarbonatation, hydratation, re-carbonatation...Le cycle de vie de ce matériau lui vaut sa désignation d'aérienne. En effet, à température habituelle, l'absorption de gaz carbonique après hydratation permet à la chaux de revenir à l'état calcaire initial. Enfin, il est naturel, affluent et polyvalent, en plus de ses propriétés physico-chimiques (basicité, surface spécifique, réactivité etc.). La chaux est toujours utilisée dans de nombreux secteurs comme l'agriculture, la chimie, l'industrie du verre, sans oublier la construction : traitements de sols, traitements de coproduits, traitements de granulats en carrières, ou dans les travaux souterrains (activateur de prise). Enfin, on la retrouve dans les chantiers de dépollution des sols et le conditionnement des boues.



## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

### III.4.1. Les chaux aériennes

Ces chaux sont ainsi nommées car elles ne peuvent durcir qu'à l'air par un processus de carbonatation. Le mortier élaboré à partir de la chaux aérienne est utilisé principalement dans la maçonnerie de faible épaisseur.

La chaux vive, également appelée CAO, est obtenue en chauffant du carbonate de calcium à une température de 850°C, produisant du dioxyde de carbone et de l'oxyde de calcium. Avant toute utilisation, la chaux vive doit être éteinte, ce qui libère une grande quantité de chaleur et entraîne une augmentation significative du volume. Parmi les chaux aériennes, on distingue :

#### III.4.1.1. La chaux grasse

Produite par la cuisson du calcaire puis l'extinction, sa densité apparente est de 0,4 et sa masse volumique est de 2,25 kg/dm<sup>3</sup>.

#### III.4.1.2. La chaux maigre

Produite par la cuisson du calcaire marneux, sa densité apparente est de 0,5 et sa masse volumique est de 2,3 kg/dm<sup>3</sup>.

Les chaux aériennes, issues de la calcination des pierres calcaires principalement composées de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), représentent l'un des premiers liants fabriqués par l'homme.

Elles sont obtenues en chauffant les calcaires à une température moyenne d'environ 800°C dans un four. Ce processus de calcination libère du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), transformant le carbonate de calcium en chaux vive (CaO).

CaO.....+..... H<sub>2</sub>O.....Ca (OH) <sub>2</sub> + dégagement de chaleur chaux vive.....eau.....Chaux éteinte

Par hydratation, la chaux vive devient de la chaux éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>), moins dangereuse à manipuler mais également moins réactive.

L'extinction de la chaux vive dégage une forte chaleur et entraîne une augmentation de volume, il est donc crucial de ne pas utiliser de chaux non complètement éteinte, car elle peut gonfler au contact de l'eau.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

La chaux éteinte, mélangée à du sable pour former un mortier, est utilisée comme liant. Sa prise résulte de la carbonatation lente au contact du dioxyde de carbone de l'air, qui forme du carbonate de calcium. Cette réaction cristallise le carbonate de calcium, rigidifiant le mortier et lui conférant une adhérence aux granulats et aux blocs de construction, assurant ainsi la solidité de l'ensemble architectural.

Ca (OH)<sub>2</sub>.....+.....CO<sub>2</sub>..... CaCO<sub>3</sub> Chaux  
éteinte.....gaz carbonique de l'air.....Carbonate de calcium

La qualité des mortiers obtenus en mélangeant de la chaux et du sable est restée dans la mémoire collective sous l'expression "être construit à chaux et à sable", synonyme de solidité. Différents types de calcaire peuvent être utilisés pour produire de la chaux aérienne, certains produisant une chaux plus pure et d'autres une chaux plus hydraulique et résistante en raison de leur teneur en argile.

La chaux vive est un matériau instable, agressif pour la peau et les matières organiques. Elle est utilisée pour diverses applications, telles que la protection des bois, la désinfection des étables, la stabilisation des sols et l'absorption de l'humidité.

La chaux éteinte peut être obtenue sous forme de poudre ou de pâte, selon le processus d'extinction utilisé. Elle est utilisée pour préparer des enduits, des mortiers et des peintures, et sa réactivité et sa plasticité dépendent de sa finesse de mouture et de son processus de fabrication. Les liants magnésiens, tels que la magnésite caustique et la dolomite caustique, sont également utilisés comme liants aériens mais résistent mal à l'eau et sont utilisés principalement pour le durcissement à l'air.

### III.4.1.3. Les chaux hydrauliques

Ces chaux ont la propriété importante de durcir non seulement à l'air et dans des environnements humides, mais aussi sous l'eau. Elles sont obtenues par la cuisson à une température comprise entre 850 et 1200°C de calcaire contenant 10 à 20 % d'argile. Le processus de fabrication des chaux comprend plusieurs étapes, notamment le concassage des pierres provenant des carrières, le triage pour éliminer les impuretés, la cuisson dans des fours, et l'extinction, soit par immersion soit par arrosage.

Les chaux hydrauliques tirent leur nom de leur propriété fondamentale de durcir non seulement à l'air et dans des environnements humides, mais également sous l'eau. Elles sont produites par cuisson à une température comprise entre 850 et 1000°C d'un mélange de

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

---

calcaire contenant une teneur en argile inférieure ou égale à 22 %. La proportion d'argile dans ces chaux détermine leur degré d'hydraulicité, avec des variations allant de faiblement hydraulique à éminemment très hydraulique, comme suit :

- Faiblement hydraulique : 5 à 8 % d'argile.
- Moyennement hydraulique : 8 à 14 % d'argile.
- Hydraulique : 14 à 19 % d'argile.
- Éminemment très hydraulique : 19 à 22 % d'argile.

L'indice d'hydraulicité, calculé en fonction du poids des constituants acides par rapport aux constituants basiques, permet de classer les chaux en fonction de leur degré d'hydraulicité, allant de la chaux aérienne à la chaux la plus hydraulique contenant jusqu'à 20 % d'argile.

Le processus de fabrication de la chaux hydraulique comprend plusieurs étapes, notamment l'extraction, le concassage, la cuisson du calcaire, l'extinction (arrosage léger suivi d'une période d'extinction totale) et le broyage pour obtenir une poudre fine.

La chaux hydraulique en poudre présente une couleur jaune clair avec des nuances grisâtres et est plus claire que les ciments. Elle est utilisée principalement pour les carrelages, les enduits et les ouvrages peu délicats où des résistances élevées ne sont pas nécessaires, tels que les murs de clôtures et les habitations à un ou deux étages.

Les chaux hydrauliques sont classées selon leur masse volumique ou leur densité en deux catégories principales :

1. Chaux légère : densité apparente inférieure à 600 kg/m<sup>3</sup>, indice d'hydraulicité inférieur à 0,3, résistance à la compression après 28 jours inférieure à 3 MPa.
2. Chaux lourde : comportant trois classes en fonction de leur résistance et de leur densité apparente.

### III.4.2. Modifications des caractéristiques par le traitement

#### III.4.2.1. La chaux

Les sols fins, formés d'argiles et de limons, ont des propriétés routières insuffisantes. Ils gonflent et deviennent plastiques au contact d'eau, ils se contractent avec la sécheresse, ou encore foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès l'extraction, soit à la suite d'intempéries, à un degré de consistance tel que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui à pour conséquence de rendre leur utilisation délicate. Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux. La chaux agit de manière immédiate, mais agit aussi à long terme.

#### III.4.2.2. Ses actions immédiates

Elle permet de diminuer la **teneur en eau du sol** traité. En effet, cette propriété du traitement est due à un apport de matériaux secs, de la consommation d'eau lors de l'hydratation de la chaux vive

( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{énergie}$ ), de l'évaporation d'eau grâce à la chaleur produite lors de cette même réaction. En général, pour 1% de chaux utilisée, la teneur en eau du milieu diminue entre 1% et 3%.

Elle modifie également la **fraction argileuse** du milieu. Ainsi, elle rassemble un grand nombre de particules fines argileuses pour former des éléments plus volumineux et friables : c'est ce qu'on appelle la floculation. Cette évolution réduit l'indice de plasticité  $I_p$ , augmente l'indice portant immédiat  $I_{PI}$ , et produit un aplatissement de la courbe Proctor avec une diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale. La chaux élève donc la contrainte au cisaillement et transforme les caractéristiques de compactage du matériau.

#### III.4.2.3. Ses actions à long terme

La chaux, agissant comme base forte, élève le pH du sol et engendre l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Il se forme alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

les grains. Notons que l'intensité et la vitesse de ces réactions à long terme résultent d'un certain nombre de caractéristiques du sol comme le pH, la teneur en matières organiques, la quantité et la nature de la fraction argileuse, la teneur en eau, dosage en chaux maximal (fonction de la quantité maximale de chaux «consommable» par l'argile présente dans le sol) et surtout de la température.



**Figure III. 2** Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol

### III.4.2.4. Les liants hydrauliques

Les LHR sont surtout utilisés dans le but d'obtenir un développement rapide et permanent des résistances mécaniques et des **stabilités à l'eau et au gel**. Compte tenu de leurs propriétés, les LHR modifient amplement le comportement des sols peu (ou pas du tout) plastiques, et ce, grâce à plusieurs actions visant à modifier les propriétés géotechniques et mécaniques du sol.

Les réactions du LHR avec un sol, consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté, suivie de la cristallisation des produits hydratés en donnant des espèces cristallines, insolubles et résistantes, qui relient les grains du sol: c'est ce qu'on appelle la **prise hydraulique**.

Ce traitement permet également d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux. Ils s'appliquent à des sols fins prétraités à la chaux ou à des sols très peu plastiques, pour lesquels les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions, et avec une qualité suffisante. Cette **diminution de la teneur en eau** est due à un apport de matériaux secs, à une

# CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

consommation d'eau lors de la prise hydraulique et à l'évaporation d'eau par l'aération de la surface lors du malaxage.

En revanche, on ne note pas de modification importante de la courbe Proctor.

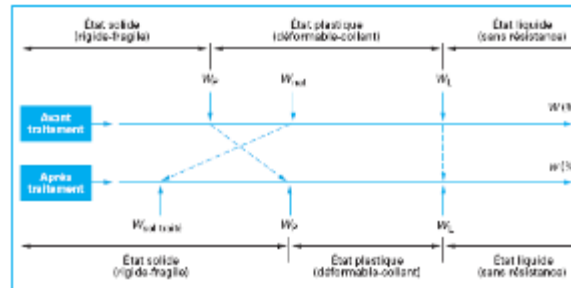


Figure 2 – Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive

Figure III. 3 Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive

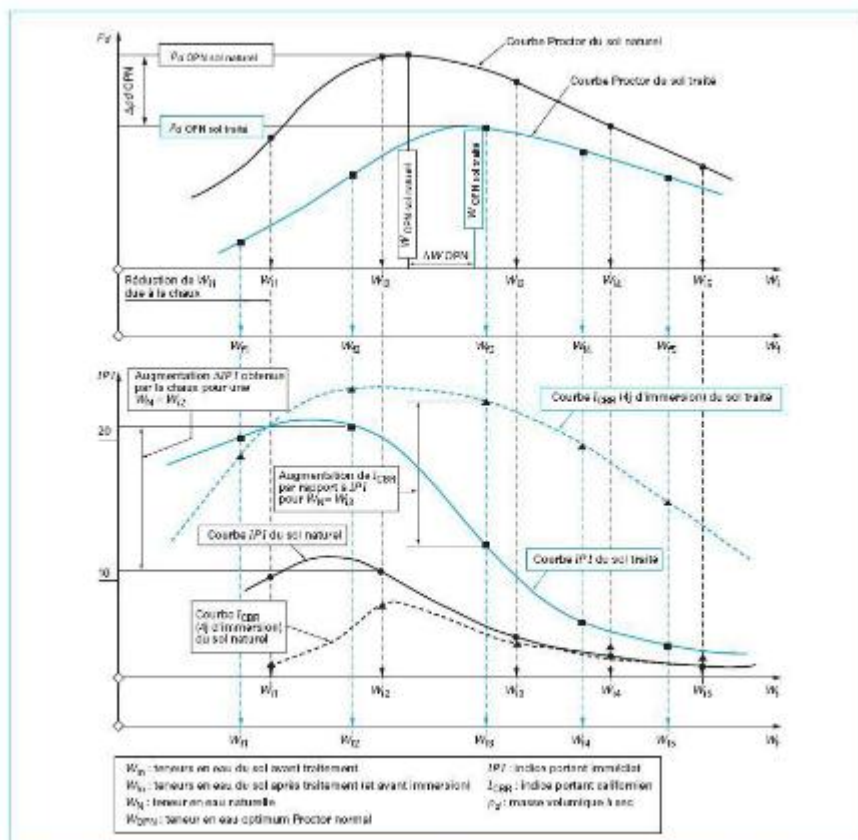


Figure 3 – Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2% de chaux vive

Figure III. 4 Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2% de chaux vive

### III.5. Les ciments

#### III.5.1. Historique

La chaux est connue depuis l'antiquité. Elle ne prend pas sous l'eau.

1756, Smeaton en Angleterre découvre que les chaux qui présentent les meilleures propriétés « hydrauliques » sont celles contenant des matières argileuses.

1796, Parker en Angleterre, développe le ciment « Roman » en calcinant certains gisements naturels de calcaires argileux.

1813, Vicat en France met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.

1824, Joseph Aspdin en Angleterre, fabrique et brevète une chaux hydraulique à laquelle il donne le nom de ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.

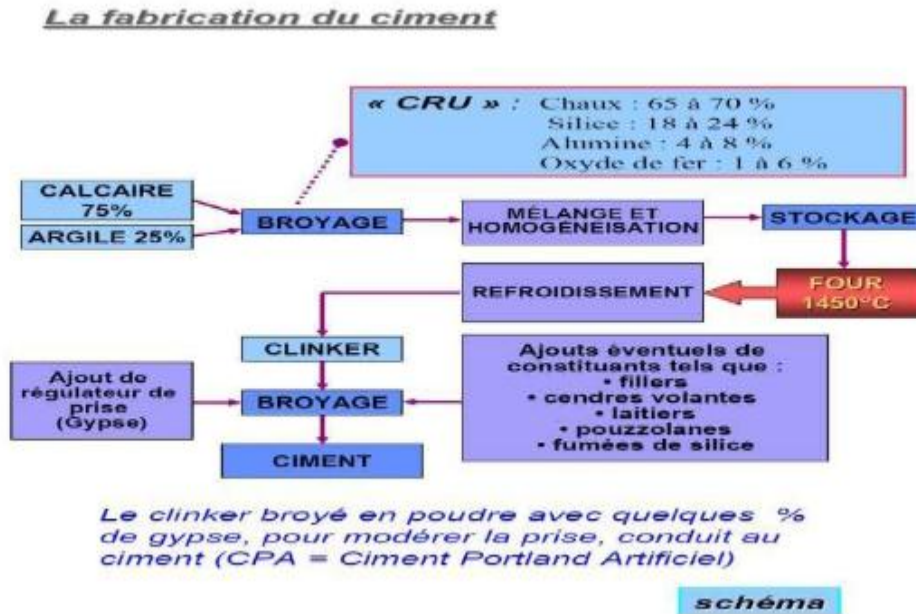
1835, Issac-Charles Johnson qui travaille dans une usine de ciment, observe que les morceaux trop cuits donnent, après mouture, un meilleur ciment. Il augmente la température de cuisson et donne ainsi naissance au véritable ciment portland

1838, William Aspdin produit le ciment Portland à côté de la Tamise et convainc Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise (Thames Tunnel) – 1ère utilisation du ciment Portland dans le génie civil.

#### III.5.2. Définition

Le ciment est un liant hydraulique qui, mélangé avec de l'eau, durcit tant sous l'eau qu'à l'air, pour constituer une pierre artificielle. C'est le constituant qui assure la cohésion des autres constituants du béton à l'état frais, et la résistance après durcissement. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) finement broyés et d'ajouts éventuels. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface spécifique Blaine. Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques. La fabrication du ciment est montrée dans le schéma suivant

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES



**Figure III. 5** Fabrications du ciment

Les ciments utilisés doivent être conformes aux normes. Ils peuvent avoir deux rôles essentiels : assurer la résistance du béton et combler les vides entre les grains. Les étapes de fabrication du ciment sont :

- Extraction : des matières premières.]
- Concassage : pour obtenir des fragments de 50 à 100 mm.]4
- Préparation du cru : c'est la réalisation du mélange homogène du calcaire et de l'argile.
- Cuisson : à une température de 1400 à 1500 °C.]
- Refroidissement : brusque (de 1450 °C à 250 voire 50 °C).]
- Broyage : pour réduire les grains du clinker en poudre. L'ajout des autres constituants] se fait au cours du broyage.

Le tableau suivant montre la classification des ciments en fonction de leur composition :



## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

**Tableau III. 1** La classification des ciments en fonction de leur composition :

Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en addition (laitier - pouzzolanes - cendres - calcaires - schistes - fumées de silice)	Teneur en constituants secondaires
Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5%
Ciment Portland composé	80 à 94%	6 à 20% *	0 à 5%
	65 à 79%	21 à 35% *	
Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	36 à 65% de laitier. 66 à 80% de laitier. 81 à 95% de laitier.	0 à 5%
	20 à 34%		
	5 à 19%		
Ciment pouzzolanique	65 à 90%	10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumée de silice *	0 à 5%
	45 à 64%	36 à 55% mêmes additions.	
Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	18 à 30% de laitier et de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
	20 à 39%	31 à 50% mêmes additions.	
* est le pourcentage de la fumée de silice et des cendres siliceuses est limité à 10%			

On trouve aussi les ciments blancs, qui sont obtenus à partir de calcaire blanc, silice et alumine contenant très peu d'oxydes métalliques (tels que les oxydes de fer, de manganèse ou de chrome) susceptibles de colorer le produit. Le tableau suivant présente la classification des ciments en fonction de leur résistance nominale :

Il existe aussi d'autres types de ciment :

- Le ciment à maçonner : Il ne présente pas de bonnes caractéristiques, destiné à la confection des mortiers de maçonnerie ou d'enduits, et ne conviennent pas pour les bétons à contraintes élevées. Ce ciment ne doit pas être utilisé dans les milieux agressifs.
- Le ciment alumineux fondu : Le ciment alumineux fondu (ou ciments d'aluminates de calcium) est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à la fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme une masse d'alumine n'excédant pas 30 % de la masse de ciment.
- Le ciment prompt naturel : Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson à température modérée, d'un calcaire argileux de composition

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

régulière, extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin. Le ciment prompt naturel est caractérisé par la présence de silicates de calcium, essentiellement sous forme de silicate bicalcique actif, d'aluminate de calcium riche en alumine et de sulfo-aluminate de calcium qui est une spécificité du produit. [3]



**Figure III. 6** Du calcaire argileux au ciment

### III.5.2. L'hydratation du ciment

Une fois mélangé avec l'eau, les réactions d'hydratation du ciment se développent, la poudre de ciment contient des constituants instables en présence d'eau, et donnent des hydrates stables en présence d'eau.

Au début le silicate tricalcique se dissout pour former le monosilicate de calcium hydraté, après un certain temps, la viscosité de la pâte augmente brusquement, c'est le début de prise, due à l'interpénétration des cristaux. Dès la fin de prise (qui correspond à l'instant où la pâte cesse d'être déformable) la pâte commence à acquérir une résistance mécanique qui se développe avec le temps, c'est le phénomène de durcissement.

La réaction d'hydratation s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

## **CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES**

---

### **III.5.3. Eau de gâchage**

L'eau entrant dans la composition du béton ne doit pas contenir d'éléments nuisibles et d'impuretés en quantités telles qu'ils pourraient porter préjudice à la prise, au durcissement et à la durabilité du béton ou provoquer une corrosion des armatures.

Les eaux potables fournies par un réseau public de distribution conviennent à tous les types de béton.

Les eaux de rinçage et de recyclage d'installation du bétonnage sont habituellement utilisables : leur aptitude est à vérifier pour certains bétons. Les eaux de ruissellement, les eaux pompées dans la nappe phréatique, les eaux de rejets industriels doivent subir un essai de convenance (NF P 18-303).

L'eau de mer, les eaux saumâtres peuvent être utilisées pour du béton non armé uniquement. Les eaux usées et les eaux vannes ne conviennent pas.

On peut ajouter au béton ordinaire des adjuvants et des additions minérales pour améliorer les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

### **III.5.4. L'adjuvant**

Produit ajouté en très faible quantité aux bétons (dose inférieure à 5% du poids de ciment), ils sont ajoutés avant ou pendant le malaxage, dans le but d'améliorer certaines propriétés : - soit à l'état frais. - soit pendant la prise et le durcissement. - soit à l'état durci.

Ce sont des substances chimiques organiques ou inorganiques qui, ajoutées aux bétons, mortiers, ou coulis, modifient :

La rhéologie.

La cinétique d'hydratation (temps de prise et de durcissement).

Les performances mécaniques.

On peut classer les adjuvants en trois critères :

Ceux qui agissent sur l'ouvrabilité : plastifiants, réducteurs d'eau, Super plastifiants, fluidifiant.

Ceux qui agissent sur la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, antigel.

## **CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES**

---

Ceux qui agissent sur les autres propriétés : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, Hydrofuge.[3]

Les ciments sont produits en portant à une température de 1400 à 1500°C un mélange de calcaire et d'argile, jusqu'à une fusion (clinkérisation) d'un mélange homogénéisé de ces deux composants. Après cuisson, le ciment est préparé sous forme commerciale, en sacs de papier de 50 kg ou en vrac pour un transport vers les chantiers. Il est impératif de le conserver dans des endroits très secs car il perd en qualité au contact de l'humidité (par exemple, après 1 an de stockage, il peut perdre entre 7 et 20 % de ses qualités).

### **III.5.5. Classification des ciments :**

Selon la proportion de laitier, de cendres ou de pouzzolane, ainsi que leur résistance, on distingue plusieurs types de ciments, tels que :

- C.P.A.L : Ciment Portland Artificiel au Laitier.
- C.P.A.C : Ciment Portland Artificiel au Cendre.
- C.P.A.Z : Ciment Portland Artificiel à la pouzzolane.
- C.P.A.L C : Ciment Portland Artificiel au Laitier et au Cendre.
- C.P.A.L Z : Ciment Portland Artificiel au Laitier et à la pouzzolane.
- C.L.X : Ciment à la chaux.
- C.L.K : Ciment de Laitier au Clinker.

Il existe également des ciments spéciaux, utilisés contre les attaques des sulfates acides.

### **III.5.6. Classes de résistance des ciments**

Après la prise de la pâte, sa résistance mécanique est mesurée à l'aide d'éprouvettes normalisées et dans des conditions normalisées. Selon les normes marocaines, les résistances nominales du ciment sont définies en bars pour différentes périodes de temps (2 jours, 7 jours et 28 jours). Les classes de résistance sont également déterminées selon des critères normalisés, permettant une correspondance entre la dénomination normalisée et la classe vraie du ciment.

## III.6. Les fibres

### III.6.1. Généralité

#### III.6.1.1. Définition de fibre

Une fibre est une formation élémentaire, végétale ou animale, d'aspect filamenteux, se présentant généralement sous forme de faisceaux.

Le rôle des fibres, dans une matrice fragile, est le renforcement et la couture de la matrice après la fissuration, donc elles doivent posséder des caractéristiques satisfaisantes. D'autre part les fibres doivent être inertes dans le milieu cimentaire. Les fibres utilisées doivent être avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice. Elles doivent conserver leurs propriétés dans le temps et être compatibles.

#### III.6.1.2. Différents types de fibres

Il existe de nombreux de fibre qu'on peut regrouper en deux catégories selon leurs propriétés mécaniques ; les fibres organiques et les fibres non organiques.

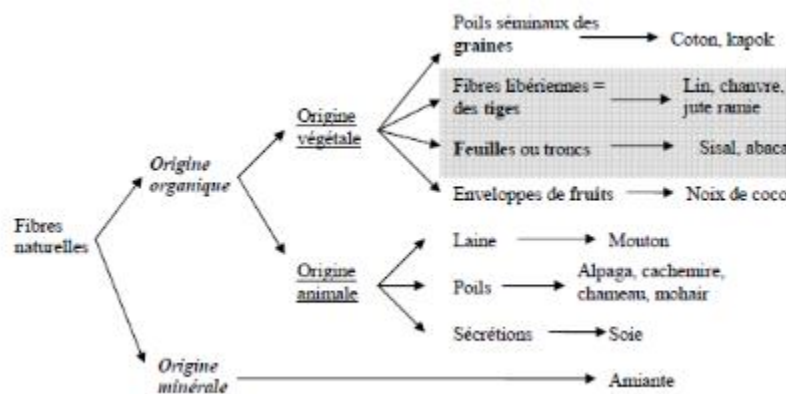


Figure III. 7 Les différents types des fibres

#### III.6.1.2.1. Fibre non organique

Ce sont des fibres minérales telles que l'amiante, la céramiques, le carbone, le bore le verre, les fibres métalliques ; ces fibres ont une bonne résistance à la traction.

La fibre la plus utilisée dans les bétons et mortier hydrauliques, ce sont les fibres métalliques disponibles dans une gamme étendue et sont classées en deux grandes familles, qui se distinguent par leur fonctionnement.

### **III.6.1.2.2. Fibre organique**

Elles se divisent en trois groupes

#### **III.6.1.2.2.1. Fibre animales**

- Fibres d'origine animale (protéiques)
  
- Laine
  
- Alpaga
  
- Chameau
  
- Cachemire
  
- Guanaco
  
- Lapin angora Mohair
  
- Vigogne
  
- Yack
  
- Fibres d'origine minérale (silicatées)
  
- Amiante
  
- Verre
  
- Fer/acier/inox
  
- Argent/or cuivre
  
- Aluminium
  
- Tourbe

L'introduction des fibres dans le béton entraîne une amélioration des caractéristiques mécaniques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la fabrication des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leur nature et leur propriété mécanique :

- fibres minérales : verre, carbone.
  
- fibres métalliques : acier, inox, fonte.
  
- fibres organiques : polypropylène, acrylique.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

- fibres naturelles : Hévée, Sisal, jute ...

Les fibres présentent des caractéristiques et des propriétés différentes : forme des fibres (plate, ondulée...), état de surface (lisse, rugueuse...), dimensions (diamètre, longueur...) et l'adhérence qui garantissent des caractéristiques mécaniques spécifiques aux ouvrages renforcés de fibres.



**Figure III. 8** Exemples des fibres d'acier, de carbone et de polypropylène.

### III.6.1.2.2.1.1. Propriétés générales des fibres

Les fabricants n'arrêtent pas d'améliorer les qualités et les caractéristiques des fibres en les modifiant pour augmenter leur ténacité, en diminuant ou agrandissant leurs extrémités pour rendre leur capacité d'ancrage plus efficace.

Le tableau présente certaines caractéristiques physico-mécaniques des fibres utilisées dans le domaine des ouvrages d'art.

**Tableau III. 2** Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibres	Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Densité (g/m <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (GPa)	Allongement de rupture (%)
Acier	5-500	7,8	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	1,5-3	80
Polypropylène	10-200	0,9	0,4-0,7	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	3	2,3
Carbone	5-9	1,7-2	2-3	0,5-1,5

### III.6.1.2.2.2 Les fibres végétales

Les fibres naturelles d'origine végétale ont été utilisées pour la fabrication des briques renforcées par la paille. Dans les années 1970, le plâtre était le premier liant utilisé avec les

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

fibres végétales. Le plâtre renforcé de fibres végétales a permis de réaliser plusieurs ouvrages [21].

Actuellement le renforcement de béton par des fibres végétales est réalisé avec des méthodes récentes. Suite aux problèmes de santé causés par les fibres d'amiante, plusieurs études sont dirigées vers le remplacement de celles-ci par des fibres naturelles (végétales).

Les filières textile et automobile utilisent beaucoup les fibres naturelles d'origine végétale. Ces fibres présentent des avantages économiques et écologiques mais leur introduction dans le domaine du bâtiment demeure timide surtout en Europe.

Par contre au Canada et au Japon elles sont très utilisées [22].

Les fibres végétales les plus utilisées sont la paille, le chanvre, le lin, le sisal et le bambou (figure III.9).

Ces fibres ont une structure creuse composée principalement de cellulose et possèdent une propriété très hydrophile. Les fibres végétales absorbent l'eau et ce caractère est très important en raison de la méthode de confection des bétons.



**Figure III. 9** Exemples des fibres végétales

Classification des fibres végétales Suivant l'origine des fibres végétales, on peut citer : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

### III.6.1.2.2.1. Les fibres de feuilles

Elles sont obtenues à cause d'un rejet des plantes. Ces fibres sont faites par chevauchement de paquet qui enferme toutes les feuilles afin de rendre les fibres rigides et



## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

résistantes. La fibre de feuille la plus utilisée est la fibre de sisal [25]. Certains chercheurs ont constaté que ce type de fibre améliore les caractéristiques mécaniques de la matrice cimentaire.

### III.6.1.2.2.2. Les fibres de tiges

Ces fibres sont obtenues dans les tiges des plantes. Elles possèdent une bonne rigidité. Ces fibres sont distribuées sous forme de paquet de cor, puis séparées grâce à un processus spécial. Les fibres de tige sont utilisées pour le renforcement des bétons et la fabrication de textile et des cordes. Parmi ces fibres, on trouve : les fibres de jute, de lin et de chanvre [25].

### III.6.1.2.2.3. Les fibres de bois

Ces fibres sont courtes, elles sont obtenues grâce à un broyage des arbres comme le bambou.

### III.6.1.2.2.4. Les fibres de surface

Généralement, les fibres de surface se trouvent sur la surface de la tige des fruits, on peut citer : le coton et la noix de coco.

La résistance à la flexion du ciment a été améliorée grâce à l'incorporation des fibres de coco [26].

### III.6.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Les chercheurs [27] ont montré les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales présentées sur le tableau

**Tableau III. 3** Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Fibres	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)
Coton	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773
Lin	-	2.7-3.2	345-1035
Chanvre	-	1.6	690
Sisal	1.5	2.6	278
Noix de coco	1.2	30	175

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

Les chercheurs [26] ont enregistré que la résistance à la traction des fibres végétales est relative à leur teneur en cellulose.

### III.6.4 Caractéristiques chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales ont une composition chimique basée sur trois constituants :

La cellulose, l'hémicellulose et la lignine [26].

#### III.6.4.1. Cellulose

La cellulose est la principale composante de la fibre végétale.

C'est un polymère naturel et les fibres végétales sont formées par une chaîne de fibres en cellulose.

#### III.6.4.2. Hémicellulose

L'hémicellulose se trouve dans toutes les parois des fibres végétales. Ce constituant permet aux parois des fibres de s'allonger durant la croissance. Ce glucide complexe est responsable de l'élasticité des fibres.

#### III.6.4.3. Lignine

Elle représente la colle qui garantit la liaison entre les fibres végétales. C'est un polymère tridimensionnel.

**Tableau III. 4** Résume la composition chimique des fibres végétales reproduit selon [22].

Fibres	Composition %			
	Cendre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Noix de coco	1.44	32-43	0.15-0.25	40-45
sisal	1.13	66-72	12	10-14
Jute	7.6	63	-	-
Palmier dattier	1.2	41-45	6-10	30-40

### III.6.5. Rôle des fibres

Les chercheurs ont commencé par introduire les fibres pour améliorer les propriétés mécaniques du béton comme la résistance à la traction par flexion, cependant le résultat obtenu était limité [28].

Les fibres ont un rôle essentiel dans le béton, il est présenté sous deux volets :

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

-Diminuer l'ouverture des fissures pour contrôler la propagation d'une fissure dans un béton en état de service, ce phénomène est présenté par la figure 8.a.

- Augmenter la sécurité du matériau lors des états de chargement ultimes par le changement du comportement fragile d'un béton en un comportement ductile (figure III.10).

- Généralement les fibres sont utilisées pour consolider la structure du béton en s'opposant à la croissance des fissures et à leur propagation.

Selon le type de l'ouvrage et la nature du béton, les fibres présentent plusieurs avantages :

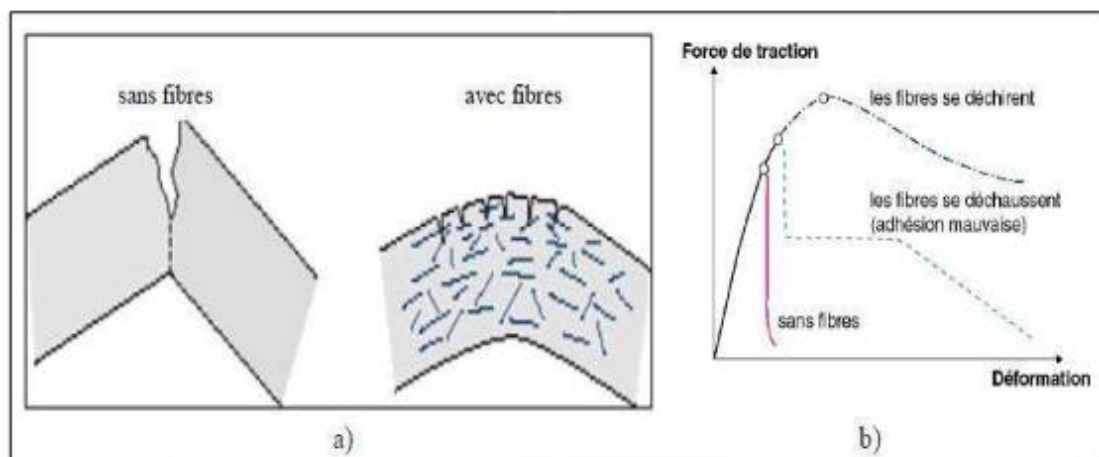
- Amélioration de l'adhérence du béton frais, les fibres rigides modifient la structure du squelette granulaire.

- Diminution de la microfissuration due aux variations dimensionnelles surtout au jeune âge.

- Diminution de la fissuration provoquée par une charge extérieure.

- Augmentation de la ductilité et la résistance à la traction.

- Augmentation de la résistance aux chocs et à la fatigue.



**Figure III. 10** Présentation de l'apport du renfort par des fibres [19].

### III.6.5.1. Processus de couture des fissures

D'après [30], l'objectif d'utilisation des fibres est d'améliorer la résistance à la traction et la ténacité des matériaux, mais pour [31], les fibres sont ajoutées non pas dans le but d'augmenter la résistance à la traction, mais surtout pour limiter la fissuration et modifier le comportement du béton fissuré (figure III.11).

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

La force de traction entraîne la formation des fissures qui se développent dans le béton et les fibres peuvent les couvrir, ce qui se traduit par la diminution de l'ouverture des fissures et retarder ainsi leur propagation. Durant l'ouverture des fissures, les fibres ont la possibilité de se déformer ou glisser suivant leur nature, leur surface et leur géométrie.

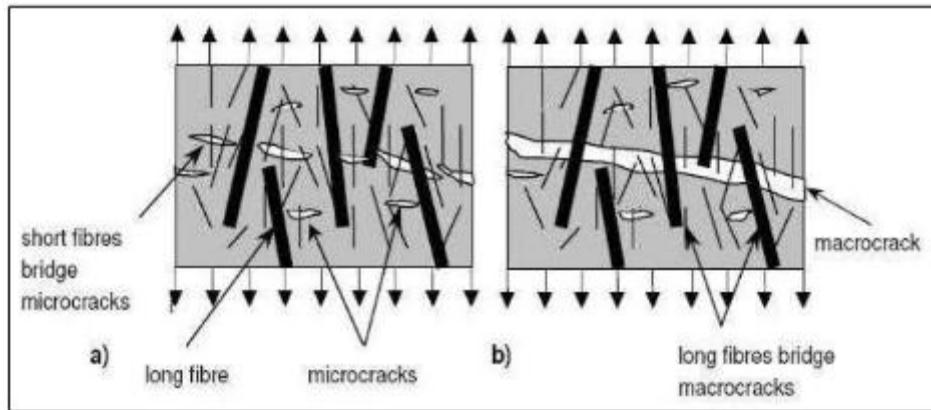


Figure III. 11 Processus de couture

### III.6.6. Le Fibre de diss

Le diss est une plante répandue à l'état sauvage dans plusieurs régions de l'Algérie (figure III.9).

Localement appelé « diss », son nom scientifique est l'ampélodesmos mauritanicus. Cette plante était utilisée dans la réalisation d'habitats ruraux anciens en terre armée de diss. Le contour de la fibre de diss n'est pas lisse et présente des aspérités ainsi qu'une remarquable rugosité. Cependant, comme toutes les autres fibres végétales, La fibre de diss présente aussi une absorption d'eau très importante en raison de sa structure poreuse et large des substances ayant pour effet de retarder la prise du ciment [32] et [33].



a. Plante de diss



b. Tiges de diss



**Figure III. 12** Fibre de diss après concassage et découpage.

Le Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*, famille des Poacées) est une grande graminée répandue dans l'Afrique-du-Nord méditerranéenne

Les matériaux végétaux représentent une source de produits renouvelables utilisés ces dernières décennies dans la construction. Le matériau diss étant fibreux, et résistant à la traction, offre au composite une ductilité comparable à celle d'un béton à fibres classiques, alors que la masse volumique est beaucoup plus réduite. Le manque de bibliographie sur les fibres de diss, confirme sa première utilisation dans la fabrication de composites à base cimentaire. Néanmoins, Savastano Jr H et al'ont utilisé des résidus de sisal, de bananier et d'eucalyptus comme renfort dans des composites cimentaires. Les composites ainsi obtenus présentent des performances mécaniques acceptables

L'utilisation d'une telle plante fibreuse dans une pâte cimentaire offre des résistances aux tractions très intéressantes, qui font de ce matériau léger un excellent remplissage pour les structures soumises aux efforts sismique

Le matériau végétal de base, très fibreux, présente une absorption de l'ordre de 90%. L'utilisation des fibres de diss naturel broyé comme agrégat dans des matrices cimentaires présente un retard de prise assez considérable et des résistances très faibles, alors que les fibres présentent des résistances à la tension considérable. Pour améliorer la contribution des fibres dans les composites à base cimentaire, nous avons donc procédé au traitement par ébullition des fibres de diss pour extraire les substances causes de la mauvaise liaison entre les fibres et la pâte de ciment. Nous avons constaté que le traitement à l'eau bouillie a été très efficace, et a bien amélioré les propriétés mécaniques du composite.

## CHAPITRE III : GENERALITE SUR LES LIANTS ET LES FIBRES

### III.6.6.1. Traitement des fibres de diss

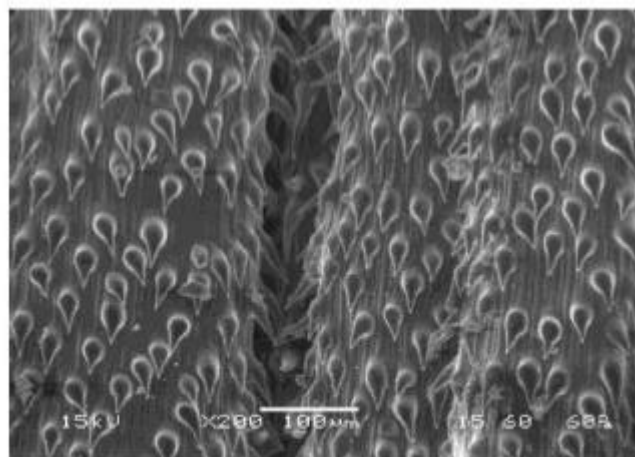
Afin de rechercher quelques améliorations sur certaines caractéristiques des composites étudiées, nous avons pensé à traiter les fibres de diss avant de les incorporer dans le sol. Ce traitement n'affecte pas la surface de la fibre, il consiste à broyer et à faire bouillir les fibres de diss dans l'eau pendant trois heures. Elles sont ensuite rincées et séchées avant leur utilisation, permettant d'éliminer des substances organiques ayant pour effet de retarder la prise et le durcissement du ciment et de provoquer une mauvaise liaison entre la fibre et la matrice cimentaire [32] et [33].

Mélange :	Début de prise	Fin de prise
Ciment + eau distillée :	2h23min	5h10min
Ciment + eau du robinet :	2h38min	5h40min
Ciment + eau d'extraction du diss bouilli :	3h26min	7h00min

### III.6.6.2. Microstructure et caractéristiques des fibres de diss

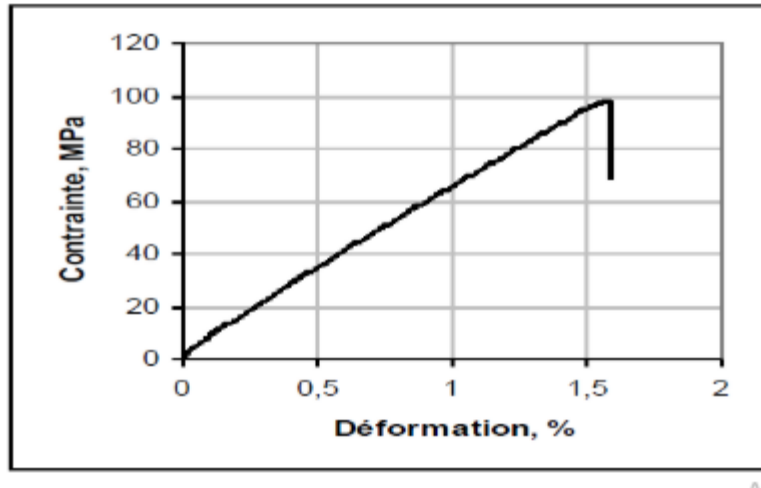
L'observation de la fibre de diss au MEB, montre que son contour n'est pas lisse et sa surface contient des épines qui jouent un rôle très important, pouvant améliorer l'adhérence à la matrice cimentaire (figure III.10). Il faut signaler que ces fibres garantissent les meilleurs résultats de point de vue de résistance à la traction [32] et [33].

C'est pour cette raison que notre choix s'est porté sur ces fibres.



**Figure III. 13 :** Surface de la fibre de diss [33]

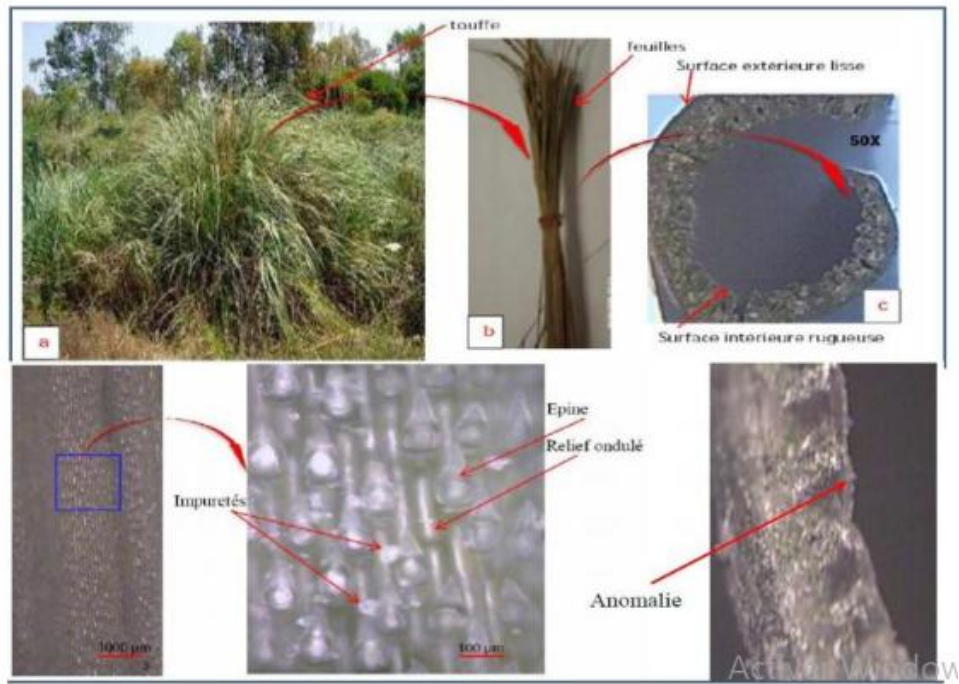
La courbe (contrainte  $\hat{R}$  déformation) de traction montre que la fibre de diss a une résistance de 100MPa.



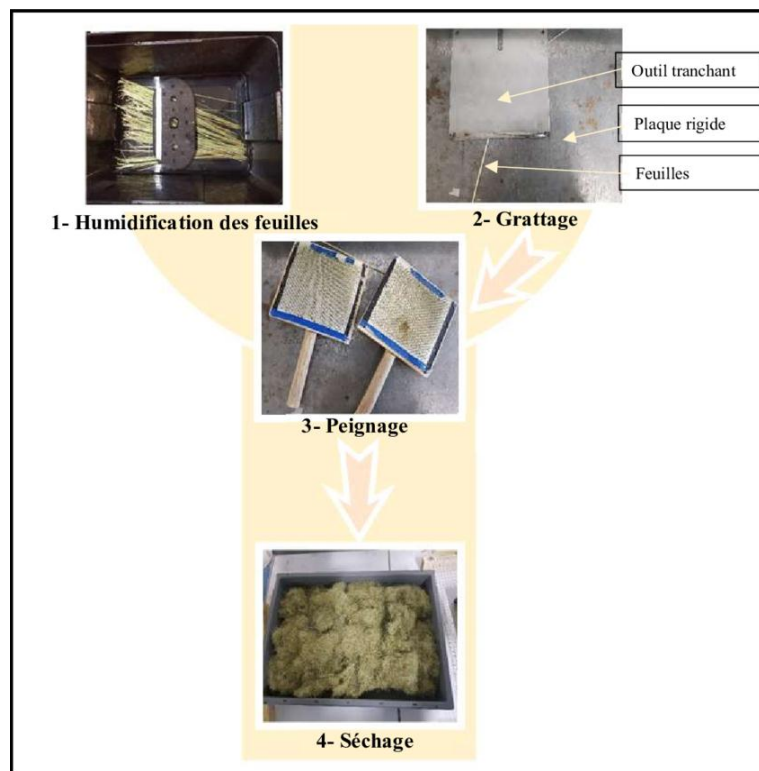
**Figure III. 14** Présente le comportement de la fibre en traction directe.

**Tableau III. 5** Caractéristiques des fibres de diss [33]

Désignation	Valeurs	Unités
Longueur	12	mm
Largeur	1 à 1,2	mm
Épaisseur	0,2 à 0,4	mm
Masse Volumique	1,23	g/cm <sup>3</sup>
Résistance à la traction	100	MPa
Module d'élasticité	6690	MPa
Absorption d'eau après 24h		
Non traitée	88	%
Traitée à l'eau bouillante	82	%



**Figure III. 15** Morphologie de fibre de diss



**Figure III. 16** Méthode d'extraction manuelle des fibres de Diss



### **III.7. Conclusion**

Nos travaux visent à contribuer au développement d'un matériau de l'industrie local en prenant en compte les exigences du contexte environnemental actuel et l'abondance des produits locaux (la fibre de Diss).

***CHAPITRE IV : ESSAIS  
EXPERIMENTAUX ET  
ANALYSE DES  
RESULTATS***

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons en détail le sol étudié et son utilisation. Nous présentons les différentes techniques de caractérisation du sol ainsi que la méthodologie d'étude adoptée. Cette méthodologie permet de déterminer la faisabilité de l'utilisation de ce matériau. Notre recherche s'est concentrée sur le sol de Ben Djerrah afin d'évaluer sa viabilité technique pour la fabrication de briques en terre crue (BTC).

### IV.2. Situation géographique et caractéristiques du sol utilisé

Le gisement de Kaolin de Bendjerrah se trouve à 7 km du sud de la ville de Guelma, À côté de la briqueterie de Benouhiba. L'utilisation de l'argile de Bendjerrah est une autre source de ce matériau. Cette argile sert comme matériau de base pour la construction de brique en terre cuite depuis les années quatre-vingt-dix du siècle précédent. La superficie sur laquelle la briqueterie de Benouhiba est construite est estimée à une vingtaine d'hectares (Figure IV.1). La fabrication des briques nécessite une consommation très énorme de l'énergie et un dégagement d'une quantité non négligeable de dioxyde de carbone.



**Figure IV. 1** Gisement de Kaolin de Bendjerrah

### IV.3. Matériaux

#### IV.3.1 Procédure de traitement de fibre

Les fibres ont été découpées en longueurs appropriées avant d'être séchées au four à une température de 60°C pendant 24 heures jusqu'à atteindre une masse constante, afin de minimiser l'influence de la teneur en humidité et de standardiser les caractéristiques physiques des tiges. La température de séchage a été choisie à 60°C car elle permet un séchage relativement rapide des fibres, ce qui est favorable pour le développement industriel du processus, sans modifier la structure chimique des fibres. Après le processus de séchage, les

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

---

fibres ont été soumises à un traitement chimique en utilisant de l'hydroxyde de sodium à différentes concentrations et pour différentes durées de traitement, afin de quantifier l'effet de la concentration et du temps de traitement sur les propriétés des fibres.



**Figure IV. 2** Les fibres avec NaOH



**Figure IV. 3** Hydroxyde de sodium(NaOH)

### IV.3.2. L'alcool polyvinylique (PVA)

L'alcool polyvinylique (PVA, parfois appelé PVOH) est un polymère hydrosoluble largement utilisé dans les adhésifs, les peintures, les mastics, les revêtements, les textiles, les plastiques, etc. Le polymère est normalement fourni sous forme de poudre et plusieurs grades en termes de viscosités et caractéristiques de solubilité sont disponibles.

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

### IV.3.3. Acétate de Polyvinyle (PVA)

Le PVA est un polymère synthétique hydrosoluble, connu pour sa forte adhésion, sa flexibilité et sa résistance à l'eau après durcissement. En stabilisation des sols, le PVA renforce la cohésion entre les particules et améliore la résistance au cisaillement du sol.



Figure IV. 4 L'alcool polyvinylique (PVA)

Petra Chemicals Co., Limited  
Rm C, 18/F Hua Chiao Commercial Center, 678 Nathan Road, Mongkok, Kowloon, Hongkong  
Tel: +8571 8823 7621, Mobile: +86 187 571 5264, Email: assistant.pec@petrachemicals.com, Website: www.petrachemicals.com

### Povol® (26-88 L)

POLYVINYL ALCOHOL

#### Technical Data Sheet

Specification:

Alcoholysis Degree	86.0-90.0%
Volatile	5 % max
Sodium acetate	2.5% max
Ash	0.7% max
P.H. Value	5-7
Viscosity	60-64 mpa.s
Formula	(CH <sub>2</sub> CHOH) <sub>n</sub>

Packing: In Paper bag of 25 kg net with plastic lining or 800 kgs big bag on pallets net each.

Uses: Mainly used in Textile sizing material, bond, coating, emulsifier, soil modifying agent, etc.

For and on behalf of  
Petra Chemicals Co., Limited

.....  
Authorized Signature(s)

Figure IV. 5 La fiche technique de PVA

### IV.3.4. Préparation de la solution de PVA

Une fois la poudre entièrement dispersée, le mélange est chauffé à la température à laquelle le polymère est solubilisé (de 90 à 98°C - cela dépend du grade PVA utilisé). Le mélange se poursuit à cette température jusqu'à ce que le PVA soit complètement solubilisé. En fonction de la qualité du matériau et de l'efficacité du système d'agitation, cela peut prendre un certain temps.



Figure IV. 6 Méthode de préparation de PVA

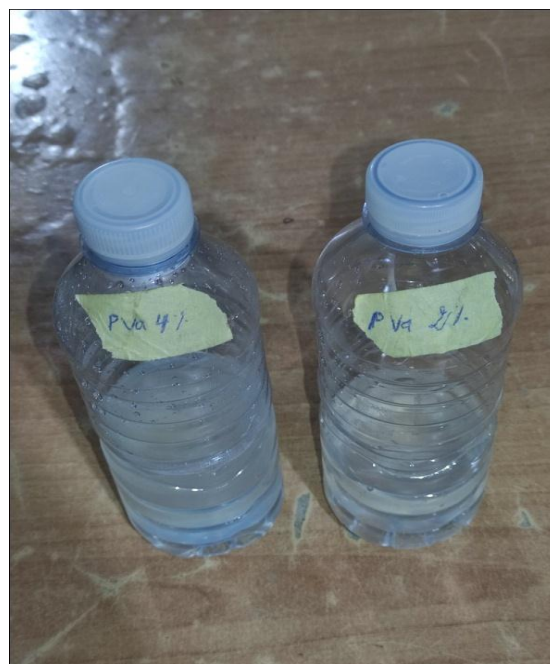


Figure IV. 7 Solution de PVA avec différent dosage

### IV.3.5. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique couramment utilisé en construction. En réagissant avec l'eau, il forme une pâte qui durcit et confère au sol des propriétés mécaniques améliorées, notamment une résistance accrue à la compression. En géotechnique, le ciment est utilisé pour renforcer et stabiliser les sols, améliorant leur capacité portante et leur durabilité.



**Figure IV. 8** Le ciment

### IV.3.6. Effet de l'Ajout de PVA et de Ciment sur les Propriétés Mécaniques des Sols

L'amélioration des sols est une technique cruciale en ingénierie géotechnique, particulièrement dans les régions où les sols naturels ne possèdent pas les propriétés mécaniques adéquates pour supporter des infrastructures. L'utilisation de liants comme le ciment, combiné avec des polymères tels que l'acétate de polyvinyle (PVA), s'est avérée efficace pour améliorer les caractéristiques du sol. Ce chapitre examine l'effet combiné de ces deux additifs sur les propriétés mécaniques des sols, avec un focus particulier sur l'essai de compression

## IV.4. Essais d'identification

Dans les études géotechniques, les essais d'identifications sont des tâches principales. Ces essais sont effectués comme suit :

### IV.4.1. Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057

La composition granulométrique influence de façon primordiale le comportement physique et mécanique du sol et toutes les propriétés liées à la teneur en eau et aux fluctuations de celle-ci (compacité, plasticité, portance, capacité de rétention, perméabilité, capillarité). La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais: le tamisage par voie humide et la sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057 successivement. L'analyse granulométrique consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché (Figure

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

---

IV.10) au moyen d'une série de tamis (Figure IV.9) 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. La fraction fine de taille inférieure à  $80\mu\text{m}$  est reprise pour faire l'essai de sédimentométrie. Cet essai permet de fournir la distribution des tailles des particules fines par le biais de la vitesse de décantation qui est liée à leurs dimensions. La loi de Stokes donne dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. Les particules passant  $80\mu\text{m}$  séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défoulant. Les particules décantent à différentes vitesses en relation avec leur taille. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la masse volumique de la solution qui évolue au fur et à mesure qu'elle se décante.



**Figure IV. 9** Lavage du sol étudié



**Figure IV. 10** Tamisage du sol étudié





**Figure IV. 11** Les particules fines dans un l'étuve



**Figure IV. 12** Les particules fines sèches

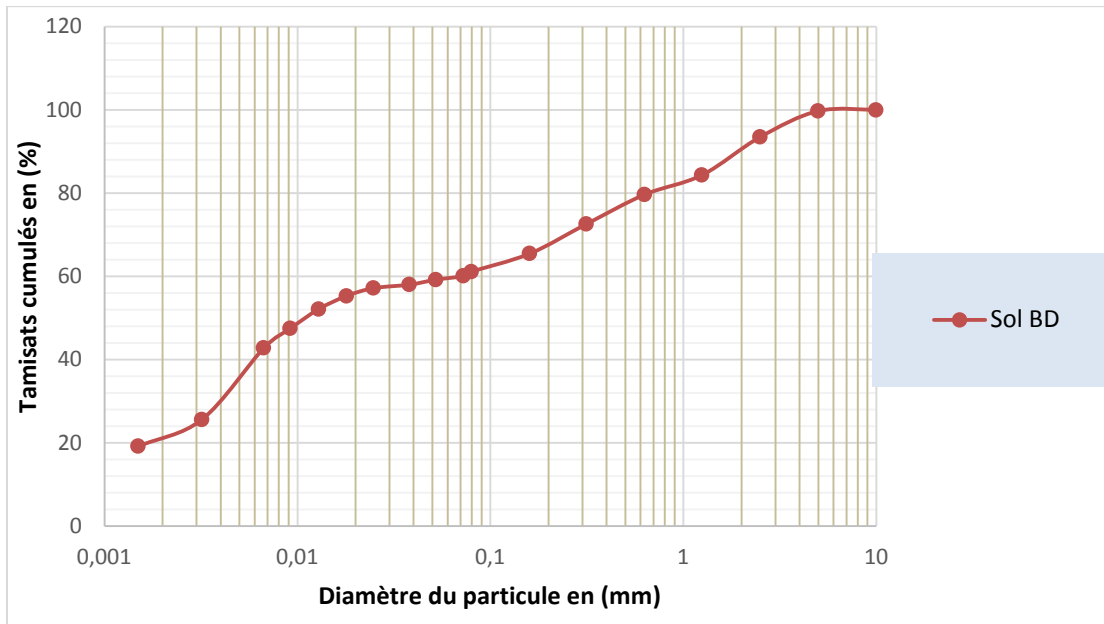


**Figure IV. 13** Essai de sédimentation

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

**Tableau IV. 1** Données des essais d'analyse granulométrique et la sédimentométrie

<b>Masse total de l'échantillon= 1000 gr</b>					
<b>tamis (mm)</b>	<b>Refus partiels(g)</b>	<b>Refus partiels (%)</b>	<b>Refus cum (g)</b>	<b>Refus cum (%)</b>	<b>passant (%)</b>
<b>10</b>	0	0	0	0	<b>100</b>
<b>5</b>	2,5	0,3	2,5	0,25	<b>99,75</b>
<b>2,5</b>	62,5	6,3	65	6,50	<b>93,50</b>
<b>1,25</b>	91,4	9,1	156,4	15,64	<b>84,36</b>
<b>0,63</b>	46,9	4,7	203,3	20,33	<b>79,67</b>
<b>0,315</b>	70,6	7,1	273,9	27,39	<b>72,61</b>
<b>0,16</b>	71,3	7,1	345,2	34,52	<b>65,48</b>
<b>0,08</b>	43,2	4,3	388,4	38,84	<b>61,16</b>
<b>0,0727</b>					<b>60,1</b>
<b>0,0522</b>					<b>59,22</b>
<b>0,0381</b>					<b>58,03</b>
<b>0,0248</b>					<b>57,18</b>
<b>0,018</b>					<b>55,32</b>
<b>0,0129</b>					<b>52,16</b>
<b>0,0092</b>					<b>47,53</b>
<b>0,0067</b>					<b>42,84</b>
<b>0,0032</b>					<b>25,63</b>
<b>0,0015</b>					<b>19,2</b>



**Figure IV. 14** Courbe granulométrique du sol étudié

### IV.4.2. Essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068

L'essai au bleu de méthylène, également connu sous le nom d'essai à la tâche, est réalisé conformément à la norme NF P94-068. Cette évaluation permet de juger de manière globale l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains d'argile. Pour ce faire, des molécules de bleu de méthylène sont fixées sur les grains d'argile, et par le biais d'un test simple, la quantité de bleu fixée est évaluée. Cette quantité permet de déterminer la valeur au bleu du sol (VBS), un indicateur essentiel dans la classification des sols. Les figures IV.15 et IV.16 illustrent les différentes étapes de l'essai au bleu de méthylène, conformément la norme AFNOR NF P 94-068.



**Figure IV. 15** Equipement pour l'essai VBS



**Figure IV. 16 : Résultats de VBS**

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau IV.2

**Tableau IV. 2** Tableau récapitulatif de l'essai VBS

<b>Poids de Sol (g)</b>	<b>30</b>
<b>Fraction 0/1(mm)</b>	0,01
<b>Volume de bleu (cm<sup>3</sup>)</b>	175
<b>Masse de bleu (g)</b>	1,75
<b>VBS</b>	6

B : masse de bleu introduite (solution à 0/1) :  $B = V \cdot 0,01$

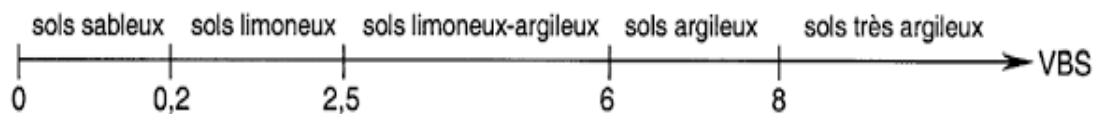
$$B = 175 \times 0,01 = 1,75 \text{ g}$$

$VBS = B/m_0 \cdot C \cdot 100$  Si :  $D_{max} > 5\text{mm}$ .

$VBS = (B/m_0) \cdot 100$  Si :  $D_{max} < 5\text{mm}$ .

$$\text{Donc : } VBS = (1,75/30) \cdot 100 = 5,83 \approx 6$$

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines. La (figure IV.17) montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

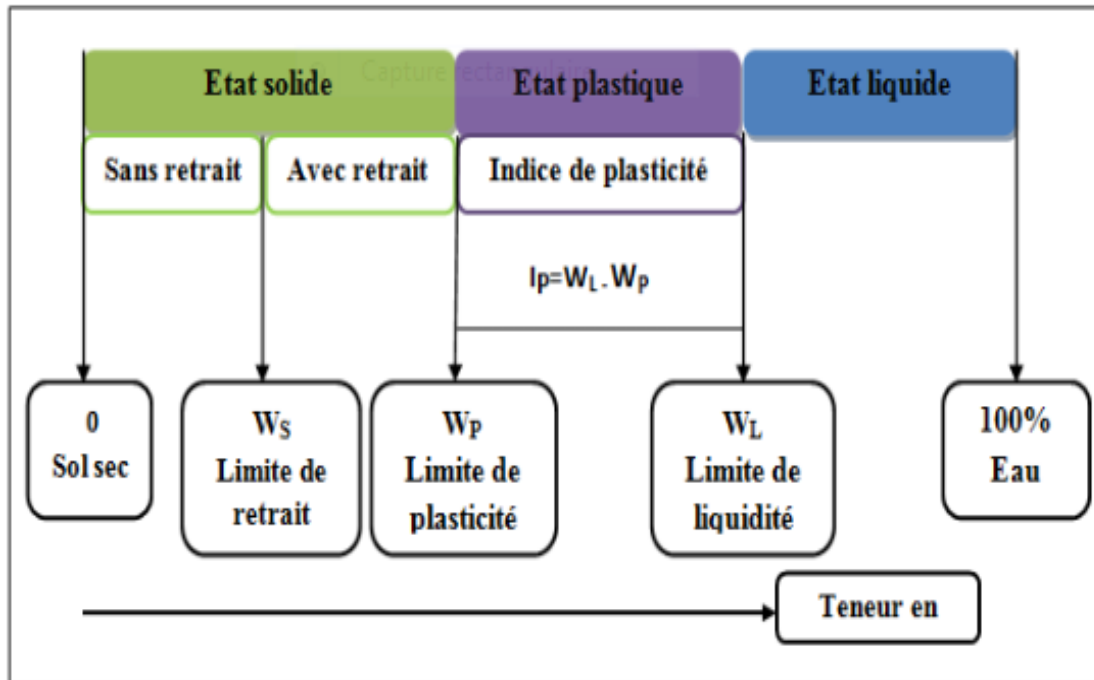


**Figure IV. 17** La classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène

D'après les résultats trouvés ( $VBS=6$ ) le sol est : **Un sol argileux**

### IV.4.3. Limites d'Atterberg (NORME NF P 94-051)

Le diagramme montré à la figure IV.18 donne une idée sur la variation de la consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau et la limite de liquidité, limite de plasticité et limite de rétrécissement correspondant.



**Figure IV. 18** Diagramme variation de la consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau.

#### IV.4.3.1. Limite de liquidité ( $W_L$ )

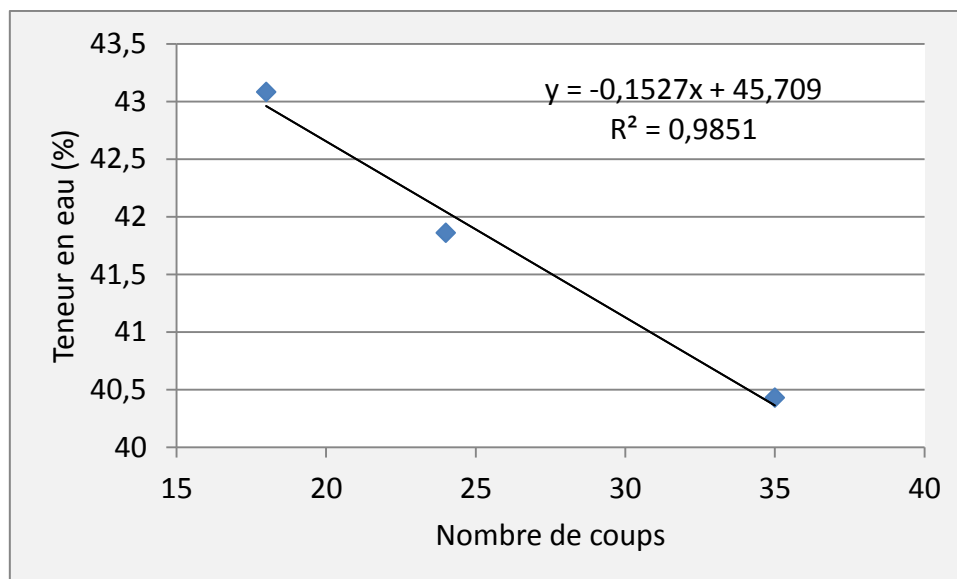
La détermination de la limite de liquidité a été réalisée à l'aide de l'appareil de Casagrande, comme illustré dans la figure. Cet essai est effectué sur la fraction du sol passant à travers un tamis de  $400\mu\text{m}$  d'ouverture. La limite de liquidité représente la teneur en eau à laquelle le sol cesse d'être plastique pour devenir liquide lorsqu'on lui ajoute de l'eau. Cette limite est identifiée lorsque le sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après 25 coups, comme illustré dans la figure IV.19, à l'intérieur d'une coupelle conçue à cet effet, avec une fréquence de deux chutes par seconde et une hauteur de chute de 1 cm. Cet essai est spécifiquement réalisé sur les particules fines du sol et implique la variation de la teneur en eau de ces particules tout en observant leur consistance. En outre, il permet de classer le sol en fonction de ses caractéristiques.



**Figure IV. 19** Sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après être tombé 25 fois.  
Le tableau IV.3 résume l'ensemble des résultats obtenus à par l'essai de l'appareil de Casagrande.

**Tableau IV. 3** Résultats de la limite de liquidité

N° de l'essai	1	2	3
N° de coups	18	24	35
Poids total humide	22,68	23,46	24,14
Poids total sec	18,85	19,58	20,17
Poids de la tare	9,96	10,31	10,35
W (%)	43,08	41,86	40,43



**Figure IV. 20** Détermination de la limite de liquidité

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à 25 coups. Elle est donc égale à  $W_L = 41.9\%$ .

### IV.4.3.2. Limite de plasticité $W_p$

En ce qui concerne la limite de plasticité  $W_p$ , l'essai vise à déterminer la teneur en eau pour laquelle un échantillon de sol, de dimensions spécifiées et façonné manuellement, se fissure en morceaux d'une longueur comprise entre 1 cm et 2 cm, conformément à la norme NF P94-051. Tout comme pour la limite de liquidité, cet essai est réalisé sur la fraction du sol passant à travers un tamis de 400 $\mu$ m d'ouverture. Les échantillons sur lesquels sont effectués les essais de limite de plasticité, ainsi que les résultats correspondants, sont présentés dans la figure IV.21 et le tableau IV.4.



**Figure IV. 21** Détermination de la limite de plasticité

**Tableau IV. 4** Résultats de la limite de plasticité

	Essai 01	Essai 02	Essai 03
<b>Masse de la tare</b>	7,10	9,90	10,40
<b>Masse totale humide</b>	8,78	11,48	11,87
<b>Masse totale sec</b>	8,50	11,20	11,60
<b>Masse d'eau</b>	0,28	0,28	0,27
<b>Masse Sole sec</b>	1,40	1,30	1,20
<b>W %</b>	20,00	21,54	22,08

La limite de plasticité est la moyenne des trois teneurs en eau indiquées au tableau IV.4. Elle est égale à :  $W_p = 21,20 \%$

IP est l'indice de plasticité; c'est la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, il caractérise l'étendue ou la zone où le sol étudié à un comportement plastique.

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

$$I_p = W_L - W_P = 41.9 - 21.2 = 20,70\% \approx 21\%$$

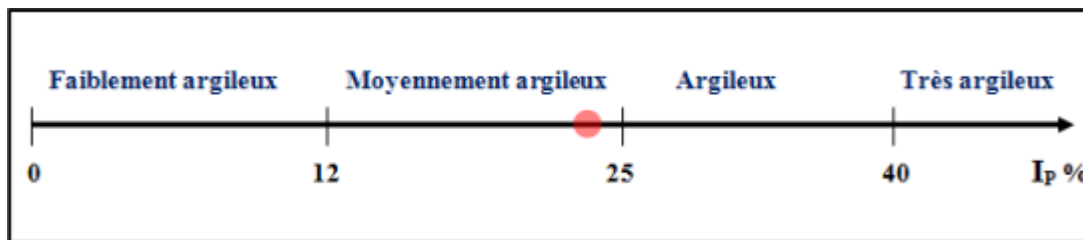
D'après ce qui est trouvé, on peut donner la classification du sol étudié.

Indice de plasticité	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

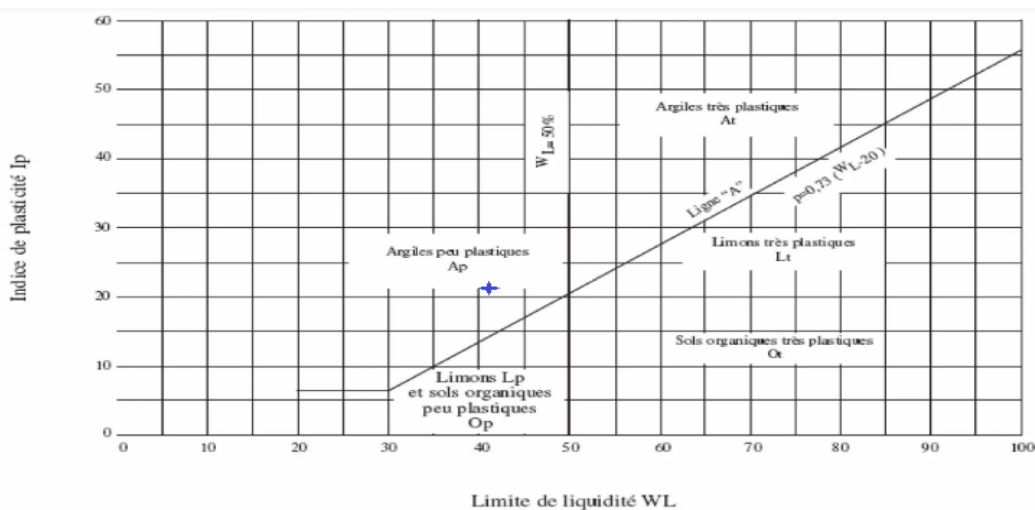
**Figure IV. 22** Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité

L'état du sol est Plastique (figure IV.22)

Le diagramme de la figure IV.23 et l'abaque de Casagrande (figure IV.24) montrent les différents intervalles d'argilosité.



**Figure IV. 23** Seuils d'Argilosité



**Figure IV. 24** Abaque de Casagrande

Ce sol est une argile moyennement (peu) plastique.



## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

Le tableau IV.5 montre les résultats des limites d'Atterberg pour quatre différents minéraux d'argile.

**Tableau IV. 5** Limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (MONACO A. ET CHASSEFIERE B.1976)

	Smectite	Attapulgite	Illite	Kaolinite
WL	100 à 1000	150 à 270	60 à 90	30 à 75
WP	50 à 100	100 en moyenne	25 à 60	20 à 40
IP	75 à 125	20 en moyenne	25 à 50	10 à 40

D'après le tableau IV.5, on note que le sol étudié est une argile de type Kaolinite.

### IV.5. Classification du sol étudié

#### IV.5.1. Selon GTR selon NF P11-300

En tenant compte des résultats d'Analyse granulométrique et limites d'Atterberg et du bleue méthylène, le sol en question peut être classifié selon GTR, comme le montre le tableau IV.6.

**Tableau IV. 6** Classification des sols fins selon GTR

NF P11-300

Classe <b>A</b>		Tableau 1 - <b>Classification des sols fins</b>			
Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	<b>A</b>	VBS ≤ 2,5 <sup>(1)</sup> OU I <sub>p</sub> ≤ 12	<b>A<sub>1</sub></b> Limos peu plastiques, loess, siltos alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 3 ou W <sub>h</sub> ≥ 1,25 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> th
				3 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 8 ou 1,10 ≤ W <sub>h</sub> < 1,25 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> h
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 1,1 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> m
				0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub> W <sub>h</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> s A <sub>1</sub> ts
		12 < I <sub>p</sub> ≤ 25 <sup>(1)</sup> OU 2,5 < VBS ≤ 6	<b>A<sub>2</sub></b> Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 2 ou I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> ≤ 0,9 ou W <sub>h</sub> ≥ 1,3 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> th
				2 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 5 ou 0,9 ≤ I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> < 1,05 ou 1,1 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 1,3 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> h
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I <sub>c</sub> ≤ 1,2 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 1,1 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> m
				1,2 < I <sub>c</sub> ≤ 1,4 ou 0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub> I <sub>c</sub> > 1,3 ou W <sub>h</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> s A <sub>2</sub> ts
		25 < I <sub>p</sub> ≤ 40 <sup>(1)</sup> OU 6 < VBS ≤ 8	<b>A<sub>3</sub></b> Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 1 ou I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> ≤ 0,8 ou W <sub>h</sub> ≥ 1,4 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> th
				1 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 3 ou 0,8 ≤ I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> < 1 ou 1,2 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 1,4 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> h
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I <sub>c</sub> ≤ 1,15 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 1,2 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> m
				1,15 < I <sub>c</sub> ≤ 1,3 ou 0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>h</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub> I <sub>c</sub> > 1,3 ou W <sub>h</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> s A <sub>3</sub> ts
I <sub>p</sub> > 40 <sup>(1)</sup> OU VBS > 8	<b>A<sub>4</sub></b> Argiles et argiles marnées, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique			A <sub>4</sub> th
					A <sub>4</sub> h
					A <sub>4</sub> m
					A <sub>4</sub> s

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

### IV.5.2. Selon AASHTO

La classification AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) constitue une version plus avancée de la classification de Terzaghi (1929) et est largement utilisée en géotechnique routière.

Dans le système de classification AASHTO, il existe huit groupes de sol (A-1 à A-8) avec plusieurs sous-groupes. Les seuls essais nécessaires sont l'analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous présente la classification AASHTO couramment utilisée.

Les sols granulaires sont répartis dans les catégories A-1 à A-3, les sols de la catégorie A-1 étant bien gradués, tandis que ceux de la catégorie A-3 sont des sables propres et uniformes en granulométrie. Les sols de la catégorie A-2 contiennent un pourcentage significatif de particules fines (jusqu'à 35 % passant le tamis N0. 200).

Les catégories A-4 à A-7 comprennent des limons et des argiles, leur classification reposant sur les limites d'Atterberg. Les zones avec des valeurs spécifiques de WL et de  $I_p$  sont attribuées à chaque groupe A-4 à A-7 ainsi qu'à des sous-groupes de A-2. Les sols fortement organiques, tels que les tourbes, sont généralement classés dans le groupe A-8. Comme dans le système Unified Soil Classification System (USCS), les sols de type A-8 sont classés sur la base d'un examen visuel.

**Tableau IV. 7** Tableau de classification AASHTO

General Classification	Granular materials (35% or less passing No. 200 Sieve (0.075 mm))							Silt-clay Materials More than 35% passing No. 200 Sieve (0.075 mm)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
(a) Sieve Analysis: Percent Passing											
(i) 2.00 mm (No. 10)	50 max		51 min								
(ii) 0.425 mm (No. 40)	30 max	50 max	51 min								
(iii) 0.075 mm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
(b) Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
(i) Liquid limit				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
(ii) Plasticity index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
(c) Usual types of significant constituent materials.	Stone Fragments Gravel and sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
(d) General rating as subgrade.	Excellent to Good							Fair to Poor			

\* If plasticity index is equal to or less than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-5 (i.e. PL > 30%)  
 If plasticity index is greater than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-6 (i.e. PL < 30%)

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

D'après le tableau IV.7 ce sol est de class A-7-6 selon le passant A 0,075mm,  $W_1$   $W_p$  et  $I_p$  nous pouvons alors dire que c'est un **sol argileux**.

### IV.5.3. Essai Proctor normal selon la norme NF 94-093

Cette norme définit les caractéristiques de compactage d'un sol, notamment la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$  en %) et la masse volumique sèche maximale ( $\rho_d$  max). L'essai Proctor normal repose sur le principe de l'humidification d'un matériau à différentes teneurs en eau, suivi de son compactage à l'aide d'une dame normalisée, pour chaque teneur en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, la masse volumique sèche du matériau est déterminée et une courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau est tracée.



**Figure IV. 25** Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor normal.

Les résultats de l'essai Proctor Normal sont rapportés au tableau IV.8

**Tableau IV. 8** Résultats de l'essai Proctor Normal

Essai N°	essai1	essai2	essai3	essai4	essai5	essai6	essai7
Teneur en eau estimée (%)	10	12	14	16	18	20	22
Masse moule (g)	4267	4267	4267	4267	4267	4267	4267
Masse moule + sol humide (g)	5807	5870	5929	5981	6025	6045	6038
Masse sol humide (g)	1540	1603	1662	1714	1758	1778	1771
Volume moule (cm <sup>3</sup> )	955,55	955,55	955,55	955,55	955,55	955,55	955,55
$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,612	1,678	1,739	1,794	1,840	1,861	1,853
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,465	1,498	1,526	1,546	1,559	1,551	1,519

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

Les résultats de l'essai Proctor normal sont illustrés à la figure IV.27.

### IV.5.4 Essai de Proctor modifié

Cet essai normalisé (NF P 94-093) permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée) et par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense, ce dernier a été choisi pour mener cette investigation. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de  $\rho_d$  en fonction de  $w$  (%), on obtient une courbe encoche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ».



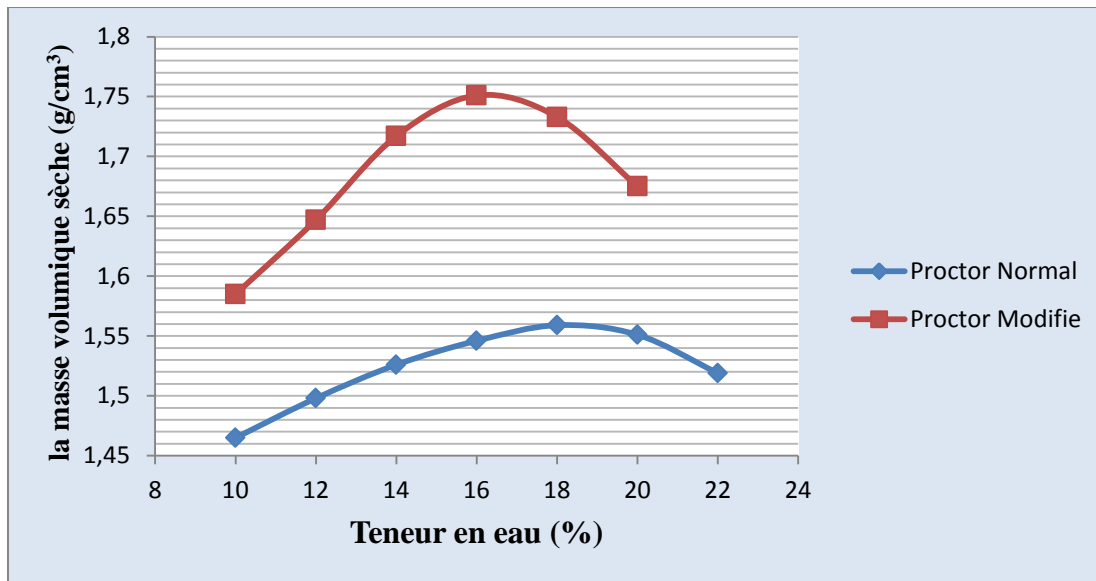
Figure IV. 26 Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor modifié.

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont rapportés au tableau IV.9.

Tableau IV. 9 Résultats de l'essai Proctor modifié.

Essai N°	essai1	essai2	essai3	essai4	essai5	essai6
Teneur en eau estimée (%)	10	12	14	16	18	20
Masse moule m(g)	4235	4235	4235	4235	4235	4235
Masse moule+sol humide mh(g)	5901	5998	6105	6176	6189	6156
Masse sol humide (g)	1666	1763	1870	1941	1954	1921
Volume moule (cm <sup>3</sup> )	955,550	955,550	955,550	955,550	955,550	955,550
$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,743	1,845	1,957	2,031	2,045	2,010
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,585	1,647	1,717	1,751	1,733	1,675

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont illustrés à la figure IV.27.



**Figure IV. 27** Courbes de l'essai Proctor normal et modifié

D'après la figure IV.27, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai sont rapportés au tableau IV.10.

**Tableau IV. 10** : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai

	Proctor normal	Proctor modifié
<b>Wopt (%)</b>	18,1	16,2
<b><math>\rho_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,56	1,76

### IV.6. Positionnement du sol naturel (SN) par rapport aux recommandations pour les BTC

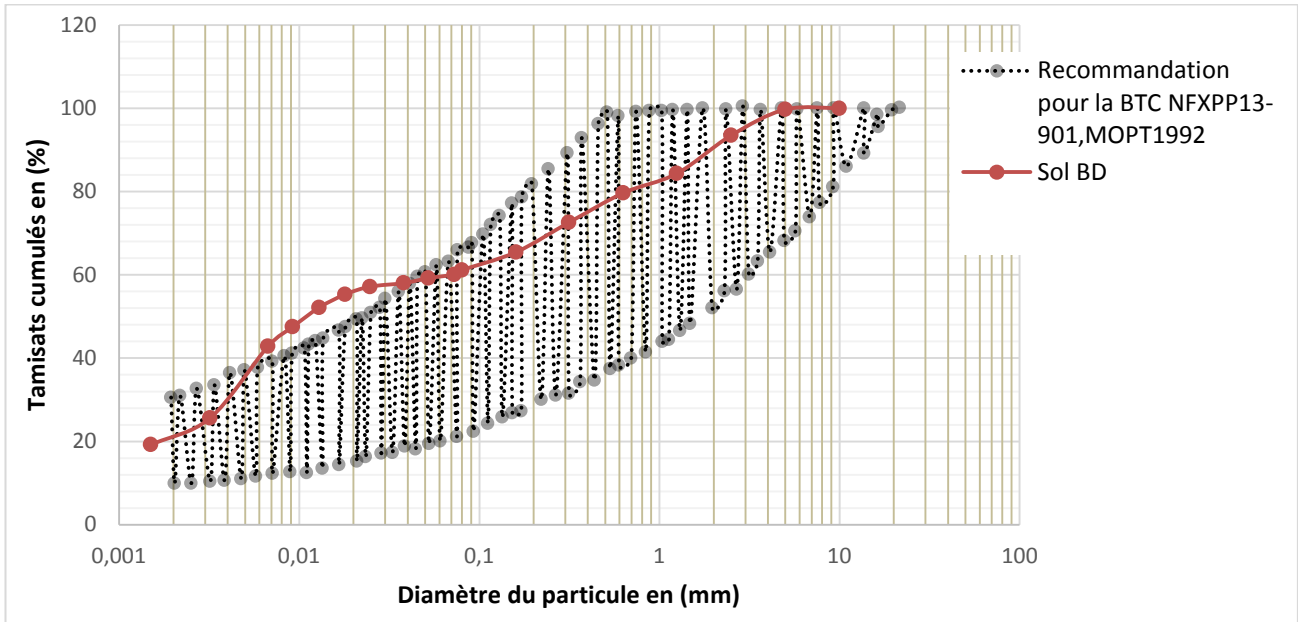
La norme NF XP P13-901 (2001) ainsi que les recommandations de CRATERre-EAG (1998), MOPT (1992), Jimenez et al. (2007), et Houben and Guillaud (1994) détaillent les critères relatifs à la granulométrie, à la plasticité, à la densité et à la résistance que doivent respecter les matériaux destinés à être utilisés dans la construction des Blocs de Terre Compressée (BTC).

#### IV.6.1. Vis-à-vis de la granulométrie

La figure IV.28 présente la courbe de distribution granulométrique. Le fuseau défini par les normes NF XP P13-901 (2001) et MOPT (1992) est indiqué en pointillés. Il est

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

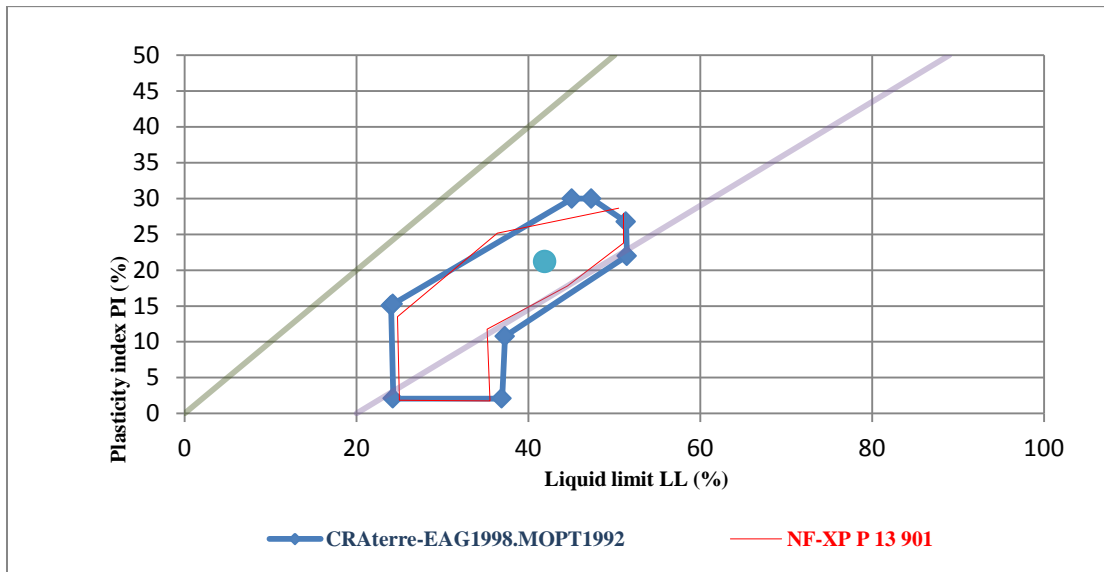
important de noter que la courbe granulométrique du sol naturel se situe de manière satisfaisante (à plus de 70 %) par rapport au fuseau granulométrique. Ainsi, ce matériau peut être choisi à l'état naturel pour la fabrication des Blocs de Terre Compressé (BTC).



**Figure IV. 28** Distribution granulométrique du sol naturel et le fuseau recommandé pour le BTC

### IV.6.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg

Dans le diagramme de Casagrande, les valeurs de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité du sol naturel sont représentées dans le plan (LL, PI) (voir figure IV.29 ). Les deux fuseaux recommandés par les normes NF XP P13-901 (2001) et MOPT (1992) sont également représentés sur ce même plan. Il est observé que le sol naturel se situe au-dessus de la droite (A) définie par l'équation  $IP = 0.73 (LL-20)$ . De plus, il se trouve à l'intérieur des fuseaux normalisés, ce qui le rend approprié pour être utilisé dans la fabrication des Blocs de Terre Compressée (BTC).



**Figure IV. 29 :** Limites d'Atterberg du sol naturel et le fuseau recommandé pour BTC

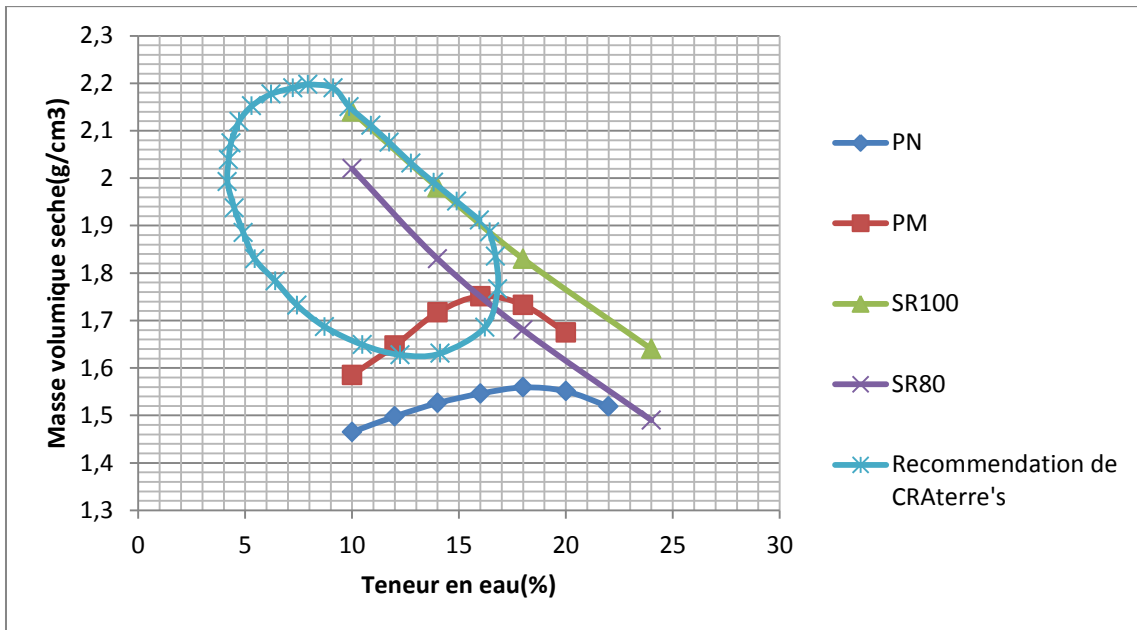
### IV.6.3. Vis-à-vis du compactage

Les courbes de compactage à l'optimum de Proctor Normal (PN) et à l'optimum de Proctor Modifié (PM) du matériau naturel (SN) sont représentées dans le plan. Sur ce même plan, nous avons positionné le domaine du couple recommandé par Moevus et al. [2012], Houben and Guillaud [1994] et Minke [2006]. On constate que pour l'énergie SPO, la masse volumique sèche maximale est bien au deçà du fuseau recommandé, qui borne la teneur en eau de 18.1% et la masse volumique sèche maximale de 1.56 g/cm<sup>3</sup>(figure4.28), mais pour l'énergie PM, le point correspondant à la masse volumique sèche maximale de 1.76 g/cm<sup>3</sup>et à la teneur en eau optimale de 16.2% est bien dans le fuseau recommandé.

Le tableau IV.11 résume les différentes valeurs du poids volumique et la teneur en eau relevées dans la littérature concernant la mise en œuvre des BTC.

**Tableau IV. 11 :** Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC. [11]

Référence	Technique	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wi (%)
Craterre2012	BTC	16 à 22	5 à 15
Jiménez 2007	BTC	17.5 à 23	5 à 15
Morel 2003	BTC	18.6 à 18.7	/
Hakimi1996	BTC	19.2 à 19.30	9.8 à 10.8
Olivier1994	BTC	18.25à 20.13	12 à 19
Ola 1987	BTC	16 à 19	/



**Figure IV. 30** Essais de compactage (PN et PM) du sol naturel (SN) et la zone recommandée pour les BTC.

### IV.7. Essai de compression simple (ISO 17892-7:2017)

Cet essai implique la compression d'une éprouvette cylindrique de sol entre deux plateaux, avec l'axe de l'éprouvette cylindrique orthogonal aux plateaux. Il consiste à appliquer une vitesse de déformation longitudinale constante et à mesurer la force axiale exercée sur l'éprouvette.

Test de Compression: Les échantillons durcis sont placés dans une machine de compression. Une charge est appliquée à un taux constant jusqu'à ce que l'échantillon se rompe. La charge maximale supportée par l'échantillon est enregistrée



**Figure IV. 31** L'équipement de l'essai de compression



### IV.7.1. Mode opératoire et procédure d'essai

Les éprouvettes utilisées pour les essais de compression ont une forme cylindrique et ont été fabriquées à l'aide d'un moule en inox spécialement conçu à cet effet (voir Figure IV.31) Les dimensions du moule sont les suivantes : H=76 mm et d= 38 mm . Au total, 56 éprouvettes ont été fabriquées avec différents dosages et temps de cure.

Le processus de fabrication se déroule en plusieurs étapes :

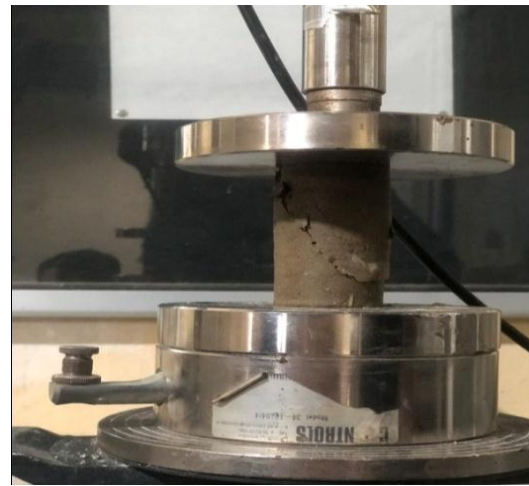
1. Séchage du sol dans une étuve pendant 24 heures à une température de 105°C.
2. Mélange du sol sec avec le produit de traitement.
3. Ajout d'une quantité d'eau et malaxage jusqu'à obtenir un mélange parfaitement homogène, puis laisser reposer le mélange dans un sac plastique fermé pendant 24 heures.
4. Compactage du mélange selon un mode statique à l'aide de la presse UNIFRAME (voir Figure IV.32).
5. Compactage en deux couches, la première représentant 2/3 de la masse totale de chaque mélange, et la seconde 1/3 de la masse totale.
6. Démoulage suivi du scellement immédiat des éprouvettes avec un film plastique (voir Figure IV.33) pour éviter l'évaporation de l'eau contenue dans les mélanges.
7. Après les périodes de cure (7 et 14 jours), réalisation des essais de compression simple conformément à la norme NF P94-077.
8. Mesure des dimensions de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse (la hauteur et le diamètre sont mesurés quatre fois selon deux directions) pour obtenir des valeurs moyennes.
9. Positionnement de l'éprouvette de sol sur le plateau d'une presse à chargement axial. Une fois les deux plateaux de la presse en contact avec l'éprouvette (voir Figure IV.34, le chargement axial est appliqué à une vitesse de déplacement constante de 1,00 mm/min.
10. À la fin de l'essai, retrait de l'échantillon (voir Figure IV.34).
11. La force maximale (F<sub>max</sub>) à la rupture est enregistrée par la machine. La résistance à la compression simple R<sub>c</sub> (la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de rupture F<sub>max</sub> et la section transversale de l'éprouvette (A)) est calculée comme suit :  $R_c = F_{max} / A$ , où R<sub>c</sub> (kPa) représente la résistance à la compression simple, F (kN) la force maximale de compression, et A (m<sup>2</sup>) l'aire de la section transversale de l'éprouvette.



**Figure IV. 32** Machine de compactage uniframe



**Figure IV. 33** Les éprouvettes de compression



**Figure IV. 34** Fussuration de l'éprouvette

### IV.7.2. Résultats des essais de compression

Le tableau IV.12 et la figure IV.35 synthétisent les résultats des essais de compression simple du sol naturel et sol traité avec des fibres de diss, ciment et Pva après 7,14,28 jours

**Tableau IV. 12** Résultats finaux de la résistance à la compression simple

temps de cure	7jour	14 jour	28jour
Fc (sol naturel) (N)		345,4	
Fc (1% ciment+sol) (N)	981	1219	1409
Fc 2%ciment+sol) (N)	1089	1528,5	1773,5
Fc (sol+1%fibres) (N)	709	750,5	759
Fc (2% pva) (N)	795,5	852	859
Fc (1%ciment+2%pva) (N)	1078	1283	1490
Fc (1%ciment+4%pva) (N)	1202	1426,5	1591

## Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

Fc (2%ciment+2%pva) (N)	1341,5	1771,5	2273
Fc (2%ciment+4%pva) (N)	1262,5	1610	2075
Fc (2%ciment+1%fibres+2%pva) (N)	1589	2224	2818,5
Fc (2%ciment+1%fibres+4%pva) (N)	1356	1889,5	2518,5

temps de cure	7	14	28
Rc(sol naturel)		0,31	
Rc(1% ciment+sol)MPa	0,87	1,08	1,24
Rc(2%ciment+sol)MPa	0,96	1,35	1,56
Rc(sol+1%fibres)MPa	0,63	0,66	0,67
Rc(2% pva)MPa	0,70	0,75	0,76
Rc(1%ciment+2%pva)MPa	0,95	1,13	1,31
Rc(1%ciment+4%pva)MPa	1,06	1,26	1,40
Rc(2%ciment+2%pva)MPa	1,18	1,56	2,01
Rc(2%ciment+4%pva)MPa	1,11	1,42	1,83
Rc(2%ciment+1%fibres+2%pva)MPa	1,40	1,96	2,49
Rc(2%ciment+1%fibres+4%pva)MPa	1,20	1,67	2,22

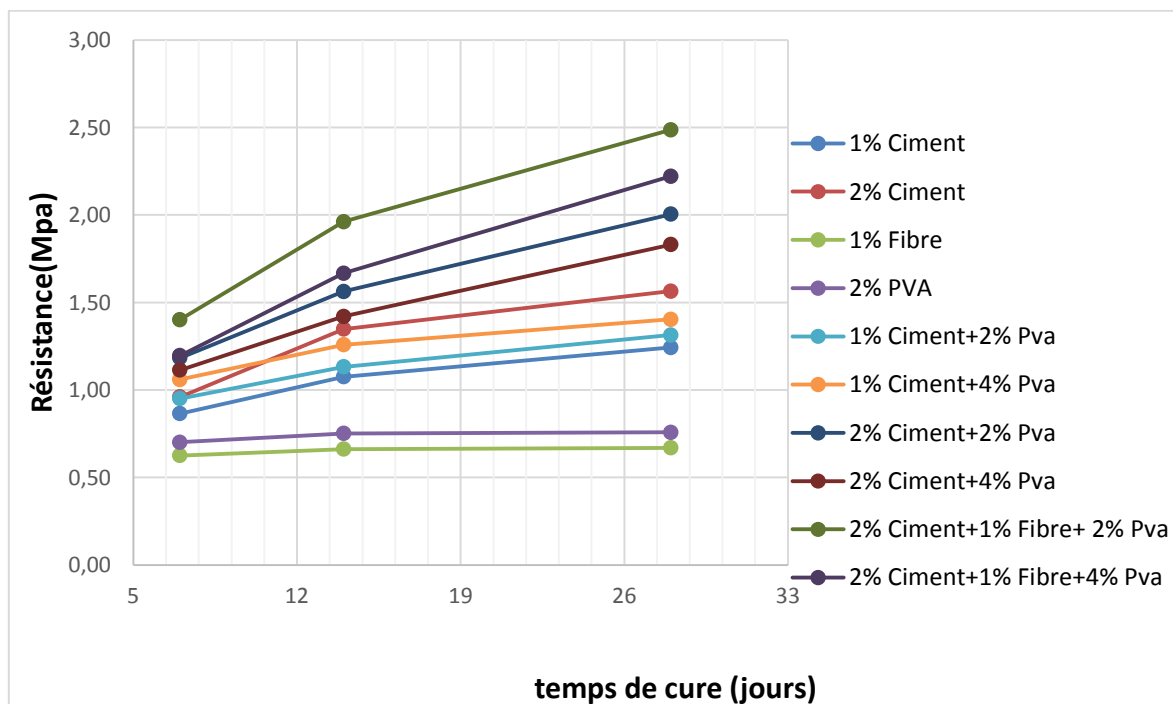


Figure IV. 35 Courbes des interactions de la résistance moyenne à la compression en fonction de temps pour différents dosages.

### IV.7.3. Prédiction pour la résistance à la compression simple

Le tableau présente les valeurs de la résistance à la compression ( $R_c$ ) de différents mélanges de sol stabilisé à divers temps de cure (7, 14, et 28 jours). Les mélanges testés incluent différentes combinaisons de ciment, fibres et poly (acétate de vinyle) (PVA). Voici une analyse des résultats :

#### **Sol naturel :**

- La résistance à la compression initiale du sol naturel est de 0,31 MPa, sans amélioration significative au fil du temps.

#### **Ciment seul :**

- 1% ciment + sol :

- À 7 jours : 0,87 MPa

- À 14 jours : 1,08 MPa

- À 28 jours : 1,24 MPa

- 2% ciment + sol :

- À 7 jours : 0,96 MPa

- À 14 jours : 1,35 MPa

- À 28 jours : 1,56 MPa

- L'ajout de ciment augmente significativement la résistance à la compression, et cet effet est plus prononcé avec 2% de ciment.

#### **Fibres :**

- Sol + 1% fibre :

- Les valeurs sont relativement basses (0,63 MPa à 7 jours, augmentant légèrement à 0,67 MPa à 28 jours), indiquant que les fibres seules n'améliorent pas beaucoup la résistance.

## **Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats**

---

### **PVA seul :**

- 2% PVA :

- La résistance augmente légèrement (0,70 MPa à 7 jours, 0,76 MPa à 28 jours), mais reste inférieure à celle des mélanges avec ciment.

### **Combinaisons ciment + PVA :**

- 1% ciment + 2% PVA :

- Résistance croissante de 0,95 MPa à 7 jours à 1,31 MPa à 28 jours.

- 1% ciment + 4% PVA :

- Résistance de 1,06 MPa à 7 jours à 1,40 MPa à 28 jours.

- 2% ciment + 2% PVA :

- Amélioration notable de la résistance de 1,18 MPa à 7 jours à 2,01 MPa à 28 jours.

- 2% ciment + 4% PVA :

- Résistance significative de 1,11 MPa à 7 jours à 1,83 MPa à 28 jours.

- Les mélanges avec des combinaisons de ciment et de PVA montrent une amélioration significative, particulièrement avec 2% de ciment et 2% de PVA.

### **Combinaisons ciment + fibres + PVA :**

- 2% ciment + 1% fibre + 2% PVA :

- La résistance est de 1,40 MPa à 7 jours, augmentant à 2,49 MPa à 28 jours.

- 2% ciment + 1% fibre + 4% PVA :

- La résistance est de 1,20 MPa à 7 jours, augmentant à 2,22 MPa à 28 jours.

- Les combinaisons qui incluent des fibres avec ciment et PVA montrent les résistances les plus élevées, particulièrement la combinaison avec 2% ciment, 1% fibre et 2% PVA.

### IV.8. Conclusion

#### **Efficacité du ciment :**

- L'ajout de ciment améliore significativement la résistance à la compression du sol, avec une efficacité croissante de 1% à 2% de ciment.

#### **Impact du PVA :**

- Le PVA seul a un effet modéré sur la résistance, mais lorsqu'il est combiné avec le ciment, il améliore considérablement la résistance, surtout à 28 jours.

#### **Rôle des fibres :**

- Les fibres seules n'augmentent pas beaucoup la résistance, mais lorsqu'elles sont combinées avec le ciment et le PVA, elles contribuent à atteindre des valeurs de résistance très élevées.

#### **Meilleures combinaisons :**

- Les mélanges avec 2% de ciment et des combinaisons de PVA, en particulier avec 1% de fibres, montrent les meilleures performances. En particulier, la combinaison de 2% ciment, 1% fibre et 2% PVA atteint une résistance à la compression de 2,49 MPa à 28 jours, la plus élevée parmi toutes les combinaisons testées.

En résumé, pour améliorer la résistance à la compression du sol, les meilleures combinaisons sont celles qui incluent du ciment (particulièrement 2%), avec des ajouts de PVA et de fibres pour des performances optimales.

*Conclusion générale et  
perspectives*

### Conclusion Générale et Perspectives

La présente étude a pour objectif de proposer un matériau à base de terre crue stabilisée comme alternative écologique. Le but de ce travail est de remplacer les liants minéraux (ciment et chaux) par d'autres liants organiques qui sont moins nocifs à l'environnement.

Dans la partie de l'état de l'art, nous avons exposé les différents types d'argiles et leurs propriétés. En plus, nous avons rappelé l'intérêt du matériau de terre crue pour les constructions contemporaines grâce à son faible impact environnemental, à son accessibilité pour des populations aux revenus modestes et à sa capacité à assurer passivement un confort naturel dans l'habitat. La plupart des stabilisations de la terre crue sont faites à base de liants minéraux en l'occurrence le ciment et la chaux. Mais les quantités de liants utilisées sont souvent très élevées pour des gains en résistances mécaniques relativement faibles, ce qui pose la question de la pertinence écologique de ces solutions. En plus, la résistance mécanique, la résistance à l'eau qui est un paramètre crucial n'est pas toujours évalué et quand c'est le cas, les méthodes ne font pas consensus.

En vue de l'utilisation du sols de Bendjerrah comme matériau dans les constructions en terre crue dans le domaine de Génie Civil, et plus particulièrement en matériaux de construction par l'élaboration de BTC (Blocs de Terre Crue Comprimée). Après avoir fait un état de l'art, nous avons décidé de nous intéresser aux caractéristiques suivantes :

- Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'identification du sol de BenDjerrah et le positionnement de ses propriétés par rapport aux normes et recommandations de BTC (granulométrie, plasticité, compactage).

- Ensuite, les résistances mécaniques que nous avons limitées dans un premier temps à la résistance en compression UCS et sa comparaison avec la norme française [NF-XP-P13-901(2001)].

- Dans un second temps, nous avons conduit des essais de compression non confinée sur ce sol non traité. Ensuite, nous avons procédé à son traitement pour étudier le changement des paramètres mécaniques du sol traité les fibres de Diss et l'alcool Polyvinyle.

- Les résultats obtenus sur le sol de Bendjerrah montrent que leurs propriétés en termes de granulométrie, densité, plasticité vérifient les normes et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC.



## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

---

Afin de mieux utiliser notre matériau dans la fabrication des biques en terre compressée, il serait intéressant de réaliser des essais de durabilité à la tenue d'eau.

# *Références Bibliographiques*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] **N. Ammar et Chouini Mohamed**, « Thème : Traitement des argiles gonflantes par des Déchets Végétaux : Etude Expérimentale, Analyse Statistiques et Optimisation ». Mémoire de master, Université 08 mai 1945 Guelma, (2023).
- [2] **Abu Zarifa Tawfiq Ammar Tawfiq et Khechaimia Djalel**, « Comportement mécanique du sol cohérent traité avec un bio-liant », Mémoire de Master, Université 08 mai 1945 Guelma, (2022).
- [3] **Ait Amrane Tilelli**, « Caractérisation de la stabilisation par des plastiques recyclés des sols argileux eaux essais de cisaillement », Mémoire de Master, Université de Bijaia (2018).
- [4] **Djemili Mohamed Rafik**, « Modification Des Propriétés D'un Sol Argileux Par Ajouts De Déchets De Marbre », Université Baji Mokhtar Annaba, (2021)
- [5] **Zerrouki Ishak**, « Effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des briques de terre crue », Mémoire de Master Université de Biskra, (2019)
- [6] **Djaalali Cherifa Et Haouam Chihab Eddine**, « Étude expérimentale de stabilisation des sols argileux avec la poudre de coquille d'œuf », Mémoire de Master, Université de Tebessa, (2021)
- [7] **Bouziane. R et Nessaib. S**, « Renforcement des argiles de doukane » Mémoire de Master, Université de Tebessa, (2023)
- [8] **Justine Raoul**, « Ambiances et esthétique de l'architecture en terre crue Justine Raoul » (2020)
- [9] **Hamdaoui Salah**, « étude du comportement mécanique et durabilité des briques en terre crue », Mémoire de Master, Université 08 mai 1945 Guelma, (2023)
- [10] **Chahma.S**, « Etude Des Propriétés Thermo-Mecanique Des Briques En Terre Gypse Traditionnel (Temchemt) Stabilisée Par Le Ciment Ou Par La Chaux (Cas De La Ville D'ouargla) », Mémoire de Master, Université de (2018)
- [11] **Anger & Fontaine**, 2009; **Guillaud & Houben**, 1995
- [12] **Source** : « L'architecture en terre construction nouvelle et conservation du patrimoine historique .Teresa Diaz Gonçalves ; Maria Idália Gomes »

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [18] **Hafsa Lamouri Hannani** « Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun », Mémoire de Master, Université de Adrar, (2014)
- [19] **Ottou J. M. A**, contribution à l'étude de la stabilisation des sols latéritiques par association compactage dynamique liant hydraulique en vue de l'élaboration de blocs pour la construction. Mémoire fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Yaoundé. (1987)
- [20] **Khenfer. M**, Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques". Thèse de doctorat, université de Bordeaux. (1990).
- [21] **Kriker. A** « Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec » (2005).
- [22] **Hameed R.** « Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques, thèse de doctorat, université de Toulouse ». (2010).
- [23] **Swamy. R. H. S., Ahuja. B., M. Krishamoorthy.** Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers. The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1. (1984).
- [24] **Coutts., R.S.P.** Flax fibers as a reinforcement in cement mortar, the international journal of cement composites and light weight concrete, vol.5 N°4, pp 257-262. (1983).
- [25] **Bledzki A. K and Gassan J.** Composites reinforced with cellulose based fibers. ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274. (1999).
- [26] **Tolëdo F.R.D., Ghavami, K., Englan.,** Development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability. ELSEVIER, Cement and concrete composite, volume 25, p. 12. (2003).
- [27] **Sukontasukkul P.** "Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beam under bending", Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep. 2004) pp. 35-41. (2004).
- [28] **Cotterell B., Mai Y.W.** "Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie Academic & Professional", London/Chapman and Hall. p. 294. (1996).

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

[29] **Markovic I., Walraven J.C., Van Mier J.G.M.** “Self-compacting hybrid-fibre concrete mix design”, workability and mechanical properties, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, Iceland. (2003).

[30] **Kawamata A., Mihashi H., Fukuyama H.** “Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement-based Composites”, journal of advanced concrete technology vol.1, No.3, 283-290. (2003).

[31] **Merzoud M., Dheilly R.M., Goullieux A., Queneudec M.** Optimisation of Lignocellulosic Composite formulated with a local ressource : The Diss (Ampelodesmamauritanica), Proceeding of the 7th International Congress, Dundee Scoltand, U.K, Edition IHS BRE presse, ISBN-13: 978-1-84806-037-1, 651-660. (2008).

[32] **Laifa W,** Contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons auto plaçant, thèse de doctorat, université d'Annaba, Algérie. (2015).

[33] Développement d'éléments en bio composite à base de fibre végétale pour la réhabilitation énergétique des bâtiments.

### **Neto-graphie**

[13] - (source : [maison suindara.wordpress.com](http://maison-suindara.wordpress.com) )

[14] - Sources : [fr.db-city.com](http://fr.db-city.com) ; [www.saint-jean-de-monts.com](http://www.saint-jean-de-monts.com) )

[15] - (source : <http://www.avenirbati.fr/mur-terre-coulee/>)

[16] - (source : <https://maison-monde.com/les-maisons-troglodytes-de-matmata/>)

[17] - (source : <https://maison-monde.com/maisons-de-gazon-traditionnelles-islande/>)

---