

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE.....	2
1 Introduction	2
2 Rappel historique	2
3 Techniques de construction en terre	6
3.1 Adobe.....	6
3.2 Mottes de terre	8
3.3Pisé	8
3.4Terre empilée	9
3.5Blocs découpés	10
3.6Terre façonnée	11
3.7Terre coulée	11
3.8Terre de garnissage ou Torchis	12
3.9 Les blocs de terre comprimée	13
3.9.1 Définition	13
3.9.2 Types de blocs de terre comprimée	13
4 La brique en terre crue	14
5 Avantages et inconvénients de la construction en terre	15
6 Conclusion	19
CHAPITRE 2 : CRITERES DE CHOIX DU MATERIAU TERRE.....	20
1 Introduction	20
2Les exigences des fuseaux de granulo et plasticité	20
2.1 Granularité.....	20
2.2 Plasticité	21
3 Phénomène de retrait	22
3.1Facteurs contrôlant la limite de retrait	24
4 Cisaillement direct	25
4.1 Définition	25
4.2 Rupture des sols	25
4.3 Relation avec la nature du sol	26
4.4 Facteurs influant sur la résistance au cisaillement	27
4.5 Comportement a court et a long terme	27

4.6 Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement direct.....	30
4.6.1 Avantage.....	30
4.2 Inconvénients.....	31
5 CONCLUSION.....	31
CHAPITRE 3 : LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	32
1 Introduction	32
2 Identification du matériau	32
2.1 Introduction	32
2.2 Description du matériau	32
2.3 Essais au laboratoire	33
2.4 Analyse granulométrique par tamisage et sedimentometrie.....	34
2.5 Limites d'Atterberg.....	35
2.6 Le poids volumique des grains solides.....	37
2.7 Essai de compactage Proctor normal.....	38
3 Programme expérimental.....	40
4 Préparation des échantillons.....	41
5 Résultats et discussions	44
5.1 Étude du retrait	44
5.2 Essai de cisaillement direct.....	46
5.2.1 La procédure de l'essai de cisaillement	46
5.2.2 Résultats et discussion.....	48
6 Conclusion.....	53
CONCLUSION GENERALE.....	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	56

Liste des figures

Figure 1.1.a	Arche de Ctésiphon, (Paulus, 2015).	3
Figure 1.1.b	Pyramide d'El-Lahoun, (Paulus, 2015).	3
Figure 1.1.c	Ziggourat d'Etemenanki, (Paulus, 2015).	3
Figure 1.1.d	Cité ChanChan, (Paulus, 2015).	3
Figure 1.2	Architecture de terre dans le monde, (Paulus, 2015).	4
Figure 1.3	Roue des différentes techniques de construction en terre, (Krami et Reggadi, 2011).	6
Figure 1.4	Brique adobe, (Krami et Reggadi, 2011).	7
Figure 1.5	Constructions en adobe: Shibam, Yémen, (Paulus, 2015).	7
Figure 1.6	Constructions en adobe ; Ghadamès, Libye, (Paulus, 2015).	7
Figure 1.7	Constructions en mottes de terre ; Lima, Pérou (Paulus, 2015).	8
Figure 1.8	Technique de pisé ; Mansourah, Tlemcen (Google).	9
Figure 1.9	Technique du pisé (Krami et Reggadi, 2011).	9
Figure 1.10	Construction en terre empilée ; Maison à Sa'dah Yémen (Paulus, 2015).	10
Figure 1.11	Construction en blocs découpés, Burkina Faso (Paulus, 2015).	11
Figure 1.12	Terre façonnée (Paulus, 2015).	11
Figure 1.13	La terre coulée, un béton de terre (Paulus, 2015).	12
Figure 1.14	Constructions en torchis ; Strasbourg, France (Paulus, 2015).	13
Figure 1.15	Différents produits de blocs de terre comprimée (Taallah, 2014).	14
Figure 1.16	Les différents blocs de terre comprimée (Mekhermeche, 2012).	14
Figure 1.17	Fabrication de la brique terre crue (Krami et Reggadi, 2011).	15
Figure 2.1	Fuseau de diagramme de texture des terres (Norme XP P13-901).	21
Figure 2.2	Fuseau du diagramme de plasticité des terres (Norme XP 13-901).	22
Figure 2.3	Courbe de retrait classique, (Nowamooz, 2008).	23
Figure 2.4	Désordres de la structure au cours des périodes de sécheresse, (Nowamooz, 2008).	23
Figure 2.5	Corrélation entre la limite de liquidité de différents sols argileux et la limite de retrait conventionnelle, (Nowamooz, 2008).	24
Figure 2.6	Courbe effort-déformation dans un essai de cisaillement, (Ihcene, 2008).	26
Figure 2.7	Principe d'un essai de cisaillement à la boîte (NF P 94-07-1-1).	29
Figure 2.8	Courbes contrainte – déplacement.	30
Figure 2.9	Détermination de ϕ et C.	30
Figure 3.1	Zone d'emprunt du matériau étudié, (Google Earth, 2017).	33
Figure 3.2	Analyse granulométrique par tamisage.	34
Figure 3.3	Analyse granulométrique par sédimentation.	34
Figure 3.4	Courbe granulométrique du sol étudié.	35
Figure 3.5	Etat de consistance d'un sol (Armand, 2010).	35
Figure 3.6	Réalisation de l'essai de limite de liquidité.	36
Figure 3.7	Détermination graphique de la limite de liquidité.	36
Figure 3.8	Position du sol étudié dans l'abaque de Casagrande.	37

Figure 3.9	Réalisation d'essai de Pycnomètre.	38
Figure 3.10	Réalisation de l'essai de compactage.	39
Figure 3.11	Courbe de compactage du tuf de Béni-Saf.	39
Figure 3.12	Préparation du matériau à $w_{opt} = 15\%$.	43
Figure 3.13	Préparation des échantillons par compactage statique.	43
Figure 3.14	la courbe variation du poids des échantillons en fonction des jours de prise.	44
Figure 3.15	Courbe de retrait.	45
Figure 3.16	évolution d'indice des vides en fonction du temps de séchage.	47
Figure 3.17	L'appareil de cisaillement.	47
Figure 3.18	Réalisation de l'essai de cisaillement cas du sol saturé ou non saturé.	49
Figure 3.19	La courbe contrainte- déplacement.	50
Figure 3.20	Détermination de φ_u et C_u .	
Figure 3.21	Evolution de la cohésion en fonction du temps de séchage des échantillons.	52
Figure 3.22	Evolution de l'angle de frottement en fonction du temps de séchage des échantillons compactés à l'OPN.	53

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Les opérations de construction en terre en Algérie (Ahmed et Ait Kadi, 2012).	5
Tableau 1.2	Caractéristiques des briques terres crues (adobe, pisé et brique de terre comprimée (Krami et Reggadi, 2011).	15
Tableau 1.3	Synthèse des différentes caractéristiques des techniques de construction en terre.	18
Tableau 2.1	Essais effectués à la boîte de cisaillement (Harichane, 2014).	25
Tableau 2.2	Calculs de stabilité en mécanique des sols (Ihcene, 2008).	29
Tableau 3.1	Paramètres de compactage à l'OPN.	39
Tableau 3.2	Paramètres physiques et mécanique de sol étudié.	40
Tableau 3.3	Conditions initiales et finales des différents essais réalisés.	41
Tableau 3.4	Résultats d'essai de cisaillement	51

Liste des symbol

CRATerre	Centre international de la construction en terre.
AFNOR	Association Française de Normalisation
C	Cohésion
C_u	Coefficient d'uniformité
C_c	Coefficient de courbure
d_{10}	Diamètre des grains correspondant à 10% de passant
d_{30}	Diamètre des grains correspondant à 30% de passant
d_{50}	Diamètre des grains correspondant à 50% de passant
d_{60}	Diamètre des grains correspondant à 60% de passant
G_s	Densité des grains solides
I_p	Indice de plasticité
I_C	Indice de consistance
S_r	Degré de saturation
D	Diamètre
H	Hauteur
M	Masse
W	Teneur en eau
W_l	Limite de liquidité
W_p	Limite de plasticité
γ_s	Poids volumique solide
γ_w	Poids volumique de l'eau
γ_h	Poids volumique humide
ρ_h	Masse volumique humide
φ	Angle de frottement
ε	Déformation
τ	Contrainte tangentielle de cisaillement

INTRODUCTION GENERALE

La terre est utilisée dans la construction depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète, vu son intérêt économique et sa facilité d'exploitation. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. Dans cet esprit, une loi sur la promotion des énergies renouvelables a été d'ailleurs promulguée en août 2004.

Cette étude rentre dans cette thématique de valorisation du matériau terre afin de l'utiliser ultérieurement dans la confection des briques de terre compactée (BTC). On notera que ce travail a été réalisé en partie au laboratoire L.T.P.O de Tlemcen.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les constructions en terre et ses différentes techniques utilisées, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre présente les recommandations pour le choix du matériau destiné à la construction en terre, ainsi qu'une synthèse sur le phénomène de retrait et l'étude de cisaillement direct à la boîte.

Le troisième chapitre présente les résultats d'un certain nombre d'essais d'identification, ainsi que les résultats de l'évolution de phénomène de retrait et l'évolution des caractéristiques mécaniques (c et φ) de l'essai de cisaillement direct à la boîte.

CHAPITRE1

GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE

1. INTRODUCTION

La Terre est un matériau disponible en quantité et utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau le plus proche, celui que l'on a sous les pieds, disponible partout dans le monde, (Paulus, 2015).

La brique en terre crue et la brique compressée, de même que le pisé, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction jusqu'à nos jours.

Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de constructions industrielles, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés.

2. RAPPEL HISTORIQUE

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (figure.1.1.a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (figure1.1.b), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (figure1.1.c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (figure1.1.d) et encore bien d'autres. Les sites archéologiques en terre crue sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au

fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois » (Anger et Fontaine, 2009).

Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible. Des études estiment « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre »

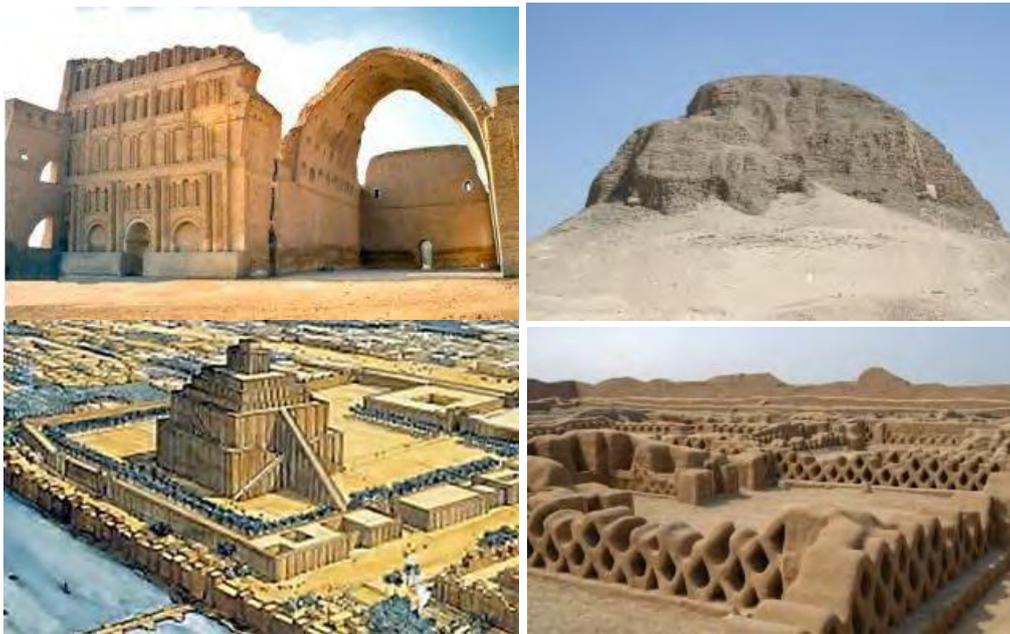


Figure 1.1: a) : Arche de Ctésiphon, b) : Pyramide d'El-Lahoun, c) : Ziggourat d'Etemenanki, d) : Cité Chan-Chan (Paulus, 2015).

De plus, la terre est relativement facile à extraire et à utiliser : de simples outils comme une pelle ou des planches en bois sont largement suffisants dans la plupart des cas.

Géographiquement, les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine (Figure 1.2), (Anger et Fontaine, 2009).

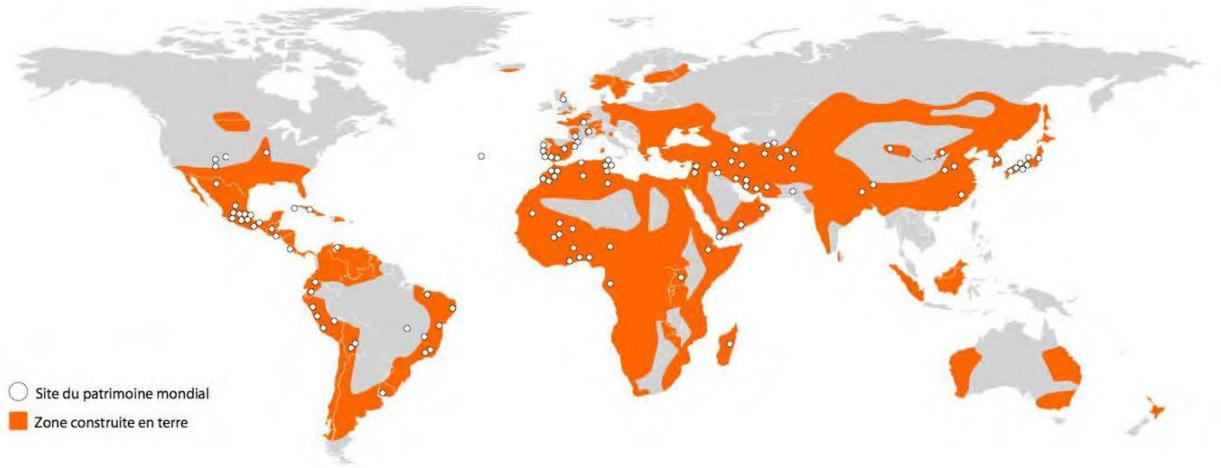


Figure 1.2 : Architecture de terre dans le monde (Paulus, 2015).

En Algérie, La terre comme matériau de construction a été largement utilisé dans l’habitat traditionnel. Diverses régions du pays en témoignent encore de l’utilisation séculaire de ce matériau sous diverses techniques de construction.

Juste quelques années après l’indépendance, l’Algérie a manifesté un certain intérêt pour la revalorisation de l’architecture de terre. Dans le tableau 1.1 quelques opérations pilotes citées par ordre chronologique.

Tableau 1.1: Les opérations de construction en terre en Algérie (Ahmed et Ait Kadi, 2012).

<i>Années</i>	<i>Réalisations</i>
1969	La réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Moustafa Ben Brahim sont réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant.
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Thoub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en Blocs de terre comprimée.
1984	Prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en Blocs de terre comprimée.
1984	Prototype fut réalisé au CNERIB en Blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en Blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Reggane en Blocs de terre comprimée
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en Blocs de terre comprimée.
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en Blocs de terre comprimée.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé "réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique" est lancée au CNERIB et financé par l'union européenne.

Chapitre 1 : Généralités sur la construction en terre

gravier étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage. Afin de minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales.

Dans les images suivantes quelques exemples de la construction en adobe (figures 1.5 et 1.6), (Paulus, 2015).



Figure 1.4 : Briques en adobe (Krami et Reggadi, 2011).



Figure 1.5 : Construtions en adobe : Shibam, Yémen (Paulus, 2015)



Figure 1.6 : Construtions en adobe ; Ghadamès, Libye (Paulus, 2015)

3.2 Mottes de terre

La seconde technique présentée ici est celle des mottes de terre. Cette technique est très ancienne et se retrouve principalement dans les régions des grandes plaines. Il s'agit de construire avec la terre de surface des sols, c'est-à-dire avec des mottes de gazon (figure 1.7). La terre contient donc de nombreuses racines et plantes herbacées. Les racines lui confèrent une résistance due à leur entrelacement.

Les avantages de cette technique sont la mise en œuvre rapide et plutôt simple (pas de mélange ni de compactage ni de mortier), le peu d'outils nécessaires (simple bêche ou pioche), la réutilisation facile des blocs pour un second usage et la bonne résistance à l'érosion.

L'inconvénient est qu'il faut ériger des murs de grosse épaisseur si on veut qu'ils soient porteurs (plus de 50cm) mais en même temps, cette épaisseur confère une bonne inertie thermique au bâtiment. (Paulus, 2015).



Figure1.7 : Constructions en mottes de terre ; Lima, Pérou (Paulus, 2015)

3.3 Pisé :

La technique de la terre comprimée, plus généralement appelée technique du pisé (figure1.8), est apparue pour la première fois à Carthage en Tunisie. Elle s'est alors répandue autour du bassin méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VIIe siècle. Elle « consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages » (figure 1.9).

La terre utilisée est généralement extraite directement du site de construction. Il faudra vérifier qu'elle ne contient pas trop d'argile, provoquant des fissures au séchage. (Anger et Fontaine, 2009)



Figure 1.8 : Technique de pisé ; Mansourah, Tlemcen (Google)

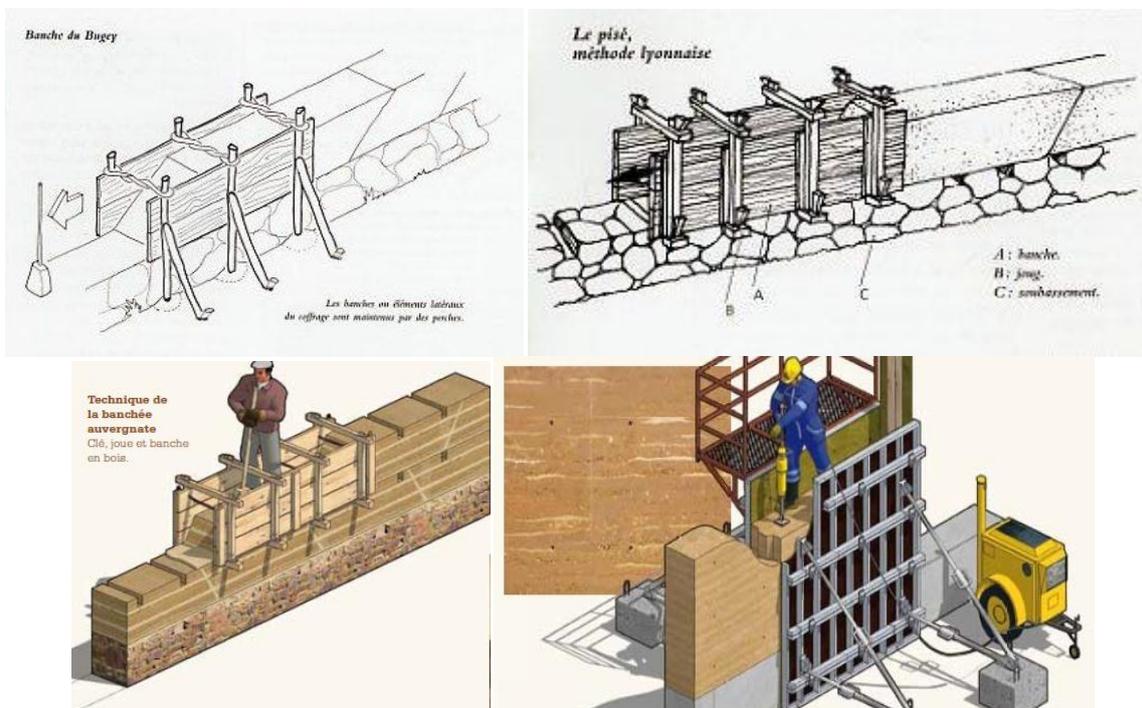


Figure 1.9 : Technique du pisé (Krami et Reggadi, 2011).

3.4 Terre empilée

La technique de la terre empilée (figure 1.10) est également appelée technique de la bauge ou cob. Tradition constructive relativement ancienne datant de plusieurs millénaires d'années,

elle consiste à « empiler des paquets de terre plastique. Les murs épais obtenus, construits d'un seul bloc on dit qu'ils sont monolithiques, ressemblent aux murs en pisé ».

La terre utilisée pour cette technique ne doit pas contenir trop de cailloux ni de graviers car la mise en œuvre des boules de terre se fait à la main. Selon la région, la terre sera donc sableuse ou plus fine et argileuse. Elle est souvent amendée de fibres végétales pour éviter la fissuration (Anger et Fontaine, 2009).



Figure 1.10 : Construction en terre empilée ; Maison à Sa'dah Yémen (Paulus, 2015).

3.5 Blocs découpés

Selon les régions, cette technique (figure 1.11) est connue sous différents noms : « tepate » au Mexique, « caliche » aux U.S.A. « mergel » en Hollande, « marl » en Angleterre et « tuf » dans les pays méditerranéens. La taille des blocs découpés se réalise en carrière. L'extraction de ces blocs est semblable à celle de la pierre traditionnelle, c'est-à-dire qu'elle se réalise à l'aide de pioches, burins, coins et scies. Ces carrières présentent une terre suffisamment cohérente et d'une dureté telle qu'on peut directement y tailler des blocs utilisables pour la construction.

La terre de ces carrières est généralement riche en éléments carbonatés. Les blocs découpés se mettent en œuvre comme des blocs classiques.



Figure 1.11 : Construction en blocs découpés, Burkina Faso (Paulus, 2015).

3.6 Terre façonnée

La technique de la terre façonnée (figure 1.12) se met en œuvre avec de la terre à l'état plastique, sans moule ni coffrage. Cette façon de faire permet d'obtenir une large gamme de formes architecturales souvent très riches tout en réduisant la main d'œuvre et les coûts de construction. Les outils utilisés sont simples et les murs réalisés avec cette technique permettent un bon accrochage des enduits. Par contre, le contrôle du séchage et des fissurations de retrait sont complexes et les performances mécaniques du matériau sont plutôt problématiques. (Anger et Fontaine, 2009).



Figure 1.12 : Terre façonnée (Paulus, 2015)

3.7 Terre coulée

La technique de la terre coulée (figure 1.13) peut être comparée à la technique du béton maigre coulé. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse.

Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème. On peut également compartimenter les constructions afin de réduire le retrait ou alors simplement boucher les fissures après séchage lorsque celles-ci ne posent pas de problèmes structurels. La terre coulée permet de fabriquer des briques, des pavés et des murs, armés ou non (Guillaud et Houben, 1995).



Figure 1.13 : La terre coulée, un béton de terre (Paulus, 2015).

3.8 Terre de garnissage ou Torchis :

La terre de garnissage, plus connue sous l'appellation de technique du torchis (figure 1.14), est une des techniques de construction les plus anciennes. La technique du torchis est « mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser ».

Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable. De ce fait, elles fissurent facilement au séchage. C'est pourquoi on y ajoute des fibres végétales (généralement de la paille). Ces dernières améliorent les propriétés d'isolation thermique du matériau, (Anger et Fontaine, 2009).



Figure 1.14 : Constructions en torchis ; Strasbourg, France (Paulus, 2015).

3.9 Les blocs de terre comprimée :

3.9.1 Définition :

Cette version moderne du bloc de terre crue moulée, ou adobe, emploie des terres aux caractéristiques assez proches de celles du pisé mais pouvant être plus argileuses (jusqu'à 25%) et écrêtées de leurs plus gros éléments (diamètre > 20 mm). La fraction sableuse (gros sables) doit être dominante et la fraction graveleuse (petits graviers) peut être moindre.

Le matériau ainsi composé, d'une granulométrie assez uniforme est compacté à un état hydrique peu humide au moyen de presses de type et de registre de performance très divers. La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits par compactage, exception faite de la phase de cuisson (Mekhermeche ,2012).

3.9.2 Types de blocsde terre comprimée :

Il existe pour ces presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques (figures 1.15, 1.16). Selon le travail qui sera réalisé (maçonnerie porteuse, maçonnerie de remplissage, maçonnerie armée, travaux particuliers, pose par juxtaposition, pose par emboîtement,...), la brique la mieux adaptée sera choisie (Guillaud et Houben, 1995).



Figure 1.15 : Différents produits de blocs de terre comprimée (Taallah, 2014).

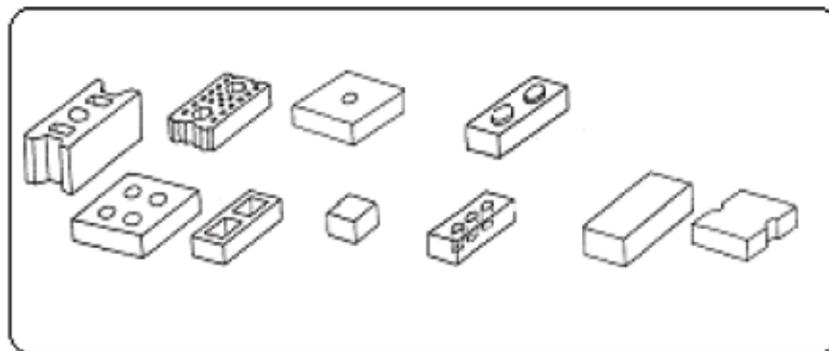


Figure 1.16 : Les différents blocs de terre comprimée (Mekhermeche, 2012).

4 LA BRIQUE EN TERRE CRUE :

Banco ou adobe sont les termes utilisés pour désigner la terre, utilisée avec le moins de transformations possibles en tant que matériau de construction. Le terme terre crue (figure 1.17) permet surtout de marquer la différence avec la terre cuite : en effet, le matériau terre se trouve aujourd'hui le plus couramment sous sa forme cuite (briques, tuiles) (Krami et Reggadi, 2011).

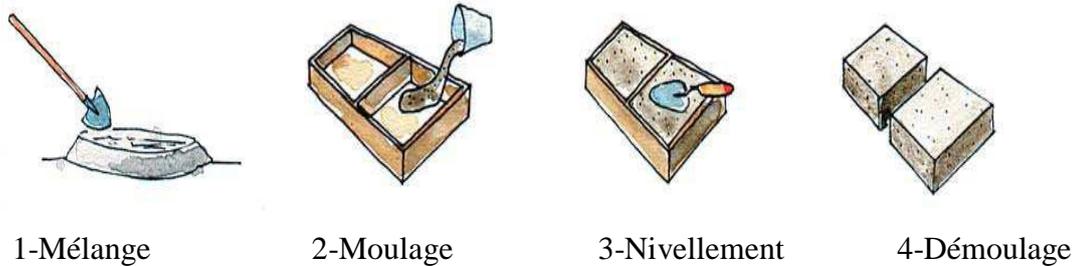


Figure 1.17 : Fabrication de la brique terre crue (Krami et Reggadi, 2011).

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

Tableau 1.2 : Caractéristiques des briques terres crues (adobe, pisé et brique de terre comprimée (Krami et Reggadi, 2011).

Caractéristique	Types de briques terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique (kg/m^3)	1200 - 1700	1700 - 2200	1700 – 2200
Résistance à la compression MPa	$2 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-3}$	2.4	2.4
Conductivité λ (W/m.°C)	0.46 – 0.81	0.81 - 0.93	0.81 – 1.04
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

5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA CONSTRUCTION EN TERRE :

La terre crue offre beaucoup d'avantages. En effet c'est un matériau écologique et 100% recyclable. Elle a aussi une bonne inertie thermique et acoustique (bon coefficient d'absorption des bruits). Elle offre une bonne perméabilité à la vapeur d'eau ce qui lui permet d'être un régulateur naturel de la température.

De nombreuses recherches traitant du matériau terre sont conduites car la terre constitue un matériau qui répond aux préoccupations de la construction durable dans la mesure où il répond à plusieurs critères ciblés. Parmi ses critères nous pouvons énumérer les points suivants :

➤ **Intégration à l'environnement :**

De l'observation du patrimoine des architectures en terre, nous dirons que la terre s'adapte parfaitement au site, à l'image des ksour du sud algérien qui établit une relation harmonieuse avec son environnement immédiat constitué par le sable ocre des dunes.

➤ **Préservation des ressources :**

La fabrication et la mise en œuvre sont peu consommatrices d'eau. C'est un matériau peu énergivore.

➤ **la maîtrise des déchets :**

La terre non stabilisée ou même stabilisée à la chaux repart à la fabrication et ne produit aucun déchet, ce qui fait d'elle un matériau 100% recyclable. La terre stabilisée non recyclable dans le domaine de la construction, peut facilement repartir à la terre.

➤ **Confort hygrothermique :**

Le confort hygrothermique est caractérisé par la sensation que ressent tout individu par rapport à la température l'humidité ambiante du local où elle se trouve.

Pour réaliser ce confort, il faut atteindre une température ambiante satisfaisante en combinant la température de l'air et la température des parois.

La terre grâce à son inertie et à son pouvoir d'absorption et de restitution de l'humidité procure un confort hygrométrique en toute saison.

➤ **Confort acoustique :**

Le confort acoustique exerce une influence importante sur la qualité de vie.

Les nuisances sonores peuvent entraîner une nervosité, un sommeil contrarié dont de la fatigue et d'autres aspects négatifs.

Non seulement la terre est un bon isolant phonique (elle nous protège des bruits extérieur) mais, par sa qualité de faible réverbération du son, elle permet aussi une bonne correction phonique pour un meilleur confort acoustique.

➤ **Protection de l'environnement :**

L'utilisation de la terre comme matériau de construction réduit la consommation d'agrégat, tels les graviers et le sable qui sont extraits de carrières ou de cours d'eau mettant souvent en péril la balance écologique de ces environnements naturels (Salmi, 2014).

Cependant, En construction, deux problèmes majeurs font face à l'utilisation de la terre, l'industrialisation et sa résistance aux effets de l'eau. Effectivement, la fabrication des briques par exemple demande beaucoup de temps et d'espace :

- La terre crue met beaucoup de temps pour sécher
- On ne peut pas empiler, ni ranger les briques si elles ne sont pas sèches

Par conséquent, le temps et l'espace que demande sa fabrication reviennent souvent sur le coût des constructions, environ 30 % plus chers que les constructions classiques (Caille, 2001).

Aussi, L'eau l'ennemi inconditionnel de la terre crue ; par ses actions répétitives sur le matériau (Merniche, 2016).

- La réduction de volume de vide entre les particules.
- La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés.
- Obtenir une meilleure cohésion.
- Elle est un peu plus chère.

➤ **Écologie :**

- Souvent disponible localement en grande quantité donc ne nécessite aucune énergie de transport.
- Ne nécessite pratiquement aucune énergie de fabrication, contrairement à la terre cuite qui elle demande beaucoup d'énergie et entraîne souvent comme conséquence la déforestation. De même que la production de ciment, qui demande également beaucoup d'énergie : elle est responsable à elle seule de 5% des émissions de CO2 mondiales.
- Matériau à 100% recyclable.

➤ **Confort :**

- Grande inertie calorifique.
- Très bonne régulation hygrométrique.

- Bonne isolation phonique.
- Prix imbattable, surtout dans les pays où la main d'œuvre n'est pas trop coûteuse.
- Grande durabilité.
- Peu d'entretien.
- Excellente résistance au feu
- Résistance aux champignons et à la moisissure.
- Grande disparité : en fonction de l'emplacement géographique, la composition terre peut varier très fortement.
- En fonction de sa composition, la terre crue est plus ou moins sensible aux intempéries.

Dans un souci de résumer l'ensemble des techniques précédemment citées, nous avons synthétisé dans le tableau 1.3, les principales caractéristiques des techniques de construction en terre.

Tableau 1.3 : Synthèse des différentes caractéristiques des techniques de construction en terre.

Type de construction	Nature du sol	Avantages	Inconvénients
Adobe	Granulométrie relativement fine	Méthode très économique	Des fissures au séchage
Mottes de terre	Racines et plantes herbacées	La bonne résistance à l'érosion	Des murs de grosse épaisseur et les problèmes de tassement
Pisé	Des murs massifs	Extraction du site de construction	Des fissures au séchage
Terre empilée	Sable et argile	Bonne résistance	Les fissures
Blocs découpés	Argile	Une meilleure cohésion	Induisant des faiblesses dans la construction
Terre façonnée	Fines et argile	Moins chère	Les fissurations de retrait sont complexes
Terre coulée	Sable et grave	La facilité de mise en œuvre	Le retrait au séchage est important
Terre de garnissage ou Torchis	Fines, argile et sable	Coûts moins chers	Le retrait au séchage est important
Les blocs de terre comprimée	Argile, sable et grave	La mise en œuvre rapide et simple	Les fissurations de retrait

6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons montré le caractère ancien de la construction en terre et son importance dans le domaine de l'écoconstruction.

Aussi, on a traité les différentes techniques de la construction en mettant en avant les avantages et inconvénients de chaque méthode.

A travers cette étude bibliographique, nous arrivons à dire que le type de sol utilisé donc la granulométrie est très important dans le choix de la technique de construction. Aussi, on remarque un problème majeure pour la majorité des technique c'est le phénomène d'apparition de fissures donc le retrait.

Dans cette optique, nous envisageons dans le chapitre suivant de voir le type de sol ou la granulométrie idéale pour la construction en terre et montrer quelques aspects bibliographiques sur le retrait et la résistance qui restent des éléments importants dans la construction en terre.

CHAPITRE 2

CRITERES DE CHOIX DU MATERIAU TERRE

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente les différents critères de sélection d'un matériau destiné à la confection de brique de terre comprimée (BTC). Ces critères sont la granulométrie, un paramètre important déjà évoqué lors du chapitre précédent. Aussi, le critère de plasticité.

Une synthèse bibliographique sera présentée aussi sur le phénomène de retrait qui influe grandement sur le séchage du matériau terre cru. On présentera aussi un aperçu sur la résistance au cisaillement direct, l'objet du chapitre sur les essais expérimentaux.

2 LES EXIGENCES DES FUSEAUX DE GRANULOMETRIE ET PLASTICITE

2.1 Granulométrie

La granulométrie du sol destinée à la construction en terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture qui suit et dont elle épousera l'allure générale (figure 2.1).

Les limites du fuseau sont recommandées par CraTerre (Centre international de la construction en terre, créé en 1979). Les sols dont la texture est inscrite dans le fuseau recommandé donnent dans la plus part des cas des résultats satisfaisants en termes de résistance.

Les sols dont la texture n'est pas inscrite dans le fuseau peuvent quand même donner des résultats acceptables, mais il est recommandé de les soumettre à un ensemble d'essais permettant de vérifier leur aptitude à être destiné à la construction.

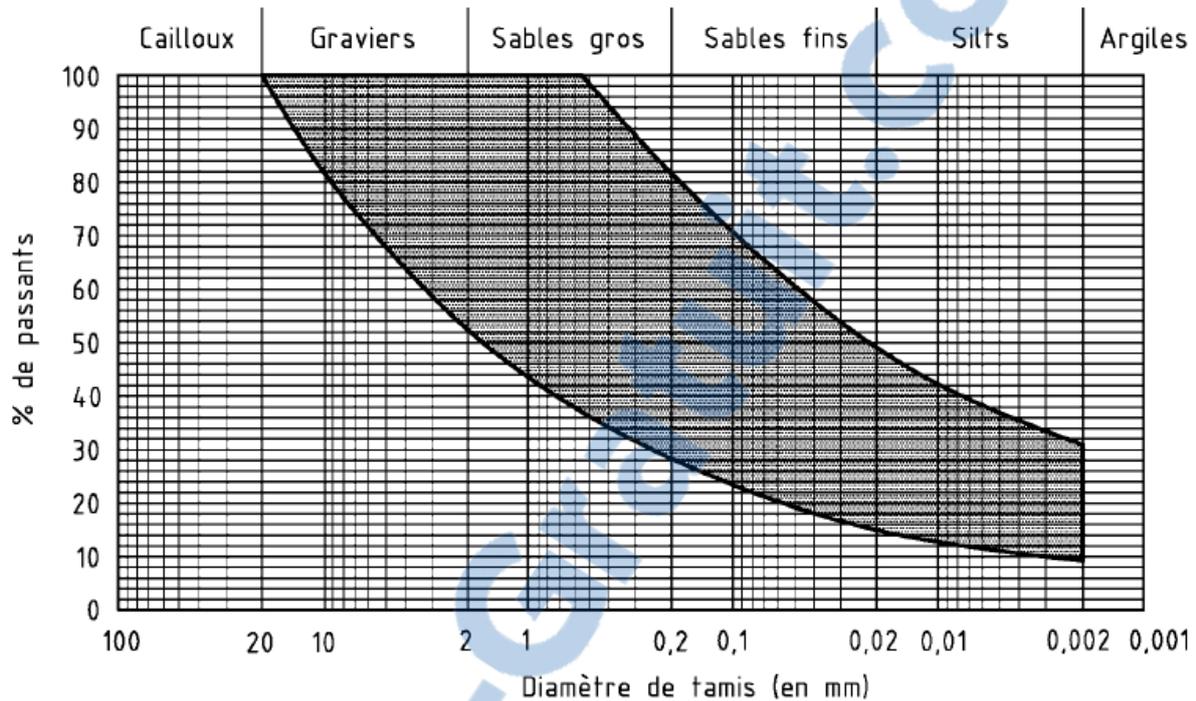


Figure 2.1 : Fuseau de diagramme de texture des terres (Norme XP P13-901).

2.2 Plasticité :

La plasticité de la terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité qui est représenté sur la figure 2.2. Les limites de ce fuseau sont recommandées par CraTerre et la norme française XP P13-901.

Les sols dont la plasticité est inscrite dans le fuseau recommandé donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Cependant, les terres dont la plasticité n'est pas inscrite dans ce fuseau peuvent quand même donner des résultats acceptables, mais il est recommandé de les soumettre à un ensemble d'essais supplémentaires.

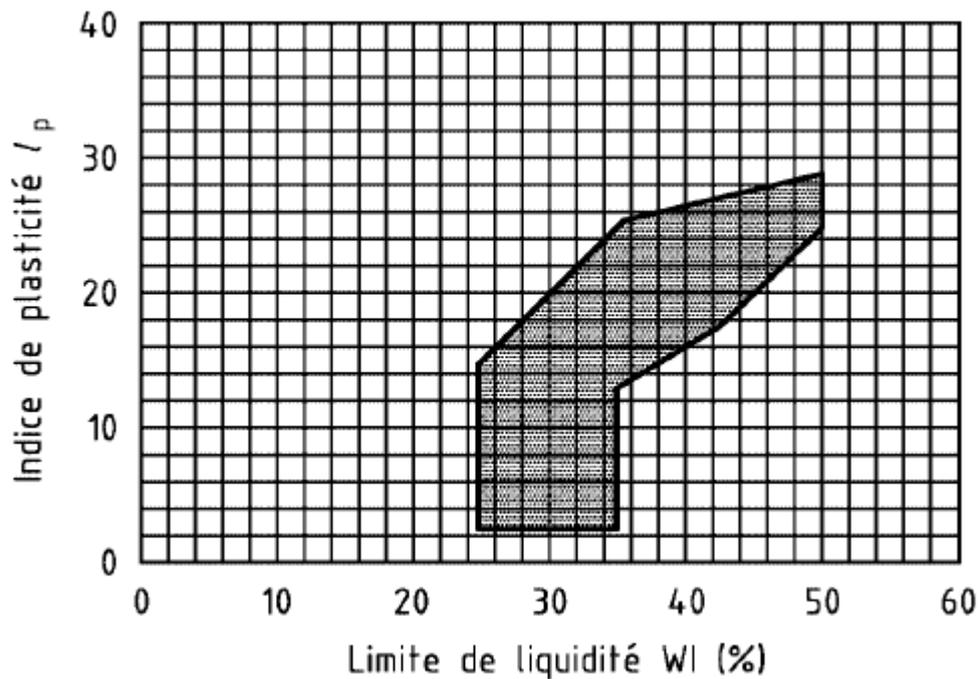


Figure 2.2 : Fuseau du diagramme de plasticité des terres (Norme XP 13-901).

3 PHENOMENE DE RETRAIT

Le retrait consiste en une diminution du volume du sol due à l'évaporation de l'eau présente dans ses pores. L'assèchement progressif du sol provoque des tensions capillaires et la formation de ménisques autour des particules du sol. Les tensions capillaires sont à l'origine de contraintes de cisaillement. Plus l'eau s'évapore, plus les tensions capillaires augmentent et plus le rayon des pores diminuent. Parallèlement, la résistance à la traction du sol augmente. Quand cette résistance atteint les contraintes engendrées par les tensions capillaires, le retrait s'arrête, le volume du sol ne diminue plus.

Le déroulement du retrait peut être décrit en trois phases, en fonction de la diminution du volume d'eau et du sol : retrait normal, retrait résiduel et absence de retrait qui sont montrés sur la courbe de retrait (figures 2.3 et 2.4) cités par Nowamooz (2008) :

- Retrait normal : la diminution du volume du sol est égale au volume d'eau perdu, dans cette phase, le sol est toujours saturé et donc, l'air n'entre pas dans les pores.

- Retrait résiduel : une fois la limite de retrait atteinte, l'air entre et occupe les vides du sol (point d'entrée d'air), de telle sorte que la diminution du volume de sol est beaucoup plus faible que le volume d'eau perdue.
- L'absence de retrait : le volume du sol ne peut plus varier du fait de l'agencement des particules, mais l'eau continue de s'évaporer

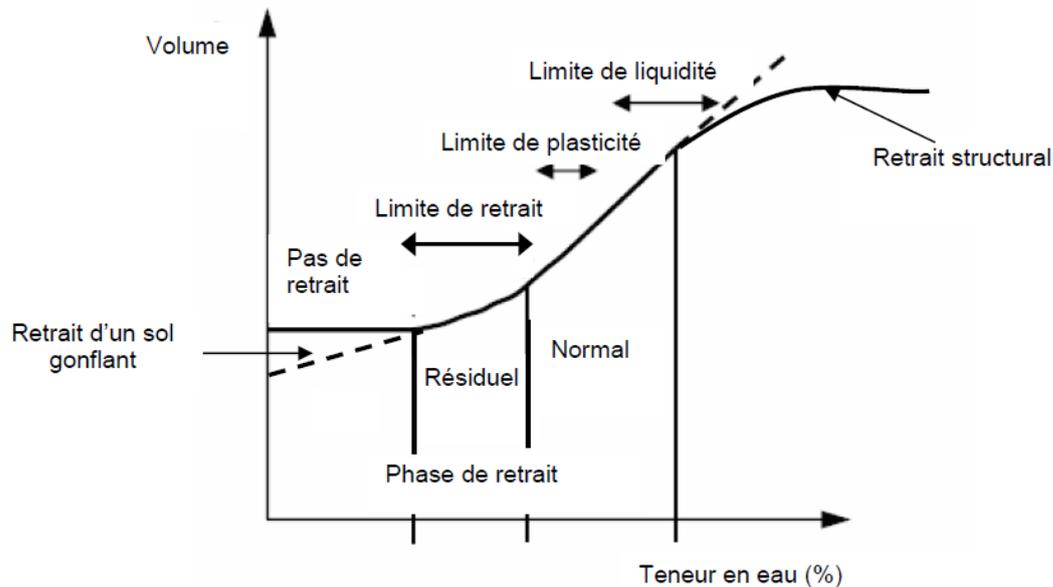


Figure 2.3 : Courbe de retrait classique, (Nowamooz, 2008).



Figure 2.4 : Désordres de la structure au cours des périodes de sécheresse (Nowamooz, 2008).

3.1 Facteurs contrôlant la limite de retrait

Contrairement à la limite de retrait conventionnelle qui est déterminée sur un échantillon remanié et qui est donc indépendante de l'état initial du sol, la limite de retrait effective ou celle déduite de l'essai de drainage dépendent fortement de l'état initial du sol et de son degré de consolidation (Figure 2.5).

Plus généralement, la limite de retrait est fortement liée à la plasticité du sol et croît avec la limite de liquidité bien qu'il semble que l'on ne puisse pas établir de relation directe entre les deux paramètres.

On peut donc dire que la limite de retrait d'un sol argileux sera liée aux mêmes paramètres que ceux qui définissent son potentiel de gonflement, parmi lesquels on peut citer : le pourcentage d'argile, la limite de liquidité ou l'indice de plasticité, la valeur au bleu de méthylène (VBS), la capacité d'échange cationique (CEC), etc. (Nowamooz, 2008).

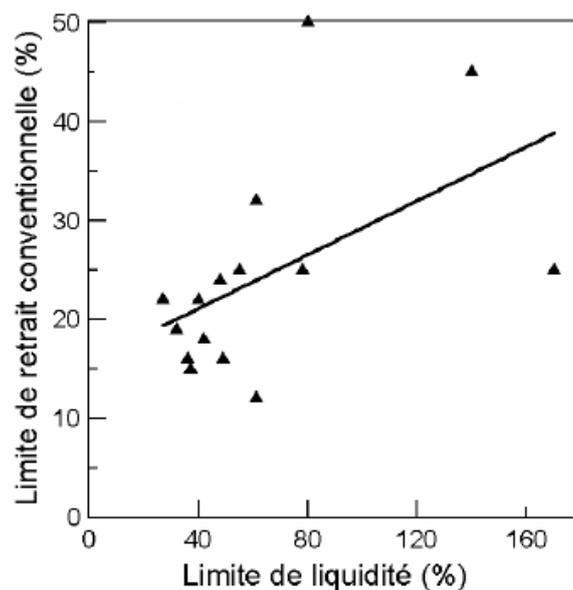


Figure 2.5 : Corrélation entre la limite de liquidité de différents sols argileux et la limite de retrait conventionnelle, (Nowamooz, 2008).

4 RESISTANCE AU CISAILLEMENT

Dans ce qui suit, on présente quelques notions de résistance au cisaillement des sols.

4.1 Définition

La résistance au cisaillement d'un sol est classiquement décrite par son critère de plasticité. Il exprime la relation existant à l'équilibre limite entre la contrainte tangentielle au plan de cisaillement τ et la contrainte σ normale à ce plan. Cette résistance est parfois difficile à déterminer, particulièrement, lorsqu'il s'agit d'un sol fin, ou encore, si le massif est composé de plusieurs sols de caractéristiques différentes (sols hétérogènes ou anisotropes), tels que les sols en mélanges, ou en plusieurs couches stratifiées (multicouches).

Selon le LCPC (1987), la résistance au cisaillement peut être définie, sur les courbes de contraintes-déformations, comme étant :

Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{max} .

La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation très grande.

La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation plus ou moins arbitraire (Bouddal, 2013).

Les différents essais effectués à la boîte de cisaillement sont regroupés dans le tableau 2.1

Tableau 2.1 : Essais effectués à la boîte de cisaillement (Harichane, 2014)

type de sol	Type de l'essai	Vitesse des essais
Tous les sols, pulvérulents ou cohérents	Essai drainés	Rapide ou lente suivant la perméabilité du sol
Sols cohérents ou fins de très faible perméabilité	Essais non drainés	rapide

4.2 Rupture des sols :

En pratique, la rupture d'une éprouvette de sol s'apprécie d'après les déformations du sol : on trace en cours d'essai la courbe représentant la variation de la déformation du sol en fonction

de la sollicitation qui l'a produite. Ces courbes ont, suivant la nature et l'état du sol, l'une des deux allures représentées sur la figure 2.6 :

- la courbe I présente un maximum. On admet que ce maximum τ_{max} correspond à l'état de rupture, la déformation continuant de croître au-delà de ε_I alors que la sollicitation appliquée diminue ou, au mieux, reste constante.
- la courbe II a une allure asymptotique : on définit arbitrairement la rupture à une valeur maximale de la déformation (τ_{lim} correspondant à ε_{II}), au-delà de laquelle le comportement de l'ouvrage est incompatible avec sa destination.

Il existe deux principaux modes de rupture :

- les ruptures par glissement sur une surface.
- les ruptures par plastification et écoulement d'une masse de sol. (Lamri, 2008)

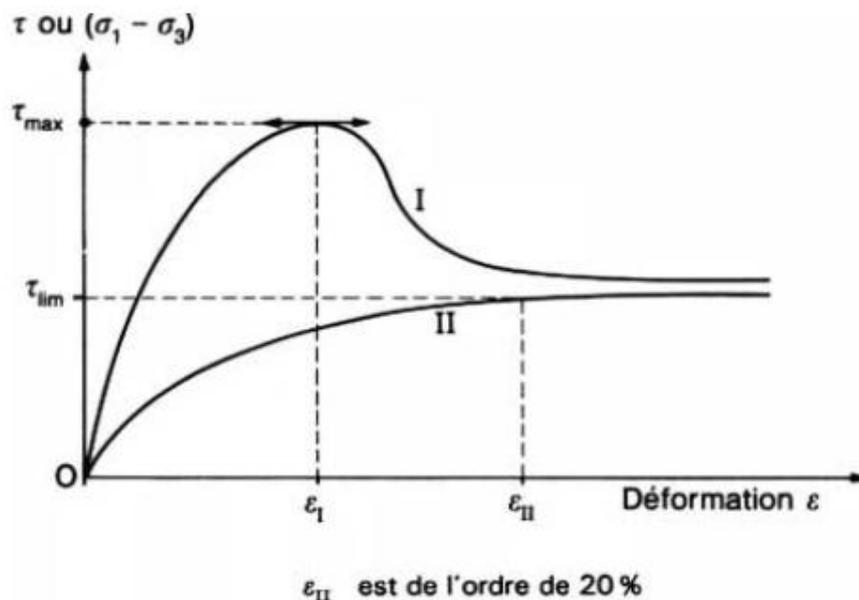


Figure 2.6 : Courbe effort-déformation dans un essai de cisaillement, (Ihcene, 2008).

4.3 Relation avec la nature du sol

Il existe une certaine correspondance entre le comportement des sols et leur nature. En particulier, en se référant aux deux grands types de sols, pulvérulents ou grenus, d'une part, cohésifs ou fins, d'autre part, on peut indiquer ce qui suit.

Pour les sols pulvérulents ou grenus à forte perméabilité (galets, graviers, sables grossiers, etc.), quelles que soient les conditions d'application de l'effort, on observe toujours un comportement drainé.

Pour les sols pulvérulents ou grenus de faible perméabilité (sables fins, notamment lorsque leur épaisseur est importante) et pour les sols cohésifs ou fins (sols limoneux, argileux, organiques), on peut observer l'un ou l'autre des deux comportements, suivant les conditions d'application de l'effort. Le comportement de ces sols en cas de sollicitation rapide est, en principe, non drainé, tandis que le comportement drainé ne peut être observé que dans des essais lents (Ihcene, 2008).

4.4 Facteurs influant sur la résistance au cisaillement

La vitesse d'application de l'effort et les conditions de drainage, la résistance du sol observée dans les essais et dans les massifs de sols en place dépend de nombreux facteurs.

Dans le cas des sols fins, argileux ou organiques, la résistance au cisaillement augmente avec la vitesse de déformation, que ce soit en comportement drainé ou en comportement non drainé.

On peut définir plusieurs résistances au cisaillement, correspondant à des états de déformation différents :

- la résistance de pic, qui correspond à la structure initiale du sol et est atteinte pour de petites déformations (de l'ordre du pour-cent).
- la résistance stabilisée après le pic, ou résistance à l'état critique, en général égale à la résistance que l'on obtient quand le sol est remanié et que la courbe « effort-déformation » a une forme asymptotique.
- la résistance après de grands déplacements sur une surface de rupture, appelée résistance résiduelle. (Ihcene, 2008).

4.5 Comportement à court et à long terme :

On considère donc deux comportements extrêmes du sol :

Un comportement à court terme (C.T): L'eau n'a pas eu encore le temps de s'évacuer et le sol se déforme à volume constant. Il s'agit alors d'un comportement non drainé (étude en contraintes totales).

Un comportement à long terme (L.T): Au bout d'un temps assez long (fin de la consolidation primaire), l'eau libre s'est évacuée. Le comportement du sol est régi uniquement par celui du squelette solide (Boudlal, 2013).

Pour les sols pulvérulents ou grenus de faible perméabilité (sables fins, notamment lorsque leur épaisseur est importante) et pour les sols cohérents ou fins (sols limoneux, argileux, organiques), on peut observer l'un ou l'autre des deux comportements, suivant les conditions d'application de l'effort (Harichane, 2013).

Les caractéristiques de cisaillement des sols sont exploitées dans deux types principaux de calculs de stabilité :

- les calculs dits à court terme, qui correspondent à une situation faisant immédiatement suite à l'application rapide d'un effort et à laquelle sont associées les caractéristiques non drainées. Ces calculs sont habituellement effectués en contraintes totales dans les sols fins (pour les sols perméables inclus dans le calcul, on utilise simultanément les caractéristiques drainées et les contraintes effectives).

Les termes « rapide » ou « lent » caractérisant l'application de l'effort sont appréciés par référence à la vitesse de consolidation.

- les calculs dits à long terme, qui correspondent à l'une des situations suivantes, auxquelles sont associées les caractéristiques drainées :
 - ✓ Application lente de l'effort (par rapport à la vitesse de dissipation des surpressions interstitielles).
 - ✓ délai suffisant pour la dissipation des surpressions interstitielles après une application rapide de l'effort (Ihcene, 2008).

Cette distinction, essentielle en mécanique des sols, est résumée dans le tableau 2.2

Tableau 2.2 : Calculs de stabilité en mécanique des sols (Ihcene, 2008).

Type de sol	Perméabilité	Type de calcul	Caractéristiques	Contraintes induites	pression interstitielle induite	Drainage
sol pulvérulent ou grenu	forte à moyenne	Long terme	Drainées	Effectives	$u = 0$	Autorisé
	faible	Long terme et court terme	Drainées	Effectives	$u = 0$	Autorisé
sol fin	faible à très faible		Non drainées	Totales	$u = 0$	Autorisé ou empêché

D'après la norme NF P 94-07-1-1 l'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette (figure 2.7). Il consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette sous l'effort un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai.
- Produire un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

Les essais sont arrêtés à la rupture.

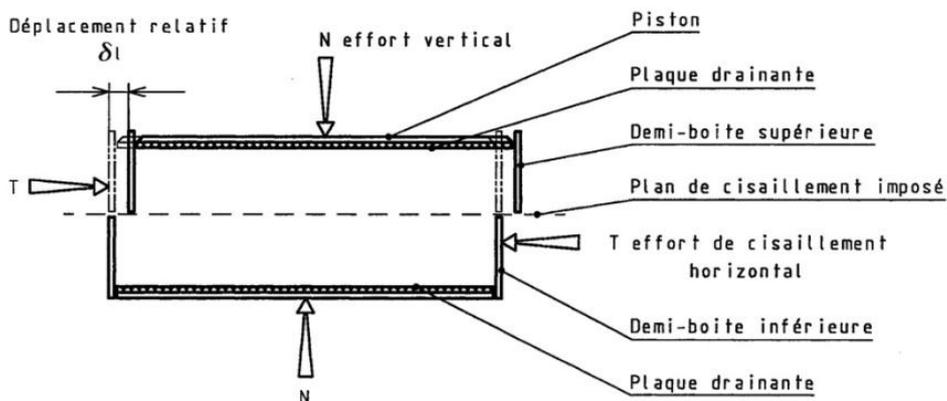


Figure 2.7 : Principe d'un essai de cisaillement à la boîte (NF P 94-07-1-1).

La loi de Morh-Coulomb traduit clairement l'importance de l'état de contrainte dans le phénomène de rupture. Pour chaque contrainte s , il y a une résistance au cisaillement (figure 2.8).

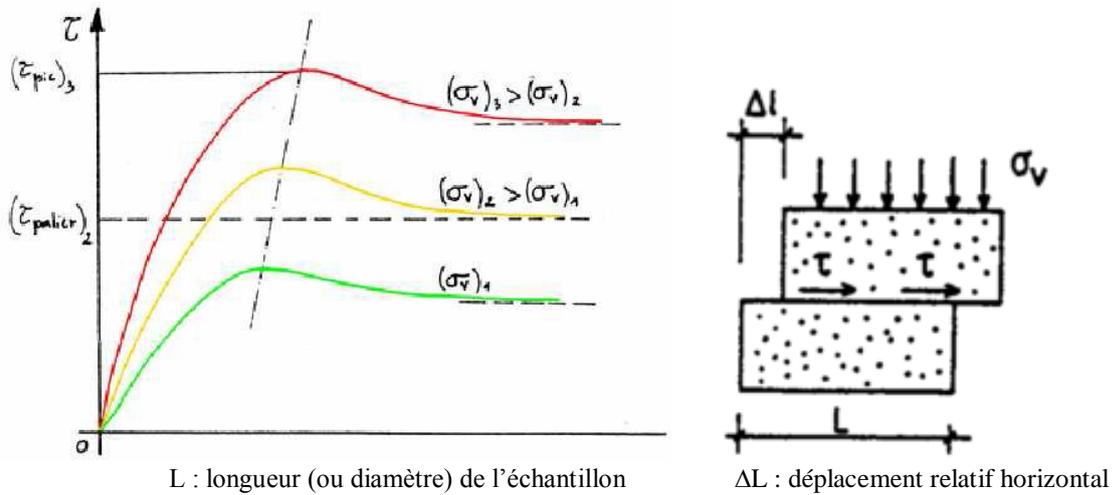


Figure 2.8 : Courbes contrainte – déplacement (Ihcene, 2008).

L'essai consiste dans la détermination des caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C (figure 2.9).

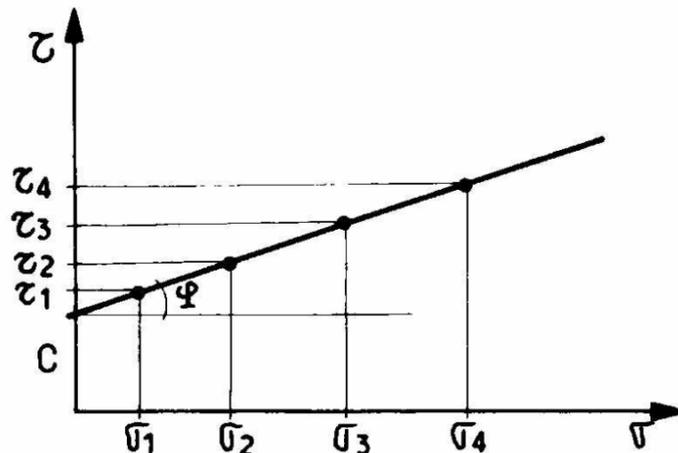


Figure 2.9 : Détermination de ϕ et C (Ihcene, 2008).

4.6 Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement direct :

4.6.1 Avantages :

- Simple
- Rapide

- Economique

4.6.2 Inconvénients :

- Pas de maîtrise des conditions de drainage.
- Pour les sols pulvérulents :
 - ✓ Drainage rapide.
 - ✓ Contraintes appliquées → contraintes effectives.
- Pour les sols fins :
 - ✓ Cisaillement rapide → contraintes totales et comportement à court terme.
 - ✓ Cisaillement lent (μ_m/min) → contraintes effectives et comportement à long terme.
 - ✓ Concentration de contraintes aux extrémités de la boîte
 - ✓ Rotation des plans principaux

5 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'identifier les critères de choix des sols destinés à la construction en terre, en présentant les différents critères proposés par CRATERreen termes de granulométrie et plasticité.

Ensuite, on a abordé le phénomène de retrait ainsi que la résistance de cisaillement des sols.

L'ensemble de ces informations vont être utiles pour la réalisation de notre étude expérimentale ainsi que l'interprétation des résultats qui vont être présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

RESULTATS EXPERIMENTAUX

1 INTRODUCTION :

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le sol doit satisfaire un certain nombre de critères pour être apte à être utilisé en tant que matériau destiné à la confection de BTC. Donc dans ce chapitre, on présentera les résultats des essais d'identification réalisés au laboratoire de géotechnique au département de génie civil ainsi que les résultats des essais de cisaillement et de retrait effectués au LTPO. L'ensemble des essais sont réalisés sur un tuf de la région de Beni-Saf.

2. IDENTIFICATION DU MATERIAU

2.1 Introduction :

Identifier un sol c'est connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose. Autrement dit c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser.

Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides appelés essais d'identification.

Dans ce qui suit, nous allons réaliser l'ensemble des essais pour identifier le sol choisi pour cette étude.

2.2 Description du matériau :

Notre matériau est issu d'un stock de déblai du projet de raccordement de la ville de Béni- Saf au réseau ferroviaire national.

Le sol a été stocké pendant les mois de mars et avril de l'année 2015, au-cours de l'opération de terrassement de la voie à une hauteur de 5 à 6m. A côté de la cimenterie de Béni-Saf. (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Zone d'emprunt du matériau étudié(Google Earth, 2017).

2.3 Essais au laboratoire :

Pour caractériser un sol, il faut déterminer les paramètres de nature qui indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ces paramètres ne varient pas au cours du temps. L'objectif de ce travail est de préciser les paramètres et les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

Dans ce qui suit, on présentera pour chaque manipulation son but, le mode opératoire synthétisé ainsi que les résultats trouvés .Tous les essais ont été réalisés selon les normes AFNOR.

2.4 Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie:(NF P94-056 et 57)

Déterminer les proportions des particules solides de différentes tailles qui constituent le sol.

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont ils sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut (figure 3.2). La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

La sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules (figure 3.3).



Figure 3.2 : Analyse granulométrique par tamisage.



Figure 3.3 : Analyse granulométrique par sédimentation.

Après analyse des résultats, la courbe granulométrie du sol qui est écrêté à 5 mm est représentée sur la (figure3.4).

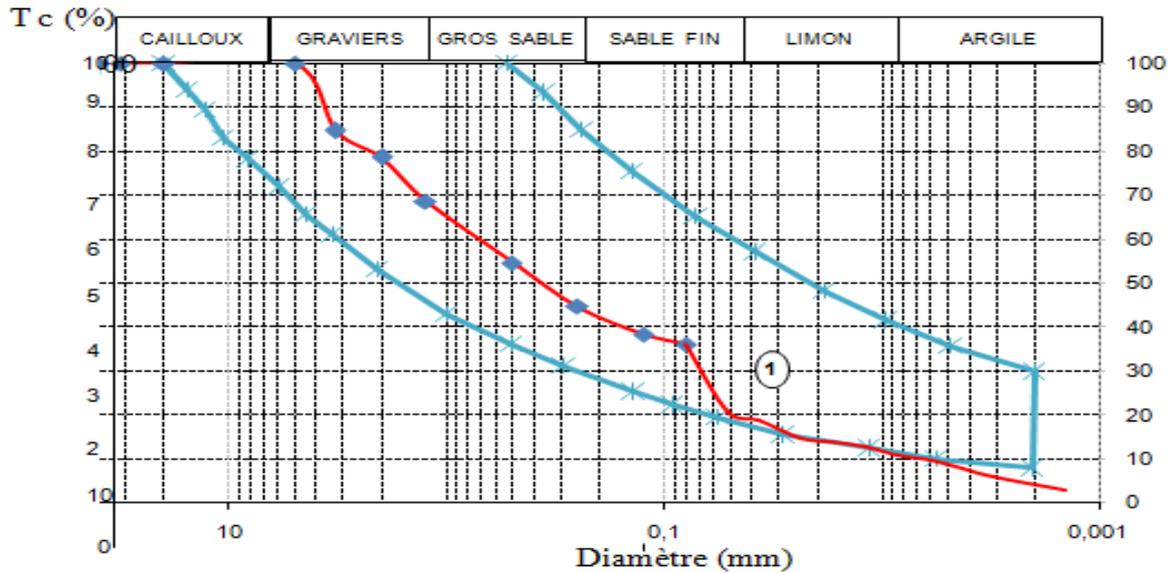


Figure 3.4 : Courbe granulométrique du sol étudié.

D'après la courbe granulométrique on trouve (figure 3.4) :

$$D_{60} = 0.7 \text{ mm}, D_{30} = 0.07 \text{ mm}, D_{10} = 0.008 \text{ mm}, D_{50} = 0.39.$$

Fraction de $80 \mu\text{m} = 38\% > 5\%$ \longrightarrow double classement et double symbole (SA) et (SL).

On constate aussi que la courbe granulométrique de tuf de Béni-Saf s'intègre dans sa majorité dans le fuseau CRATERre pour les BTC. Cependant on constate que le tuf de Béni-Saf présente une quantité d'argile légèrement inférieure à celle préconisée par les recommandations CRATERre et la norme Afnor XP P13-901.

2.5 Limites d'Atterberg: (NF P94-051)

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm). L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et en observer sa consistance. (Figure 3.5).

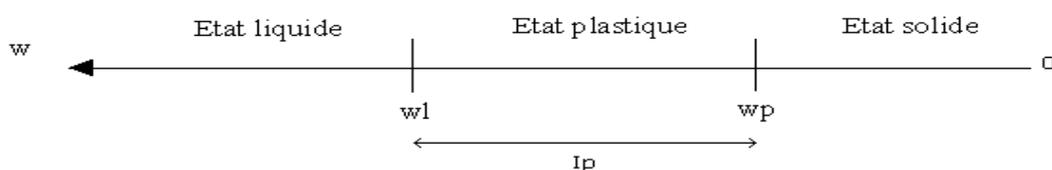


Figure 3.5 : Etat de consistance d'un sol (Armand, 2010).

Le but de ces essais est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique et liquide.



Figure 3.6 : Réalisation de l'essai de limite de liquidité.

Les résultats de l'essai sont reportés sur le graphique (Figure 3.7) :

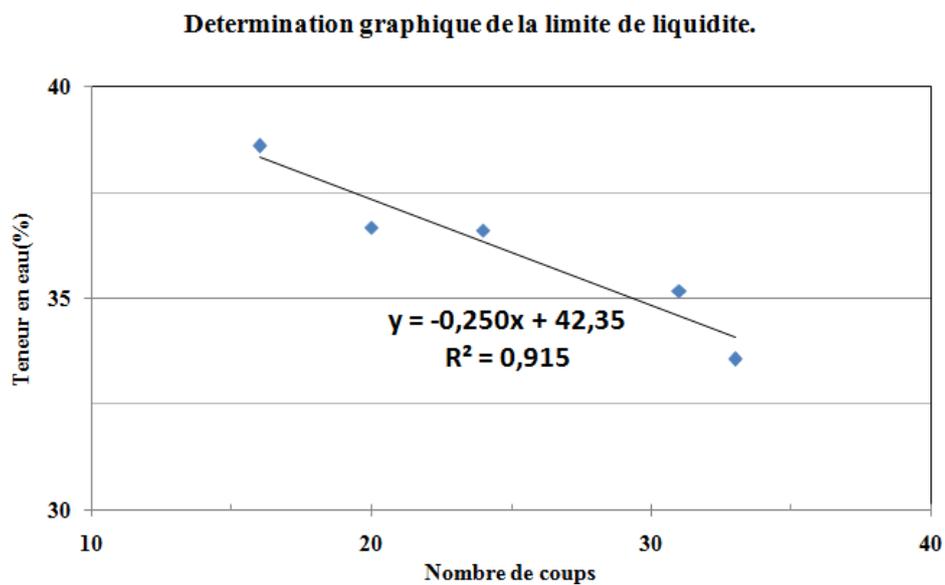


Figure 3.7 : Détermination graphique de la limite de liquidité.

Donc la limite de liquidité est $W_l=36\%$.

D'après la corrélation de BIAREZ et FAVRE (1976), la valeur de I_p vaut :

$$I_p=0.73 (W_l - 13) \text{ Donc } I_p = 16.8 \%$$

D'après le diagramme de Casagrande (figure 3.8), ($I_p = 16.79\%$ et $W_l = 36\%$) se situe dans la gamme des argiles peu-plastiques.

Donc, selon la classification LPC modifiée, le tuf de Beni-Saf est un sable argileux peu plastique Ap-SA

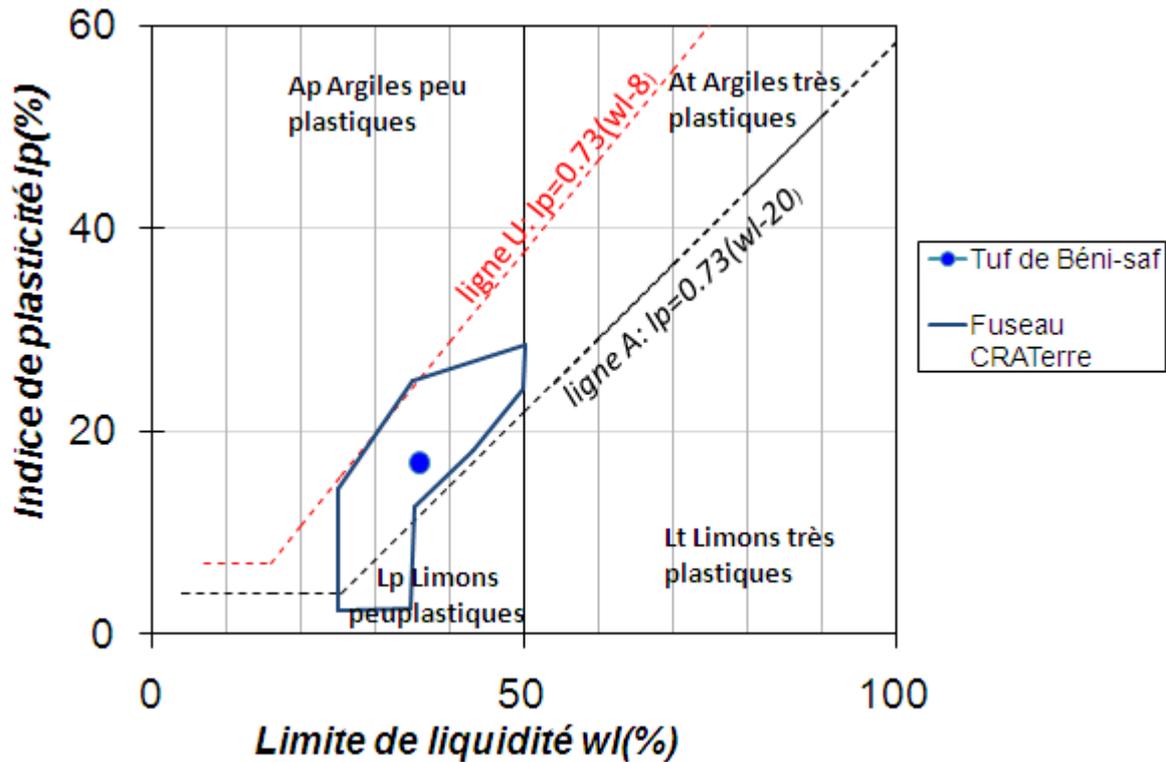


Figure 3.8 : Position du sol étudié dans l'abaque de Casagrande.

Aussi, du point de vue plasticité, on constate que le tuf de Béni-Saf répond aux exigences de plasticité, et s'intègre dans le fuseau de plasticité de CRATerre.

Donc, d'après les deux fuseaux (granulométrique et de plasticité), on peut conclure que notre sol est apte à être utilisé comme matériau de fabrication de la BTC.

2.6 Le poids volumique des grains solides :(NF P94-054)

Le principe de l'essai consiste à déterminer le volume des grains solides qui est mesuré au pycnomètre (figure 3.9), et en conséquence déterminer le poids volumique des grains solides.



Figure 3.9 : Réalisation d'essai de Pycnomètre.

Après réalisation de l'essai (Figure 3.9) le poids volumique des grains solide

$$\gamma_s = 27.1 \text{ kN/m}^3 \longrightarrow G_s = 2.71$$

2.7 Essai de compactage Proctor normal : (NF P 94-093)

Afin de compléter la caractérisation de notre matériau, nous avons déterminé les caractéristiques de compactage à l'OPN. Compacter un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...). Cette diminution de volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial.

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une énergie définie. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la densité sèche du matériau, et on trace la courbe de la densité sèche en fonction de la teneur en eau (figure 3.10), avec :

- W_{OPN} teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal.
- γ_{dOPN} poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal.



Figure 3.10 : Réalisation de l'essai de compactage.

Les résultats de l'essai de compactage dynamique sont représentés sur la figure 3.11 :

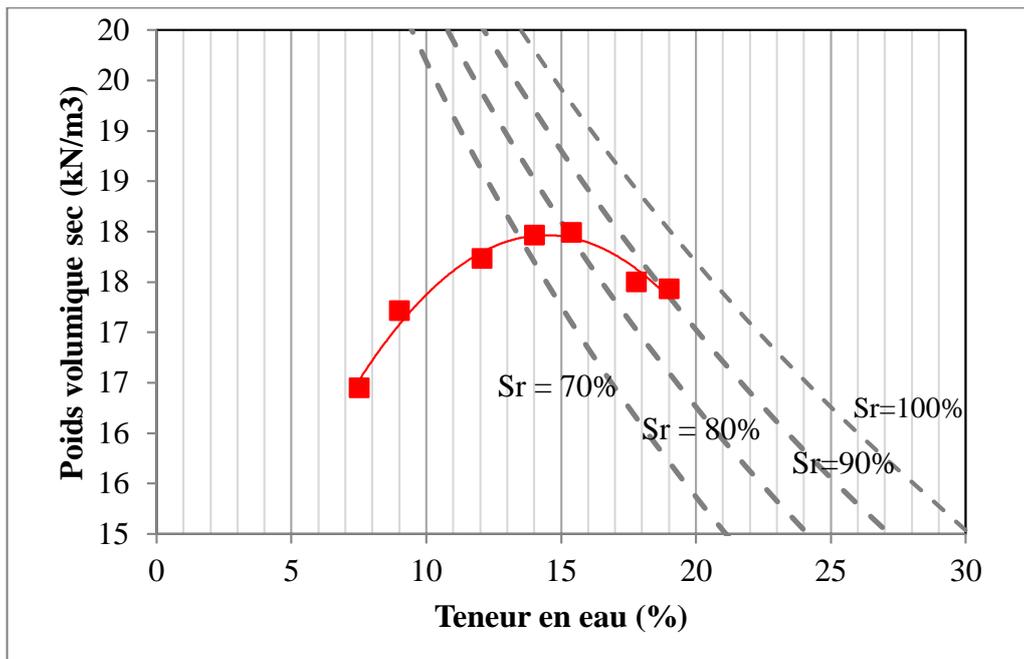


Figure 3.11 : Courbe de compactage du tuf de Béni-Saf.

Les valeurs de compactage obtenues en termes de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale sont représentées dans le tableau 3.1 suivant :

Tableau 3.1 : Paramètres de compactage à l'OPN.

w_{opt}	15%
γ_{dmax}	18kN/m ³

L'ensemble des résultats des essais d'identifications sont regroupés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Paramètres physiques et mécanique de sol étudié.

<i>Matériaux</i>		<i>Bèni-saf</i>	<i>Normes</i>
▪ Granulométrie			NF P 94-041
Gravier	(%)	21	
Sable	(%)	64	
limon	(%)	11	
Argile	(%)	4	NF P 94-057
	(%<2µm)	79	
	(%<80µm)	36	
d ₁₀	(µm)	0.008	
d ₃₀	(µm)	0.07	
d ₆₀	(µm)	0.7	
d ₅₀	(µm)	0.39	
C _u =d ₆₀ /d ₁₀		87.5	
C _c = (d ₃₀) ² / (d ₁₀ * d ₆₀)		0.875	
▪ Limites d'Atterberg			NF P 94-051
Liquidité W _l	(%)	36	
Plasticité W _p	(%)	19.2	
Indice de plasticité I _p	(%)	16.8	
▪ Densité des grains solides		2.72	NF P 94-054
▪ Proctor normal			NF P 94-093
γ _{dmax} /γ _w		1.79	
W _{opt}	(%)	15	

3 PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais de cisaillement direct sur le tuf de Béni-Saf, compacté à l'OPN. Les conditions initiales sont représentées sur le tableau 3.3. Le cisaillement est réalisé soit directement après compactage, ou après un certain nombre de jours de séchage du matériau (7jours, 14jours, 21jours, 28jours).

Une série d'essai, a été réalisé en condition saturés, directement après le compactage, tandis que les autres essais ont été réalisé à teneur en eau constante. Les essais réalisés sont de type non consolidés, non drainés (UU), avec une vitesse de cisaillement de 1.21mm/min, qui est une vitesse rapide.

Les conditions initiales et finales des essais réalisés sont donnée dans le tableau figure 3.3.

Tableau 3.3 : Conditions initiales et finales des différents essais réalisés.

Essai	Temps de séchage	Type d'essai	Conditions initiales						Conditions finales		
			$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$			w (%)			w (%)		
			1 ^{er} éch.	2 ^{ème} écha.	3 ^{ème} éch.	1 ^{er} éch.	2 ^{ème} écha.	3 ^{ème} éch.	1 ^{er} éch.	2 ^{ème} écha.	3 ^{ème} éch.
Sat-imm	immédiatement	saturé	16.71	17.05	17.3	14.9	14.9	14.7	18.31	19.21	18.44
w-const-imm	immédiatement	w constante	17.16	16.76	16.72	14.8	14.9	14.8	12.22	11.04	12.82
w-const-7	7j		16.89	16.99	17.2	1.82	1.82	1.84	1.38	1.36	1.34
w-const-14	14j		16.75	17.34	16.95	1.48	1.46	1.47	1.69	1.58	1.71
w-const-21	21j		16.67	17.16	17.26	1.34	1.34	1.35	1.4	1.5	1.6

4PREPARATION DES ECHANTILLONS

Dans le cadre de cette étude, les échantillons ont été obtenus par compactage statique. Ce mode de compactage a été retenu du fait qu'il permet d'obtenir des éprouvettes plus homogènes et une meilleure reproductibilité qu'avec le compactage dynamique.

Pour la préparation des échantillons aux différents essais projetés, on a suivi les étapes suivantes :

- Étuvage du matériau à une température de 105°C,
- Ecrêtage du matériau à 5mm

- Pour le compactage, toujours la quantité d'eau distillée est ajoutée au matériau sec, par le moyen d'un arrosoir. Au fur et à mesure de l'ajout d'eau on malaxe le matériau afin d'obtenir un mélange homogène. Après, le mélange est conservé dans des sacs étanches, puis laissé pendant au moins 24h dans un endroit hermétique pour l'homogénéisation de la teneur en eau. Avant chaque essai, une vérification de la teneur en eau est réalisée (Figure 3.12).
- le compactage statique été réalisé directement dans la boîte de cisaillement (figure. 3.13), Les dimensions de l'échantillon confectionné ($\pi \frac{60^2}{4} * 20\text{mm}$), ainsi que sa teneur en eau (w) et sa densité sèche (γ_d) étant connues, on peut facilement calculer le poids humide P_h à introduire dans le moule de compactage avec la formule (1). Les conditions initiales correspondent aux conditions de compactage à l'OPN, soit :

$$w_{\text{opt}} = 15\% \text{ et } \gamma_{d\text{max}} = 18\text{kN/m}^3$$

$$P_h = V \cdot \gamma_d \cdot (1+w) \quad [1], \text{ avec } V \text{ le volume de l'échantillon.}$$

- Mise en place de la cellule de cisaillement sur le bâti, et emplacement des capteurs de déplacement et de forces (anneau) (figure 3.16). Le cisaillement est réalisé à une vitesse de 1.2mm/min.
- Pour chaque essai, on applique les contraintes normales suivantes :

$$\sigma_N = 1 \text{ bar} = 100\text{kN/m}^2$$

$$\sigma_N = 2 \text{ bar} = 200\text{kN/m}^2$$

$$\sigma_N = 3 \text{ bar} = 300\text{kN/m}^2$$

- A la fin de chaque essai, on déduit les conditions finales en termes de teneur en eau (w_f) (Figure 3.13).



Figure 3.12 : Préparation du matériau à $w_{opt} = 15\%$.



Figure 3.13 : Préparation des échantillons par compactage statique.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Étude du retrait :

L'essai consiste de suivre l'évolution du volume totale et de la masse des échantillons compacté pour cisaillement, en fonction du temps jusqu'à stabilisation totale.

Les mesures de volume ont été réalisées à l'aide d'un pied à coulisse digitale et la variation de masse se fait par des pesées à des intervalles de temps (figure 3.14).

La courbe de retrait obtenue est représentée sur la figure 3.15. On note, qu'après le compactage, les mesures de volume et de teneur en eau ont été déterminé immédiatement. Cependant, les autres mesures n'ont pas pu être prises qu'après 72 h (coïncidence avec le week-end).

Pour chaque mesure et pesés on déduite la variation des paramètres suivant :

- Indice de vide
- La teneur en eau

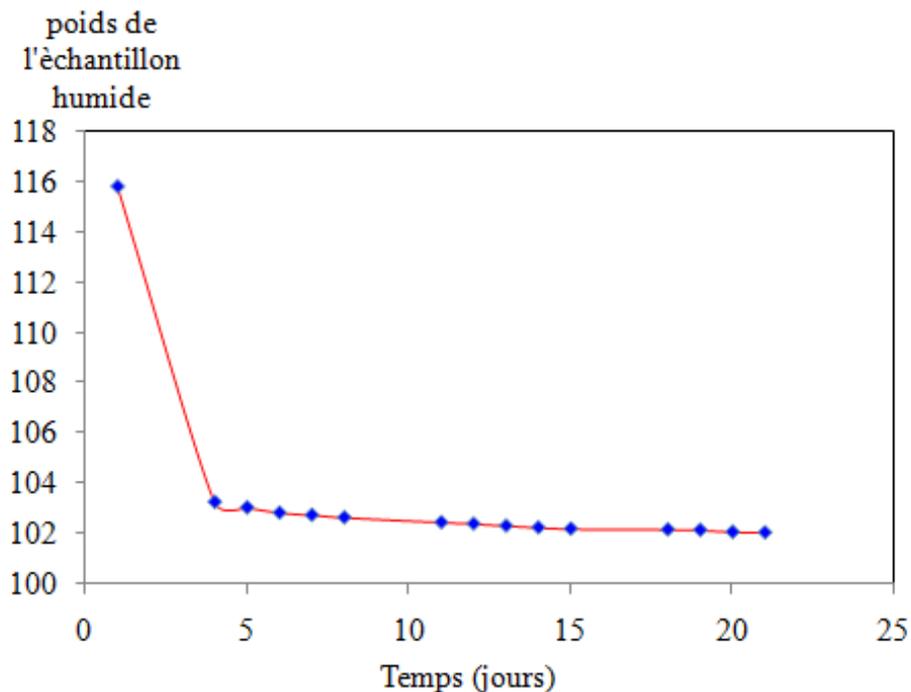


Figure 3.14 : la courbe variation du poids des échantillons en fonction des jours de prise.

Les résultats des indices des vides en fonction de la teneur en eau sont représentés sur la figure (3.15).

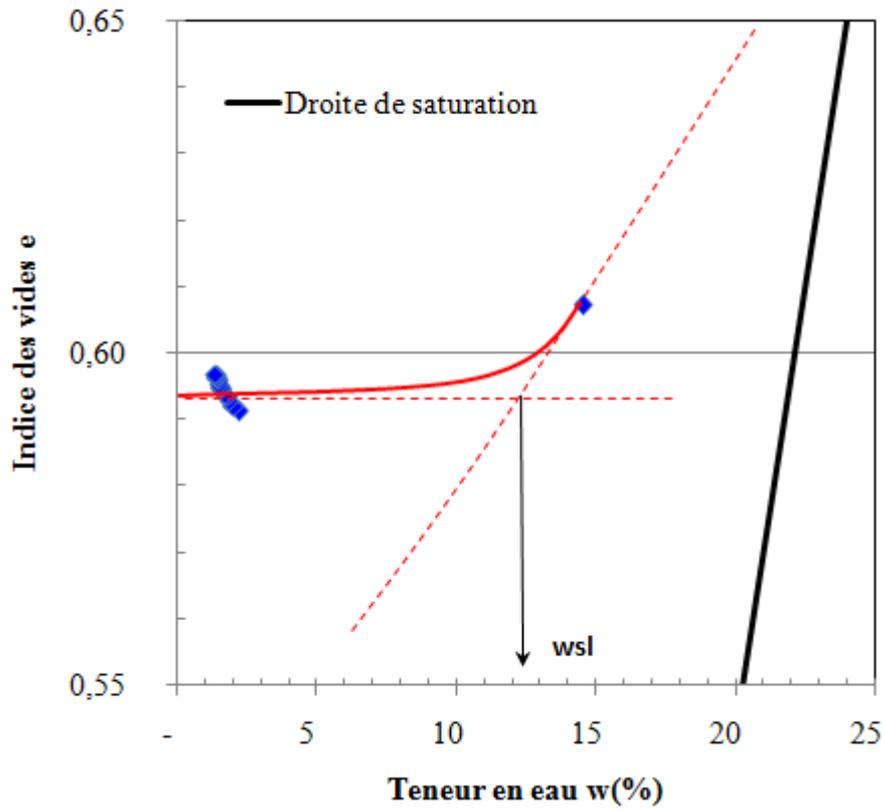


Figure 3.15 : Courbe de retrait.

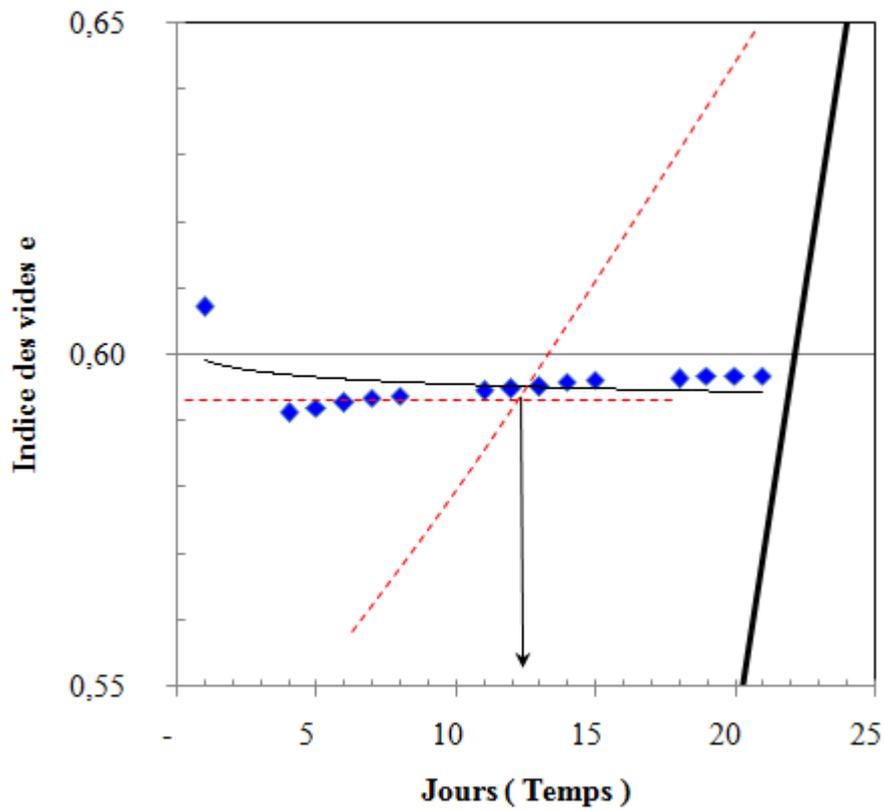


Figure 3.16 : évolution d'indice des vides en fonction du temps de séchage.

D'après la courbe de l'évolution d'indice des vides en fonction de la teneur en eau on constate que la courbe de retrait est positionnée loin de la droite de saturation indiquent que le caractère non saturé des échantillons compacté à l'optimum et après séchage selon la figure 3.15 montre qu'après compactage le sol subit une phase de retrait résiduel très réduite jusqu'à la limite du retrait estimé à $w_{sl} = 12.5\%$.

Ensuite on constate que le sol entre dans une phase de non retrait, à cette phase l'indice des vides tend vers une valeur asymptotique de l'ordre de $e_i - e_{min}$

On note que la déformation totale de l'échantillon pendant 21 jours est de l'ordre :

$$\frac{x}{1+e_i} = \frac{e_i - e_{min}}{1+e_i} = \frac{0.61 - 0.592}{1+0.61} = 1.11\% \text{ pour une valeur de teneur en eau } 13.5\%.$$

Cette valeur nous semble très faible, et montre que le compactage à l'OPN n'induit pas des déformations volumiques important qui peuvent influencées sur le comportement mécanique de la brique en terre (éviter l'apparition de fissures).

5.2 Essai de cisaillement direct :

5.2.1 La procédure de l'essai de cisaillement :

Pour l'ensemble des essais de cisaillement, la procédure est comme suit :

- ✓ Préparer les plaques drainantes
- ✓ Découper et tailler l'échantillon
- ✓ Peser l'échantillon
- ✓ Introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes
- ✓ Placer le piston muni de sa plaque sur le sommet de l'éprouvette
- ✓ Mettre l'éprouvette dans le châssis étanche fixé sur le bâti
- ✓ Fixer le système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T) et noter la valeur d'origine du capteur de l'effort (T)
- ✓ Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et noter la valeur d'origine
- ✓ Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine
- ✓ Mesurer le déplacement vertical du piston δh en fonction du temps

Chapitre 3 : Résultats expérimentaux

- ✓ Désolidariser les deux demi-boîtes en enlevant les goupilles
- ✓ Mettre en marche la machine à la vitesse désirée
- ✓ Noter les lectures données par le capteur de mesure de l'effort (T)
- ✓ Arrêter l'essai
- ✓ Enlever les poids du tableau de charge
- ✓ Enlever la boîte du chariot de la machine
- ✓ Mesurer la teneur en eau
- ✓ Nettoyer les pierres poreuses et les boîtes de cisaillement
- ✓ Noter les valeurs calculées



Figure 3.17 : L'appareil de cisaillement.



Figure 3.18 : Réalisation de l'essai de cisaillement cas du sol saturé ou non saturé.

5.2.2 Résultats et discussion

Les résultats des essais de cisaillement sont donnés en termes de variation de la contrainte de cisaillement en fonction de déplacement (figure 3.18).

D'après ces résultats on constate une augmentation de la résistance de cisaillement au pic en fonction la contrainte normale appliquée.

Par exemple dans le cas de l'essai Sat-imm la résistance au pic varie entre 28 kPa à 38 kPa quand la contrainte normale varie de 100 kPa à 300 kPa.

Dans les cas des essais w- constantes sauf 21 jours, généralement les contraintes de cisaillement de pic ne changent pas beaucoup par rapport aux essais saturés (Sat-imm).

Cependant les résistances au pic ont nettement évalué pour passer de 38 kPa pour une $\sigma_N = 100$ kPa et à 45 kPa pour $\sigma_N = 300$ kPa. Ceci montre que l'effet de séchage n'est clairement observé qu'au-delà du 14^{ème} jour.

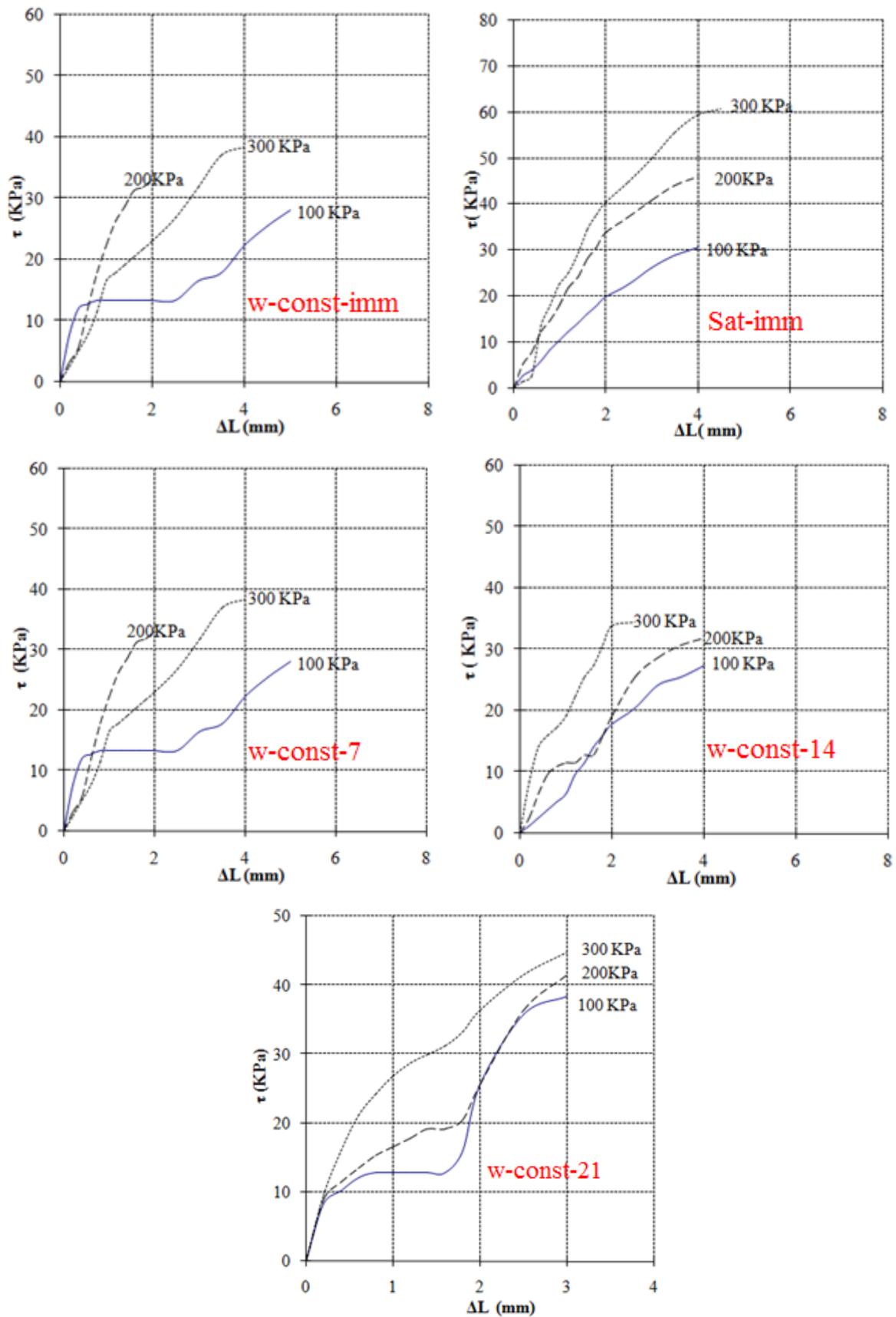


Figure 3.19 : La courbe contrainte- déplacement.

L'interprétation des résultats à l'aide de la représentation de Mohr-Coulomb nous a permis de déterminer les valeurs de C et ϕ pour l'ensemble des essais réalisés. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 3.19.

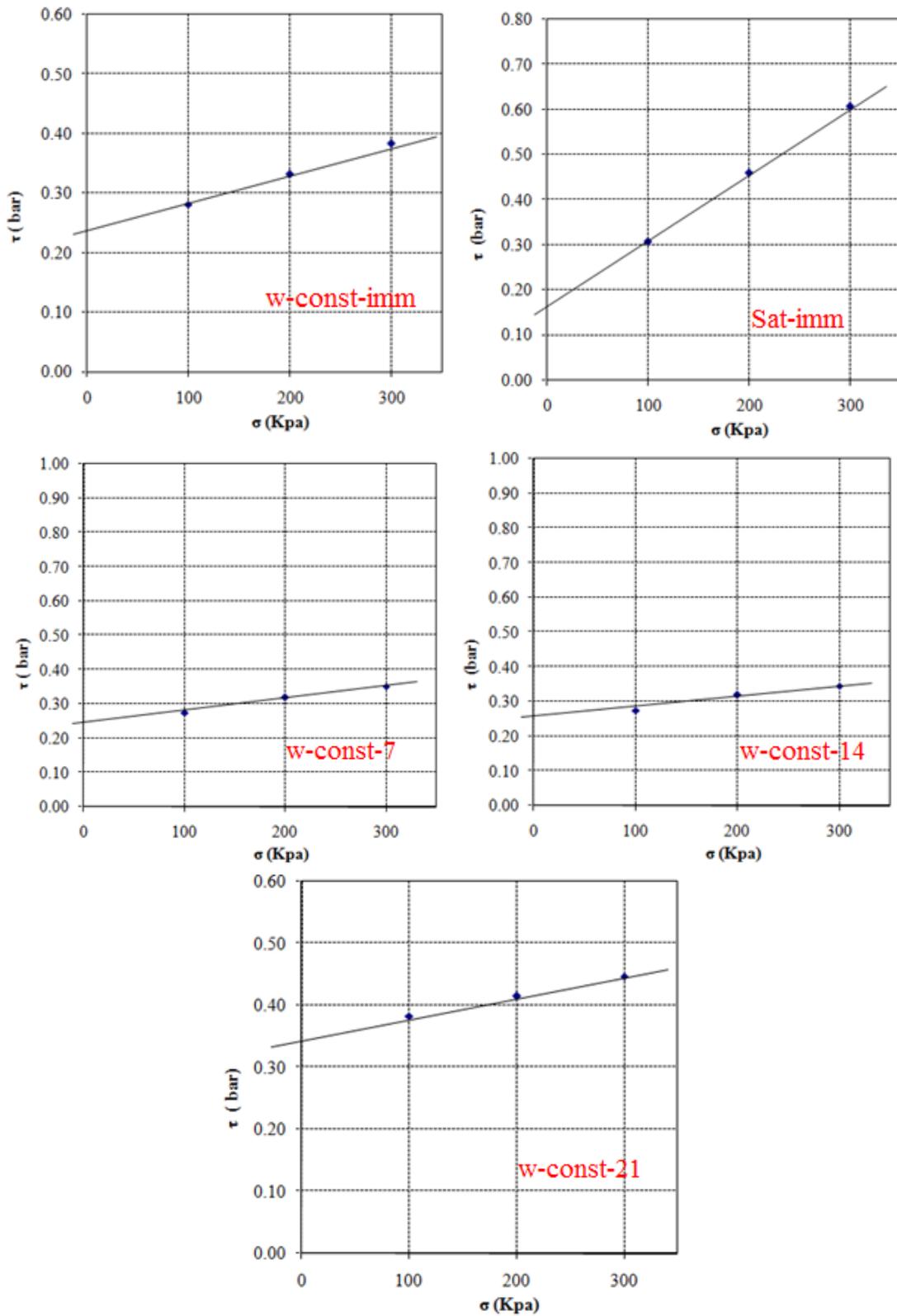


Figure 3.20 : Détermination de ϕ_u et C_u .

Le tableau 3.4 regroupe l'ensemble des valeurs de C et ϕ déterminées.

Tableau 3.4 : Résultats d'essai de cisaillement

	C_u	ϕ_u
Sat-imm	17	8
w-const-imm	23	3
w-const-7	25	2
w-const-14	27	1
w-const-21	35	2

Le traçage des données de ce tableau en fonction du temps de séchage nous a permis de tirer les remarques suivantes :

- D'après la figure 3.20 on constate que la cohésion pour l'essai saturé (Sat-imm) vaut 17 kPa, valeur qui est inférieure à l'ensemble des cohésions des essais w-const.
- En outre la cohésion pour les essais à w-const évaluée en fonction du temps de séchage. Entre l'essai réalisé w-const-imm et l'essai w-const-21, un taux d'augmentation de l'ordre plus de 50%. Cette différence est liée à l'existence d'une cohésion capillaire due à la non saturation des échantillons et qui évolue en fonction de temps de séchage (3.20) et par conséquent la succion dans le sol.

Cette cohésion peut être estimée par la différence entre les valeurs de cohésion à w-const et la cohésion à la saturation (2).

$$C_{cp} = C_{non\ sat} - C_{sat} \quad (2)$$

Cette cohésion passe d'une valeur de 6 kPa immédiatement après compactage à 16 kPa à 21 jours.

- D'une autre manière, le séchage de brique en terre induit une résistance supplémentaire au matériau. Cependant, l'humidification du matériau, induit une perte de sa résistance qui peut être estimée de plus de 50% d'où la nécessité de la stabilisation de ce type de matériau afin d'augmenter les caractéristiques de résistances. Aussi d'explorer le côté durabilité des BTC.

L'équation (3) peut être proposé pour évaluer l'augmentation de la cohésion en fonction du temps de séchage $Cu_{w\ sat} = 22.21e^{0.019j}$; $R^2 = 0.903$

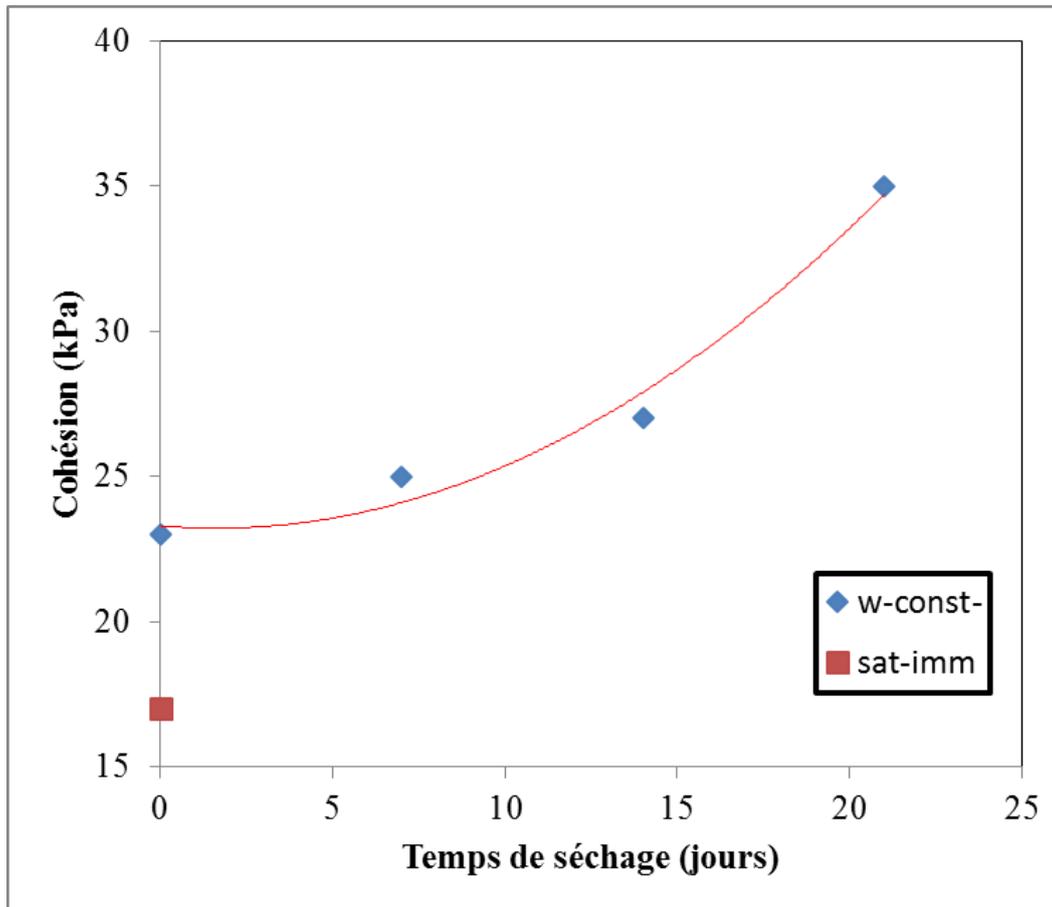


Figure 3.21 : Evolution de la cohésion en fonction du temps de séchage des échantillons.

En ce qui concerne la figure 3.21, on constate que la valeur trouvée à sat-imm vaut 8°.

Cependant les valeurs trouvées par les essais à w-const sont légèrement inférieure. Ces valeurs ne sont pas influencées par le temps de séchage, et on peut dire que la Cu à w-const est indépendante du temps de séchage.

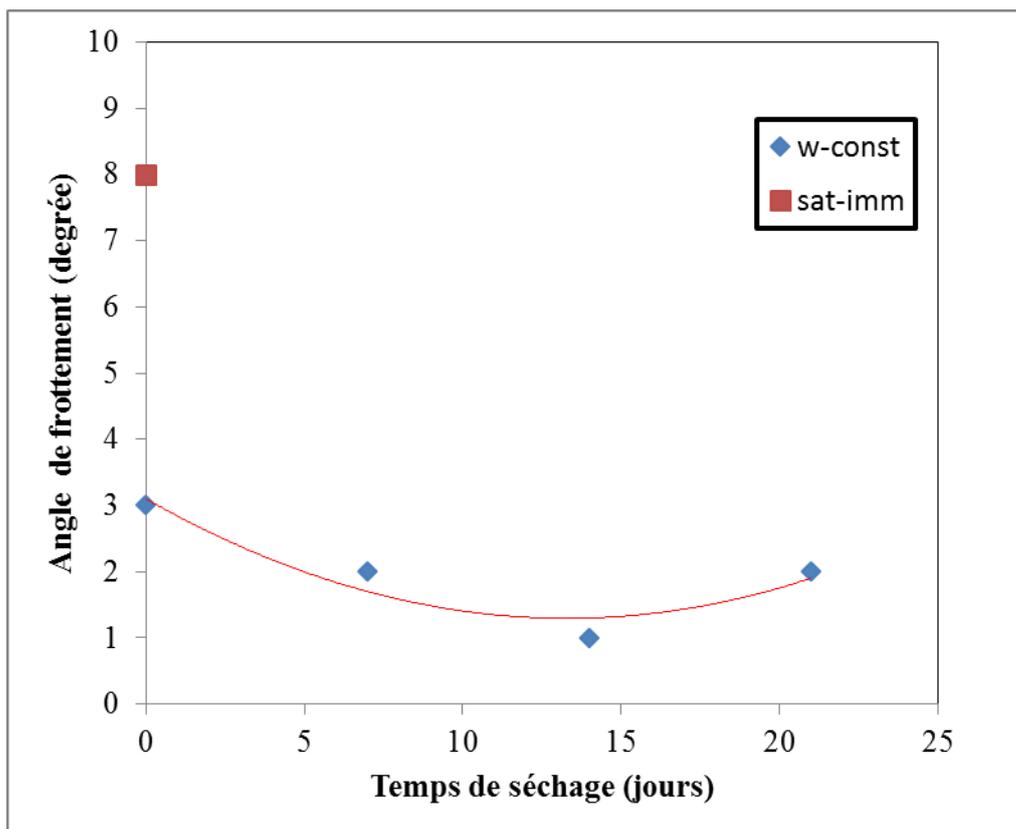


Figure 3.22 : Evolution de l'angle de frottement en fonction du temps de séchage des échantillons compactés à l'OPN.

6 CONCLUSION :

Au terme de ce chapitre les résultats obtenus montrent que notre matériau respecte l'ensemble des exigences CRATERre pour l'utilisation de ce matériau dans la fabrication des briques en terre cru compactés BTC.

L'étude de retrait nous a montré que le compactage à l'OPN n'induit pas des déformations volumiques importantes qui peuvent nuire à la brique en terre.

En terme de résistance au cisaillement, les résultats ont montré que le séchage induit une cohésion capillaire qui augmente en fonction de temps de prise et qui influe directement sur la valeur de la résistance au cisaillement.

CONCLUSION GENERALE

A travers les chapitres de ce mémoire, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le matériau terre destinée à la construction doit obéir simultanément à deux fuseaux, l'un granulométrique et l'autre de plasticité. Notre matériau, le tuf de Béni-Saf s'intègre exactement dans ces deux fuseaux.

L'étude expérimentale réalisée sur le tuf de Beni-Saf, compacté aux conditions de l'optimum Proctor normal, à montrer que :

- Les déformations volumiques induites par retrait sont négligeables. Ceci montre que l'effet de séchage des briques en tuf de Beni-Saf compactées à l'OPN, est limité, et ne risque pas de causer l'apparition de fissures.
- La résistance de cisaillement présente une augmentation de la valeur au pic en fonction la contrainte normale appliquée.
- Les résultats ont montré aussi que le séchage induit une cohésion capillaire qui augmente en fonction du temps de séchage.
- La cohésion pour l'essai saturé (Sat-imm) est inférieure à l'ensemble des cohésions des essais w-const, car on a l'effet de la cohésion capillaire.
- L'essai réalisé à w-const-imm et l'essai à w-const à 21 jours de séchage montre un taux d'augmentation de l'ordre plus de 50% pour les valeurs de cohésion.
- D'une manière inverse, on peut penser que le processus d'humidification induira une chute de la valeur de la cohésion et par conséquent la résistance au cisaillement. Ceci montre d'une part, la nécessité de la protection des briques en terre contre l'humidité, et d'autre part, l'intérêt de la stabilisation de ce type de matériau.

À l'issu de ce travail, un certain nombre de points doivent être éclairés dans les travaux futurs.

On peut citer les perspectives suivantes :

- Étudier l'effet des ajouts tel que la chaux ou des ajouts naturels tel que : le foin, l'Alfa, pour voir l'incidence de ses stabilisants sur les paramètres de résistance et de retrait.
- Augmenter l'énergie de compactage afin d'obtenir de meilleurs résultats en terme de résistance.

- Étudier comment améliorer la durabilité du matériau terre et contrecarrer la diminution ou disparition de la cohésion capillaire lors de l'humidification.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ait Kadi S. 2012, performances thermique du matériau terre pour un habitat durable des régions aride et semi arides: cas de Timimoun

Anger et Fontaine, 2009, Construire en terre, une autre voie pour loger la planète, laboratoire CRATerre-ENSAG.

Armand P. 2010, Étude des constructions en briques de terre stabilisée à l'aide des extraits du parkia biglobosa, Mémoire de master, institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement.

Bouddal O. 2013, Étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Guillaud et Houben, 1995, Traité de construction en terre, laboratoire CRATerre-ENSAG.

Harichane K. 2013, Cours mécanique de sol, Université Hassiba Ben-Boubali de Chlef.

Ihcene L.2008, Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique, mémoire de magistere, université 20 aout 1955-Skikda.

Krami et Reggadi, 2011, Étude des briques de terre gypso-calcaire stabilisée par le ciment ou par la chaux, Mémoire de master, Université KasdiMerbah de Ouargla.

Mekhermeche A. 2012, Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksourssahariennes. Mémoire de Master, université KasdiMerbah Ouargla.

Merniche S. 2016, Terre crue : stabilisation naturelle, Rapport, Ecole Nationale Supérieure de Paris.

Norme NF P 94-041, sols : reconnaissance et essais identification granulométrique méthode de tamisage par voie humide.

Norme NF P 94-071-1, Sols : Reconnaissance et Essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : Cisaillement direct.

Norme NF P 94-093, Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

Norme NF P94-051, sols : reconnaissance et essais détermination des limites d'Atterberg - limite de liquidité à la coupelle _ limite de plasticité au rouleau).

Norme NF P94-054, sols : reconnaissance et essais détermination de la masse volumique des particules solides des sols –méthode du pycnomètre à eau).

Norme NF P94-056, sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthode par tamisage à sec après lavage et **Norme NF P94-057**, sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthode par sédimentation.

Norme XP 13-901, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - spécifications - méthodes d'essais - conditions de réception.

Nowamooz H. 2008, Retrait/Gonflement des sols argileux compactés et naturels, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de lorraine France.

Paulus J. 2015, construction en terre crue: Dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique, Mémoire de master, Ouagadougou, Université de Liège, 2015.

Taallah B. 2014, Etude du comportement physico mecanique du bloc de terre comprimée avec fibres, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.