



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : SALMI Abdelhakim & NAILI Mouad

DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Génie Civil
OPTION : Conception et Calcul des Structures

Thème

*Etude du comportement physico-mécanique des murs en blocs de
terre comprimés et stabilisés :
Application : construction en région saharienne*

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr : Lakhdari. M. Fateh	M.A.A	Président
Mme : Djoudi. A	M.C.B	Examineur
Mr : Gueddouda. M. K	M.C.A	Rapporteur
Mr : Nouioua. T	M.A.A	Co- Rapporteur

Promotion : Juin - 2016

REMERCIEMENTS

A la lumière de la fin de ma promotion, et comme les coutumes l'exigent et le devoir l'impose et D'abord, volontiers je dévoue mes sincères remerciements à ceux qui ont consacré et procurer leur temps précieux, leur énergie et leur moyens pour que je sois ici présent aujourd'hui et en ce moment.

Il ne sera jamais suffisant d'exprimer mes reconnaissances et remerciements via ces mots simplistes, alors que ça serait une empreinte morale aggravé dans ma mémoire qui composera une partie de ma personnalité.

Il s'agit du soutien de tout genre de mes parents et mes frères, de mes amis et mes copains,

Mon immense gratitude à monsieur GUEDDOUDA Mohamed Kamel, mon directeur de thèse et NOUIOUA Taher, pour m'avoir confié ce travail, dont j'apprécie la qualité de ses orientations et ses comportements dignes d'un encadreur, ses bonnes attentions et ses sérénités.

Aussi je veux remercie monsieur DEMDOUM Abdallah de son soutien durant ce travail.

A joindre mes cordiales salutations et remerciements aux membres du jury qui m'ont honoré de bien vouloir juger ce travail :

- *Mr. LAKHDARI M .Fateh ; président*
- *Mme. DJOUDI Amina ; examinatrice*

Conscient, aussi, de l'effort et de l'intérêt et encouragements qui m'ont été réservés pour la réussite de cette thèse de la part de tous les professeurs du département de Génie Civil.

L'honneur d'accomplir mon parcours atypique sous leur coupole, mes profondes gratitude vous sont offertes messieurs.

En addition, mes vives et parfaites convictions sont allouées au personnel du laboratoire de Génie Civil de l'assistance et l'accompagnement sans hésitation ni qui m'ont porté, pendant la durée de la réalisation de mon travail de laboratoire.

Pour Achever mes grâces, permettez-moi messieurs d'attirer votre attention que la réussite d'un travail est une culture de sincérité de confiance et de collaboration.

MERCI

إهداء

أهدي عملي ومذكرتي إلى من كانت ليوم تخرجي
بالانتظار.... لكن سبقتنا وسبقتها الأقدار... فرحلت لدار
القرار إلى روح أمي العزيزة الطاهرة سهرت على الليالي
ولم تنالي.

إلى الحبيبة وقرّة عيني والدتي العزيزة رحمها الله وأكرمها
بالجنة إن شاء الله.

إلى سدي في الحياة أبي العزيز بارك الله في عمره.
إلى إخوتي: مصطفى و إلياس.

إلى كل من أصدقائي الأعزاء.

إلى كل من يؤمن بالله الواحد ويعلم أن فوق كل ذي علم عليم
أهدي ثمرة جهودي.

النايلي معاد

إهداء

إلى من يسعد قلبي بلقياها
إلى روضة الحب التي تنبت أزكى الأزهار
أمي

إلى رمز الرجولة والتضحية
إلى من دفعني إلى العلم وبه ازداد اقتنار
أبي

إلى من هم اقرب إليّ من روعي
إلى من بهم استمد عزتي وإصراري
إخوتي

إلى من أنسني في دراستي وشاركني همومي
تذكراً وتقديراً
أصدقائي

أهدي هذه المذكرة

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
ملخص	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	vi
Liste des photos	viii
Introduction Générale	1

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction.....	5
2. Les matériaux appropriés au développement d'un habitat économique.....	5
2.1. Définitions	5
2.1.1. Matériaux locaux.....	5
2.1.2. Matériaux modernes	5
2.1.3. Matériaux appropriés : critères de choix (figure I.1).....	5
3. Historique.....	7
4. Avantages et inconvénients de la construction en terre (Bensaâda.A, 2011)	12
4.1. Avantages Economiques.....	12
4.2. Avantages Ecologiques.....	12
4.3. Inconvénients	13
5. Types De Construction en Terre	13
5.1. Adobe (Bensaâda.A, 2011).....	13
5.2. Le torchis (Bensaâda.A, 2011)	14
5.3. Le Pisé (Bensaâda.A, 2011)	15
5.4. La bauge (terre-paille) (Bensaâda.A, 2011)	16
5.5. Bloc de Terre Comprimée (BTC) (Bensaâda.A, 2011).....	16
5.6. Caractéristiques de quelque type de brique de terre crue	18
Le tableau suivant présente les caractéristiques des différents types des blocs en terre crue..	18
6. Différentes phases de la terre	18
6.1. Une phase solide	18

Elle comprend :	18
6.2. Une phase fluide	19
7. Facteurs de L'érosion.....	19
Tableau I. 3 : Facteurs de dégradation affectant la durée de vie des matériaux de construction ...	19
7.1. Causes de l'érodabilité	20
<input type="checkbox"/> La Battance	20
<input type="checkbox"/> L'Humidité.....	20
<input type="checkbox"/> Le Ruissellement	20
<input type="checkbox"/> Le Retrait De Fissuration	20
8. Critères De Stabilités.....	21
<input type="checkbox"/> Un Choix Judicieux Des Sols	21
9. Stabilisation	21
9.1. Stabilisation Physique	21
9.2. Stabilisation physico-chimique	24
<input type="checkbox"/> Traitement Dans La Masse	24
<input type="checkbox"/> Traitement De Surface.....	24
9.3. Stabilisation physico-mécanique	25
<input type="checkbox"/> Modes de compactage	25
<input type="checkbox"/> Energie de compactage et teneur en eau.....	27
10. Conclusion.....	29

Chapitre II : Techniques Expérimentales

1. Introduction	31
2. Essais d'identification physique.....	31
2.1. Masse volumique	31
2.2. Analyse granulométrique.....	34
2.3. Equivalent de sable (NF P 18-598).....	35
2.4. Limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	38
2.5.Essais Bleu Méthylène (NF P 94-068)	41
2.6.Essai de Proctor	43
3. Essais Mécaniques	45
3.1. Résistance à la compression simple (NF P 98-232-1).....	46

3.2. Résistance à la traction (NF P 98-232-3).....	46
4. Conclusion.....	48

Chapitre III : Techniques Expérimentales

1. Introduction.....	50
2. Caractérisations des matériaux.....	50
2.1. Echantillonnage.....	50
2.2. Caractéristiques des matériaux.....	51
2.2.1. Argile.....	52
2.2.2. Sable de dune.....	57
2.2.3. liant hydraulique.....	59
3. Conclusion.....	61

Chapitre IV : Résultats et interprétations

1. Introduction.....	63
2. Programme expérimental.....	63
3. Essai de Proctor normal.....	70
4. Limites d'Atterberg.....	71
5. Résistance mécanique.....	71
5.1. Résistance à la compression en fonction d'âge.....	72
5.1.1. Argile pure.....	72
5.1.2. Argile pure traité à la chaux et au ciment.....	73
5.1.3. Mélanges argile – sable de dune.....	74
5.1.4. Mélanges Argile + sable traité à la chaux et au ciment.....	80
5.2. Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge.....	84
6. Conclusion.....	90
Conclusion Général.....	92
Références bibliographique.....	94

ملخص

العجز في السكن بالجزائر يقدر بأكثر من مليوني وحدة سكنية, و عليه يجب إضافة أكثر من مائة وعشرين ألف وحدة سكنية سنويا لتلبية احتياجات الأسر الجديدة, مجهودات وجهت نحو تنمية أساليب جديدة في البناء تحث على استخدام المواد المحلية بغية الرد المناسب على هذه الأزمة.

وفي هذا الإطار, فإن المواد المحلية مثل كتل الأرض المضغوطة هي موضوع العديد من الدراسات. الانتعاش المتزايد للمنشآت ذات الكتل الأرضية يجذب اهتمام الكثير من الأبحاث, لأن هذا النوع من البناء يستخدم على نطاق واسع في المناطق الصحراوية من البلاد لوفرة المواد وانخفاض تكلفة البناء.

ويتعلق هذا العمل بدراسة المواد المحلية و ذلك لاستخدامها في البناء بكتل الأرض المضغوطة في المناطق الجنوبية من الجزائر.

المواد الأساسية المستعملة هي الرمال الكثبانية و الطين. حيث أن دراسة خلطات الطين و الرمال الكثبانية بمختلف الكثافات تستند على معيار قوة الضغط و ذلك يسمح بالحصول على الخلطات الأمثل.

ثم أجريت دراسة بإضافة روابط هيدروليكية على الخلطات المثالية قصد تحسين سلوكها الميكانيكي.

و قد كانت النتائج مشجعة للغاية والتي تلبى احتياجات القواعد المتوفرة.

الكلمات الرئيسية : أرض, رمال الكثبان, رابط هيدروليكي, كتلة أرض مضغوطة, سلوك ميكانيكي, الأغواط.

Résumé

Le déficit en logement en Algérie est estimé à plus de deux millions de logements auquel on doit ajouter plus de cent vingt mille logements chaque année pour subvenir aux besoins de nouvelles familles. Des efforts ont été orientés vers le développement de nouvelles méthodes de construction en utilisant des matériaux locaux afin d'apporter une réponse adéquate à cette crise.

Dans ce cadre, les matériaux locaux comme les blocs de terre ont fait le sujet de plusieurs investigations. De plus en plus la valorisation des constructions en terre attire l'intérêt des recherches car ce type de construction est largement utilisé dans les zones sahariennes du pays vu l'abondance du matériau et le faible coût de la construction.

Le présent travail concerne une étude de valorisation de matériaux locaux en vue d'une utilisation dans la construction en blocs de terre comprimés (BTC) dans les régions sud de l'Algérie.

Les matériaux de base étant le sable de dune et l'argile de Laghouat. Une étude de formulation des mélanges de sable de dune et argile à différentes densités sèches basée sur le critère de résistance à la compression a permis d'adopter des mélanges optimaux.

On a conduit ensuite une étude de traitement par des liants hydrauliques sur les mélanges optimaux afin d'améliorer le comportement mécanique de blocs en terre comprimés.

Les résultats obtenus sont très encourageants qui répond aux exigences des dispositions réglementaires.

Mots-clés : Terre, sable de dune, liant hydraulique, blocs de terre comprimée (BTC), comportement mécanique, Laghouat.

Abstract

The deficiency of housing in Algeria is estimated to be approximately at more than two millions homes to which have to be add about a hundred and twenty thousand homes each year to meet the needs of new families. Efforts have been directed towards the development of new methods of construction using local materials to provide an adequate response to this crisis.

In this context, local materials such as blocks have been the subject of several investigations. More and more the valorisation of land constructions attracts the interest of research for this type of construction which is widely used in the Saharan areas of the country that have an abundance of the material and the low cost of construction.

The present work concerns the study of the valorisation of the local material to use it in the building with Compressed Earth Block (CEB) in the southern regions of Algeria.

The basic materials were the sand of the dunes and the clay from Laghouat area. A formulation study use mixtures of sand and clay to different dry densities based on the compressive strength criterion it possible to adopt optimum mixtures.

We did a treatment study by hydraulic binder on the optimal mixtures to improve the mechanical behaviour of the compressed earth block.

The results were very encouraging and meet the requirements of the regulations.

Keywords: Earth, sand dune, hydraulic binder, compressed earth blocks (CEB), mechanical behavior, Laghouat.

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Opérations des différentes réalisations en terre en ALGERIE	11
Tableau I. 2 Caractéristiques des briques de terre crue.....	18
Tableau I. 3 Facteurs de dégradation affectant la durée de vie des matériaux de construction.....	19
Tableau II.1 Masses volumique de diverses substances	33
Tableau II.2 Nature et qualité du sable selon E_{sv} ou E_{sp}	37
Tableau II.3 Classification de Casa grande pour les sols fins (Bensaâda.A 2011)	39
Tableau II.4 Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA LCPC 1992).....	40
Tableau II.5 Classification des argiles selon la surface spécifique(S_s) (Bultel, 2001).....	43
Tableau II.6 les caractéristiques du moule Proctor.....	44
Tableau III. 1 Essai masse volumique apparente.....	52
Tableau III. 2 Essai masse volumique absolue.....	52
Tableau III. 3 Analyse chimique d'argile.....	52
Tableau III. 4 Analyse granulométrique d'argile.....	53
Tableau III. 5 Les limites d'Atterberg d'argile.....	54
Tableau III. 6 Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	56
Tableau III. 7 Analyse chimique du sable de dune.....	57
Tableau III. 8 Paramètres d'identifications de sable de dune.....	58
Tableau III. 9 Résultats de l'essai équivalent de sable.....	59
Tableau III. 10 Paramètres d'identifications de sable de dune.....	59
Tableau III. 11 Composition chimique de la chaux de Saida.....	60
Tableau III. 12 Caractéristiques Physiques.....	60
Tableau III. 13 Analyse chimique du ciment.....	61
Tableau IV. 1 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude.....	67
Tableau IV. 2 Résultats de l'essai de Proctor.....	70
Tableau IV. 3 limites de liquidité en fonction pourcentage de sable.....	71
Tableau IV. 4 Résistance à la compression simple (R_c) en fonction d'âge d'argile pure	72
Tableau IV. 5 Résistance à la compression simple (R_c) en fonction d'âge.....	73
Tableau IV. 6 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90% A + 10% S) en fonction d'âge.....	74

Tableau IV. 7 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80% A + 20% S) en fonction d'âge.....	75
Tableau IV. 8 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70% A + 30% S) en fonction d'âge.....	75
Tableau IV. 9 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60% A + 40% S) en fonction d'âge.....	76
Tableau IV. 10 Les mélanges optimaux à condition de la résistance à la compression simple à 28j.....	79
Tableau IV. 11 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude....	80
Tableau IV. 12 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S) traité.....	81
Tableau IV. 13 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S) traité.....	81
Tableau IV. 14 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S) traité	81
Tableau IV. 15 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S) traité	82
Tableau IV.16 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude.....	85
Tableau IV. 17 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure.....	85
Tableau IV. 18 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S)	86
Tableau IV. 19 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S)	86
Tableau IV. 20 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S)	86
Tableau IV. 21 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S)	86
Tableau IV. 22 les résistances de BTC et pisé	89

Liste des Figures

Figure I. 1 Critères d'appréciation d'un matériau approprié.....	6
Figure I.2 Carte cratère montrant la présence de construction en terre.....	7
Figure I. 3 600 logts en BTC à travers l'Algérie.....	11
Figure I. 4 Schéma des différents procédés constructifs à partir du matériau terre.....	23
Figure I. 5 Briques pleines et perforées et brique perforées.....	23
Figure I. 6.a Densité en fonction de la teneur en eau (compactage statique).....	26
Figure I. 6.b Densité en fonction de la teneur en eau (vibro-compression).....	26
Figure II. 1 Procédure de l'essai masse volumique apparente	32
Figure II. 2 Procédure de l'essai masse volumique absolue	33
Figure II. 3 Etat de teneur en eau	39
Figure II. 4 Présente l'abaque de Casagrande pour la classification des sols fins	40
Figure II. 5 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997).....	40
Figure II. 6 Schéma du mode d'application de l'effort de compression	46
Figure II. 7 Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.....	47
Figure II. 8 Schéma du mode d'application de l'effort de Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale.....	47
Figure III. 1 Localisation de la zone étudiée.....	50
Figure III. 2 Courbe granulométrique d'argile.....	54
Figure III. 3 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997).....	55
Figure III. 4 Courbe Proctor d'argile utilisé	56
Figure III. 5 Courbe granulométrique du sable de dune.....	58
Figure IV. 1 Plan de travail de la partie expérimental	65
Figure IV. 2 Courbes Proctor normal des différentes quantités de sable de dune ajouté.....	70
Figure IV. 3 Les limites de liquidité (WL) en fonction de % d'argile	71
Figure IV. 4 Résistance à la compression en fonction d'âge.....	72
Figure IV. 5 Les résistances à la compression simple de mélange traité à (4%, 8 % ciment) et (4%, 8% chaux)	74
Figure IV. 6 Mélange (90%A+10%S) non traité.....	76
Figure IV. 7 Mélange (80%A+20%S) non traité	77

Figure IV. 8 Mélange (70%A+30%S) non traité	77
Figure IV. 9 Mélange (60%A+40%S) non traité	78
Figure IV. 10 Les courbes des mélanges optimales à la résistance à la compression simple....	79
Figure IV. 11 La courbe de mélange (90%A+10%S) traité	82
Figure IV. 12 La courbe de mélange (80%A+20%S) traité	83
Figure IV. 13 La courbe de mélange (70%A+30%S) traité.....	83
Figure IV. 14 La courbe de mélange ((60%A+40%S) traité.....	84
Figure IV. 15 La courbe de mélange argile pure traité.....	87
Figure IV. 16 La courbe de mélange ((90%A+10%S) traité	87
Figure IV. 17 La courbe de mélange ((80%A+20%S) traité.....	88
Figure IV. 18 La courbe de mélange ((70%A+30%S) traité.....	88
Figure IV. 19 La courbe de mélange (60%A+40%S) traité	89

Liste des Photos

Photo I.1 La tour de Babel.....	8
Photo I.2 Pyramides d’Egypte.....	8
Photo I. 3 Casbah Marocaines.....	8
Photo I. 4 Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie.....	8
Photo I. 5 Aztèques de Mexique.....	8
Photo I. 6 Shibam, la " Manhattan du désert " (Yémen).....	13
Photo I. 7 Confection du torchis	14
Photo I. 8 Construction d’un mur	14
Photo I. 9 Maison a Colombage	14
Photo I. 10 Mosquée du Méchouar, Tlemcen	15
Photo I. 12 Mur Eden Project, (Angleterre)	15
Photo I. 11 Maison en pisé en Auvergne (France)	15
Photo I. 13 Courtoisie de Gérard Bavay (France ,2002)	16
Photo I. 14 Bauge au Costa Rica	16
Photo I. 15 Fabrication des blocs de terre comprimée à l’aide d’une presse manuelle (Cinva Ram).....	17
Photo I. 16 Fabrication des blocs de terre comprimée à l'aide d'une presse mécanique	17
Photo I. 17 Ecole expérimentale construite en béton de terre comprimée (Soudan).....	17
Photo II. 1 Opération d’ajout du matériau	32
Photo II. 2 Appareillage d’équivalent de sable	37
Photo II. 3 La méthode de calcul visuel	38
Photo II. 4 La méthode de calcul par piston	38
Photo II. 5 Boite de Casagrande (limite de liquidité).....	41
Photo II. 6 Essai de limite de plasticité.....	41
Photo II. 7 Le cas positif et négatif de l’essai de bleu	42
Photo II. 8 Moule Proctor Normal avec la dame dans laboratoire de Génie Civil (Laghouat)...	44
Photo II. 9 Moule Proctor Normal avec la dame	44
Photo II. 10 Moule utilisé dans le compactage	45
Photo II. 11 Presse hydraulique.....	45
Photo IV. 1 Les échantillons non traités (argile pure) qui ont été testés lors de l’étude	68
Photo IV. 2 Les échantillons non traités (argile + sable de dune) qui ont été testés lors de l’étude.....	69

Photo IV. 3 Les échantillons non traités (argile + sable de dune) qui ont été testés lors de l'étude.....	69
Photo IV. 4 Les échantillons traités (argile + sable + liant) qui ont été testés lors de l'étude....	69
Photo IV. 5 Essai de compression simple en laboratoire de Génie Civil (Laghouat).....	89
Photo IV. 6 Essai de traction par fendage (Essai Brésilien) au laboratoire de Génie Civil (Laghouat).....	89

*Introduction
Générale*

Introduction Générale

La terre est une matière naturelle, largement disponible, dont la transformation en matériau de construction requiert peu de dépenses énergétiques. Ses grandes qualités plastiques, écologiques et esthétiques ont permis à nos ancêtres de l'utiliser en abondance pour édifier leurs demeures, et ce en parfait accord avec leur environnement.

Les sols, de par leur abondance et leur facilité d'accès, sont des matériaux de construction millénaires. Cette ancienneté a révélé les problèmes que pose leur utilisation, sans toute fois les gommer.

Aussi, l'idée de les améliorer n'est elle pas nouvelle. La muraille de Chine et certaines voies romaines ont été réalisées à l'aide de terre "traitée". Il en est de même dans le domaine du bâtiment avec par exemple "la tour de Babel" qui, selon les archéologues, aurait été bâtie en terre stabilisée au bitume.

Dans beaucoup de pays d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique elle n'a jamais cessé que la terre est un matériau de construction privilégié.

Déjà en Inde et en Amérique latine dans les années 50, les bétons de terre comprimée voient leur première utilisation. Par la suite, de nombreuses études relatives à leurs comportements mécaniques (résistance en traction, compression) et physiques (érosion, capillarité, succession etc.) se sont rapidement multipliées. On est arrivé à un consensus partiel sur des procédures d'essais relatifs aux blocs de terre comprimée pour murs et cloisons par exemple.

En Algérie, l'utilisation de la terre est une tradition très ancienne. Elle était employée non seulement dans les campagnes mais également dans les villes. Actuellement, malgré la tendance à utiliser le béton de ciment, plus de 50% des habitations du Sahara algérien sont encore en "toub" (LNTPB 1973). Presque toutes les constructions dites traditionnelles sont réalisées avec la terre associée à d'autres matériaux d'appoint, tels que les ajouts végétaux (paille et autres) ou minéraux.

Nous avons ainsi hérité d'un riche patrimoine bâti qui marque le paysage de nos régions et le cœur de beaucoup de villes historiques.

Ces quelques exemples nous montrent que l'utilisation des sols recouvre des domaines aussi différents en apparence que les routes et le bâtiment, mais on découvre aussi que le traitement des sols est une technique ancienne.

Les matériaux de constructions subissent des efforts et réagissent aux efforts simples de compression ou de traction. Ils subissent en tout premier lieu les effets de leur propre poids puis des charges qu'ils supportent. Ils réagissent dans la mesure où le sol offre une force de réaction qui les empêche de s'enfoncer. Le poids tend à écraser les matériaux, à les compresser. La qualité première d'un matériau de construction est donc de résister à cette pression sans se déformer. En effet, la résistance du poids provoquée par la réaction du sol entraîne dans le corps d'un cylindre du matériau les efforts de compression. Le cylindre résiste tant que les éléments qui le composent restent compacts. La résistance d'une colonne se mesure par sa capacité à supporter une charge sans se déformer.

Afin de nous assurer que les blocs en terre comprimés (BTC) dont nous avons déterminé les propriétés mécaniques sont bien adaptés à la construction, nous avons réalisé des essais en compression simple et en traction par fendage. En effet, à défaut d'améliorer les propriétés physiques ou mécaniques des BTC, il faudrait s'assurer que l'introduction de ciment ou de la chaux dans les matériaux n'entraîne pas une baisse de leurs propriétés mécaniques au-dessous d'une valeur critique. D'autre part, il convient de s'assurer que les éléments incorporés dans les blocs de terre comprimée ne présentent pas de risques pour l'environnement. En effet, les considérations environnementales sont actuellement très débattues et connaissent une constante évolution. Ces essais consistent à mesurer à l'aide d'une presse la résistance à la compression simple et à la traction par fendage, à une échéance de 28 jours, d'une éprouvette cylindrique normalisée.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer expérimentalement le comportement mécanique de mélanges de sable de dune-argile, et rechercher, ce faisant, le mélange optimal satisfaisant en termes de résistance à la compression pour la construction en terre comprimé dans les régions sud de l'Algérie.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est constitué d'une synthèse bibliographique on mentionne les critères d'appréciation d'un matériau approprié, plus un historique qui donne une vue sur les techniques de mise en œuvre de la terre comme matériaux de construction, on présente aussi les actions influentes sur sa durabilité.
- Le deuxième chapitre consiste à la présentation des techniques expérimentales ou on expose les méthodes et les techniques expérimentales, des essais utilisés dans ce projet à savoir : Les essais d'identification : (la masse volumique, analyse granulométrique, équivalent de sable, essai Proctor, limite d'Atterberg et l'essai de bleu) et les essais mécaniques : (résistance à la compression simple, résistance à la traction par fendage).
- Dans le troisième chapitre, on présente les résultats des essais d'identifications de deux matériaux radicalement différents (Argile et Sable de dune) utilisés pour confectionner les blocs en terre.
- Le quatrième chapitre présente une étude expérimentale, on présente les résultats et les interprétations des essais réalisés sur les blocs en terre comprimés réalisés sur plusieurs mélanges argile et sable à différents pourcentages avant et après traitement par plusieurs liants hydrauliques et après durcissement sur le comportement mécanique.

On termine ce travail par des conclusions générales qui résument les principaux résultats obtenus. Des perspectives à court et moyen termes ont été proposées.

Chapitre I :
Etude
Bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction

Les choix technologiques liés aux matériaux de construction jouent un rôle important dans la recherche des solutions aux problèmes d'habitat économique. Dans ce chapitre on présente les différents aspects des constructions en terre à savoir ; l'historiques des constructions en terre dans le monde, leurs avantages et inconvénients, les types de construction en terre, les facteurs de dégradation et les critères de stabilités.

2. Les matériaux appropriés au développement d'un habitat économique

2.1. Définitions

2.1.1. Matériaux locaux

Nous entendons pour les matériaux locaux tous les matériaux produits à partir de matières premières locales.

De ce fait, nous nous plaçons dans un cadre technologique où toute solution est acceptable, dès que la technique de production adoptée est applicable et justifiable sur le plan économique. Cette justification des conditions économiques se fait à partir, des moyens financiers disponibles, des potentialités industrielles et artisanales.

2.1.2. Matériaux modernes

Ce sont les matériaux utilisés dans les constructions des pays industrialisés. Ils sont généralement importés car ne pouvant être produits localement (exemples : ciment, produits en acier, vitreries...).

2.1.3. Matériaux appropriés : critères de choix (figure I.1)

Ce sont des matériaux dont l'utilisation s'inscrit dans une stratégie d'auto-développement donc d'autosuffisance. Ils doivent donc apporter des solutions précises aux problèmes particuliers d'une région.

Les critères de choix des matériaux appropriés seront donc :

- 1- Emploi des matières premières locales ;
- 2- Prix de revient suffisamment faible ;
- 3- Demandé, peu d'investissement et des installations simples, et peu de distances dans les circuits de distribution ;
- 4- Utiliser au maximum les ressources humaines locales et des technologies facilement maîtrisables.

Une solution technologique ne sera appropriée que si elle s'adapte à la géographie, à la géologie, à l'économie et aux ressources locales en matière de main d'œuvre, énergie... Il faudra donc faire preuve de bon sens et ne pas proposer des procédés demandant beaucoup d'eau dans des régions désertiques.

Dans un pays donné, aucune production de matériaux de construction ne peut se développer si elle repose sur trop d'éléments ou de produits d'importation.

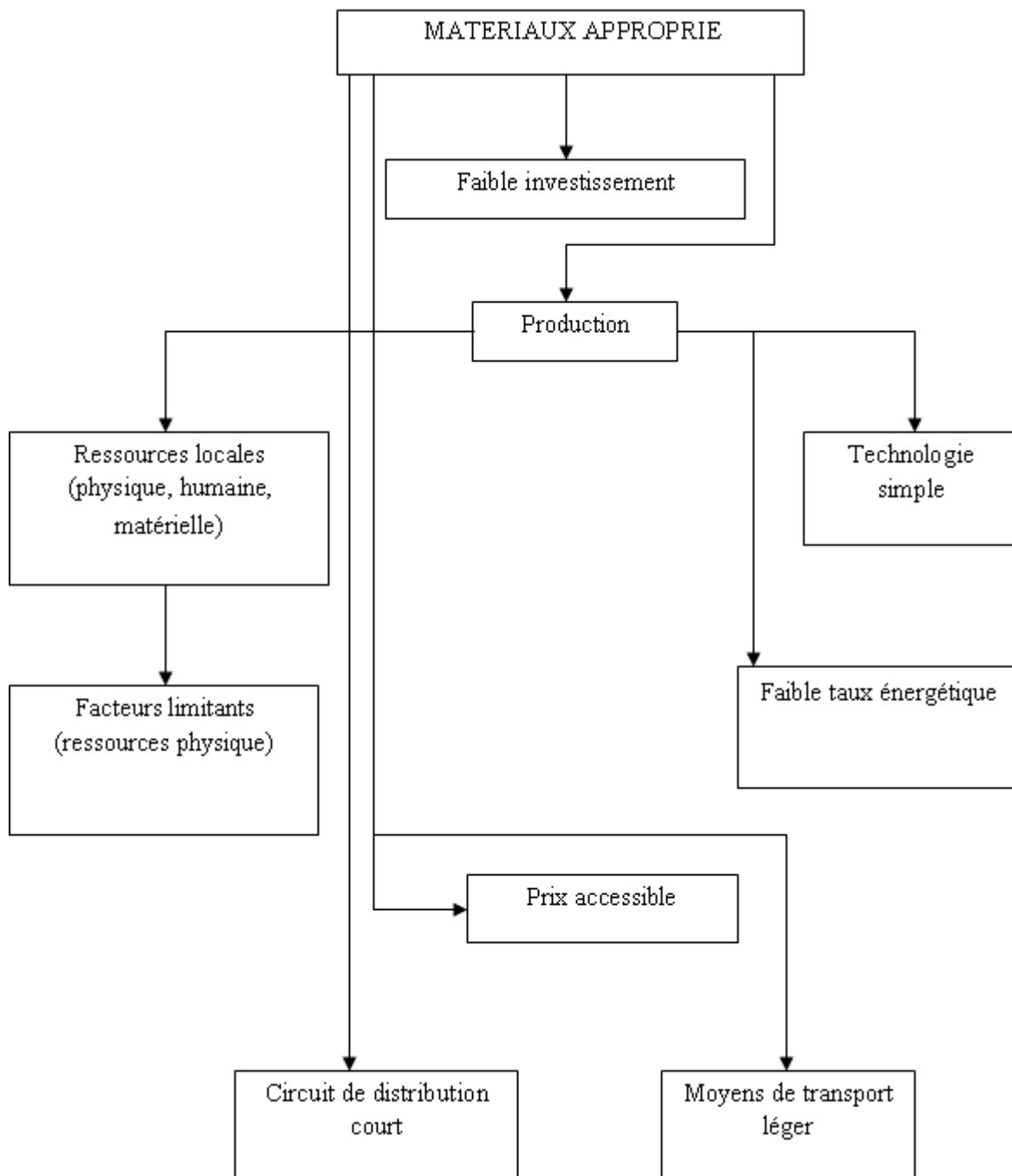


Figure I. 1 Critères d'appréciation d'un matériau approprié, (Bensaada.A, 2011)

En se fondant sur ces critères, les études sur les matériaux de construction doivent porter sur :

- Les aspects économiques, c'est-à-dire : les éléments énergétiques, les problèmes de mise en œuvre (main d'œuvre, outillage, produits...).
- Les aspects techniques, d'une part, les performances mécaniques, et d'autre part, les problèmes de durabilité, de confort et des exigences de protection.

En effet, les produits à base de terre conviennent non seulement à de petites unités de production d'organisation et de gestion faciles, mais de plus, demandent des installations simples ne nécessitant que peu d'investissement. Par ailleurs, la technologie de production s'adapte bien à une production artisanale.

3. Historique

Le matériau terre reste comme même le premier matériau utilisé par l'homme pour construire des habitations ou des ouvrages de génie-civil. Dans la majeure partie de l'Afrique, dans de nombreux pays de l'Asie et de l'Amérique et même en Europe, la terre a été de tout le temps le matériau le plus employé et dans certains cas le seul matériau utilisé et l'on peut considérer que les constructions en terre abritent encore une part importante de la population mondiale. La figure I.2 Montre la présence de construction en terre dans le monde.

Parmi les célèbres constructions historiques en terre dans le monde, on peut citer par exemple la ville de Babylone avec la tour de Babel (VII^e siècle avant J.C).(voir photo I.1)



Figure I. 2 Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde,
(www.craterre.org)



Photo I. 1 La tour de Babel, (www.fr.wikipedia.org)

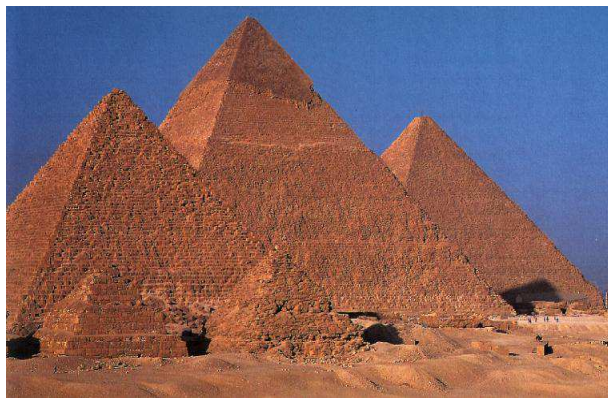


Photo I. 2 Pyramides d’Egypte,
(www.fr.wikipedia.org)



Photo I. 3 Casbah Marocaines,
(www.marocain.biz)



Photo I. 4 Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie,
(www.sidielhadjaissa.com)



Photo I. 5 Aztèques de Mexique,
(www.fr.wikipedia.org)

De nombreuses constructions en briques de terre crue ont été construites par des différentes civilisations.

Partout dans le monde, on trouve d'autres vestiges de l'utilisation de la terre dans les constructions d'ouvrages divers témoignant d'une présence continue de ce matériau. Si nos ancêtres construisaient en terre, c'est parce que les techniques et les matériaux actuels n'étaient pas disponibles.

A travers l'expérience de générations successives, nous sommes arrivés au développement actuel du matériau de construction qui a été délaissé suite à une action de phénomène tant scientifique que technologique tels que :

- Efforts minimes et dispersés déployés en matière de recherche pour améliorer la construction en terre ;
- Frein psychologique chez la majorité des gens pour lesquels la terre est symbole de pauvreté.

Depuis quelques années, on assiste à un ressaut intéressant de la recherche sur les matériaux dits traditionnels.

On cherche des logements économiques suite à la rareté et au coût excessif des logements pour les pays en développement notamment l'Algérie et l'Égypte où les architectes étaient convaincus que la solution étaient dans le passé.

Les ressources sont demeurées rares, la demande de loger s'est levée et l'urgence pour fournir les solutions pratiques immédiates est devenue plus aiguë.

L'abri proportionné est un des besoins humains de base les plus importants, pourtant 25% de la population du monde n'a aucune demeure fixe, alors que 50% de la population urbaine vivent dans les taudis (ESCAP/RILEM, 1987; ILO, 1987).

En effet 80% des règlements urbains dans les pays en voie de développement se composent des taudis et des règlements spontanés sont faits de matériaux provisoires (KEDDI et CLEGHON, 1980; ILO/UNIDO, 1984). Des stratégies ont eu donc un besoin urgent pour développer les matériaux de construction moins coûteux, aisément disponibles et durables. Un matériau naturellement abondant tel que le sol qui est trouvé sur la majeure partie de la surface de la terre devrait être une ressource importante pour construire dans les pays en voie de développement.

La recherche et le développement du sol stabilisé comme matériau de construction n'est pas nouveau.

L'utilisation de béton de terre stabilisée peut être tracée 50 ans en arrière. A partir du début des années 50 les tentatives ont été faites en vue de développer le matériau comme unité alternative de construction en briques de terre crue.

La promotion du matériau a été à l'origine présentée par l'intermédiaire des Nations Unies.

L'idée de rendre la terre compacte pour améliorer sa qualité et exécution sous forme de blocs moulés cependant remonte au 18ème siècle (BENSAËDA.A, 2011).

L'addition d'une reliure pour stabiliser le sol est plus récente. Indépendamment des premiers travaux des Nations Unies, l'histoire de la diffusion du béton de terre stabilisée n'est pas bien illustrée. Pendant les années 50 l'utilisation du matériau largement a été disséminée dans le monde entier. Malgré que les années 60 et le début des années 70 fussent cependant stagnants, l'Algérie par la participation de divers experts Français et Belges, a pu réaliser un programme de mille villages pilotes dont le groupe d'habitations rurales à Zéralda. Cela devrait changer avec l'Assemblée 1976 de Vancouver de la conférence des Nations Unies sur des règlements humains (UNIDO, 1980).

En Mars 1998, l'Organisation Régionale Africaine de Normalisation (**ORAN**) édite un document sur les normes des blocs de terre comprimés.

En Octobre 2001, l'Association Française de Normalisation (**AFNOR**) diffuse le premier document sur la norme intitulé "Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons" **XP P 13-901**.

En 1993, Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrés du Bâtiment (CNERIB) ajouté des recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée, en 1994 le (CNERIB) édite un Guide Technique du Béton de Terre Stabilisée à l'usage des auto-constructeurs.

Aussi le (CNERIB) a lancé des recherches et études sur le BTS (Béton de Terre Stabilisé) et plusieurs projets tel que le montré le tableau I.1:

Tableau I. 1 : Opérations des différentes réalisations en terre en ALGERIE (BERREHAIL .T ; 2009)

Année	Opération de construction en terre
1969	Réalisation de 136 Logements en pisé au village agricole bouhilet à Batna
1971	Un groupe de maisons rurales à Zéralda en collaboration avec une équipe franco-belge
1973	30 des 300 logts du village Mustapha ben Brahim SidiBel Abbés
1975	Le village d'Abadla
1976	100 logts du village agricole Felliache Biskra
1980	120 logements village Madher Boussaâda
1981	40 logements à Chéraga près d'Alger
1984	Un prototype bioclimatique construit à Tamanrasset
1984	Un prototype réalisé par CNERIB en terre comprimée
1986	10 logts à Adrar en Béton de Terre Stabilisé
1986	10 logts à Régane en Béton de Terre Stabilisé
1994	24 logts à Tamanrasset –OPGI- en Béton de Terre Stabilisé
1994	44 logts à Tamanrasset EN Béton de Terre Stabilisé
1998	Un prototype en pisé réalisé au CNERIB

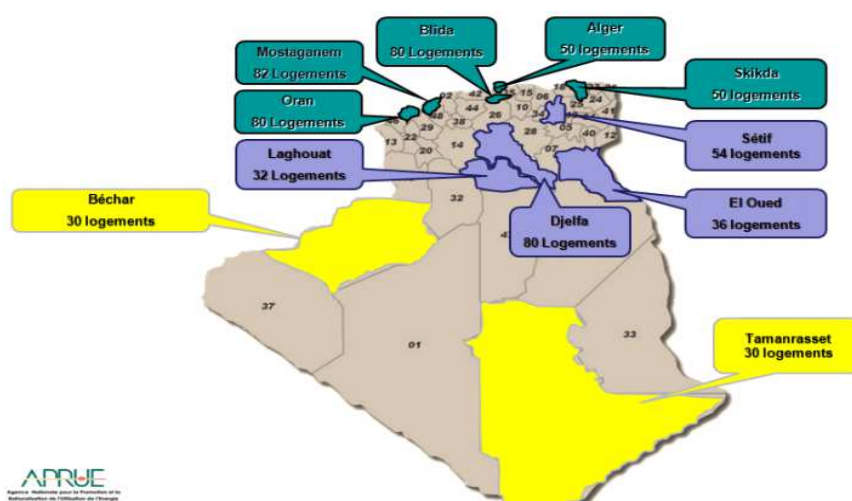


Figure I. 3 600 logts en BTC à travers l'Algérie (BENOUALI.H, 2015)

Deux axes ont été développés dans le but de garantir les matériaux et les structures en terre:

- la connaissance du matériau.
- l'utilisation de la terre dans la construction.

Pour le premier axe les recherches se sont concentrés sur les procédés en BTS et PISE, pour le second axe les recherches devront se mener sur les formes architecturales, adaptives aux modèles sociales algériens, les détails constructifs architecturaux et la durabilité des constructions en terre dans le temps (BERREHAIL .T, 2009).

4. Avantages et inconvénients de la construction en terre

4.1. Avantages Economiques

- La terre est disponible en quantité quasiment illimitée dans la plus part des régions ;
- La terre absorbe et restitue l'humidité ;
- La terre régule la température ;
- La terre est un très bon isolant phonique ;
- Réduction de la fuite des devises par une diminution des matériaux importés (ciment, acier et bois) ;
- Une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale ;
- Autorégulation du taux d'humidité à l'intérieur des réalisations grâce aux matériaux ;
- Atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques ;

4.2. Avantages Ecologiques

- La terre utilise peu d'eau en phase de transformation ;
- La terre est une ressource locale abondante et renouvelable.
- La terre a des vertus thérapeutiques, soigne les affections de la peau, détruit les bactéries et les acariens.
- Réduction d'émission de CO₂, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment,
- Réduction importante d'énergie consommée pour le transport et pour la production du matériau de construction (3%).

4.3. Inconvénients

La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante : même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler.

Il faut aussi bien avoir conscience que le financement de ce type de maison n'est pas conventionnel, en effet il vous sera difficile d'obtenir un prêt hypothécaire pour ce genre d'habitation. Maudits banquiers.

5. Types De Construction en Terre

5.1. Adobe

"Tobe" signifiant brique, désigne une brique de terre faite d'un mélange de sable, d'argile, d'eau et des débris végétaux comme la paille moulée généralement dans des cadres de forme parallélépipède, et séchée au soleil. Malgré sa réputation d'être peu résistant à la compression, l'adobe est le matériau de base de (Shibam, la " Manhattan du désert " (Yémen), où de nombreux immeubles comptent une dizaine de niveaux (Photo I.6). Les plus vieux adobes connus, aujourd'hui, se trouvent en Iraq, les plus vieilles habitations continuellement habitées sont en adobe. Selon l'archéologue José Imbelloni, les adobes étaient coniques, puis cylindro-coniques en demi-sphère et enfin parallélépipédiques. La forme en poire est utilisée depuis plus de cinq millénaires. On la rencontre encore aujourd'hui au Togo et au Nord du Nigeria. Le séisme de Bam (Iran) en décembre 2003 montre cruellement la dangerosité de la construction traditionnelle en adobe dans les régions sismiques.



Photo I. 6 Shibam, la " Manhattan du désert " (Yémen), (www.archdaily.com)

5.2. Le torchis

C'est un mur composite de terre façonnée sur une ossature de bois construite à l'avance généralement en treillis. Cette technique porte également le nom de construction en pans de bois et en colombage. Il faut néanmoins noter que le remplissage n'est pas nécessairement réalisé en terre crue. Des briques cuites ou du ciment peuvent la remplacer. Seule l'ossature joue un rôle structurel. Le mélange en torchis ne détient pas de fonction porteuse.

Traditionnellement, l'architecture en torchis s'y illustre par un procédé plaquant la terre crue uniformément sur toute la surface du mur, y compris sur l'ossature en bois qui ne demeure plus visible (photos 7 ,8 ,9).



Photo I. 7 Confection du torchis
(<http://elanfourapain.canalblog.com/>)



Photo I. 8 Construction d'un mur
(<http://www.lesavoirfaire.fr/>)



Photo I. 9 Maison a Colombage
(<http://bastidess.free.fr/>)

5.3. Le Pisé

C'est un mélange de sable ($\approx 50\%$), d'argile et de limon, mis en œuvre par couches successives (8 à 10cm) dans un coffrage (planches ou banches) et compacté à l'aide d'un pilon (le pisoir). La terre employée sans armatures. D'après François Cointeraux: Le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans la mélanger de paille, ni de bourre. Il consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur des murs ordinaires de moellons, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend de la consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations."



Photo I. 10 Mosquée du Méchouar, Tlemcen (<http://mapio.net/>)



Photo I. 12 Maison en pisé en Auvergne (France) (<http://www.fr.wikipedia.org/>)



Photo I. 11 Mur Eden Project, (Angleterre) (<http://www.fr.wikipedia.org/>)

5.4. La bauge (terre-paille)

La bauge est une technique qui offre beaucoup de libertés au constructeur car celui-ci n'est pas limité par l'emploi d'un coffrage, comme pour le pisé, d'un colombage, comme pour la terre-paille ou d'un module parallélépipédique, comme pour les blocs ou les ballots. Avec la bauge, des murs courbes et sinueux ne sont plus le cauchemar du maçon.

Selon la littérature, la bauge est une technique qui supporte aisément les hivers froids et venteux des régions réputées pour leur climat humide.

La technique de la bauge n'a pas fait l'objet de beaucoup d'attentions dans les pays européens. Les réalisations contemporaines y sont excessivement rares. Il semblerait que le savoir-faire soit encore assez vivant au Yémen et un regain de faveur apparaît dans les pays anglo-saxons. Peut-être que ce sont les temps de séchage excessivement longs entre deux assises (jusqu'à deux semaines) qui refroidissent les ardeurs des passionnés de la construction en terre. Pourtant, cette technique est sans doute la plus écologique et abordable des techniques de construction en terre.



Photo I. 13 Courtoisie de Gérard Bavay (France ,2002), (Bensaâda.A, 2011)



Photo I. 14 Bauge au Costa Rica, (<http://www.fr.wikipedia.org/>)

5.5. Bloc de Terre Comprimée (BTC)

Il existe plusieurs techniques de construction en terre. De nos jours, la technologie de la terre comprimée est une des mieux connue et mieux maîtrisée.

La fabrication des blocs de terre comprimée requiert une terre légèrement humide, telle qu'on la retrouve dans la nature. Cette terre est versée dans une presse soit manuelle, mécanique ou hydraulique. La production de ces blocs s'apparente à celle des briques, sauf pour l'étape de la cuisson.

Autrefois, les blocs étaient comprimés manuellement. L'emploi des presses est assez récent. Ce n'est que vers 1956, qu'est mise sur le marché la première presse spécialement conçue pour la production de blocs de terre crue : la presse Cinva-Ram (Photo I.15).

Aujourd'hui, la gamme de matériel de pressage s'est grandement élargie, répondant à toutes les tendances techniques et à tous les prix. Cette technologie se prête bien à l'industrialisation (Photo I.16).

Mais pour mieux répondre aux critères que nous avons définis au début de notre travail, nous nous sommes orientés vers la technique du bloc de terre comprimée.



Photo I. 16 Fabrication des blocs de terre comprimée à l'aide d'une presse manuelle (Cinva Ram) (www.papercrete.com)



Photo I. 17 Fabrication des blocs de terre comprimée à l'aide d'une presse mécanique (www.oskam-vf.com)



Photo I. 15 Ecole expérimentale construite en béton de terre comprimée (Soudan) (Bensaâda.A 2011)

5.6. Caractéristiques de quelque type de brique de terre crue

Le tableau suivant présente les caractéristiques des différents types des blocs en terre crue.

Tableau I. 2 : Caractéristiques des briques de terre crue (DELEBECQUE. R, 1990 ; GUILAUD. H, 1997)

Caractéristiques	Type de brique de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique Kg/m ³	1200 - 1700	1700-2200	1700 - 2200
Résistance à la compression MPa	2 - 5	< 2.4	< 2.4
Retrait au séchage µm/m	1	1 - 2	0.2 - 1

6. Différentes phases de la terre

Ce matériau comprend essentiellement deux phases :

6.1. Une phase solide

Elle comprend :

- Une fraction minérale silicatée, de granulométrie variée, depuis les éléments sableux jusqu'aux colloïdes, à laquelle peuvent être associés des carbonates et des sulfates. Les sables ont des surfaces spécifiques faibles et sont liés par des forces gravitationnelles leur conférant une activité physico-chimique négligeable. En revanche dans les colloïdes ou argiles (de forte activité surfacique), l'activité chimique est dominante quand il y a interaction avec les autres phases du système. Les terres contenant ces deux classes, sont caractérisées par des particules grenues et grossières, constituant un squelette, entourées par une matrice argileuse. Celle-ci est d'importance capitale pour la structure, puisqu'elle assure sa cohésion, donc sa stabilité.

- Une fraction organique composée de débris végétaux et de colloïdes (matière organique transformée).

6.2. Une phase fluide

Constituée :

D'air ou de gaz issus de la décomposition de produits organiques (CO₂, NH₃, H₂S, CH₄).

D'eau sous deux formes :

- une eau interstitielle ou eau libre,
- une eau adsorbée qui conditionne les propriétés plastiques des matériaux.

7. Facteurs de L'érosion

Le matériau terre est exposé à l'érosion. Selon STARKEL (1976), les érosions les plus importantes sont dues aux phénomènes météorologiques. MASTERS et AL. (1987) ont établi une liste complète de ces phénomènes (voir tableau I.3).

Le matériau terre est essentiellement sensible à l'insolation, au vent, aux précipitations, à l'humidité et à la température. L'importance de ces agents varie largement avec le type de climat et la localisation géographique.

Tableau I. 3 : Facteurs de dégradation affectant la durée de vie des matériaux de construction

FACTEURS	TYPE DE PHENOMENE
Climatiques	<ul style="list-style-type: none"> • Radiation <ul style="list-style-type: none"> - Solaire
	<ul style="list-style-type: none"> • Température <ul style="list-style-type: none"> - Elevée - Basse - Cyclique
	<ul style="list-style-type: none"> • Eau <ul style="list-style-type: none"> - Solide (neige, glace) - Liquide (pluie, eau stagnante) - Vapeur (grande humidité relative)
	<ul style="list-style-type: none"> • Constituants de l'air <ul style="list-style-type: none"> - Oxygène et ozone - Oxyde de carbone
	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminants de l'air <ul style="list-style-type: none"> - Gaz (oxyde de soufre et d'azote) - Brumes (sels, acides, alcalis dissous dans l'eau) - Particules (sables, poussières, saleté)
	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles de gel-dégel
	<ul style="list-style-type: none"> • Vents
Biologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Micro-organismes • Bactéries
Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes cycliques • Contraintes aléatoires • Action physique de l'eau, ex : pluie, neige, verglas, grêle • Action physique du vent • Combinaison d'action de pluie et de vent

7.1. Causes de l'érodabilité

La norme ASTM E 241-77 (1977) indique que 90% des causes de l'érosion dans les constructions sont dues à l'eau, sous toutes ses formes.

- **La Battance**

ELLISON cité par HENIN (1976), a étudié ce phénomène qui traduit l'érosion de la terre humide sous l'action de chocs de gouttes de pluies intenses dites "battantes". Ce mécanisme a été mis en évidence grâce à la cinématographie ultrarapide qui permet de suivre la goutte d'eau arrivant sur la masse ou elle forme un petit cratère.

MIHARA cité par HENIN (1976) a montré que les gouttes de pluie orageuse pouvaient atteindre 5 mm de diamètre et tombent avec une vitesse de 9 m/s.

- **L'Humidité**

HENIN (1976) indique que pour être érodée, il faut qu'une certaine épaisseur de terre soit humide, car les gouttes d'eau bien qu'elles se pulvérisent au moment du choc, elles n'entraînent presque pas de matière terreuse si le matériau est sec. Ce qui implique que la pluie ait débuté depuis quelques temps.

- **Le Ruissellement**

Si l'intensité de la pluie correspond à un débit supérieur à la vitesse d'absorption du matériau terre, nous aurons des filets d'eau qui entraîneront une partie des éléments, notamment les agglomérats détachés lors de la battance.

- **Le Retrait De Fissuration**

Le retrait est le procédé de densification d'un sol sous la pression capillaire. Durant le retrait, le volume varie tant que les forces capillaires ne sont pas équilibrées par la résistance interne du sol qu'il peut générer.

Le taux du retrait dépend du pourcentage d'argile dans le sol, du type de l'argile, de l'arrangement des particules. Son action est alors limitée aux terres relativement argileuses ayant des agglomérats de petites tailles. Au cours de leur dessiccation, ces matériaux subissent des tensions internes qui peuvent être très importantes engendrant ainsi une fissuration.

HENIN (1976) a montré que ces tensions étaient le résultat d'une différence de vitesse de dessiccation entre les parties interne et externe du système.

8. Critères De Stabilités

Afin de pouvoir assurer une certaine stabilité de la terre vis-à-vis de l'eau, il est nécessaire que les facteurs qui suivent soient satisfaits :

- une faible mouillabilité
- une faible porosité
- une cohésion à l'état humide adéquate
- une absence des fissures de retrait
- un gonflement minimal
- une résistance à la battance

Cependant une terre utilisée seule en construction peut difficilement résister aux actions simultanées des agents climatiques. L'amélioration peut être apportée par :

➤ Un Choix Judicieux Des Sols

Des sols mal choisis ont toujours conduit à une dégradation rapide et une moindre durabilité. Les argiles comme on a pu constater auparavant, subissent en séchant un retrait et une fissuration et gonflent à l'humidité. Si les terres argileuses peuvent-être volumiquement instables par retrait de gonflement à l'eau, il convient encore de signaler que leur comportement peut-être également influencé par la macrostructure des éléments argileux qui peuvent être présents sous forme de granulats plus ou moins grossiers; Cette macrostructure pouvant préexister dans la terre naturelle ou bien avoir été laissée par les opérations d'extraction et de malaxage.

Ainsi cette macrostructure peut avoir une influence très marquée sur les vitesses de cheminement capillaires, le cheminement préférentiel faisant par les interfaces des granulats argileux. Les sables, en revanche, s'éboulent facilement quand ils sont secs.

Entre ces deux extrêmes se situent les sables argileux et les argiles sableuses qui se sont révélées appropriées pour la construction. Pour les constructions de 1 à 2 niveaux, MAITI (1985) montre que la contrainte à la base des murs ne dépasse pas 4-5 bars.

9. Stabilisation

C'est un procédé qui réduit la susceptibilité du sol à l'eau, ceci augmente la fiabilité de la structure et minimise la maintenance. Deux types de technique sont d'actualité :

9.1. Stabilisation Physique

C'est probablement le plus simple et certainement le plus ancestral de tous les procédés de stabilisation, il s'agit là du compactage au moyen duquel la terre humide foisonnée est

convertie en un système dense ayant des caractéristiques de stabilité et de durabilité plus grande.

CASAGRANDE (1932), explique que la densité d'un matériau compacté dépend de l'eau qu'il contient et spécialement dans les sols à grains fins. L'eau ajoutée à ces derniers à l'état sec est adsorbé sous forme de film leur permettant de glisser les uns sur les autres et au fur et à mesure du compactage, il y a réarrangement des grains offrant au système un moindre volume des vides.

L'efficacité du compactage est fonction du type de sol, du mode de compactage et de la force de compactage. LAMBE (1958) montre que la structure d'une argile compactée varie avec le mode de compactage et la teneur en eau de compactage. Il existe pour un sol et pour un procédé de compactage donné, une teneur en eau optimale qui donne une porosité minimale. Pour densifier la terre, l'homme s'est servi de ses pieds comme outil, il a par la suite utilisé des pilons en bois et en acier,... de nos jours les outils dépendent du procédé de fabrication. La figure I.4 présente les divers modes de constructions en terre.

L'étude du compactage d'un sol, au laboratoire est généralement réalisée à partir de l'essai PROCTOR (ASTM D 698-66 T). Cet essai, de compactage dynamique est non représentatif des conditions de fabrication des blocs où le compactage est quasi-statique.

9.2. Stabilisation physico-chimique

Cette technique a sans cesse progressé depuis que sont mieux connues les forces d'interaction entre les particules de sols et l'eau.

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques sera subdivisé en deux parties : un traitement dans la masse ou une protection de surface par imprégnation sur la partie exposée.

❖ Traitement Dans La Masse

Il s'agit d'améliorer les propriétés physiques et physico- chimiques du sol en y introduisant dans sa masse une quantité minimale de stabilisant.

- **Ciment** : sa fabrication est universelle mais sa disponibilité dans certaines régions est irrégulière voir inexistante. L'hydratation, pour une quantité d'eau suffisante, fait apparaître un certain nombre de constituants hydratés qui offrent au mélange une résistance croissante en fonction du temps.

- **Chaux** : produit d'une technologie simple. En la mélangeant au sol humide, on introduit des ions Ca^{++} et OH^- . Un échange cationique se produit quand les ions calcium remplacent les cations du sol comme le magnésium, le sodium, le potassium et l'hydrogène. Des ponts se forment à court terme reliant entre elles les particules fines qui se trouvent ainsi agglomérées. Celles-ci sont peu sensibles à l'eau et possèdent une bonne résistance mécanique.

❖ Traitement De Surface

Le but d'un traitement de surface (enduits) est d'augmenter la résistance du matériau à l'eau de pluie sans oublier que ces surfaces doivent être esthétiques et facilement nettoyables.

- **Enduits** : composés d'un ou plusieurs produits sous forme pâteuse ou semi-fluide appliqués sur un mur en une ou plusieurs couches. Le mur en terre étant déformable, le revêtement doit l'être aussi. Un enduit raide provoque un arrachement de la terre, détériorant le support. Il faut par conséquent des enduits à faible module d'élasticité. Il existe aussi beaucoup de types d'enduits en terre constitués par un mélange d'argile et de sable souvent stabilisé par un liant hydraulique.

L'idéal serait d'avoir un matériau qui réponde aux exigences suivantes :

- ✓ La pénétration de l'eau liquide et son transport vers l'intérieur doivent être stoppés.
- ✓ le mouvement et l'échange de la vapeur d'eau, à l'état gazeux ne doivent pas être diminués.

9.3. Stabilisation physico-mécanique

Dans l'intérêt de conférer aux matériaux des performances mécaniques satisfaisantes lors de leur mise en œuvre, on cherche à obtenir la meilleure densité possible : c'est le but de la stabilisation mécanique. Pour atteindre ce résultat, on agit sur la structure du matériau en modifiant l'arrangement des particules. Ces modifications sont apportées essentiellement par le compactage qui permet de réduire la porosité ou l'indice des vides du sol en rapprochant ses éléments constitutifs. L'obtention de la compacité optimum nécessite un bon arrangement des grains et ne peut être réalisée qu'en présence d'eau ; trop sec, le matériau se met mal en place, trop humide, il devient à la limite incompactable ; L'eau joue le rôle de lubrifiant. Sa teneur est en relation avec l'énergie du compactage.

Ainsi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation physico-chimique. Il est le plus souvent défini par trois caractéristiques : Le mode, l'énergie et la teneur en eau.

❖ Modes de compactage

Les modes de compactage sont nombreux, les plus importants peuvent être : Dynamique, statique, par vibration ou combinaison entre eux .On trouve dans le commerce plusieurs presses utilisant l'un ou l'autre de ces procédés (HOUBEN et AL, 1979). (SEED et CHAN et AL, 1968) ont étudié ces différents modes sur les résistances d'une argile limoneuse et ont trouvé ce qui suit :

- ✓ Pour des teneurs en eau jusqu'à l'optimum, les trois modes principaux sont à peu près équivalents ;
- ✓ Pour des teneurs supérieures à l'optimum, le compactage statique est le plus performant ;

J.R Bell (1975) est arrivé aux mêmes conclusions ; Le compactage statique est le plus efficace pour toute teneur en eau pour une énergie inférieure (environ 1/3 de l'énergie due au compactage dynamique à l'optimum), ce compactage serait plus efficace pour une petite vitesse et un long temps d'application de la charge. Un inconvénient, qui semble cependant se greffer à ces trois modes de compactage lorsqu'un seul type est utilisé, est le gradient de densité.

Nguyen Dag Chi (1977) propose un compactage par vibro- compression (avec une compression de 2 à 3 bars) pour la confection d'éprouvettes parfaitement homogènes. En compactage statique, ce gradient de densité s'observe sur une demi-hauteur de l'éprouvette (BIVIGOU ,1983), et sur toute la hauteur pour un compactage à simple effet .Comme tous les matériaux, la résistance de sol-ciment est une fraction généralement croissante de la densité.

B. MELBOUCI (1991) a étudié les différents modes de compactage sur les résistances d'une argile limoneuse et a dégagé les points suivants :

✓ La vibration et le pilonnage n'ont aucune influence sur l'amélioration de la densité sèche (figure I.6.a) et (figure I.6.b)

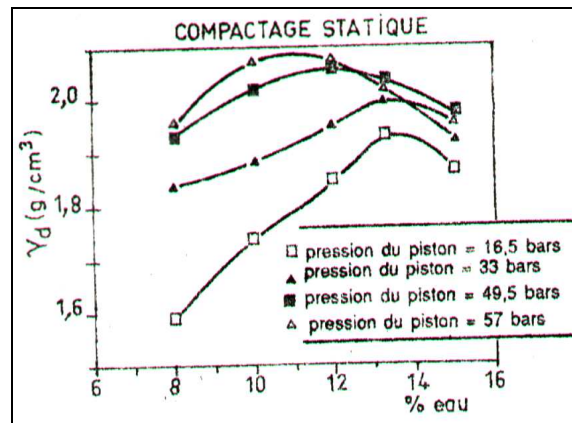


Figure I. 6.a Densité en fonction de la teneur en eau (compactage statique)

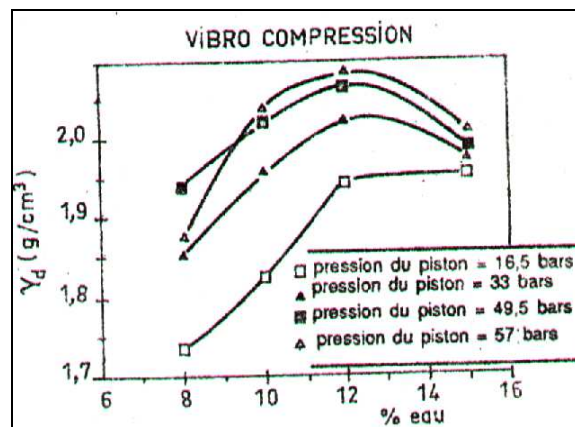


Figure I. 6.b Densité en fonction de la teneur en eau (vibro-compression)

✓ Le compactage dynamique améliore considérablement les propriétés physiques et mécaniques du béton de terre stabilisée ; Ce mode de compactage donne également des résultats intéressants avec le sable fin, alors que la vibro-compression n'apporte pas de gain de résistance par rapport au compactage statique et la vibration n'améliore en aucun cas la densité sèche.

❖ **Energie de compactage et teneur en eau**

Pour tous les modes de compactage, la résistance des sols traités croît avec l'énergie de compactage pour toute teneur en eau (LEONARS ,1968), (JEUFFROY ,1978) et (SICALI et AL ,1980).

A chaque niveau d'énergie correspond en principe une teneur en eau optimale (densité sèche maximale). Nous allons exposer les résultats trouvés par les différents auteurs qui ont utilisé le compactage statique, mode utilisé dans notre recherche.

(V.V ASKALANOV et AL 1957), ont étudié la variation de la résistance des éprouvettes à différents âges et à différentes teneurs en eau pour trois types de sol et trois niveaux de pression. Les résultats de cette étude font ressortir quelques points qui prêtent une attention particulière à savoir :

- ✓ Les résistances croissent en fonction de la pression de confection pour toute teneur en ciment ;
- ✓ Les accroissements de la résistance sont plus importants entre 20 et 100 bars qu'entre 100 et 160 bars pour des teneurs en ciment élevées, l'effet inverse pour des faibles teneurs ;
- ✓ Les résistances initiales (à 7 jours) se valent pour une pression de compactage qui varie de 100 à 160 bars mais diffèrent à long terme de 20% et en raison de l'hydratation de ciment ;

J.R .COAD (1979) a étudié la variation de la résistance en fonction du compactage pour deux sols traités à la chaux et a montré que la résistance croît avec la pression mais l'hydratation de la chaux n'a pas d'effet.

M. OLIVIER (1980) a montré que le sol étudié, la relation résistance – pression de compactage est quasiment linéaire ; Pour le matériau traité de 2 à 4 % de ciment, l'accroissement s'atténue fortement dès qu'on dépasse un certain seuil de compactage (60 bars) .Pour le matériau brut contenant 17% d'argiles et 50% de sable avec une grosseur maximale de grains de 5mm, il en résulte ce qui suit :

- ✓ Un compactage statique de l'ordre de 20 bars correspond quasiment au Proctor normal mais le Proctor modifié n'est pas atteint même avec une pression de compactage de 100 bars ;
- ✓ Un décalage de 1 à 2 % de la teneur en eau optimale est observé pour les pressions entre 20 et 100 bars pour le matériau brut traité à 4 % de ciment. Le même sol traité à la chaux éteinte donne des densités sèches décroissantes en fonction de la teneur en eau, mais des résistances croissantes pour les teneurs en eau optimales déterminées ;

Le même auteur a proposé en 1986 un nouvel essai plus représentatif de l'action des presses à parpaings, appelé essai de compactage statique. Les courbes Proctor statiques sont construites de la même manière que les courbes usuelles, mais au lieu d'opérer à énergie constante, on opère à pression de fabrication constante.

M. OLIVIER (1994) a réalisé une brève étude sur le comportement de la densité sèche et la résistance à la compression selon le mode de compactage statique (compactage par vibro-compression). La vibro-compression est réalisée avec une pression de 3 bars et une vibration de 150Hz.

Les résultats obtenus ont montré que la teneur en eau de fabrication influe beaucoup moins sur la densité et sur la résistance à la compression.

GUETTALA et AL (1997) a montré pour les matériaux testés et surtout fins, qu'une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à l'état sec de 30 à 50%.

MESBAH (1999) a montré que l'essai de Proctor qui applique un compactage dynamique est mieux adapté aux sols pulvérulents et que le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux et qu'avec la même teneur en eau initiale on obtient la même densité sèche.

MOREL et OLIVIER (1999) d'après une étude effectuée sur un matériau naturel assez argileux, ont voulu montrer que l'essai de compactage statique permettait d'obtenir sur un sol les mêmes caractéristiques que les presses à briques utilisées in-situ, c'est-à-dire qu'avec une même teneur en eau initiale on obtient la même densité sèche. D'autre part ils ont trouvé qu'assez loin de la saturation ($S_r < 80\%$), il y avait une relation linéaire entre la contrainte de compactage et l'énergie dissipée en compactage.

WALKER (2000) a précisé que pour les sols reconstitués, la teneur en eau optimale Proctor n'est pas la même pour les bétons de terre comprimée et les seuls commentaires faits par l'auteur sur les échantillons Proctor sont :

- ✓ Leur densité décroît quand le pourcentage d'argile croit ;
- ✓ L'adjonction du ciment augmente leur résistance en compression ;

MONTGOMERY (2002), a montré que le compactage statique, dynamique en laboratoire peut être effectué par un compactage Proctor, par table à choc ou encore par vibration sur table vibrante ; Dans ce cas plus l'énergie de compactage est élevée, moins on a besoin de l'eau pour obtenir des densités plus élevées pour les blocs stabilisés en ciment.

Il y a une certaine relation à considérer entre l'énergie de compactage disponible et la teneur en argile du matériau terre. Si l'on ne dispose que l'effort de la main ou du pied pour mouler ce matériau et si l'on ne dispose que des étreintes capillaires apportées au soleil pour le serrage, alors il faut que la terre soit assez fortement argileuse pour obtenir une cohésion suffisante. En revanche, avec une énergie de compactage, on peut utiliser des terres maigres peu argileuses pour la stabilité volumique.

Enfin et quelque soit le mode de compactage et son énergie, son effet demeure toujours le rapprochement des grains : Diminution des vides et réarrangement des grains avec une structure plus serrée. Son action seule ne suffit pas, l'introduction d'un liant double quasiment la résistance du matériau.

10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les constructions en terre. Il est divisé en deux parties, la première est consacrée à la présentation des définitions des matériaux locaux ou on a mentionné les critères d'appréciation d'un matériau approprié plus. On a exposé brièvement une chronologie sur les actions menées en faveur des constructions en terre, les opérations des différentes réalisations en terre en Algérie, les types de construction en terre et les techniques de mise en œuvre. La deuxième partie est consacrée à la terre comme matériaux de construction ou on a présenté la présence de la construction en terre à travers le monde et la construction en BTC en Algérie, les facteurs qui influent sur sa durabilité, les critères de choix des sols et les différents modes de stabilisations: stabilisation physico-chimique (par des liants) et stabilisation physico-mécanique (compactage, correction granulométrique).

CH II :
Techniques
Expérimentales

Chapitre II : Techniques Expérimentales

1. Introduction

Le but de ce chapitre et avant d'accéder au programme expérimental, il est nécessaire de définir et d'exposer les méthodes et les techniques expérimentales, des essais utilisés dans ce projet à savoir :

- Les essais d'identification :(la masse volumique, analyse granulométrique, équivalent de sable, essai Proctor, limite d'Atterberg et l'essai de bleu).
- Les essais mécaniques :(résistance à la compression simple, résistance à la traction par fendage).

2. Essais d'identification physique

2.1. Masse volumique

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (*rhô*) ou μ (*mu*). On utilise ces deux notations en fonction des habitudes du domaine de travail.

➤ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules, exprime généralement cette masse volumique en gramme par centimètre cube (g/cm^3), elle est donnée par la formule suivante:

$$\rho_a = \frac{M_t}{V_t}$$

M_t = La masse totale d'échantillon

V_t = Le volume total d'échantillon

• Matériel utilisé

- Bécher.
- Une règle à araser.
- Balance de précision 0.1g



Bécher



Balance

- **Mode opératoire**

- 1- peser le bécher vide.
- 2- prendre le matériau dans les deux mains formant entonnoir. (voir photo II.1)
- 3- Placer ces 2 mains à 10 cm environ au-dessus du bécher, et laisser tomber ce matériau, ni trop lentement ni trop rapide. (voir figure II.1)
- 4- Verser ainsi le matériau, toujours au centre du bécher, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
- 5- Araser à la règle.
- 6- Peser le contenu.

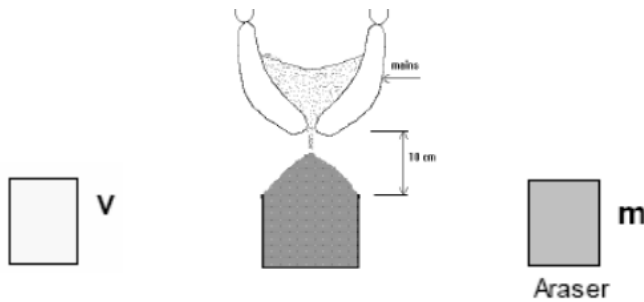


Figure II. 1 Procédure de l'essai masse volumique apparente



Photo II. 1 Opération d'ajout du matériau

➤ **Masse volumique absolue**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

M_s = La masse des grains solides

$V_2 - V_1$ = Le volume des grains solides

- **Matériels utilisés**

- Eprouvettes graduée.
- Une balance de précision 0.1g.



Balance



Epruvette graduée

- **Mode opératoire (Figure II.2)**

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
2. Peser un échantillon sec M de granulats (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Lire le nouveau volume V_2 .

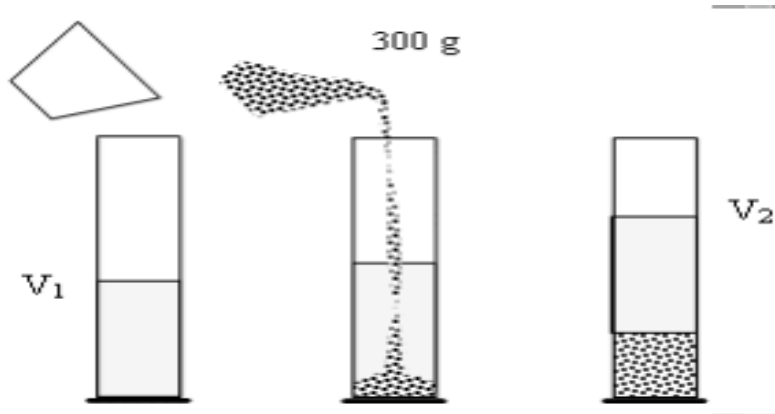


Figure II. 2 Procédure de l'essai masse volumique absolue

➤ **Tables des masses volumiques de diverses substances**

Tableau II.1 présente les masses volumiques des roches, minéraux et des matériaux usuels, les masses volumiques indiquées sont des masses volumiques apparentes.

Tableau II.1 Masses volumique de diverses substances

Roches, Minéraux, Matériaux usuels	Masse Volumique (Kg/m³)
Argile	1 300 – 1 700
Béton	2 200 (armé 2 500)
Béton bitumineux	2 350
Kaolin	2 260
Marbre	2 650 – 2 750
Pierre poncée	910
Quartz	2 650
Sable	1 600 (sec) – 2 000 (saturé)
Terre végétale	1 250

2.2. Analyse granulométrique

➤ Le but d'essai

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

➤ Mode opératoire

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme (NF P94-056).
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète la première. Elle est effectuée selon la norme (NF P94-057).

Le matériau est versé le plus souvent en plusieurs fois pour ne pas surcharger les tamis supérieures le tamisage à sec recommandé pour les sols sableux ou renfermant surtout des cailloux et des graviers.

➤ Appareillage

- Balance de précision 0.1g.
- Les tamis.
- Appareil d'analyse granulométrique.



Balance



Tamiseur



Tamis

Les résultats de cette analyse sont traduits par des courbes.

La courbe granulométrique nous renseigne sur son uniformité, on caractérise un sol par la granulométrie c'est-à-dire par le coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen, qui est défini comme suit :

C_u : Coefficient d'uniformité

C_u=D₆₀/D₁₀

D₆₀ : Diamètre des particules à 60% passant

D₁₀ : Diamètre des particules à 10% passant

- Si $(D_{60}/D_{10}) < 2$ le sol présente une granulométrie uniforme.
- Si $(D_{60}/D_{10}) > 2$ le sol présente une granulométrie variée.
-

2.3. Equivalent de sable (NF P 18-598)

➤ Principe

L'essai utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier.

➤ Mode opératoire

- Verser une quantité (gr) de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir.

Préparer de la même façon une seconde éprouvette.

- Laisser les deux éprouvettes au repos pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes à l'aide des bouchons et les agiter avec la machine agitatrice.
- Remplir les éprouvettes jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et les parois intérieures afin de récupérer toutes les impuretés et le sable au fond des tubes.
- Laisser reposer chaque éprouvette 20 minutes en tenant compte des décalages de temps dus aux manipulations.
- Lire les valeurs de h_1 et h_2 à l'aide du réglet (Méthode de calcul visuel).
- Abaisser le piston dans le liquide pour séparer le floculat de l'eau et lire les valeurs h_1 et h_2 (Méthode de calcul à piston).

➤ Matériel nécessaire

- Un tamis de mailles 2 mm avec fond et couvercle.
- Une machine à tamiser.
- Deux éprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique, diamètre intérieur 32 mm, hauteur 430 mm, munies de deux repères à 100 et 380 mm de la base.
- Un bouchon de caoutchouc s'adaptant sur les éprouvettes.

- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon.
- Un piston taré de 1 kg.
- Un réglelet métallique gradué, de 500 mm de longueur.
- Un flacon de 5 litres muni d'un siphon (placé à 1 mètre au-dessus de la table de travail) contenant une solution lavante à base de solution concentrée (chlorure de calcium + glycérine + solution aqueuse de formaldéhyde).
- Un tube laveur relié au flacon avec un robinet d'arrêt.
- Une machine agitatrice.
- Un chronomètre.
- Une balance de portée 5 kg, précision 1g.
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.

Deux indices peuvent être déterminées :

Es à vue (E_{s_v}) et Es à piston (E_{s_p}) (voir les photos II.3 et II.4).

E_{s_v} : Equivalent de sable Visuel

E_{s_p} : Equivalent de sable à Piston

$$E_s = 100 \cdot h_2 / h_1$$

h_1 : Sable propre + éléments fins.

h_2 : Sable propre seulement (piston).

h'_2 : Sable propre seulement (visuel).

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'apprécier la qualité, voir tableau II.2.

Tableau II.2 Nature et qualité du sable selon E_{s_v} ou E_{s_p}

ES visuel	ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait
$75 \leq ES < 85$	$70 \leq ES < 80$	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$85 \leq ES$	$80 \leq ES$	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

➤ **Appareillages utilisés**

**Photo II. 2** Appareillage d'équivalent de sable.

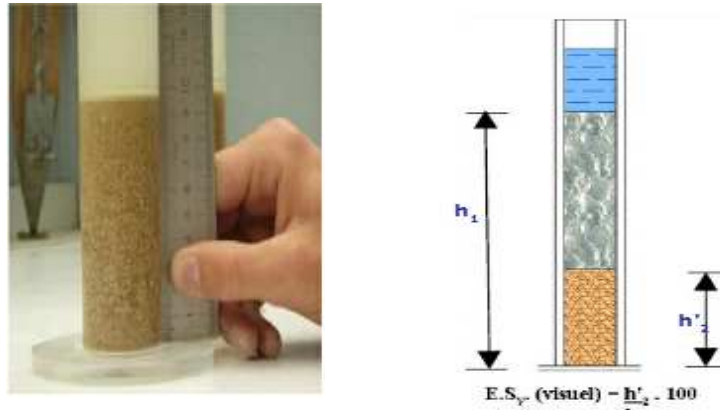


Photo II. 3 La méthode de calcul visuel.

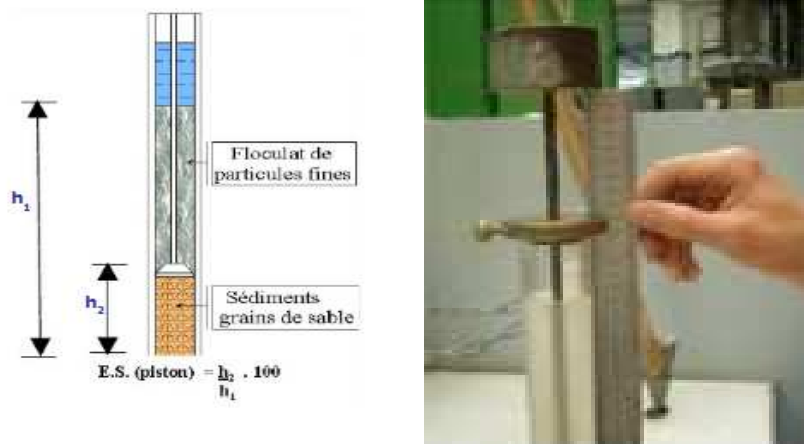


Photo II. 4 La méthode de calcul par piston

2.4. Limite d'Atterberg (NF P 94-051)

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers, sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μ m.

Ces limites séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre.

➤ Principe de détermination des limites de consistance

• La limite de liquidité W_L

La limite de liquidité se détermine en utilisant l'appareil de Casagrande. On étend sur une coupelle une couche d'argile dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte, bien entendu, tout l'appareillage est rigoureusement normalisé, W_L correspond à 25 coup. (Voir la Photo II.5)

- **La limite de plasticité W_p**

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. On exécute en général, 2 essais pour déterminer cette limite. (Voir Photo II.6)

- **Indice de plasticité I_p**

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = W_L - W_P$$

La figure II.3 présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau

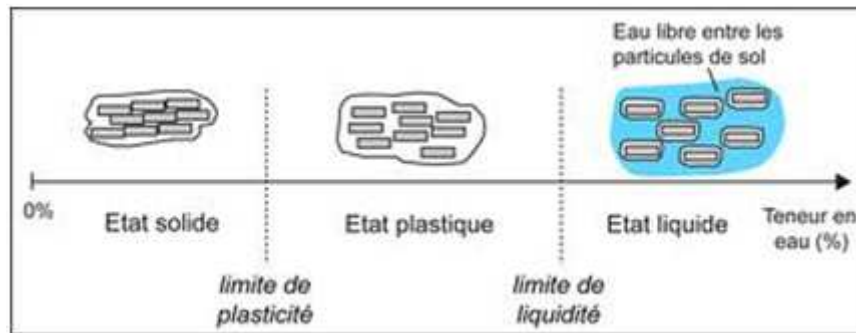


Figure II. 3 Etat de teneur en eau (<http://geoslab.fr/>)

La classification des sols selon la limite de liquidité et l'indice de plasticité présenté sur le tableau II.3

Tableau II.3 Classification de Casagrande pour les sols fins (Bensaâda.A 2011)

	Limite de liquidité (W_L)	Indice de plasticité
Sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$15 < I_p < 25$
Argile	$W_L \geq 60$	$I_p \geq 25$

La classification des sols en fonction de l'indice de plasticité présenté sur le tableau II.4.

Tableau II.4 Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA LCPC 1992)

Indice de plasticité	Caractéristique
$I_p \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p \leq 40$	Argileux
$I_p > 40$	Très argileux

Figure II. 4 Présente l'abaque de Casagrande pour la classification des sols fins

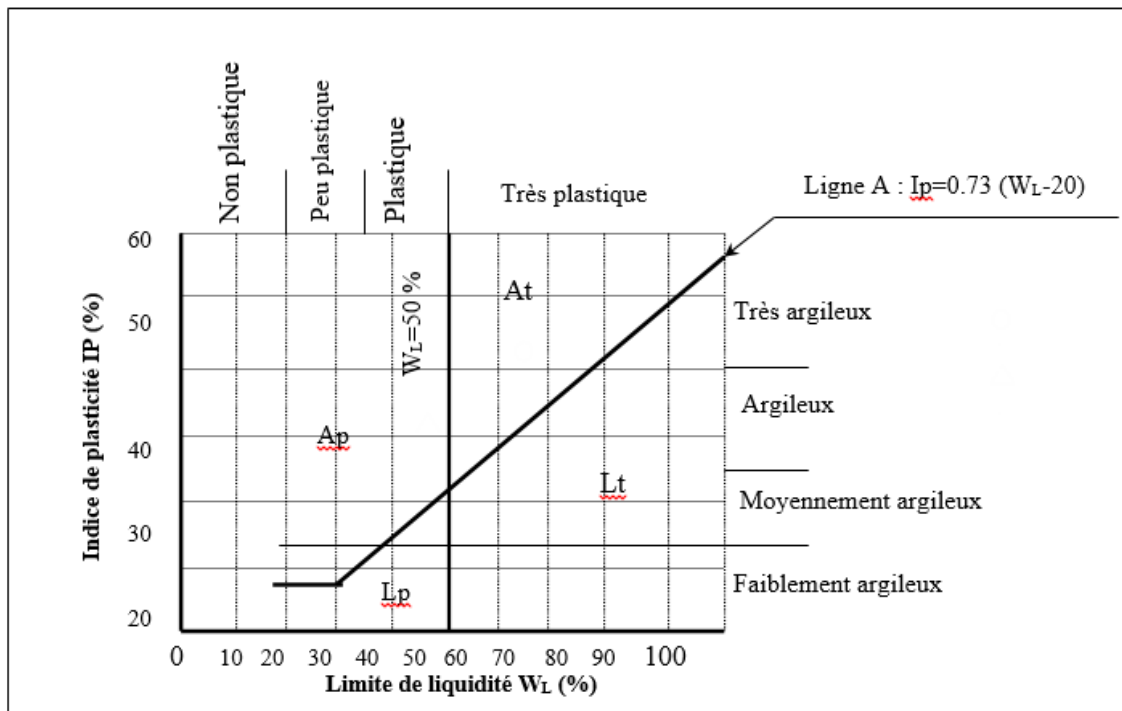


Figure II. 5 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997)

Avec :

A_t : argiles très plastiques. A_p : argiles peu plastiques.

L_t : limons très plastiques. L_p : limons peu plastiques.

➤ **Appareillage**

- appareil de Casagrande.
- Coupelle, spatule et l'outil à rainure en V.
- bascule électronique.
- four électrique.

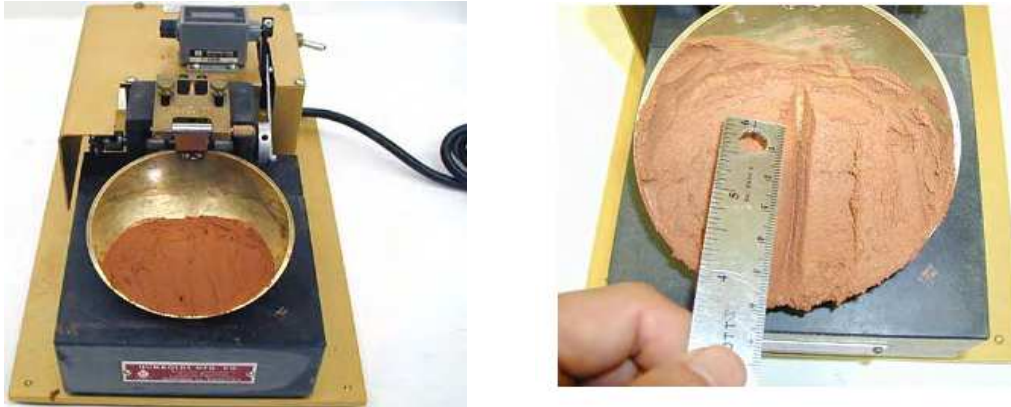


Photo II. 5 Boite de Casagrande (limite de liquidité).



Photo II. 6 Essai de limite de plasticité

2.5. Essais Bleu Méthylène (NF P 94-068)

➤ **Principe**

Consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau.

La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau.

➤ **But de l'essai**

Mesure la capacité d'adsorption d'un sol, déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

➤ **Mode opératoire**

- Verser un échantillon de 30 gr de sol sec dans le Bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur.
- Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher.
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.
- Si la tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le teste soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
- Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer. (Voir Photo II.7).

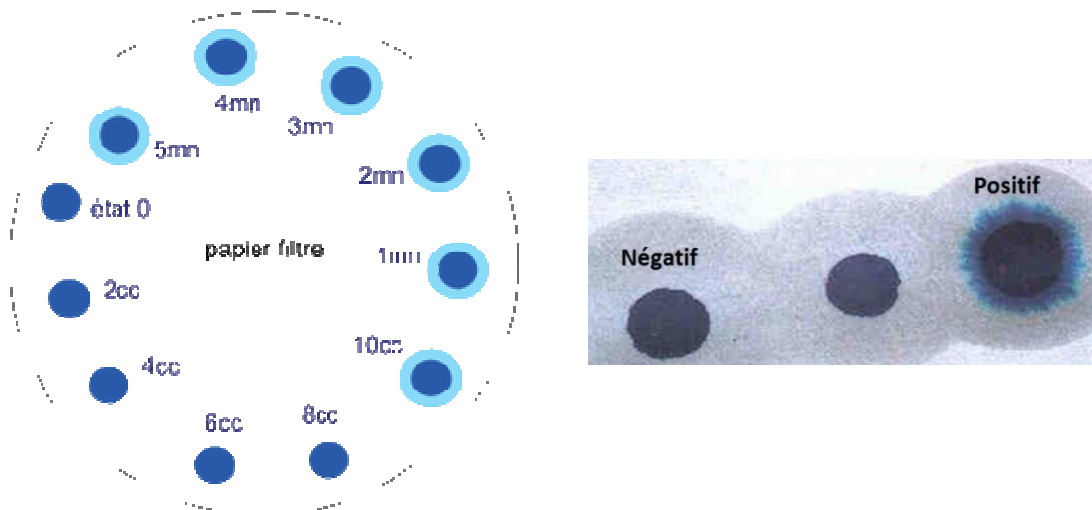


Photo II. 7 Le cas positif et négatif de l'essai de bleu

Pour calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante:

$$Valeur\ du\ bleu = \frac{Masse\ du\ bleu\ introduite}{Masse\ sèche} \qquad VB = \frac{B}{Ms}$$

Une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu de la phase argileuse V_B ($0/2\ \mu m$) a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) :

$$Sst = 21 V_B (0/2\ \mu m)$$

Le tableau II.5 présente la classification des argiles selon la surface spécifique Sst.

Tableau II.5 Classification des argiles selon la surface spécifique(S_{st}) (BULTEL, 2001)

Argile	S_{st} (m^2/g)
Montmorillonite	700 – 840
Illite	65 – 100
Kaolinite	10 – 20

2.6. Essai de Proctor

➤ Le but de l'essai

Cet essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau en évaluant la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette on distingue l'essai Proctor normal et modifié, qui conduit à des valeurs de couple différente.

Cet essai s'applique sur la fraction granulaire des matériaux testés avec un $D_{max} < 20$ mm.

➤ Principe

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la densité sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette densité en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la densité sèche du matériau γ_{dmax} qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau **Wopt**. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

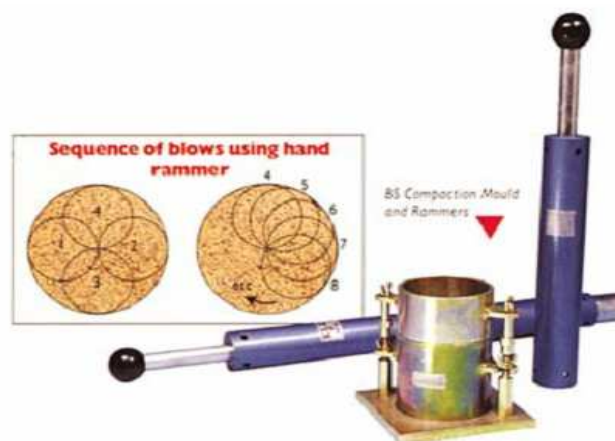
Deux essais proctor sont reconnus par décision n° 2128 du directeur du L.C.P.C : « l'essai proctor normale et l'essai proctor modifié dont les caractéristique sont données dans le tableau II 6 :

- **Essai Proctor Normal(NF P 94-093)** : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé, voir photo II.8, 9 ;
- **Essai Proctor Modifié (NF P 98-231-1)** : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière ;

Moule proctor : $\varnothing = 101.6$ mm, H =117 mm

Tableau II.6 les caractéristiques du moule proctor (MESBAH. A, 1985)

	Proctor normal	Proctor modifié
Poids de la dame	2 490 g	4 535 g
Diamètre du mouton	51 mm	51 mm
Hauteur de chute	305 mm	407 mm
Nombres de couches	3	5
Nombre de coups par couche	25	25
Poids approximatif d'une couche	650 g	400 g

➤ **Appareillages utilisés****Photo II. 8** Moule Proctor Normal avec la dame dans laboratoire de Génie Civil (Laghout).**Photo II. 9** Moule Proctor Normal avec la dame

3. Essais Mécaniques

➤ But des essais

Les essais consistent à suivre le phénomène de durcissement dans le temps. Ces essais consistent à soumettre les éprouvettes compactées à des efforts de compression simple et de traction.

➤ Préparation des échantillons

Les essais sont réalisés sur des échantillons confectionnés avec des éléments dont le diamètre de 5mm et compactés une teneur en eau et densité sèche de l'essai Proctor Normal, les mélanges utilisés dans ce projet sont (Argile pure, 90% argile + 10% sable, 80% argile + 20% sable, 70% argile + 30% sable, 60% argile + 40% sable)

Le mélange Argile + Sable et Argile + Sable + Liant (Chaux ou Ciment) a été préparé selon les conditions du Proctor Normal de chaque mélange.

On ajoute la proportion massique du sable ou liant correspondant à X_s^1 % ($X_s = 00\%$, 10%, 20%, 30% et 40%) et X_L^2 % ($X_L = 00\%$, 04% et 08%) de poids sec d'Argile et on mélange manuellement jusqu'à avoir une couleur homogène.

On ajoute une quantité d'eau représentant W de poids sec du mélange, le tout malaxé manuellement dans le but d'avoir un mélange homogène. Le mélange humide est soumis par la suite à un compactage statique à un seul piston dans un moule de diamètre 50 mm et 180 mm de hauteur (Photo II.11).

Le compactage est assuré à l'aide d'une presse hydraulique à une vitesse de 20mm/min.



Photo II. 11 Presse hydraulique

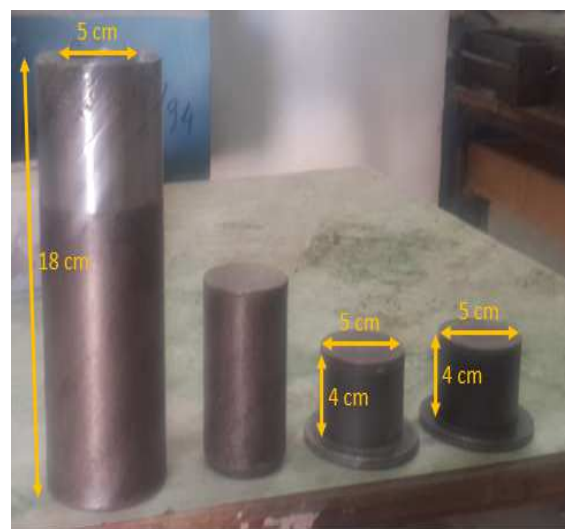


Photo II. 10 Moule utilisé dans le compactage

¹ X_s : Quantité de sable ajoutée proportionnellement au poids sec d'argile

² X_L : Quantité de liant ajoutée proportionnellement au poids sec d'argile + sable

3.1. Résistance à la compression simple (NF P 98-232-1)

La connaissance de cette dernière est de grande importance dans notre programme expérimental, Vu qu'elle nous permet de connaître l'aptitude du matériau à travailler dans les conditions de charges normales (en service), comme élément rentrant dans la construction des murs porteurs.

Pour l'essai de compression, les éprouvettes ont été soumises à un effort de compression dont la vitesse est 1mm/s appliqué parallèlement à l'axe du cylindre. (voir figure II.6 et photo II.12).

Les résultats pour chaque point sont les moyennes de trois valeurs.

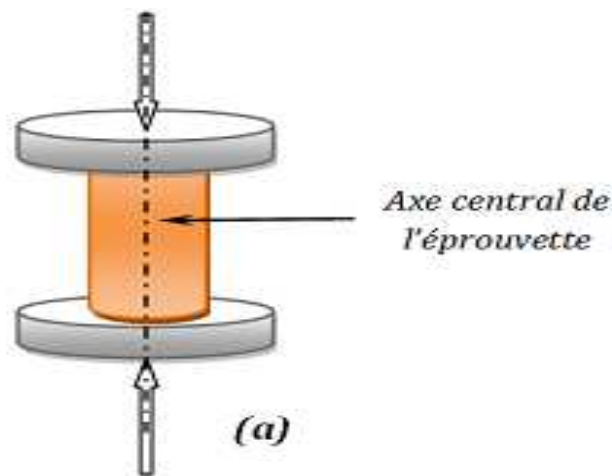


Figure II. 6 Schéma du mode d'application de l'effort de compression

3.2. Résistance à la traction (NF P 98-232-3)

Sachant que notre matériau ne travaille pas seulement en compression simple mais elles peuvent être aussi assujetties à des efforts de traction.

Concernant l'essai de traction, il ya plusieurs modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction (Figure II.7), parmi ces essais nous citons :

- Traction directe (non applicable aux sols) ;
- Traction par flexion (non applicable aux sols) ;
- Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale

(NF P 98-232-3). (voir figure II.8 et photo II.13)

- $R_t = 0,8 R_{tb}$, (Goual. I, 2012)

R_t : Résistance à la traction

R_{tb} : Résistance à la traction par fendage

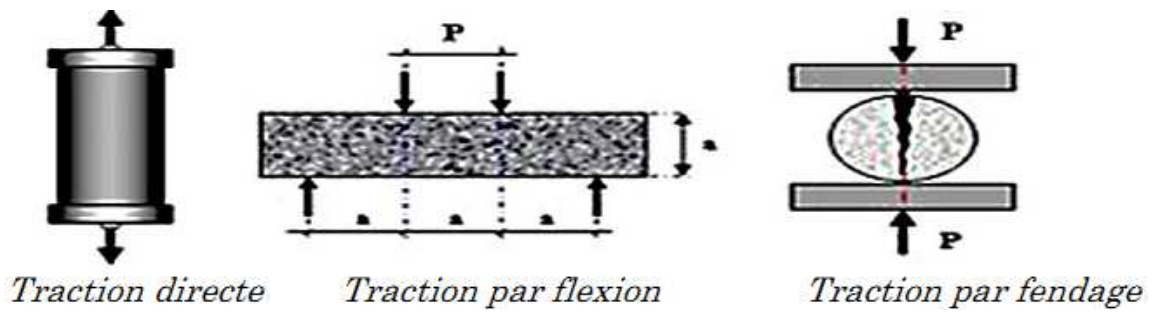


Figure II. 7 Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction

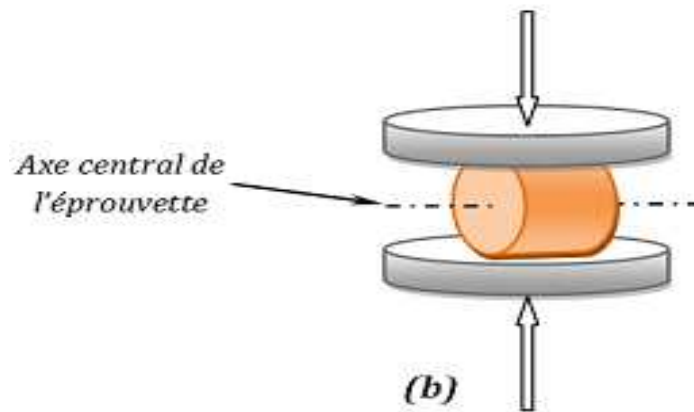


Figure II. 8 Schéma du mode d'application de l'effort de Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini les méthodes, les principes et les modes opératoires des essais d'identification physique tel que la masse volumique, l'analyse granulométrique, équivalent de sable, les limites d'Atterberg et l'essai de Proctor et d'autre part, les essais mécaniques tel que la résistance à la compression simple et à la traction par fendage (Essai Brésilien), et tous ces essais sont réalisés selon des normes normalisées et bien étudiés.

Chapitre III :
Caractérisation des
matériaux utilisés

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

1. Introduction

La construction en blocs de terre comprimée est une technologie dont le but est l'utilisation des matériaux locaux, c'est à dire disponibles dans les alentours immédiats du site de construction. Le contexte même de la naissance des bétons de terre comprimée implique donc un spectre de terre à utiliser le plus large possible. Ainsi, les exigences résident uniquement au niveau des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des blocs en fonction de leur destination (brique, pisé, terre de paille...etc.). Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais d'identifications de deux matériaux radicalement différentes (Argile et Sable de dune) utilisé pour confectionner les blocs en terre.

2. Caractérisations des matériaux

2.1. Echantillonnage

- Argile

Cette argile provienne de la région de Mraigha (prélevée de la carrière de Sofabril, une briqueterie de la région) distante de 6Km au Nord de la ville de Laghouat. Elle se présente sous forme d'un sol de couleur Marron (Figure III.1).



Figure III. 1 Localisation de la zone étudiée

- **Sable de dune**

Comme la région de Laghouat est considérée comme une région saharienne (région aride), la zone de provenance de sable de dune est située dans les environs très proches de la ville (Oasis nord).

2.2. Caractéristiques des matériaux

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification des matériaux.

Concernant l'identification des argiles, l'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :

- Masse volumique
- Analyse chimique
- Analyses granulométriques par sédimentation.
- Les limites d'Atterberg : Classification des argiles.
- Essais de Proctor Normal.
- Essais au bleu de méthylène.

Les essais menés sur le sable de dune sont :

- Analyse granulométrique.
- Essais « équivalent de sable ».
- Essai au bleu méthylène.

2.2.1. Argile

➤ Masse Volumique

Les résultats des masses volumiques représentées la moyenne de deux essais.

• Masse Volumique Apparente

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.1

Tableau III. 1 Essai masse volumique apparente

	Essai 1	Essai 2
M_0 (g)	264	264
M_1 (g)	1674	1682
V_1 (cm ³)	1000	1000
V_{app} (g/cm ³)	1.41	1.42
V_{app} moyenne (g/cm ³)	1.415	
V_{app} moyenne (kg/m ³)	1415	

• Masse Volumique Absolue

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.2

Tableau III. 2 Essai masse volumique absolue

	Essai 1	Essai 2
M_1 (g)	200	200
V_1 (cm ³)	300	400
V_2 (cm ³)	406	502
V_{ab} (g/cm ³)	1.89	1.96
V_{ab} moyenne (g/cm ³)	1.93	
V_{ab} moyenne (kg/m ³)	1930	

➤ Analyse Chimique

D'après les analyses chimiques à (LTPS) de Ghardaïa, le Tableau III.3 présente les résultats.

Tableau III. 3 Analyse chimique d'argile

Sulfates SO_4^-	Carbonates $CaCO_3$	Chlorures Cl^-	Matières organiques
2.347	22.14	0.53	2.11

➤ Analyse Granulométrique (NOUIOUA. T)

Tableau III.4 présente les résultats de l'analyse granulométrique d'argile

Tableau III. 4 Analyse granulométrique d'argile

Diamètre de tamis Ø	Refus partiel (gr)	Cumulé des Refus (gr)	Cumulé %	Tamisât %
3,15	2,5	2,5	0,13%	99,88%
2,5	0,1	2,6	0,13%	99,87%
2	0,3	2,9	0,15%	99,86%
1,6	0,2	3,1	0,16%	99,85%
1,25	0,2	3,3	0,17%	99,84%
1	0,1	3,4	0,17%	99,83%
0,8	0,1	3,5	0,18%	99,83%
0,63	0,3	3,8	0,19%	99,81%
0,5	0,2	4	0,20%	99,80%
0,315	0,8	4,8	0,24%	99,76%
0,16	5,5	10,3	0,52%	99,49%
0,08	12,6	22,9	1,15%	98,86%
0,06637643				97,99%
0,0472045				96,01%
0,03356795				94,03%
0,02146772				90,08%
0,01534606				86,12%
0,01096749				82,17%
0,00783648				78,21%
0,00556975				76,24%
0,00334148				62,02%
0,00141337				49,74%
0,00104207				45,47%

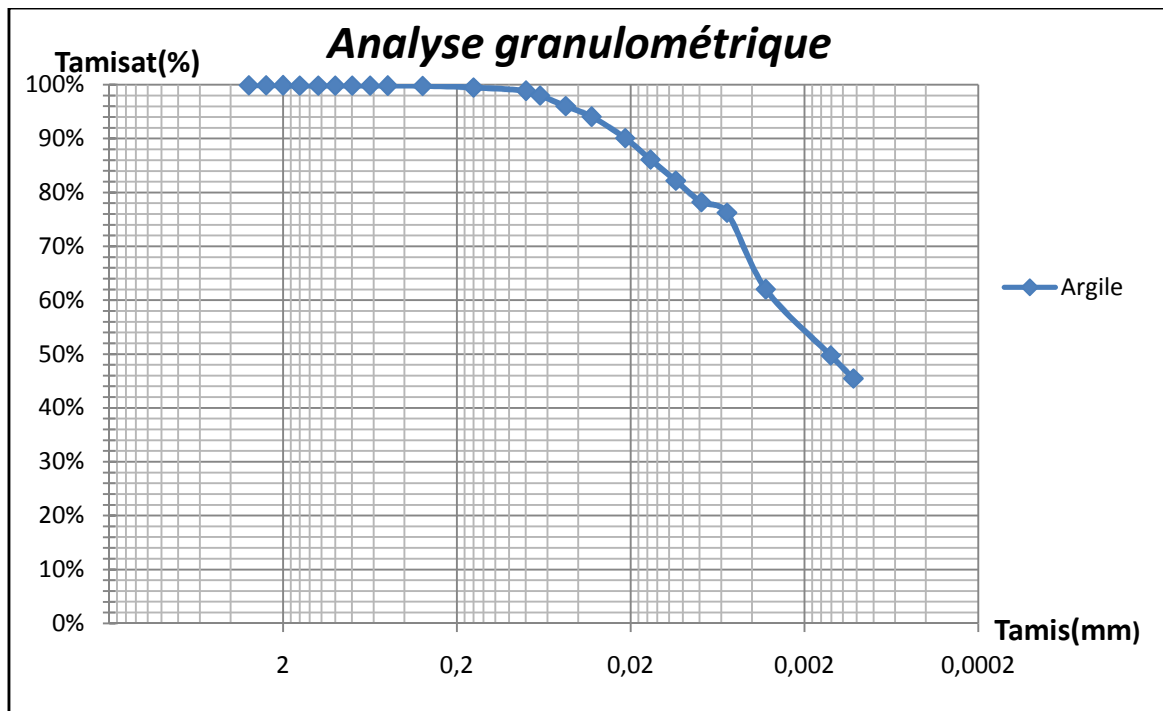


Figure III. 2 Courbe granulométrique d'argile

D'après le tableau III.4, plus que 98% du passant sont inférieur à 0.08 Ø (80 µm) et 50% du passant sont inférieur à 0,00104207 Ø.

➤ **Les limites d'Atterberg**

Les résultants des limites d'argiles ont présentés dans le tableau III.5

Tableau III. 5 Les limites d'Atterberg d'argile.

	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
Argile	53	31	22

Pour déterminer l'état d'argile utilisée, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande. (Voir figure III.3)

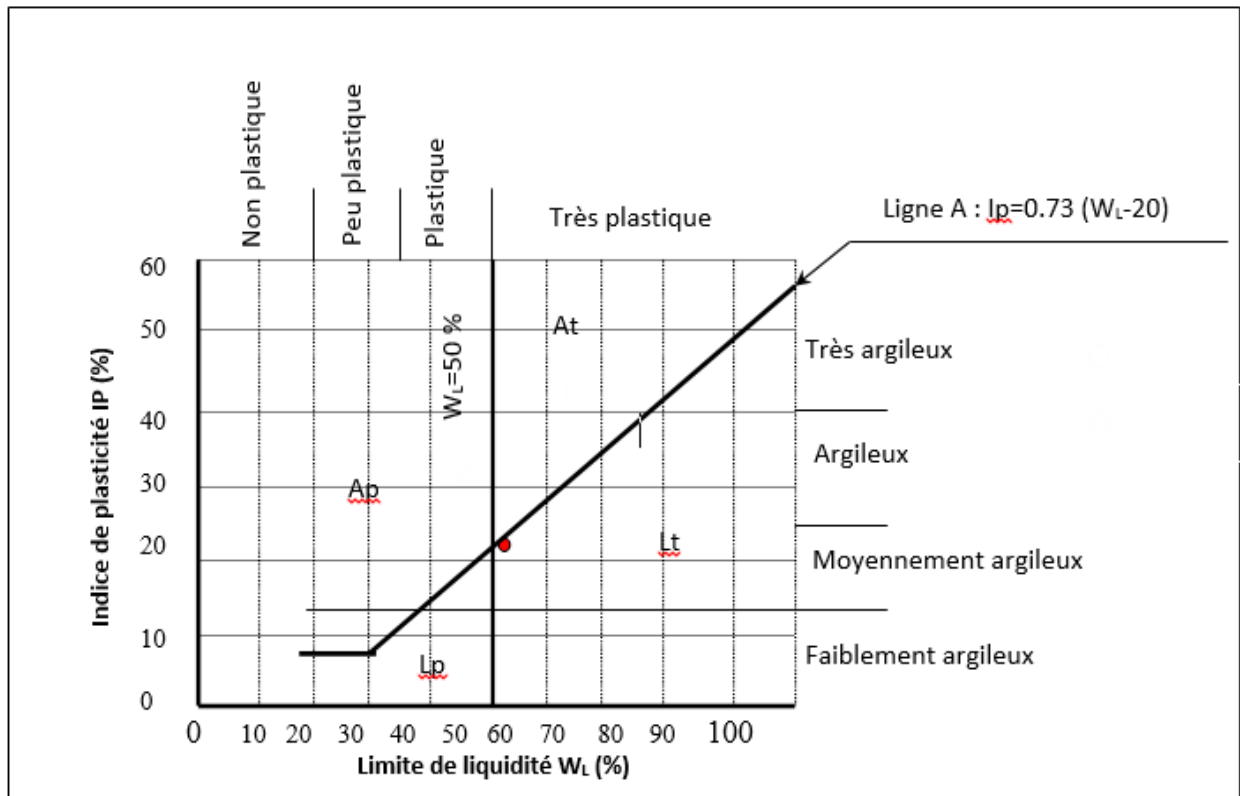


Figure III. 3 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997)

D'après le tableau II.3 Chapitre II, notre sol se classe parmi les sols limoneux.

D'après le tableau II.4 Chapitre II, notre sol est moyennement argileux.

D'après la figure III.3, notre sol est plastique à très plastique moyennement argileux.

➤ Essai de Proctor Normal (NOUIOUA. T)

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 modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor Normal (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation.

La figure III.4 représente la courbe de Proctor Normal du sol utilisé (Argile).

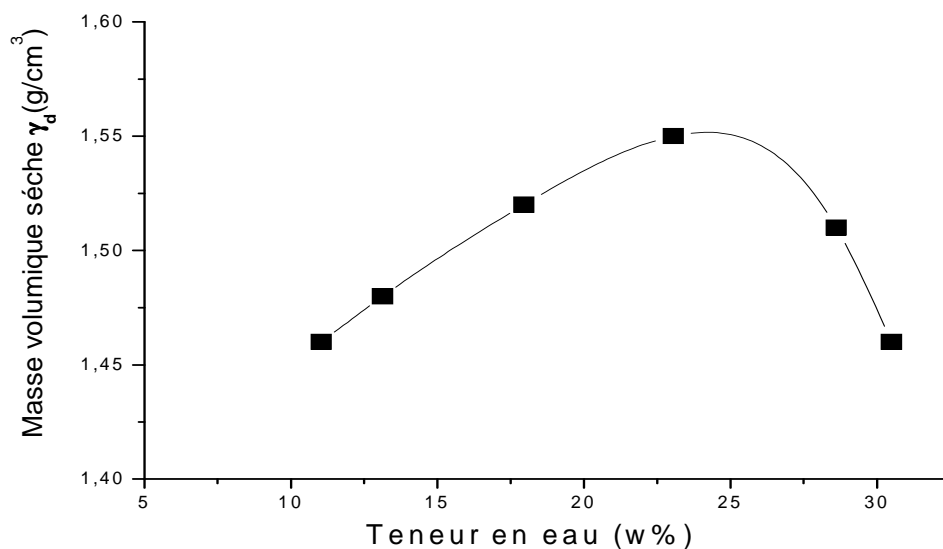


Figure III. 4 Courbe Proctor d'argile utilisé

Les résultats de l'essai Proctor Normal montre que l'argile une densité maximale $\gamma_{dmax}=1.55$ et une teneur en eau optimale $W_{opt}=24.4\%$.

➤ **Essai au bleu de méthylène**

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau III.6

Tableau III. 6 Résultats de l'essai au bleu de méthylène.

Sols	V_B	Sst (m ² /g)
Argile	5.8	122

D'après le tableau II.5 Chapitre II, l'argile étudiée est classée comme une Illite.

Remarque : 122 proche à 100 qui est la valeur d'illite.

2.2.2 Sable de dune

➤ Analyse chimique

Cette analyse a été effectuée par l'LNHC¹ de DJELFA, et qui a donné les résultats qui sont illustrés dans le tableau III.7 (GUEDDOUDA.K, 2005)

Tableau III. 7 Analyse chimique du sable de dune

	Symboles	Unité	Sable de dune
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	95.87
Sulfates	SO ₃	%	0.91
Chlorures	Cl ⁻	%	0.36
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	2.5
Matières organiques	MO	%	-----

La constatation importante a signalée, est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 95%, et par conséquent, le sable de dune de Laghouat est un sable siliceux.

➤ Analyse Granulométrique (NOUIOUA. T)

L'essai normalisé (NF P 18-560), par voix sèche, nous permet de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs, cette répartition est traduite par la courbe granulométrique de la figure III.5

¹Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

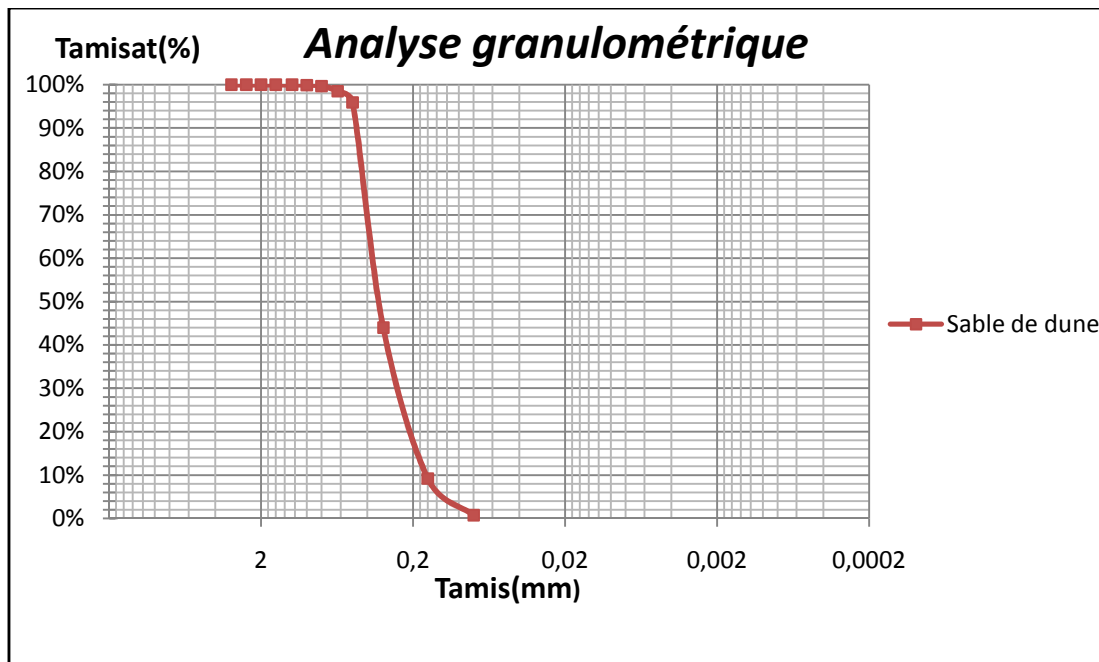


Figure III. 5 Courbe granulométrique du sable de dune.

Tableau III. 8 Paramètres d'identifications de sable de dune

Paramètres	Granulométrie	
	Cu	Cc
Sable	1,67	1,1

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D_{60}/D_{10}$

Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (C.208, technique de l'ingénieur), le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisé par les lettres SM (sable mal gradué), de granulométrie moyenne. Sa courbe est uniforme et serrée.

➤ **Equivalent de sable**

Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable de dune sont résumés dans le tableau III.9.

Tableau III. 9 Résultats de l'essai équivalent de sable

	Equivalent de sable	
Paramètres	ES _V	ES _P
sable	86.17	74.20

A partir de tableau II.2 Chapitre II page 32, le sable de dune est classé parmi les sables propres.

➤ **Essai au bleu de méthylène**

Les résultats de cet essai sont inclus dans le tableau III.10.

Tableau III. 10 Paramètres d'identifications de sable de dune

	Bleu de méthylène	
Paramètres	V _B	Sst (m ² /g)
sable	0.067	1.4

La valeur de la surface spécifique totale étant très faible, ce qui est en accord avec la définition même de la surface spécifique, que plus le taux des particules fins est important plus sa surface spécifique est grande.

2.2.3. Liant hydraulique

➤ **La Chaux**

Les différents types de liants se distinguent par le mécanisme de leur durcissement qui est influencé par la composition des matières de départ. La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO₂, et aluminates Al₂O₃ et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO, ce qui donne à notre liant son aspect aérien.

- **Analyse chimique de la chaux**

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau III.11

Tableau III. 11 Composition chimique de la chaux de Saida

Composition chimique	Chaux broyée	Chaux hydratée
Humidité	< 5%	
CaO	> 83,3%	67,4% - 73,25%
MgO	< 0,5%	< 0,4 %
Fe ₂ O ₃	< 2%	< 2%
Al ₂ O ₃	< 1,5%	< 1%
SiO ₂	< 2,5%	< 2,2%
SO ₃	< 0,5%	< 1%
K ₂ O+NaO	0,47 à 0,50	< 0,4%
CO ₂	< 5%	< 5%
CaCO ₃	< 10%	< 10%
Ca(OH) ₂		< 80%
Constance volumique	Bonne	Bonne
Insoluble	< 1%	< 0,35%

➤ **Le Ciment**

Le ciment employé est un ciment portland composé CPJ CEMII/A 42.5 disponibles sur le marché et provenant la cimenterie ACC de M'sila.

- **Caractéristiques physiques**

D'après la fiche technique les caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau III.12

Tableau III. 12 Caractéristiques Physiques

Paramètres	Valeurs
Masse volumique absolue	$\rho_s = (3040 \pm 22.91) \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente	$\rho_a = (1945 \pm 15.00) \text{ kg/m}^3$
Compacité	$C_p = (63.98 \pm 0.79)\%$
Porosité	$P = (36.02 \pm 0.79)\%$
Surfaces spécifique	$SSB = (4010.07 \pm 110.015) \text{ m}^2/\text{g}$
Temps de prise à chaud	40 min
Temps de prise à froid	2h30min

- **Caractéristiques Chimiques**

L'analyse chimique du ciment utilisé est représentée ans le tableau III.13.

Tableau III. 13 Analyse chimique du ciment

Composé	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	CaO(libre)	R.I	P.A.F
Min	19,08	4,44	3,40	61,82	1,70	2,15	0,44	0,03	0,01	0,68	0,90	5,00
Max	20,35	4,61	3,59	2,61	1,89	2,39	0,52	0,38	0,03	1,52	1,97	6,92
Moy	19,70	4,52	3,49	62,15	1,79	2,27	0,49	0,25	0,02	1,00	1,56	5,83
EC.T	0,40	0,05	0,05	0,17	0,06	0,06	0,03	0,15	0,00	0,29	0,25	0,60

- **Caractéristiques mécaniques**

Les résistance caractéristiques a la compression et à la traction par flexion du mortier de ciment à 28 jours sont obtenues en constituant un mortier normal conformément la norme (NF EN 196-1)

$$R_{c28} = 47.08 \pm 1.12 \text{ MPa}$$

$$R_{t28*} = 8.09 \pm 0.35 \text{ MPa}$$

R.I : Résidu Insoluble

P.A.F : Perte Au Feu

3. Conclusion

L'argile utilisée de Mrigha est une argile plastique à très plastique moyennement argileux et qui a tendance d'être une Illite.

Pour le sable de dune, c'est un sable propre et qui présente une courbe granulométrique serrée et se classe parmi les sables propre mal graduée (SM).

Chapitre IV :

Résultat et interprétations

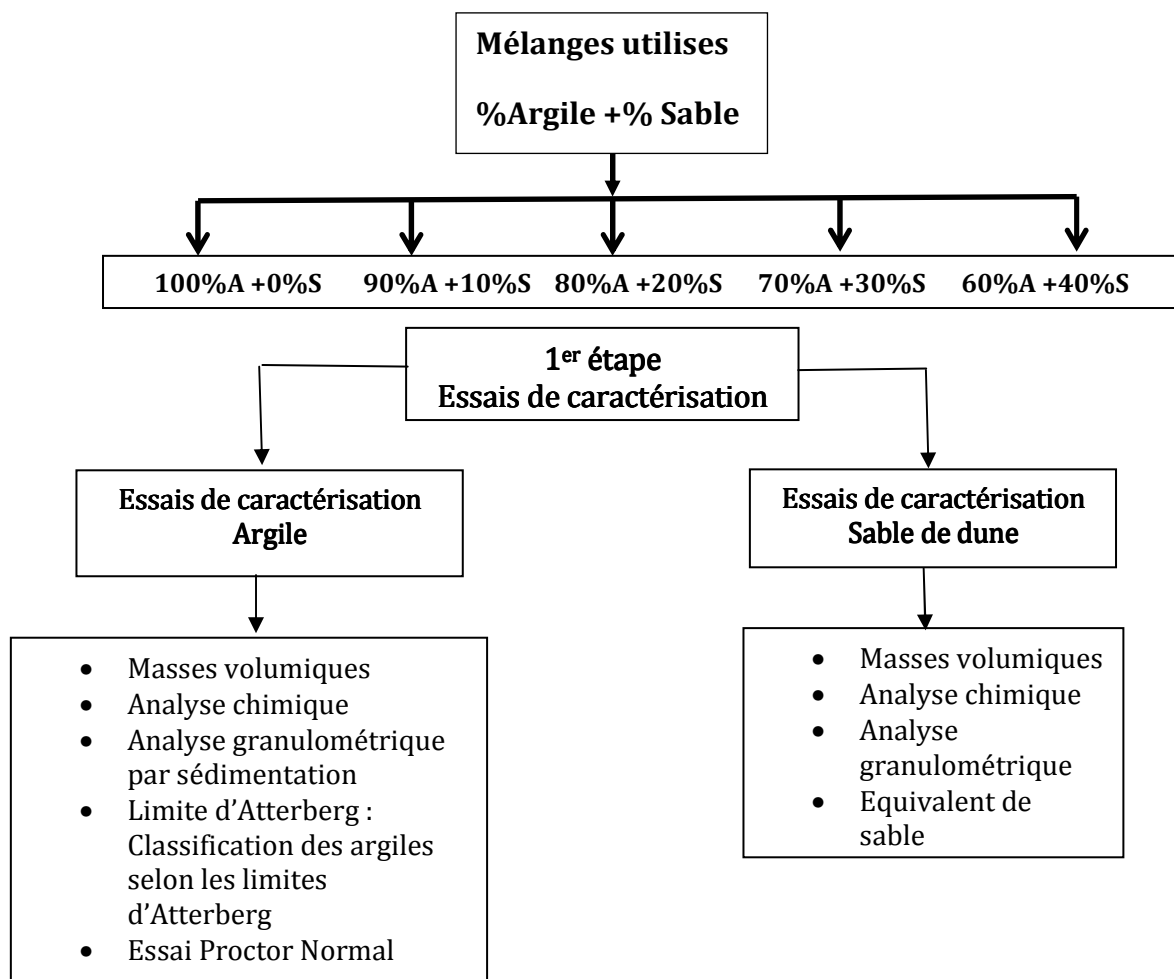
Chapitre IV : Résultats et interprétations

1. Introduction

Bien que la méthodologie de fabrication des blocs ait été maîtrisée et que les matériels aient été conçus pour permettre l'obtention d'un matériau fiable et performant, il n'existe pas encore de norme d'essai reconnue de manière universelle pour évaluer la résistance en compression et en traction de ces blocs. Les tests classiques concernant les matériaux de construction dans leur ensemble restent assez sommaires et permettent d'avoir simplement accès à des valeurs qui peuvent être utilisées ensuite pour le contrôle, pour comparer les matériaux entre eux et effectuer un classement. Les objectifs de ce chapitre sont la présentation des résultats des essais mécaniques des mélanges agile –sable à différents pourcentages et à différentes teneurs en eau et différents densités sèches dans les deux cas non traité et traité par des liants hydraulique à différents pourcentages (chaux et ciment) pour arriver à un mélange optimal qui satisfait les réglementations en vigueur en vue de construire des blocs en terre comprimé.

2. Programme expérimental

Dans ce qui suit nous allons présenter le plan de travail de cette étude sous forme d'un organigramme (figure IV.1)

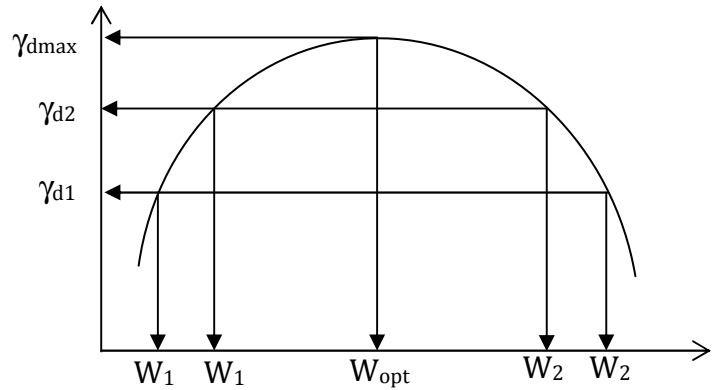


**Choix des
Des densités et teneurs en eau**

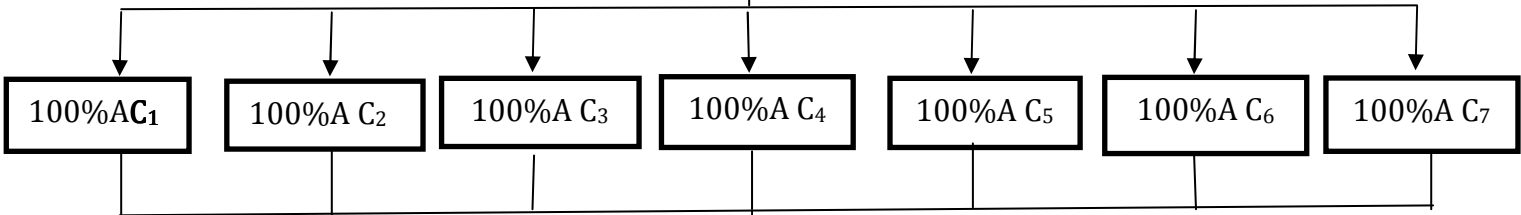
C1 : $\gamma_{d1} - w_1$ côté sec d'OPN
C2 : $\gamma_{d1} - w_2$ côté Humide de OPN
C3: $\gamma_{d1} - w_3 = w_{opt}$

C4 : $\gamma_{d2} - w_1$ côté sec d'OPN
C5 : $\gamma_{d2} - w_2$ côté Humide d'OPN
C6: $\gamma_{d2} - w_3 = w_{opt}$

C7: $\gamma_{dmax} - w_{opt}$



**2ème étape
Argile pure à différentes
compositions**



Résistance à la compression

**Mélange optimum
(C_{OPT})**

Traitement de C_{OPT} :
C_{OPT} + 4%ciment
C_{OPT} + 8%ciment
C_{OPT} + 4chaux
C_{OPT} + 8chaux

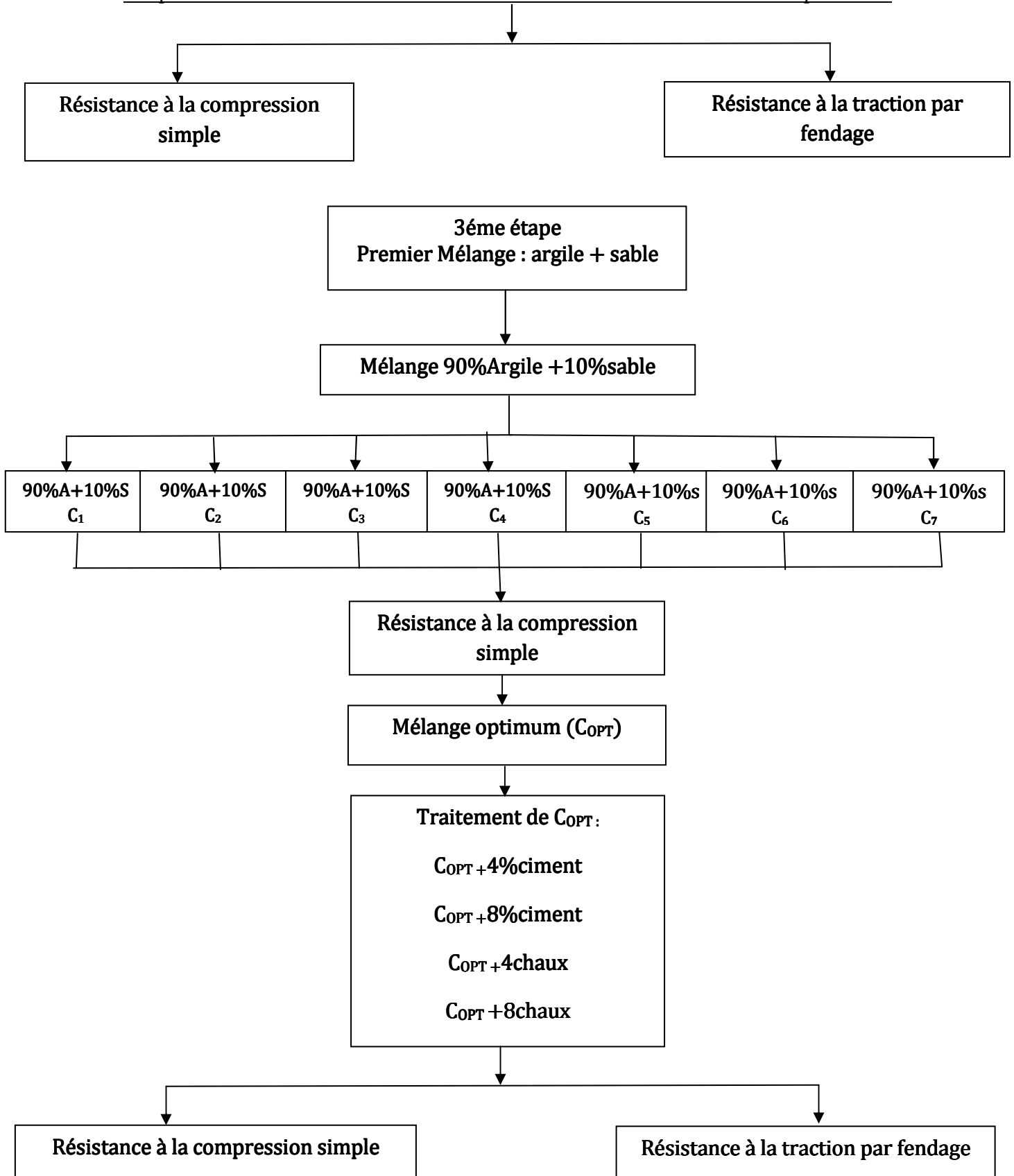


Figure IV.1 Plan de travail de la partie expérimental

Le même programme expérimental pour les mélanges (80%A+20%S), (70%A+30%S) et (60%A+40%S).

A : Argile

S : Sable de dune

OPN : Optimum Proctor Normal

Le choix des densités γ_{d1} et γ_{d2} représente les valeurs de γ_d max - 2% à -7%.

γ_d max-7% $\leq \gamma_{d1}$ et $\gamma_{d2} \leq \gamma_d$ max-2

Les mélanges étudiés correspondent à **1005** éprouvettes sont réparties comme suit :

- **525** éprouvettes soumis à la compression simple pour les mélanges non traités. (Voir tableau IV.1)
- **240** éprouvettes soumis à la compression simple pour les mélanges traités. (Voir tableau IV.11)
- **240** éprouvettes soumis à la traction par fendage pour les mélanges traités. (Voir tableau IV.16).

Les résultats des essais mécaniques représentent la moyenne de trois essais.

Tableau IV.1 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude

N° de mélange	Mélange	γ_d (g/cm ³)	W (%)	γ_h (g/cm ³)	Nombre des éprouvettes	Nombre totale
1	100% A	$\gamma_{d1}=1,46$	W ₁ =11,04	1.62	15	105
			W ₂ =30,50	1.91	15	
			W _{opt} =23,05	1.80	15	
		$\gamma_{d2}=1,5$	W ₁ =17,85	1.77	15	
			W ₂ =28,87	1.93	15	
			W _{opt} =23,05	1.85	15	
$\gamma_{dopt}=1,55$	W _{opt} =23,05	1.91	15			
2	90% A + 10 % S	$\gamma_{d1}=1,55$	W ₁ =14,41	1.77	15	105
			W ₂ =22,25	1.89	15	
			W _{opt} =16,40	1.80	15	
		$\gamma_{d2}=1,59$	W ₁ =15,41	1.84	15	
			W ₂ =20,51	1.92	15	
			W _{opt} =16,40	1.85	15	
$\gamma_{dopt}=1,63$	W _{opt} =16,40	1.90	15			
3	80% A + 20% S	$\gamma_{d1}=1,54$	W ₁ =14,03	1.76	15	105
			W ₂ =26,39	1.95	15	
			W _{opt} =19,03	1.83	15	
		$\gamma_{d2}=1,63$	W ₁ =16,71	1.90	15	
			W ₂ =22,58	2	15	
			W _{opt} =19,03	1.94	15	
$\gamma_{dopt}=1,67$	W _{opt} =19,03	1.99	15			

4	70% A + 30% S	$\gamma_{d1}=1,54$	$W_1=13,81$	1.75	15	105			
			$W_2=24,21$	1.91	15				
			$W_{opt}=17,52$	1.81	15				
		$\gamma_{d2}=1,66$	$W_1=15,43$	1.92	15				
			$W_2=20,34$	2	15				
			$W_{opt}=17,52$	1.95	15				
		$\gamma_{dopt}=1,7$	$W_{opt}=17,52$	2	15				
		5	60% A + 40% S	$\gamma_{d1}=1,66$	$W_1=12,30$		1.86	15	105
					$W_2=20,66$		2	15	
$W_{opt}=16,68$	1.94				15				
$\gamma_{d2}=1,72$	$W_1=14,00$			1.96	15				
	$W_2=18,00$			2.03	15				
	$W_{opt}=16,68$			2.01	15				
$\gamma_{dopt}=1,75$	$W_{opt}=16,68$			1.17	15				
					Totale	525			

A : Argile

S : Sable de dune

C : Ciment

CH : Chaux



Photo IV.1 Les échantillons non traités (argile pure) qui ont été testés lors de l'étude



Photo IV.2 Les échantillons non traités (argile + sable de dune) qui ont été testés lors de l'étude



Photo IV.3 Les échantillons non traités (argile + sable de dune) qui ont été testés lors de l'étude



Photo IV. 4 Les échantillons traités (argile + sable + liant) qui ont été testés lors de l'étude

3. Essai de Proctor normal (Nouioua. T)

La figure IV.2 représente les courbes de Proctor normal des mélanges suivant :

- 1) 100% argile
- 2) 90% argile + 10% sable de dune
- 3) 80% argile + 20% sable de dune
- 4) 70% argile + 30% sable de dune
- 5) 60% argile + 40% sable de dune

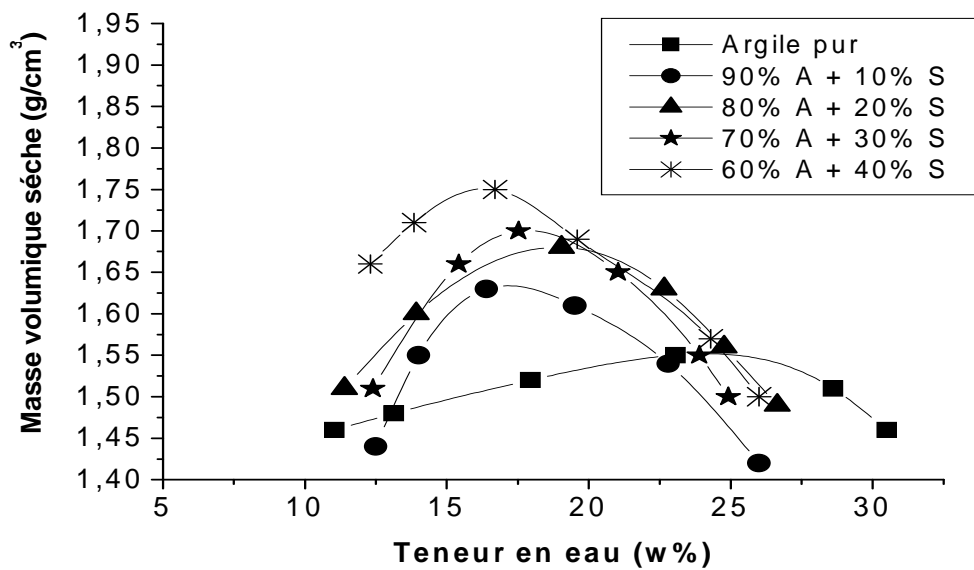


Figure IV.2. Courbes Proctor normal des différentes quantités de sable de dune ajouté

A partir de ces courbes, on peut ressortir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Les résultats sont regroupés dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 Résultats de l'essai de Proctor

Les mélanges	γ_{dopt}	$W_{opt}(\%)$
Argile pure	$\gamma_{dopt}=1.51$	$W_{dopt}=23.1$
90% A+10% S	$\gamma_{d1}=1.63$	$W_2=16.4$
80% A+20% S	$\gamma_{dopt}=1.67$	$W_{dopt}=19.03$
70% A+30% S	$\gamma_{d2}=1.7$	$W_{dopt}=17.52$
60% A+40% S	$\gamma_{d2}=1.75$	$W_2=16.68$

Pour chaque courbe de compactage de tous les mélanges, le poids volumique sec optimal du mélange sable-argile augmente avec le pourcentage de sable ajouté. Contrairement pour la teneur en eau optimale.

4. Limites d'Atterberg

Les résultats sont illustrés dans le tableau VI.3 :

Tableau IV.3 limite de liquidité en fonction pourcentage de sable

Les mélanges	Pourcentage de sable de dune (g)	La limite de liquidité W_L
100% A	0%	53
90% A+10% S	10%	43,6
80% A+20% S	20%	39,1
70% A+30% S	30%	36,5
60% A+40% S	40%	33,6

La figure IV.3 présente les limites de liquidité des mélanges en fonction de pourcentage d'argile. On constate que, la limite de liquidité diminue avec le pourcentage de sable ajouté.

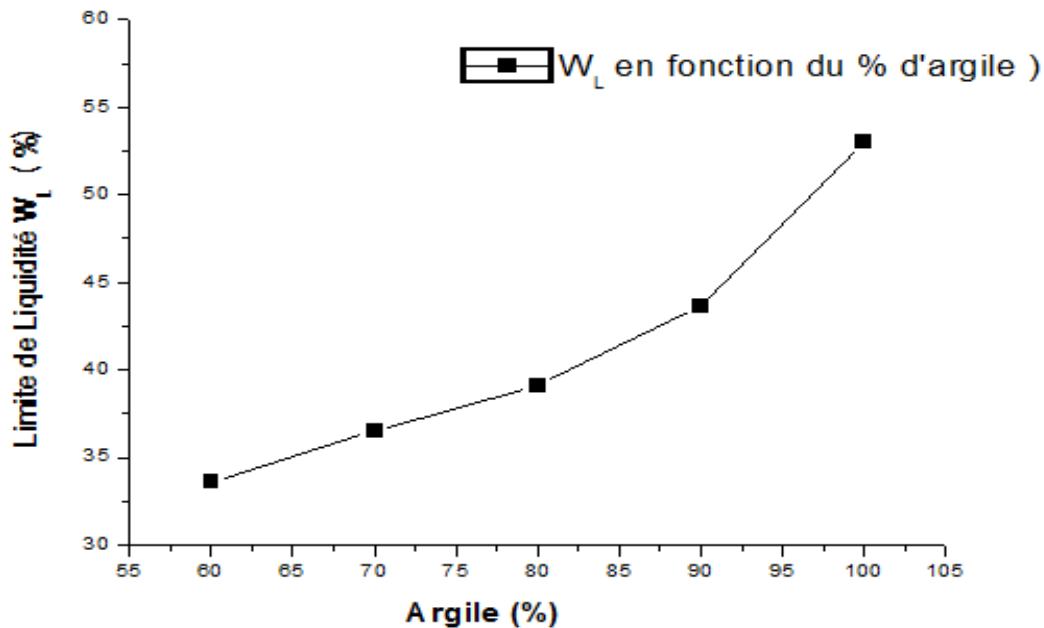


Figure IV.3 Les limites de liquidité (W_L) en fonction de % d'argile

5. Résistance mécanique

L'importance de l'étude du comportement mécaniques des mélanges, mené des exigences que doit remplir tout matériaux destiné à la construction (critères de stabilité). Dans ce cadre, la présente étude sera divisée en deux parties, résistance à la compression et à la traction par fendage.

5.1. Résistance à la compression en fonction d'âge

5.1.1. Argile pure

Après l'écrasement l'évolution de la résistance (MPa) en fonction d'âge, les résultats sont présentés sur le tableau IV.4

Tableau IV.4 résistance à la compression simple (Rc) en fonction d'âge d'argile pure

γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)			
			0 j	7 j	14 j	28 j
$\gamma_{d1}=1,46$	$W_1=11,04$		0,12	0,17	0,17	0,19
	$W_{opt}=23,05$		1,27	1,08	0,74	0,59
	$W_2=30,50$		3,18	3,13	1,06	0,65
$\gamma_{d2}=1,5$	$W_1=17,85$		0,13	0,20	0,89	1,20
	$W_{opt}=23,05$		2,35	2,26	1,32	2,02
	$W_2=28,87$		3,32	3,11	1,96	1,66
$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$		0,52	0,91	2,36	2,86

D'après le tableau IV 4 on trace les courbes de la figure IV.4

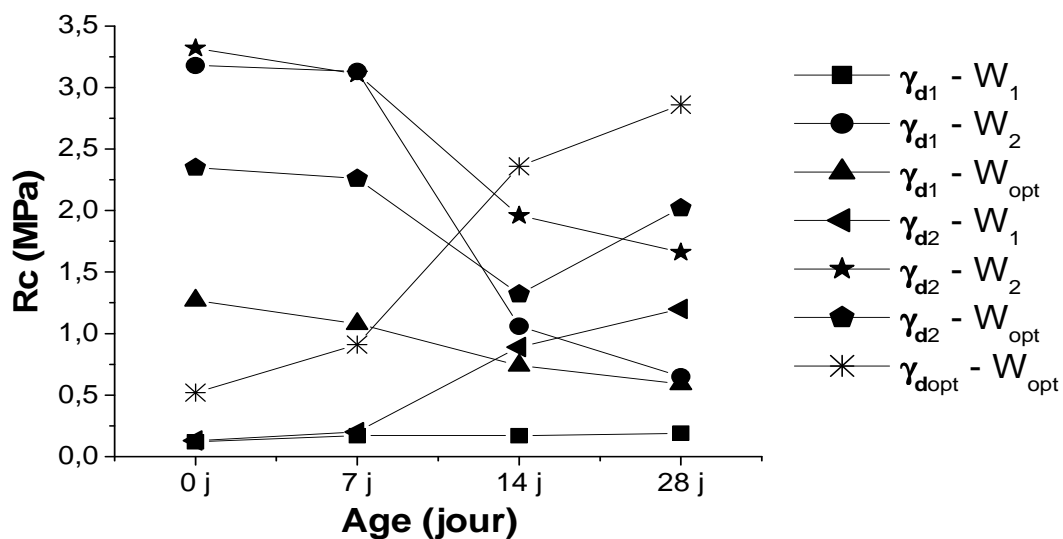


Figure IV.4 Résistance à la compression en fonction d'âge

Pour le mélange optimum, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc) à différent âge. Elle atteint la valeur de 2,86 MPa.

Pour une densité sèche, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en eau à différent âge.

Pour les densités inférieures à γ_{dopt} ($\gamma_{d1} < \gamma_{dopt}$, $\gamma_{d2} < \gamma_d$), on constate une diminution de résistance (R_c) pour les différents âges, une exception de γ_{d2} et une teneur en eau w_1 elle est proche à γ_{dopt} ; la résistance (R_c) augmente pour les différents âges.

5.1.2. Argile pure traité à la chaux et au ciment

Tableau IV.5 Résistance à la compression simple (R_c) en fonction d'âge

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		Age (jour)			
				0 j	7 j	14 j	28 j
100% A	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	R_c (MPa)	0,52	0,91	2,36	2,86
96% A + 4% C				0,46	2,90	3,64	4,62
92% A + 8% C				0,76	3,55	4,76	5,57
96% A + 4% CH				0,29	2,80	3,45	3,98
92% A + 8% CH				0,58	3,16	4,22	5,02

D'après le tableau IV 5 on constate que le traitement d'argile conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple et que les résultats de ces essais sur l'argile traité pour le même pourcentage de chaux ou ciment sont presque les mêmes. Donc, on choisit l'argile traité à 8% chaux comme un mélange plus résistant pour garder l'aspect économique.

D'après le tableau IV 5, on trace les courbes de la variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge (Figure IV.5).

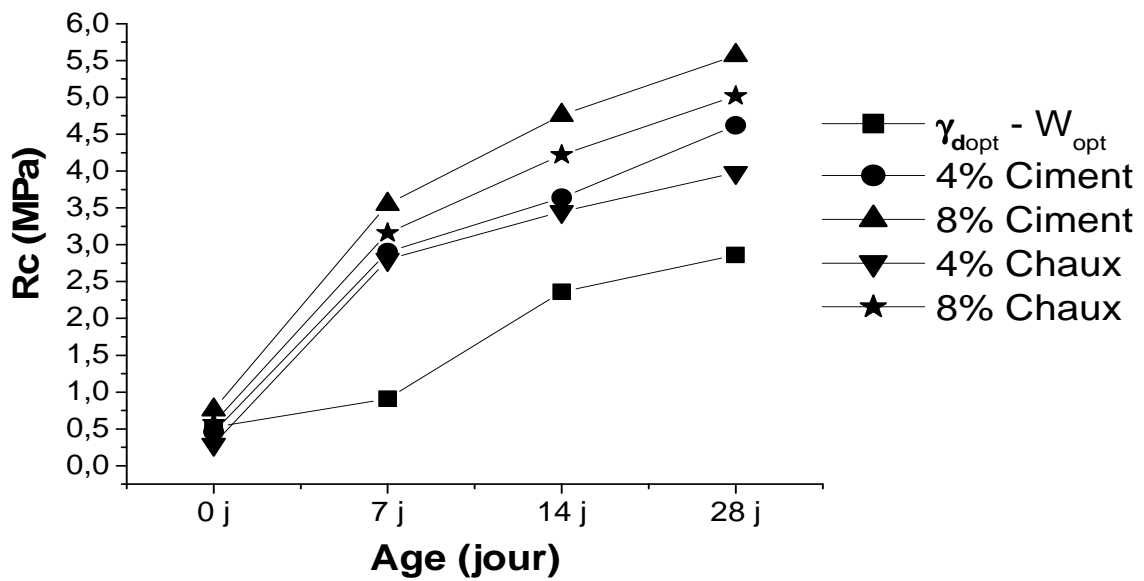


Figure IV.5 Les résistances à la compression simple de mélange traité à (4%, 8 % ciment) et (4%, 8% chaux)

5.1.3. Mélanges argile – sable de dune

Pour les mélanges on adopte les pourcentages 10%, 20%, 30% et 40% de sable de dune proportionnellement à la quantité d’argile pour étudier l’effet du changement granulaire, pour cela en exécute des écrasements sur des éprouvettes confectionnées.

Les résultats sont regroupés dans le tableau IV.6, 7, 8,9.

Tableau IV.6 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90% A + 10% S) en fonction d’âge

Mélange	γ_d (g/cm ³)		W (%)	0 j	7 j	14 j	28 j
90% A+10% S	$\gamma_{d1}=1,55$	Rc (MPa)	$W_1=14,41$	0,21	0,41	0,48	0,32
			$W_{opt}=16,40$	0,44	0,57	0,70	0,95
			$W_2=22,25$	2,02	2,21	2,58	2,75
	$\gamma_{d2}=1,59$		$W_1=15,41$	0,88	0,82	0,77	0,76
			$W_{opt}=16,40$	0,70	0,87	1,15	0,57
			$W_2=20,51$	2,60	2,57	2,09	2,08
	$\gamma_{dopt}=1,63$		$W_{opt}=16,40$	2,32	2,05	1,66	1,05

Tableau IV.7 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80% A + 20% S) en fonction d'âge

Mélange	γ_d (g/cm ³)		W (%)	0 j	7 j	14 j	28 j
80% A+20% S	$\gamma_{d1}=1,54$	Rc (MPa)	$W_1=14,03$	0,72	0,66	0,60	0,52
			$W_{opt}=19,03$	2,07	2,24	2,38	1,60
			$W_2=26,39$	2,08	2,36	3,20	3,48
	$\gamma_{d2}=1,63$		$W_1=16,71$	2,35	2,17	1,99	1,06
			$W_{opt}=19,03$	1,87	2,37	3,16	3,97
			$W_2=22,58$	2,83	3,07	3,68	3,15
	$\gamma_{dopt}=1,67$		$W_{opt}=19,03$	3,08	3,25	4,00	4,12

Tableau IV.8 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70% A + 30% S) en fonction d'âge

Mélange	γ_d (g/cm ³)		W (%)	0 j	7 j	14 j	28 j
70% A+30% S	$\gamma_{d1}=1,54$	Rc (MPa)	$W_1=13,81$	0,77	0,60	0,54	0,33
			$W_{opt}=17,52$	1,50	1,63	1,89	1,73
			$W_2=24,21$	2,59	2,69	2,73	2,99
	$\gamma_{d2}=1,66$		$W_1=15,43$	1,78	1,55	1,26	1,08
			$W_{opt}=17,52$	2,81	3,00	3,67	3,79
			$W_2=20,34$	3,89	3,58	3,52	3,30
	$\gamma_{dopt}=1,7$		$W_{opt}=17,52$	2,63	2,40	2,10	2,52

Tableau IV.9 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60% A + 40% S) en fonction d'âge

Mélange	γ_d (g/cm ³)		W (%)	0 j	7 j	14 j	28 j
60% A+40% S	$\gamma_{d1}=1,66$	Rc (MPa)	$W_1=12,30$	0,87	0,68	0,58	0,73
			$W_{opt}=16,68$	1,89	2,14	2,32	2,63
			$W_2=20,66$	2,63	3,04	3,46	3,53
	$\gamma_{d2}=1,72$		$W_1=14,00$	0,99	1,12	1,90	1,69
			$W_{opt}=16,68$	2,11	1,71	1,24	1,38
			$W_2=18,00$	2,96	3,14	3,58	3,69
	$\gamma_{dopt}=1,75$		$W_{opt}=16,68$	3,93	3,60	3,27	2,53

Les résultats des essais de compression simple de tous les mélanges sont traduit par des courbes des figures IV.6, 7, 8 et 9

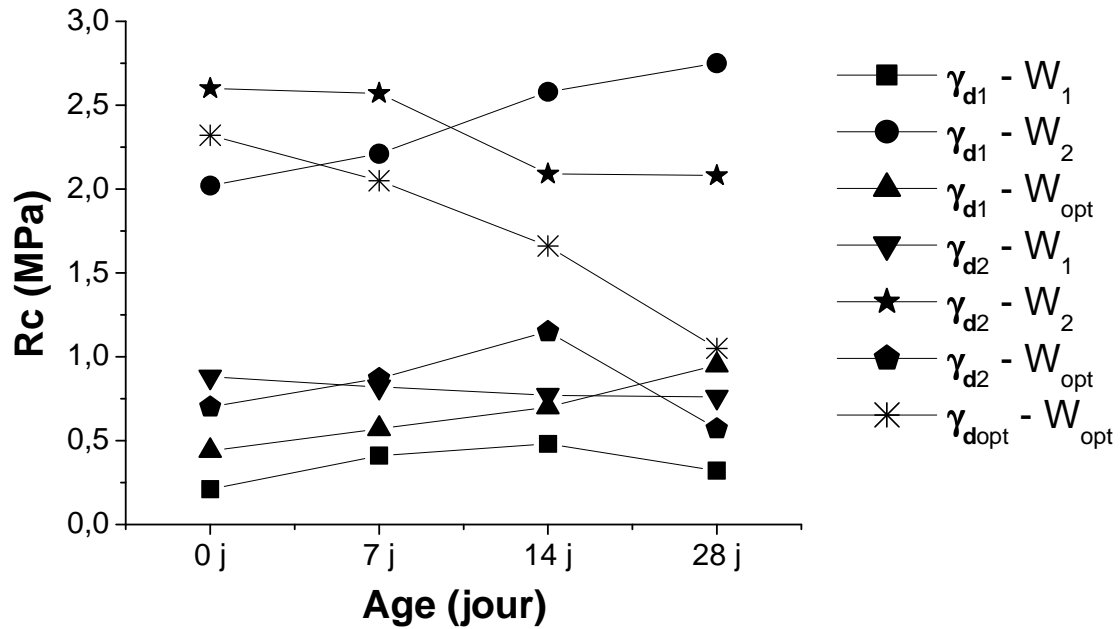


Figure IV.6 Mélange (90%A+10%S) non traité

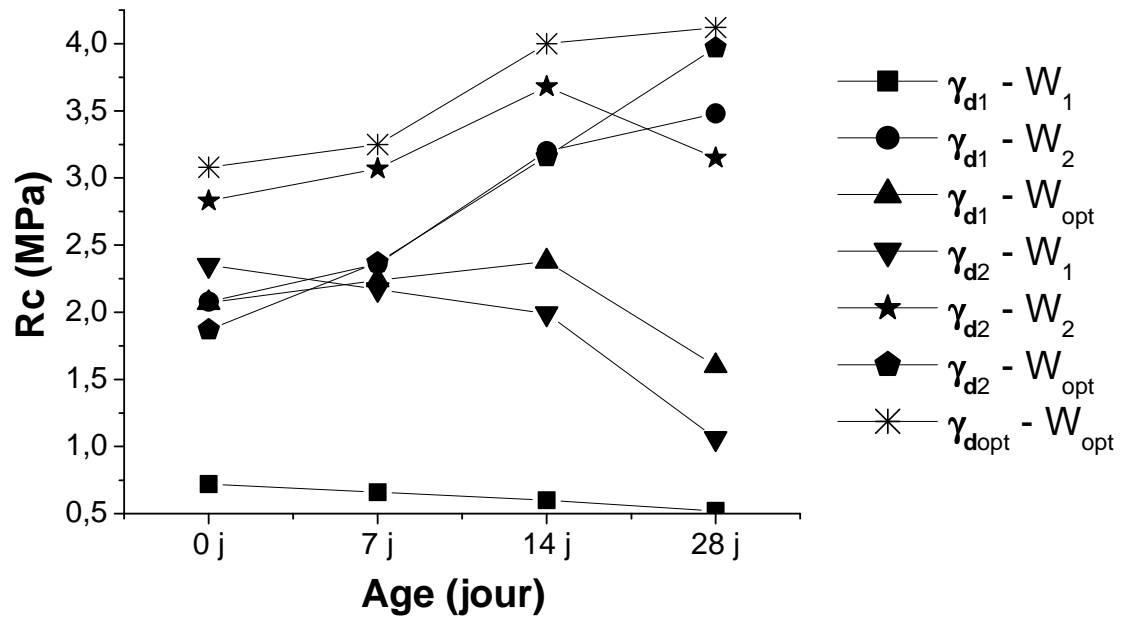


Figure IV.7 Mélange (80% A+20% S) non traité

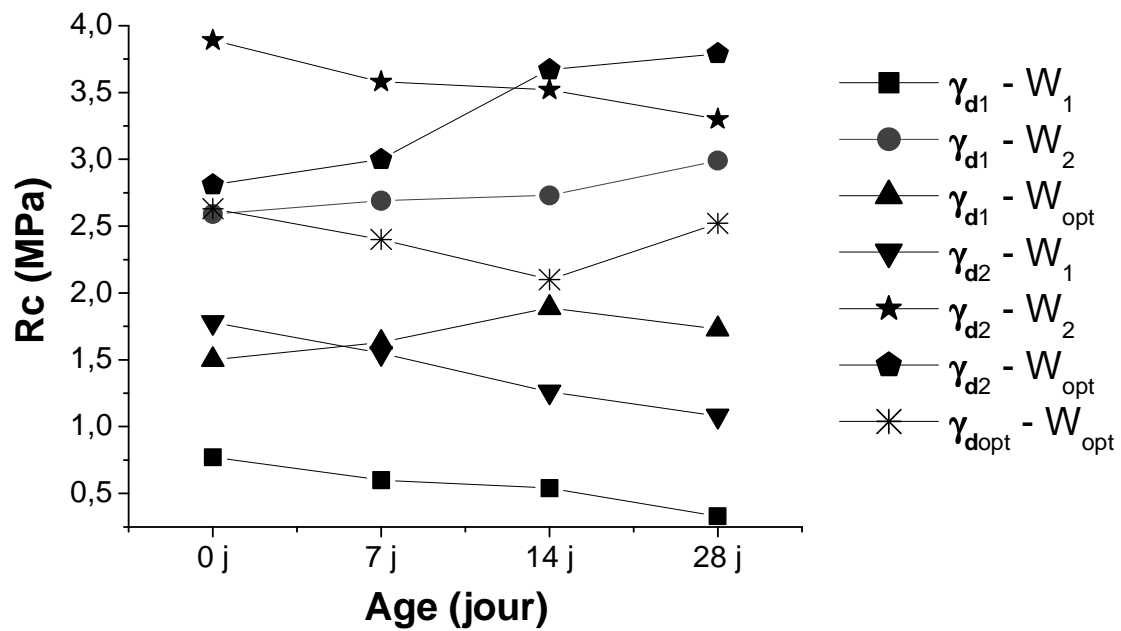


Figure IV.8 Mélange (70% A+30% S) non traité

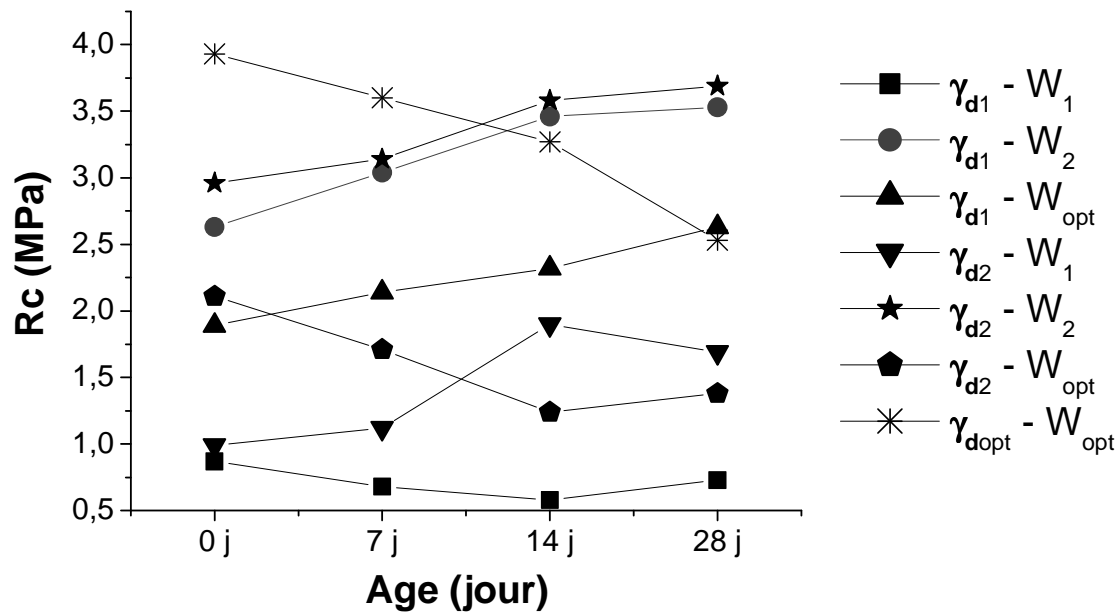


Figure IV.9 Mélanges (60% A + 40% S) non traité

Pour tous les mélanges A+S et pour $\gamma_d = \gamma_{dmax}$ et $W = W_{opt}$, on constate que la résistance à la compression diminue en fonction de l'âge, exception faite pour le mélange 20% S + 80% A. sa résistance Rc atteint 4MPa à 28j qui représente la valeur maximale pour tous les mélanges à différentes densités et à différentes teneur en eau et pour différents âges (tableau IV.10).

Pour tous les mélanges S+A et pour une densité sèche, la résistance à la compression simple augmente avec l'augmentation de la teneur en eau à différent âge.

Pour tous les mélanges S+A et pour une densité sèche et pour les teneurs en eau supérieur ou égale à la teneur en eau optimale, on constate que la résistance Rc augmente avec l'âge « j », une exception faite pour quelques points en particulier à 28j. Ceci peut être dû à la bonne cohésion entre les grains en particulier lorsqu'on augmente la quantité d'eau au mélange

Les valeurs de la résistance (Rc) optimale à 28j sont regroupées dans le tableau IV.10. Ces résultats sont traduits par des courbes de la figure IV.10.

Tableau IV.10 Les mélanges optimaux à condition de la résistance à la compression simple à 28j

Mélange	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc ₂₈ (MPa)
100%A	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	2.86
90%A+10%S	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$	2.75
80%A+20%S	$\gamma_{dopt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$	4.12
70%A+30%S	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{opt}=17,52$	3.79
60%A+40%S	$\gamma_{d2}=1,72$	$W_2=18,00$	3.69

D'après le tableau en trace les courbes présentés dans la figure IV.10.

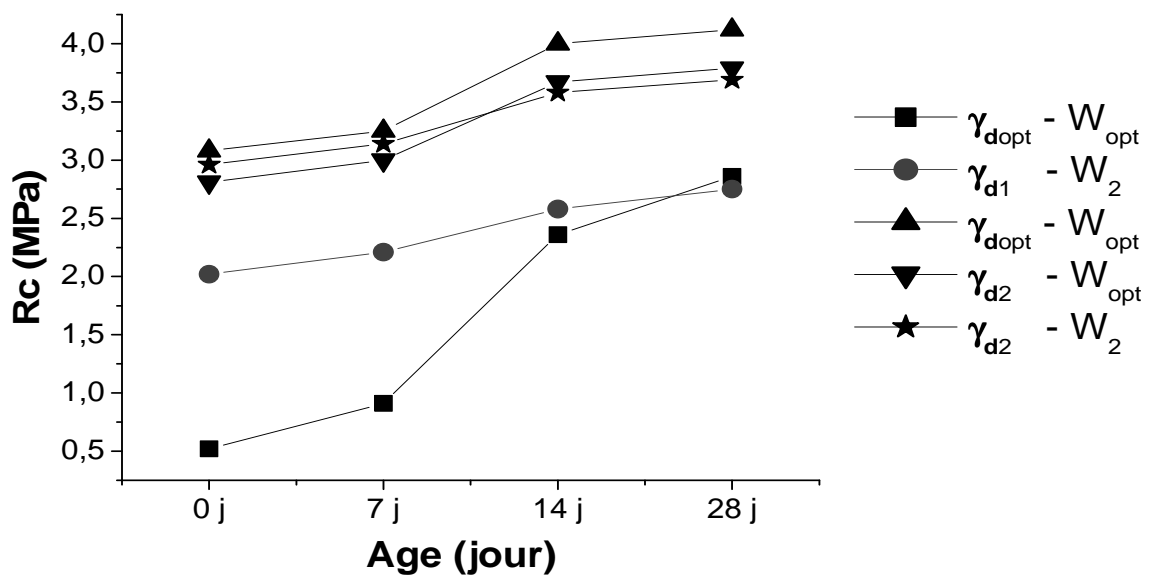


Figure IV.10 Les courbes des mélanges optimaux à la résistance à la compression simple

Le tableau IV 10représente les variations de la résistance à la compression, en fonction du pourcentage de sable à28 jours. Nous remarquons que l'augmentation de sable jusqu'au 20% a permis d'améliorer les performances mécaniques de l'argile où $Rc_{28}=4,12$ MPa. Mais au-delà de ce pourcentage il y'a eu une diminution de résistance mécanique.

Le mélange optimal sans traitement est entre 20% S+80%A ce qui est en accord avec le pourcentage usuellement utilisé dans la production des briques industrielles qui est de l'ordre 30% (Mekhermeche. A ; 2012).

5.1.4. Mélanges Argile + sable traité à la chaux et au ciment

Cette partie est consacrée au traitement par deux types de liants hydraulique (chaux et ciment) à différents pourcentages (4%,8%) pour les mélanges A+S qui ont présentés des résistances aux compressions maximales (voir tableau IV.11).

Tableau IV.11 présente les mélanges étudiés et le nombre des éprouvettes confectionnées pour la réalisation des essais de compression simple.

Tableau IV.11 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude

	N° de mélange	Mélange	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Nombre des éprouvettes
100%A	1	96% A + 4% C	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	12
	2	92% A + 8% C			12
	3	96% A + 4% CH			12
	4	92% A + 8% CH			12
90% A +10% S	5	86% A +4% C + 10% S	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$	12
	6	82% A +8% C +10% S			12
	7	86% A + 4% CH + 10% S			12
	8	82% A + 8% CH + 10% S			12
80% A +20% S	9	76% A + 4% C + 20% S	$\gamma_{d opt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$	12
	10	72% A +8% C + 20% S			12
	11	76% A + 4% CH + 20% S			12
	12	72% A + 8% CH + 20% S			12
70% A +30% S	13	66% A +4% C + 30% S	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{opt}=17,52$	12
	14	62% A +8% C + 30% S			12
	15	66% A + 4% CH + 30% S			12
	16	62% A + 8% CH + 30% S			12
60% A +40% S	17	56% A +4% C + 40% S	$\gamma_{d2}=1,72$	$W_2=18,00$	12
	18	52% A +8% C + 40S			12
	19	56% A + 4% CH + 40% S			12
	20	52% A + 8% CH + 40% S			12
Totale					240

Les Tableau IV.5, 6, 7 et 8) présente les résultats des écrasements des mélanges optimums indiqués dans le tableau IV 12.

Tableau IV.12 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S) traité

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
90% A + 10% S	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$	Rc (MPa)	2,02	2,21	2,58	2,75
86%A+10%S+4%C				0,51	2,58	3,36	3,72
82%A+10%S+8%C				0,70	2,64	3,65	4,07
86%A+10%S+4%CH				0,25	1,55	1,95	2,56
82%A+10%S+8%CH				0,36	1,87	2,08	2,69

Tableau IV.13 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S) traité

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
80%A+20%S	$\gamma_{dopt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$	Rc (MPa)	3,08	3,25	4,00	4,12
76%A+20%S+4%C				0,43	2,33	2,79	3,39
72%A+20%S+8%C				0,74	3,00	3,52	3,44
76%A+20%S+4%CH				0,38	2,20	2,58	2,70
72%A+20%S+8%CH				0,68	2,32	2,65	2,74

Tableau IV.14 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S) traité

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
70%A+30%S	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{opt}=17,52$	Rc (MPa)	2,81	3,00	3,67	3,79
66%A+30%S+4%C				0,38	1,48	1,60	1,77
62%A+30%S+8%C				0,43	1,59	2,06	2,58
66%A+30%S+4%CH				0,22	1,35	1,32	1,24
62%A+30%S+8%CH				0,33	1,31	1,31	1,52

Tableau IV.15 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S) traité

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
60%A+40%S	$\gamma_{d2}=1,72$	$W_2=18,00$	Rc (MPa)	2,96	3,14	3,58	3,69
56%A+40%S+4%C				0,19	1,45	1,55	1,67
52%A+40%S+8%C				0,49	2,00	1,94	2,31
56%A+40%S+4%CH				0,19	1,26	1,56	1,43
52%A+40%S+8%CH				0,18	1,77	1,85	2,05

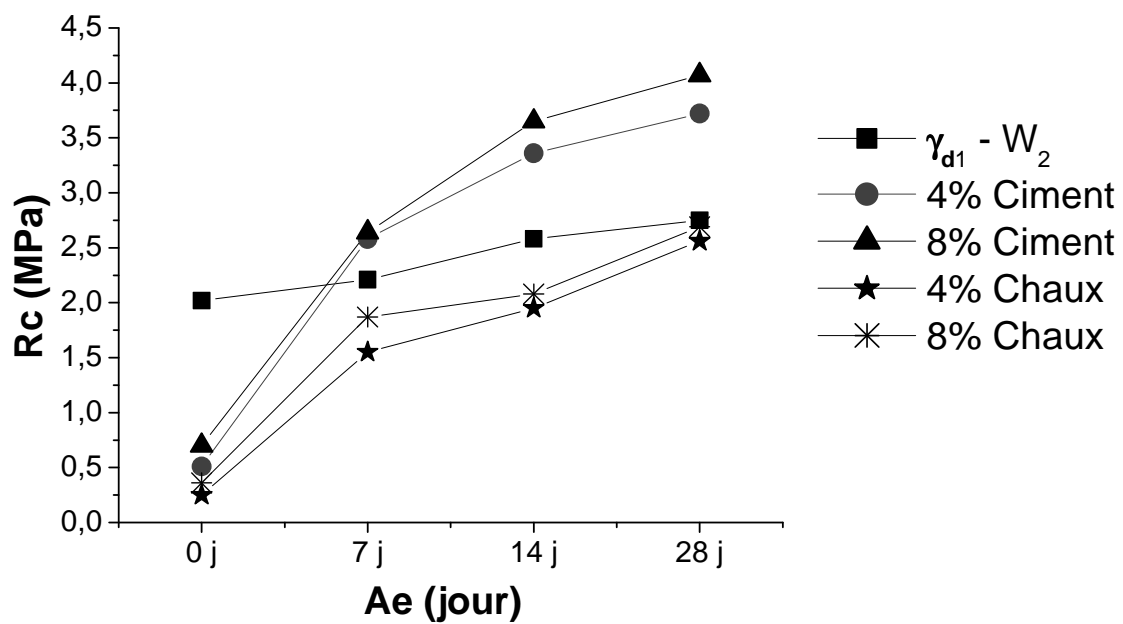


Figure IV.11 La courbe de mélange (90%A+10%S) traité

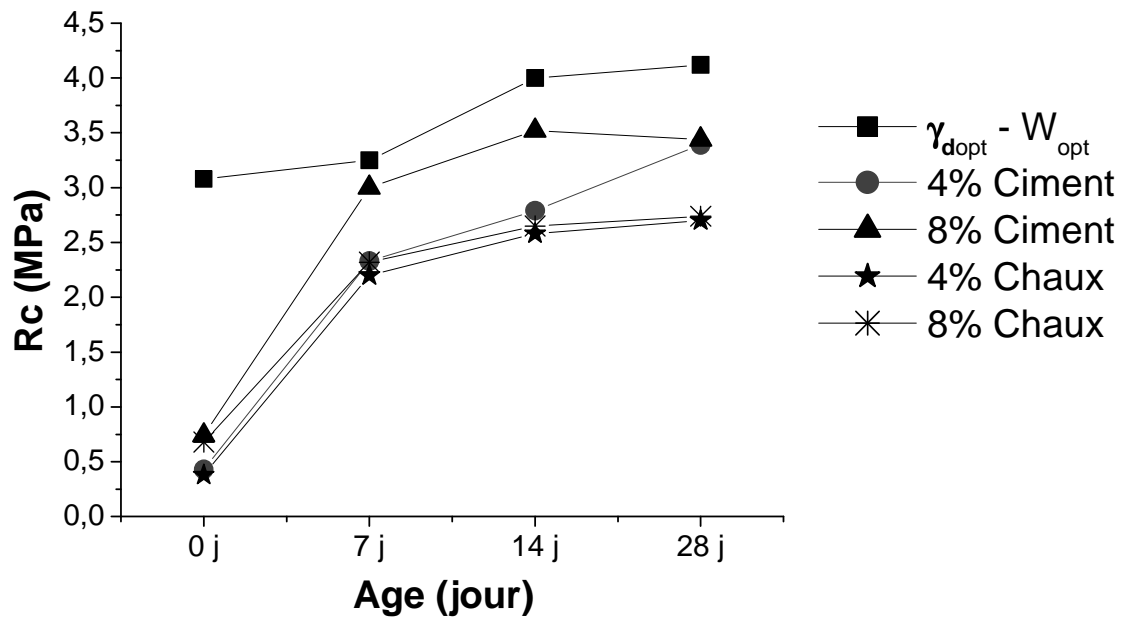


Figure IV.12 La courbe de mélange (80% A+20% S) traité

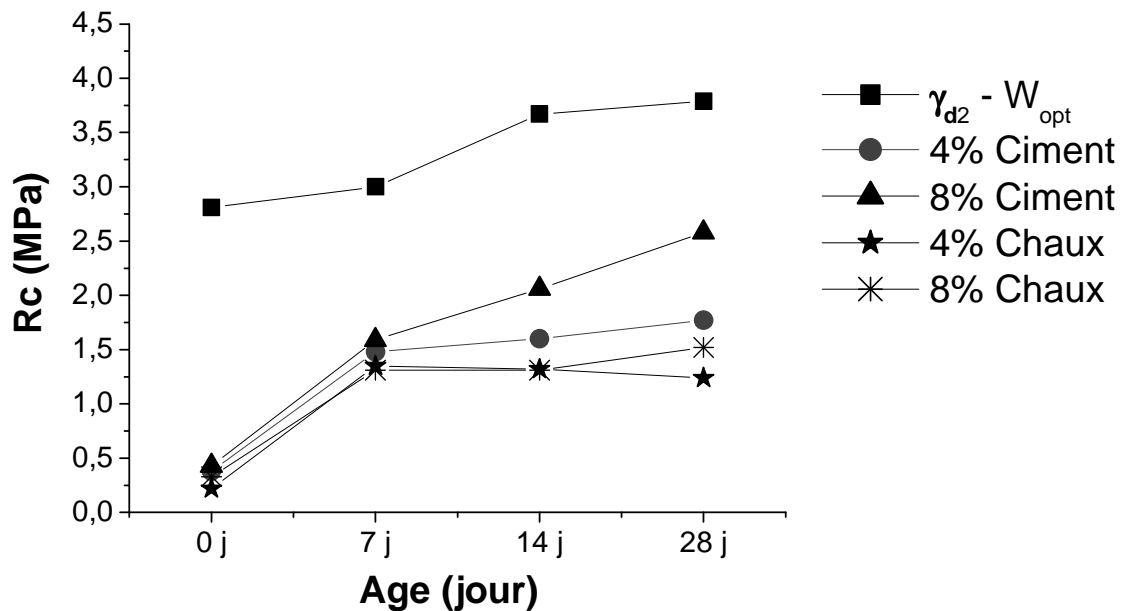


Figure IV.13 La courbe de mélange (70% A+30% S) traité

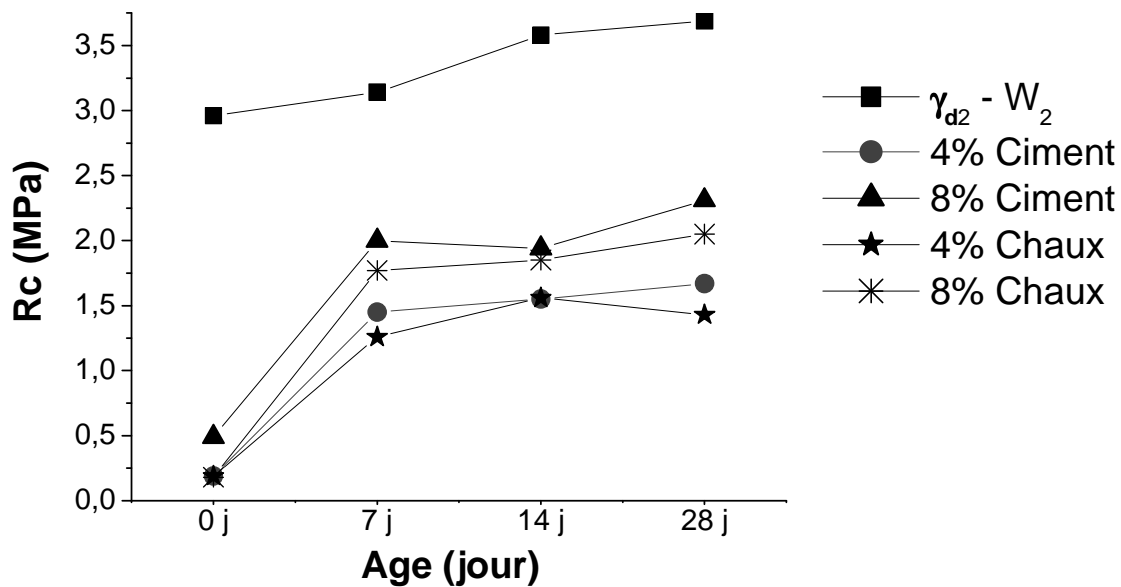


Figure IV.14 La courbe de mélange ((60%A+40%S) traité

Les figures IV. 11-14 présentent l'évolution de la résistance (Rc) à différent âge pour tous les mélanges traités par les liants hydrauliques. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression pour tous âges testés.

Une exception pour le mélange (90%A+10%S), la résistance des mélanges à 4% 8 % de ciment a différent âge respectivement 3.72MPa et 4.07 MPa supérieure à la résistance de mélange non traité 2.75 MPa.

Ces résultats est en accord avec les travaux de Solomon-Ayeh (1994), effectués sur la latérite du Ghana. Il a obtenu une résistance en compression des blocs de terre stabilisés avec 8% de ciment comprise entre 3 et 4,5 MPa alors que ceux stabilisés à 4% de ciment ont une résistance en compression varie entre 2 et 3,5 MPa. (Meukam.P ; 2004)

5.2. Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge

La résistance à la compression est la performance la plus importante pour les constructions. Mais bien sûr dans une approche approfondie du comportement des structures, il est nécessaire de connaître le comportement à la traction. Par ailleurs, les constructions en terre sont aussi sollicitées en traction et en cisaillement dans le cas de tassement différentiel dans les fondations. La procédure utilisée ici est celle de l'essai de traction par fendage (essai brésilien).

Tableau IV.16 présente les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude de la traction par fendage.

Tableau IV.16 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude

	N° de mélange	Mélange	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Nombre des éprouvettes
100% A	1	96% A + 4% C	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	12
	2	92% A + 8% C			12
	3	96% A + 4% CH			12
	4	92% A + 8% CH			12
90% A + 10% S	5	86% A + 4% C + 10% S	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$	12
	6	82% A + 8% C + 10% S			12
	7	86% A + 4% CH + 10% S			12
	8	82% A + 8% CH + 10% S			12
80% A + 20% S	9	76% A + 4% C + 20% S	$\gamma_{dopt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$	12
	10	72% A + 8% C + 20% S			12
	11	76% A + 4% CH + 20% S			12
	12	72% A + 8% CH + 20% S			12
70% A + 30% S	13	66% A + 4% C + 30% S	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{opt}=17,52$	12
	14	62% A + 8% C + 30% S			12
	15	66% A + 4% CH + 30% S			12
	16	62% A + 8% CH + 30% S			12
60% A + 40% S	17	56% A + 4% C + 40% S	$\gamma_{d2}=1,72$	$W_2=18,00$	12
	18	52% A + 8% C + 40% S			12
	19	56% A + 4% CH + 40% S			12
	20	52% A + 8% CH + 40% S			12
				Totale	240

On expose les résultats de cet essai dans les tableaux :

Tableau IV.17 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
96% A + 4% C	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	Rtb (MPa)	0,54	1,02	1,73	1,97
92% A + 8% C				0,48	1,06	2,18	2,29
96% A + 4% CH				0,14	0,80	1,21	1,48
92% A + 8% CH				0,25	0,59	1,06	0,81

Tableau IV.18 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S)

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
86%A + 10%S + 4%C	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$	Rtb (MPa)	0,29	0,70	0,89	1,24
82%A + 10%S + 8%C				0,30	0,98	1,05	1,26
86%A + 10%S + 4%CH				0,07	0,28	0,58	0,83
82%A + 10%S + 8%CH				0,08	0,25	0,50	0,73

Tableau IV.19 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S)

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
76%A + 20%S + 4%C	$\gamma_{d\text{opt}}=1,67$	$W_{\text{opt}}=19,03$	Rtb (MPa)	0,14	0,66	0,84	0,92
72%A + 20%S + 8%C				0,19	0,87	1,04	1,22
76%A + 20%S + 4%CH				0,09	0,44	0,67	0,67
72%A + 20%S + 8%CH				0,15	0,65	0,58	0,46

Tableau IV.20 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S)

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
66%A + 30%S + 4%C	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{\text{opt}}=17,52$	Rtb (MPa)	0,32	0,54	0,55	0,56
62%A + 30%S + 8%C				0,28	0,66	0,59	0,67
66%A + 30%S + 4%CH				0,24	0,66	0,41	0,44
62%A + 30%S + 8%CH				0,15	0,45	0,40	0,41

Tableau IV.21 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S)

	γ_d (g/cm ³)	W (%)		0 j	7 j	14 j	28 j
56%A + 40%S + 4%C	$\gamma_{d2}=1,72$	$W_2=18,00$	Rtb (MPa)	0,07	0,42	0,43	0,43
52%A + 40%S + 8%C				0,11	0,50	0,47	0,45
56%A + 40%S + 4%CH				0,10	0,41	0,33	0,37
52%A + 40%S + 8%CH				0,07	0,34	0,26	0,31

Les résultats montrent que la résistance à la traction par fendage augmente avec les différents pourcentages et différents liants hydraulique étudiés et pour les différents âges.

Les résistances à la traction par fendage des mélanges traités par le ciment sont supérieurs à ceux traités par la chaux, et ceci pour le même pourcentage utilisé.

La résistance à la traction par fendage décroît en fonction de l'augmentation de sable de dune à 28j. D'après les tableaux on trace les courbes ci-dessous :

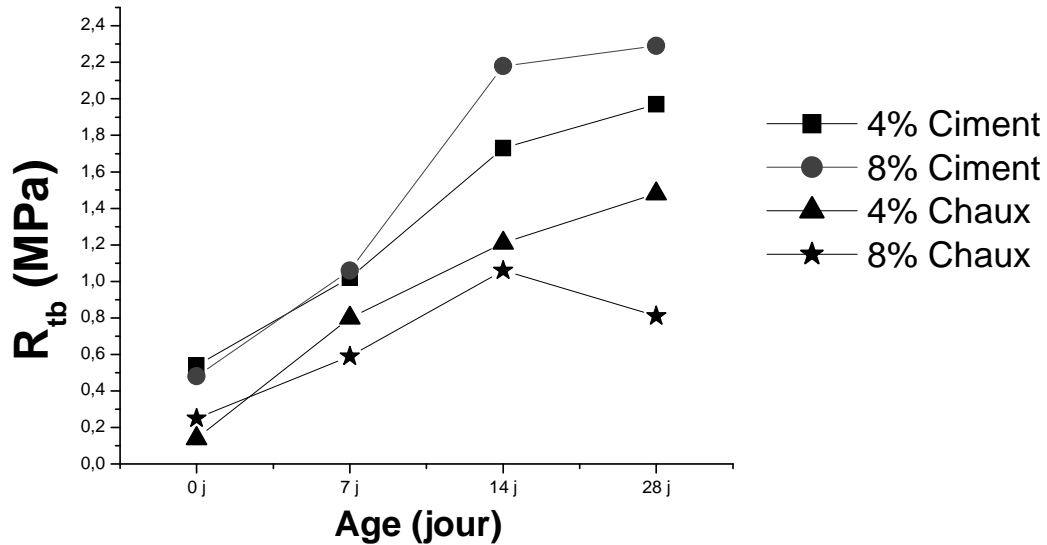


Figure IV.15 La courbe de mélange argile pure traité

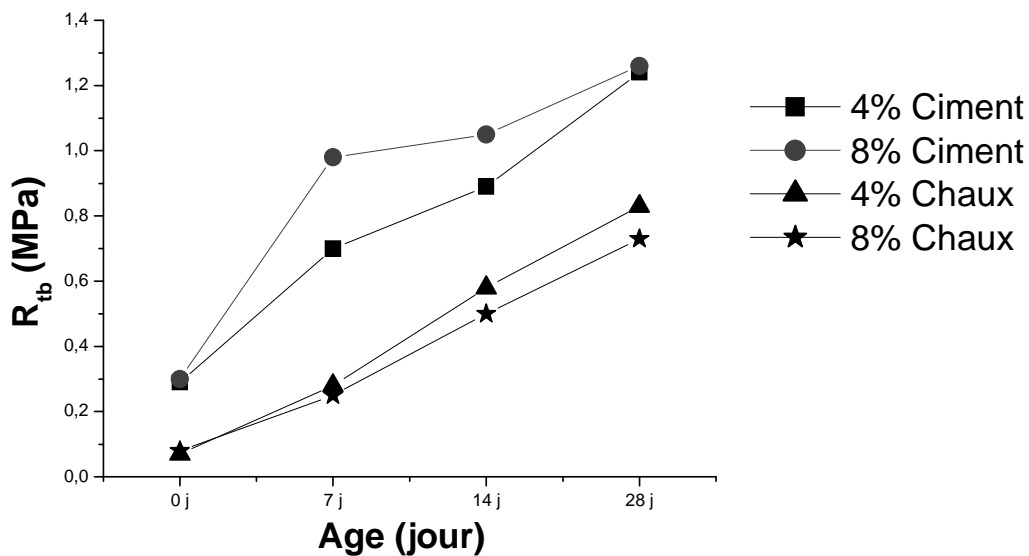


Figure IV.16 La courbe de mélange ((90% A+10% S) traité

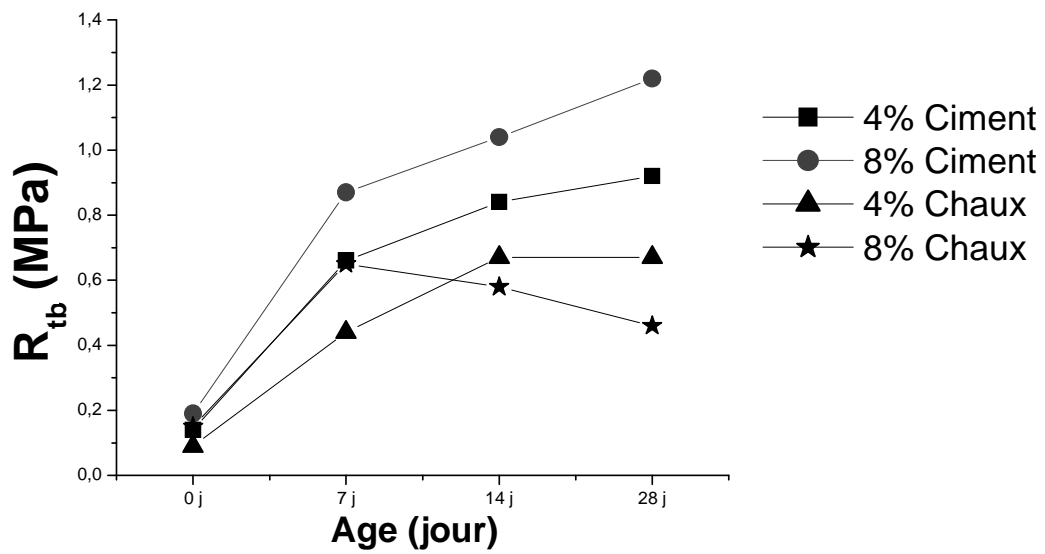


Figure IV.17 La courbe de mélange ((80%A+20%S) traité)

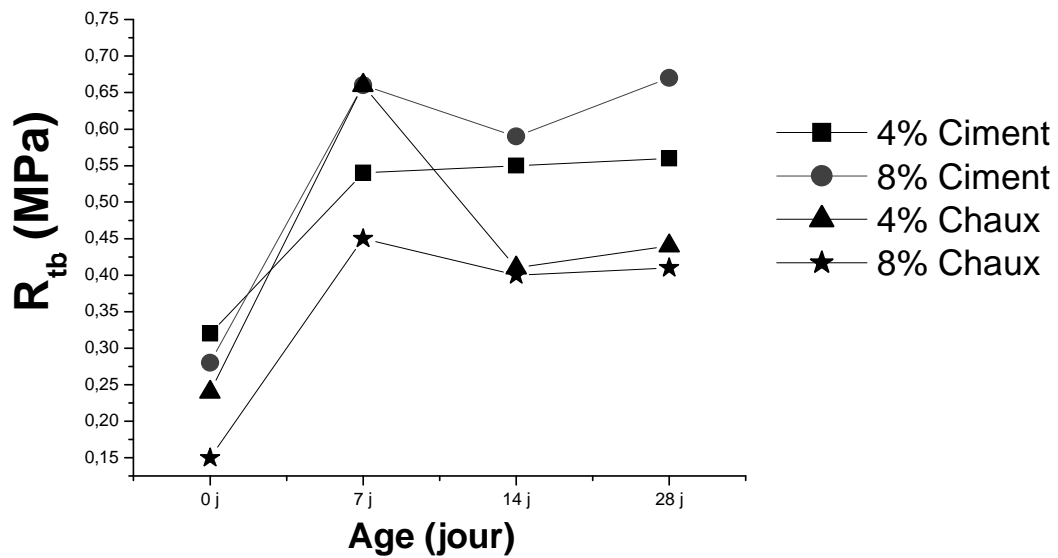


Figure IV.18 La courbe de mélange ((70%A+30%S) traité)

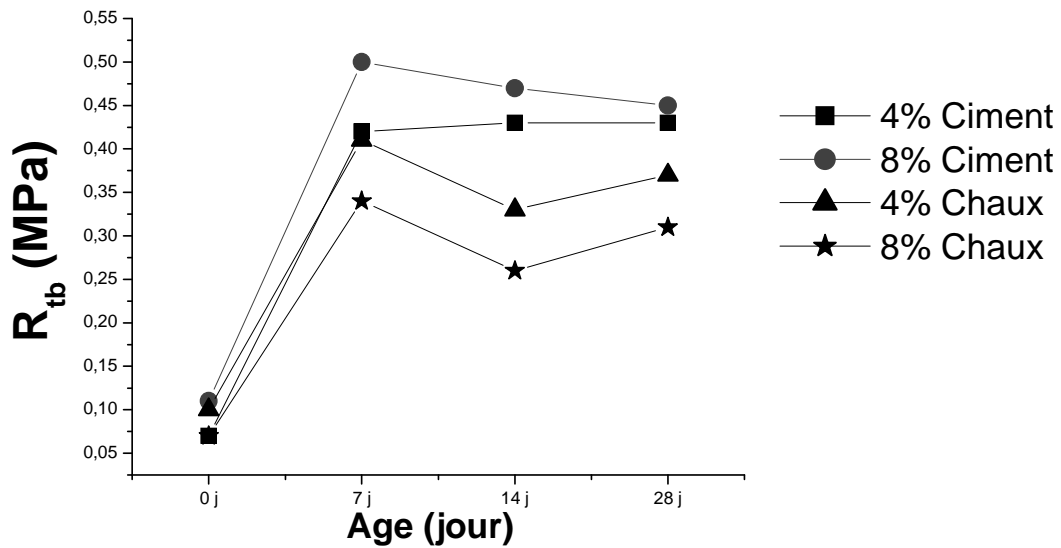


Figure IV. 19 La courbe de mélange (60% A+40% S) traité



Photo IV.5 Essai de compression simple en laboratoire de Génie Civil (Laghout)



Photo IV.6 Essai de traction par fendage (Essai Brésilien) au laboratoire de Génie Civil (Laghout)

On remarque que la résistance optimale à la traction par fendage dans les mélanges (90% A+10% S) traité par 4 % ciment est de 1.24MPa, tandis que, la résistance du même mélange traité par 8% ciment est 1.26MPa. Ce que nous permis de dire que la résistance du mélange traité par 4 ou 8 % de ciment sont les mêmes.

Tableau IV.22 les résistances de BTC et pisé

	BTC et pisé
Résistance en compression	0,2 à 4 MPa, et plus selon les liants
Résistance en traction (fendage)	0,1 à 0,2 x Rc

6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques du bloc de terre comprimée BTC par ajout de sable de dune pour différents pourcentages.

Pour une meilleure stabilisation des blocs de terre comprimée (BTC), on a utilisé des liants hydrauliques à savoir le ciment et la chaux.

Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de dégager les conclusions principales suivantes :

- L'ajout des liants (ciment et chaux) à l'argile pure améliore leur comportement mécanique (R_c), par contre, elle conduit à diminution à l'argile + sable ;
- il y a une proportionnalité positive entre l'augmentation de sable de 0% à 20% et la résistance à la compression simple, au-delà de 20% on remarque une variation dans le sens inverse ;
- Le mélange optimal non traité 80% argile + 20% sable ($R_{c28} = 4,12$ MPa) après l'introduction de liant on remarque une diminution à sa résistance (3,44 et 2,74 MPa pour 8% ciment et chaux) respectivement, Cela démontre que le pourcentage des liants est faible pour couvrir toutes les grains, par conséquent l'insuffisance de liaison entre ces grains.
- Le pourcentage optimal est entre 10% et 20% ce qui est en accord avec le pourcentage usuellement utilisé dans la production des briques industrielles qui est de 30%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux pour la construction en régions sud de l'Algérie en utilisant les blocs en terre comprimé à base de sable de dune et de la terre. Elle a des retombées essentiellement environnementales et économiques, en plus le développement de la construction en terre.

Plusieurs conclusions peuvent être émises à la suite de ce travail :

Les résultats montrent que le choix d'un meilleur mélange constituant le bloc en terre comprimé sur la base de comportement mécanique, c'est le mélange (80%A+20%S) d'une valeur de résistance à la compression $R_{c28} = 4,12$ MPa dans la phase de BTC non traitée.

Les résultats du traitement des mélanges argile-sable à différents pourcentages par différents pourcentages des liants hydrauliques (chaux et/ou ciment) ont conduit à une amélioration significative de la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage.

En générale, pour un même pourcentage de chaux ou de ciment, l'effet sur le comportement mécanique (résistance à la compression et la résistance à la traction) est similaire.

Finalement, On conclut que la formulation du bloc en terre comprimé à base de sable de dune et de la terre adoptée répond parfaitement aux exigences de la réglementation en vigueur et constitue un produit économique à base de matériaux locaux disponibles en abondance pour la construction en régions sud de l'Algérie.

On envisage d'exploiter les résultats déterminés tout au long de ce travail, dans le cadre d'une étude thermique et une étude du renforcement des BTC par l'incorporation des faibles pourcentages de fibres. Cela permettra de vérifier la possibilité de réaliser des BTC avec ce type de matériaux locaux en particulier dans les régions arides. Ce complément fera l'objet d'un travail dans le cadre d'un autre mémoire de master.

*Références
Bibliographiques*

References bibliographiques

- **AFNOR (XP P13 901)**, (Association française de normalisation), Blocs de terre comprimée, définitions, spécifications, méthodes d'essai et conceptions ,2001.
- **BENOUALI.H**, "La réglementation technique Algérienne de construction avec les Matériaux locaux". Festival ArchiTerre, 2015. Ministère de la culture.
- **BENSAADA.A**, "Valorisation des sols locaux dans la construction en terre Cas de la Région de Laghouat". Thèse de magister 2011. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- **BERREHAIL .T**, "La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable". Thèse de magister, 2009. Université Mentouri Constantine.
- **CASAGRANDE. A**, "Research os the Atterberg Limits of Soi1s", *Public Road.*, vol. 13, 1932.
- **CNERIB**, Guide technique du beton de terre stabilisee, CNERIB, Ministry of Housing, Algiers, Algeria, 1994. p. 55.
- **CNERIB**, Recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée, (Arrêté ministériel du 5 décembre 1987), Algérie, 1993. P. 33.
- **DELEBECQUE.R**, "Éléments de Construction Bâtiment", Edition Delagrave; 1990.
- **ESCAP/RILEM/CIB**, "Building Materials for Low-income Housing" . Asian and Pacific Region. Proceedings of an International Symposium in Bangkok (January 1987). E. & F.N. Spon. London, England.
- **GOUAL. I**, "Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière". Thèse de magister 2012. Université Aboubakr Belkaid Tlemcen.
- **GUEDDOUDA. M. K**, "Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de dunes Cas : Région de Laghouat". Thèse de magister 2005. Université d'Oran Mohamed Boudiaf.
- **GUETTALA. A, GUENFOUD M**. "Béton de Terre Stabilisée Propriétés Physico-Mécaniques et Influence des Types d'argiles". 1997.
- **GUILAUD. H**, "Centre International pour la Construction en Terre", Ecole d'Architecte de Grenoble, Encyclopédie de Bâtiment, Tome 2 Edition Wake, CRATerre ; 1997.
- **HENIN. S**, "Cours de physique du sol", ORSTOM, 1976.

- **HOUBEN. H, GUILLAUD. H** ;"Traité de construction en terre (1995) CRATerre-EAG". Éditions Parenthèses, Marseille (Fr) ,1995.
- **ILO**, "Background document for the high-level meeting on employment and structural adjustment". Geneva, 1987.
- **ILO/UNIDO**, Small-scale Brickmaking, Memorandum Técnico N° 6, International Labour Office (ILO), Ginebra, Suiza, 1984.
- **KEDI & CLEGHORN**, «Brick Manufacture in Developing Countries ".Scottish Academic Press Ltd .Edinburg, Scotland, 1980.
- **LAMBE. T**, "The engineering behavior of compacted clay: Jour. Soil Mech. and Fdns. Div., Am. Soc. Cir. Engrs". 1985.
- **MADJNOUN. A**, Aanalyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflent
- **MASTERS et al**, "Yeast mitochondrial RNA polymerase" is homologous to those encoded by bacteriophages T3 and T7. 1978.
- **MEKHERMECHE. A**, "Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes", thèse de magister 2012. Universite Kasdi Merbah Ouargla.
- **MESBAH. A, MOREL J.C, OLIVIER. M**, "Comportement des sols fin argileux pendant un essai de compactage statique": détermination des paramètres pertinents, Matériaux et constructions, vol 32, N°223, 1999.
- **ORAN**, (Organisation Africaine de Normalisation) Edition; "Blocs de terre comprimée : Normes Technologie N°11.CDI et CRATerre- EAG" , Belgique ,1998.
- **PHILIPPONNAT et HUBERT**, Classification géotechnique des sol s basée sur la classification U.S.C.S. 1997.
- **STARKEL**, "The Role of Extreme (catastrophic) Meteorological Events in the contemporaneous Evolution of Slopes", (Geomorpho/ov and climate, I) ; 1976.
- **UNIDO**, "Appropriate Industrial Technology for Construction and Building Materials", No. 12, Naciones Unidas, New York, 1980.

- <http://www.craterre.org/>, figure I.2 Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde.
- <http://www.marocain.biz/>, photo I.3 casbah marocaine.
- <http://www.fr.wikipedia.org/>, photo I.1 la tour de babel, photo I.2 pyramides d’Egypte, photo I.5 aztèques de mexique, photo I.11 Maison en pisé en Auvergne (France), photo I.12 Mur Eden Project, (Angleterre),
- <http://www.sidielhadjaissa.com/>, photo I.4 Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie.
- <http://www.archdaily.com/>, photo I.6 Shibam, la " Manhattan du désert " (Yémen).
- <http://elanfourapain.canalblog.com/>, photo I.7 confection du torchis, “Thématique maçonnerie : Fabrication du torchis et de la brique de terre crue artisanal”.
- <http://www.lesavoirfaire.fr/>, Photo I.8 Construction d’un mur, "Les murs en torchis : construire ou rénover un mur".
- <http://bastidess.free.fr/>, photo I.9 maison à colombage.
- <http://mapio.net/>, photo I.10 mosquée du Méchouar, Tlemcen.
- <http://www.papercrete.com/>, photo I.15 Fabrication des blocs de terre comprimée à l’aide d’une presse manuelle (Cinva Ram).
- <http://www.oskam-vf.com/>, photo I.16 Fabrication des blocs de terre comprimée à l'aide d'une presse mécanique.
- <http://www.astm.org/>, ASTM D698-66 T, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Standard Effort" ; ASTM E241-77, "Standard Guide for Limiting Water-Induced Damage to Buildings", April 6, 1977.