



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

ALI HMAYAME & ALI TADJI

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Conception et calcul du Structures

Thème

*Etude du comportement mécanique des murs en blocs de terre
renforcés par des fibres "halfa"
Application : construction en "Région saharienne"*

Soutenu le 24/05/2017

Jury de soutenance :

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

Promotion : Juin - 2017

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 mémoire 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 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 réservé pour la réussite de ce mémoire de la part de tous les enseignants 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

ALI HMAYAME & ALI TADJI

إلى

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

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

إلى من هم اقرب أليّ من رحي
إلى من بهم استمد عزتي وإصراري
إخوتي

إلى من أنسنى في دراستي وشاركني همومي
تذكراً وتقديراً
أصدقائي

أهدي هذه المذكرة

حميم علي

إلى

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

إلى رمز الرجولة والتضحية
إلى من دفعني إلى العلم وبه ازداد افتخار
روح أبي الطاهرة

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

إلى من أنسني في دراستي وشاركني همومي
تذكراً وتقديراً
أصدقائي

أهدي هذه المذكرة

على تاجي

ملخص

قصد تثمين المواد المحلية المساهمة في التقليل من تكاليف البناء والطاقة المستهلكة في التدفئة والتكييف , تم استخدام ألياف الحلفاء لتثبيت التربة المضغوطة ويتعلق هذا العمل بدراسة المواد المحلية ذلك لاستخدامها في البناء بكتل التربة المضغوطة في المناطق الجنوبية من الجزائر.

وفي هذا الإطار, فإن المواد المحلية مثل كتل التربة المضغوطة هي موضوع العديد من الدراسات. الانتعاش المتزايد للمنشآت ذات الكتل التربة يجذب اهتمام الكثير من الأبحاث, لأن هذا النوع من البناء يستخدم على نطاق واسع في المناطق الصحراوية من البلاد لوفرة المواد وانخفاض تكلفة البناء, المواد الأساسية المستعملة هي الرمال الكثبانة و الطين و الألياف, حيث أن دراسة خلطات الطين و الرمال الكثبانة بمختلف الكثافات تستند على معيار قوة الضغط و ذلك يسمح بالحصول على الخلطات الأمثل.

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو دراسة تأثير استخدام الالياف النباتية, وبشكل خاص الياف الحلفة على الخصائص الميكانيكية للتربة المضغوطة ,وقد انصب البحث على درجة تأثير الكتل بالماء من خلال درجة الامتصاص الكلية بهدف المقارنة, في هذا الاطار قمنا باستخدام نسب من الجير (3%, 6%) وثلاث نسب من الالياف الحلفة (2%, 4%, 6%) بأطوال 1سم و 2سم وهذا بنسبة لوزن الخليط الجاف وكذلك اجهاد الرص

النتائج بينت وجود تحسن في مقاومة الضغط وهذا في بالنسبة لألياف الحلفة 6% بطول

1سم

ملخص

بينما في حالة الجير الحي كذلك مقاومة جيدة في الضغط و الشد, في المقابل فان الياف الحلفة تأثير ايجابي على السلوك الميكانيكي للمادة .

كلمات المفاتيح: أرض, رمال الكثبان, رابط هيدروليكي, كتلة التربة مضغوطة, سلوك ميكانيكي, الياف الحلفة.

Résumé

Pour la valorisation des matériaux locaux en vue de leurs utilisations dans les constructions dans les régions arides (sud de l'Algérie) sous forme de blocs en terres comprimées (BTC) ou sous forme de blocs de terre stabilisés (BTS), les matériaux locaux; tels que des blocs de terre comprimée font l'objet de nombreuses études. Le développement durable de bloc de terre attire l'attention de beaucoup de recherches, parce que ce type de construction utilisé dans les zones saharienne ont un coût faible par rapport aux matériaux de base.

Les mélanges sable de dune et argile et les fibre de l'alfa a différents pourcentages font l'objet de cette étude pour atteindre à des mélanges optimums par rapport à la résistance à la compression.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'ajout des fibres végétales, en particulier la fibre de l'alfa sur les propriétés mécaniques du comportement mécanique du BTC (la résistance à la compression).

Les mélanges optimums (% S +% A+ %F) à partir des résultats de la compression ont été stabilisés par différents pourcentages de chaux (3 % et 6%).

Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de fibres ajoutées. Les mélanges traités par la chaux ont montrés une augmentation de résistance à la traction ,

Mots-clés: terre, dunes de sable, connecteur hydraulique, bloc comprimé de terre, comportement mécanique, fibre Alfa.

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Les différentes techniques de construction en terre	8
Tableau I. 2 Caractéristiques des briques de terre crue	12
Tableau I. 3 Opérations des différentes réalisations en terre en ALGERIE	19
Tableau II.1 Nature et qualité du sable selon Es ou Esp	44
Tableau II.2 Classification de Casagrande pour les sols fins	48
Tableau II.3 Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité	48
Tableau II.4 Classification des argiles selon la surface spécifique(S_s) (Bultel, 2001).....	51
Tableau II.5 les caractéristiques du moule Proctor.....	52
Tableau III. 1 Essai masse volumique apparente.....	62
Tableau III. 2 Essai masse volumique absolue.....	62
Tableau III. 3 Analyse chimique d'argile.....	62
Tableau III. 4 Les limites d'Atterberg d'argile.....	63
Tableau III. 5 Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	65
Tableau III. 6 Analyse chimique du sable de dune.....	66
Tableau III. 7 Paramètres d'identifications de sable de dune.....	67
Tableau III. 8 Résultats de l'essai équivalent de sable.....	67
Tableau III. 9 Paramètres d'identifications de sable de dune.....	67
Tableau III. 10 Composition chimique de la chaux de Saida.....	68
Tableau III. 12 Composition chimique de fibre (halfa)	70
Tableau IV. 1 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude (essais de compression pour les fibres de 1cm)	78
Tableau IV. 2 Résultats de l'essai de Proctor.....	81
Tableau IV. 3 limites de liquidité en fonction pourcentage de sable.....	82
Tableau IV. 4 Evolution de Résistance à la compression simple (R_c) en fonction d'âge d'argile pure	83
Tableau IV. 5 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90%A+10%S+F%) en fonction d'âge.....	84
Tableau IV. 6 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80% A + 20% S) en fonction d'âge.....	85
Tableau IV. 7 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70%A+30%S+F%) en fonction d'âge	86

Tableau IV. 8 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60% A + 40% S) en fonction d'âge.....	87
Tableau IV. 9 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (100%A+F%) en fonction d'âge) (essais de compression pour les fibres de 2cm).....	88
Tableau IV. 10 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90%A+10%S+f %) en fonction d'âge).....	89
Tableau IV. 11 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80%A+20%S+f %) en fonction d'âge).....	90
Tableau IV. 12 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70%A+30%S+f %) en fonction d'âge).....	91
Tableau IV. 13 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60%A+40%S+f %) en fonction d'âge).....	92
Tableau IV. 14 Les mairres résistance a 'la compression obtenus a' 28 jour pour les différents mélanges.....	93
Tableau IV. 15 Résistance à la compression simple (Rc) en fonction d'âge argile pure +f traite en chaux.....	93
Tableau IV. 16 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90% A +10% S) en fonction d'âge	94
Tableau IV. 17 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80% A + 20% S) en fonction d'âge traité	95
Tableau IV. 18 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70% A + 30% S) en fonction d'âge) traité.....	95
Tableau IV. 19 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60% A +40% S) efonctiond'âgeen fonction d'âge.....	95
Tableau IV. 20 Les mélanges optimales à condition de la résistance à la compression simple.....	98
Tableau IV.21 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude.....	99
Tableau IV. 22 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure.....	100
Tableau IV. 23 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S)	100
Tableau IV. 24 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S)	100
Tableau IV. 25 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S)	100
Tableau IV. 26 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude....	104
Tableau IV. 27 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure.....	104

Tableau IV. 28 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S).....	105
Tableau IV. 29 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S)	105
Tableau IV. 30 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S)	105
Tableau IV.31 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S)	106
Tableau IV. 32 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure	109
Tableau IV.33 Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S).....	109
Tableau IV. 34 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S)	109
Tableau IV. 35 Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S)	110
Tableau IV. 36 Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S)	110
Tableau IV.37 les résistances de BTC et pisé.....	115

Liste des Figures

Figure I. 1 Critères d'appréciation d'un matériau approprié, (Bensaada .A, 2011).....	7
Figure 1.2 Différents produits de blocs de terre comprimée	12
Figure I.3 Les régions de développement de l'architecture de terre (Houben, H et al, 2006).	14
Figure 1.4 La pathologie humide ou système de la goutte d'eau (Kebaili, 2006).....	14
Figure I.5 Le schéma de bonne conception architecturale d'un bâtiment en terre (source le CRA Terre).....	25
Figure. I.6 Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).....	27
Figure 1.7 Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne (Akpokodje ,1985).....	29
Figure 1.8 La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur En chaux et l'âge (Ausroads, 1998).....	30
Figure 1.9 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013.....	33
Figure 1.10 Structure générale d'un palmier dattier.....	34
Figure 1.11 Influence de 4% de fibres sur la relation contrainte-déformation du sol (Ghavami, 1999).....	36
Figure 1. 12: Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo, 2014).....	37
Figure 1. 13: Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo, 2014).....	38
Figure II.1: éprouvette utilise pour la detarmination dey app	40
Figure II.2: principe de l'essais	40
Figure II.3: éprouvette graduée utilise pour la détermination de γ abs	41
Figure II. 4 Procédure de l'essai masse volumique absolue.....	46
Figure II.5: presente la limite d'Atterberg.....	48
Figure II.6 Etat de teneur en eau.....	49
Figure II. 7 Classification des sols fins l'abaque de Casagrande	54
Figure II.8: Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande.....	57
Figure II.10: courbe de la masse volmique en fonction l'eau	58
Figure II.11 : Le schéma du moule dans la presse.....	58
Figure II. 12: Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse	58
Figure II.13: Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction	58

Figure III. 1: Courbe granulométrique de l'argile	
Figure III. 2: Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997).....	63
Figure III. 3 Courbe Proctor d'argile utilisé	64
Figure III. 6 Courbe granulométrique du sable de dune.....	65
Figure III. 6 : mesure la masse volumique de des fibres de 1cm et 2cm Figer : essais de traction des fibres de 1cm et 2cm et 3cm.....	66
Figure IV.1 programme de melangede composition	22
Figure IV.2 Plan de travail de la partie expérimental.....	74
Figure IV.3 Courbes Proctor normal des différentes quantités de sable de dune ajouté	77
Figure IV.4 Les limites de liquidité (W_L) en fonction de % d'argile.....	81
Figure IV.5 Mélange (100%A+F%)	82
Figure IV.6 Mélange (90%A+10%S+F%)	83
Figure IV.7 Mélange (80%A+20%S+F%).....	84
Figure IV.8 Mélange (70%A+30%S+F%).....	85
Figure IV.9 Mélange (60%A+40%S+F%).....	86
Figure IV.10 Mélange (100%A+F%).....	87
Figure IV.11 Mélange (90%A+10%S+F%).....	88
Figure IV.12 Mélange (80%A+20%S+F%)	89
Figure IV.13 Mélange (70%A+30%S+F%).....	90
Figure IV.14 Mélange (60%A+40%S+F%).....	91
Figure IV.15 Les résistances à la compression simple de mélange traité à (3%, 6% chaux).....	92
Figure IV.16 Mélange (90%A+10%S+6%F(1cm)) traité par la chaux.....	94
Figure IV.17 Mélange 80%A+20%S+6%F(1cm) traité par la chaux.....	96
Figure IV.18 : Mélange 70%A+30%S+6%F(1cm) traité pa la chaux.....	96
Figure IV.19 Mélange 60%A+40%S+6%F (1cm) traité pa la chaux.....	97
Figure IV.20 La courbe de mélange 100%A+6%F (2cm) traité par la chaux.....	97
Figure IV.21 La courbe de mélange 90%A+10%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.....	101
Figure IV.22 La courbe de mélange 80%A+20%S + 6%F (1cm) traité par la chaux.....	101
Figure IV.23 La courbe de mélange 70%A+30%S+6%F (2cm) traité par la chaux.....	102
Figure IV.24 La courbe de mélange 60%A+40%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.....	102
Figure IV.24 La courbe de mélange 60%A+40%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.....	103

Figure IV.25 La courbe de mélange argile + 6%F (1cm) traité par la chaux.....	106
Figure IV.26 La courbe de mélange 90%A+10%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	107
Figure IV.27 La courbe de mélange 80%A+20%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.....	107
Figure IV.28 La courbe de mélange 70%A+30%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	108
Figure IV.29 La courbe de mélange 60%A+40%S + 6%F (1cm) traité par la chaux.....	108
Figure IV.30 La courbe de mélange argile + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	111
Figure IV.31 : La courbe de mélange 90%A+10%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	111
Figure IV.32 : La courbe de mélange 80%A+20%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	112
Figure IV.33 : La courbe de mélange 70%A+30%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	112
Figure IV. 34 : La courbe de mélange 60%A+40%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.....	113

Liste des Photos

Photo I.1 étape d'opération le torchis.....	9
Photo I.2 étape d'opération Bauge	10
Photo I. 3 étape de opération adobe	10
Photo I. 4 Mur en adobe déjà monté.....	11
Photo I. 5 Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde.	13
Photo I. Pyramides d'Egypte	14
Photo I. 7 La tour de Babel	15
Photo I. 8 Maison Vallée du Rio Grande	15
Photo I. 9 Tourfan, chine: Mosquée en pisé édifiée en 1788.....	16
Photo I. 10 Une maison traditionnelle en pisé en région Rhône-Alpes.....	16
Photo I. 11 Tchoga zambil en Iran	18
Photo I. 12 Ksar Aïn Madhi Laghouat	20
Photo I. 13 logements en B.T.C. à tamanraet Algérie	20
Photo I. 14 Premières assises du prototype Souidania1999 (Le CNERIB)	21
Photo I. 15 Prototype achevé Souidania1999.....	21
Photo I. 16 Ghardaïa une ville anciennes, du Sud Algérien	21
Photo I. 17 Le temple d' Horyu-Ji au Japon.....	24
Photo I. 18 à grande muraille de chine	24
Photo II. 1 bécher utilise pour la detarmination de γ app	39
Photo II. 2 balance utilise pour la d tarmination de γ app	39
Photo II. 3 balance utilise pour la d tarmination de γ app	40
Photo II. 4 eprouvette graduée utilise pour la d tarmination de γ app	42
Photo II. 5 les matériels utilise pour l'analyse granulométrique	45
Photo II. 6 Appareillage d'équivalent de sable	45
Photo II. 7 La méthode de calcul visuel	49
Photo II. 8 La méthode de calcul par piston	49
Photo II. 9 Boite de Casagrande (limite de liquidité).....	50
Photo II. 10 Essai de limite de plasticité	53
Photo II. 11 Le cas positif et négatif de l'essai de bleu	53
Photo II. 12 Moule Proctor Normal avec la dame dans laboratoire de Génie Civil (Laghouat)..	55
Photo II. 13 Le cas positif et négatif de l'essai de bleu	

Photo II.14 Moule utilisé dans le compactage	55
Photo II.15 La presse de l'écrasement Labo G.C laghaut.....	56
Photo II.16 La presse et computer	56
Photo II.17 matériel couper halfa.....	56
Figure III.1 Localisation de la zone étudié.....	60
Photo III 2 zone de provenance du sable de dune (oasis nord)	61
Photo III.3 La fibre d'Alfa.....	69
Photo III.4 mesure la masse volumique de des fibres de 1cm et 2cm.....	71
Photo III.5 essais de traction des fibres de 1cm et 2cm	72
Photo IV. 1 Les échantillons non traités (argile pure) qui ont été testés lors de l'étude	79
Photo IV. 2 Les échantillons non traités (argile + sable de dune) qui ont été testés lors de l'étude.....	79
PhotoIV. 3 Les échantillons traités (argile + sable + liant) qui ont été testés lors de l'étude.	80
Photo IV. 4 Essai de compression simple en laboratoire de Génie Civil(Laghouat).....	114
Photo IV. 5 Essai de traction par fendage (Essai Brésilien) au laboratoire de Génie Civil (Laghouat).....	114

SOMMAIRE

Remerciement	i
Dédicace	iii
ملخص	v
Résumé	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	xi
Liste des photos	xiv
Sommaire	xiv
Introduction Générale	

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction.....	3
2. Définitions.....	3
I.2.1. Matériaux de terre	3
I.2.1.1. Définition	3
2.1.2. Les avantages du matériau terre.....	5
2.1.3. Les inconvénients du matériau terre.....	6
2.1.3. Matériaux locaux.....	6
2.1.5. Matériaux appropriés : critères de choix.....	6
3. Techniques de constructions	8
3.1. Description et caractérisation des principales techniques.....	8
3.1.1. Torchis.....	8
3.1.2. Bauge (terre-paille).....	9
3.1.2. La brique de terre crue moulée Adobe : (Salmi Safia 2014).....	10
3.1.3. Le pisé: (Salmi Safia 2014).....	11
3.1.4. La terre compactée (B.T.C.) (Salmi Safia 2014).....	11
3.2. Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	11
3.2.1. Caractéristiques de quelque type de brique de terre crue.....	12

4. Historique.....	13
5. pathologies des constructions en terre.....	21
5.1. Critères De Stabilités.....	22
6. Durabilité des constructions en terre, témoignage de.....	25
6.1. Stabilisation	25
6.1. Définition de Stabilisation : (TAALLAH Bachir).....	25
6.3.3 Stabilisation chimique.....	26
6.4. Traitement Dans La Masse.....	27
6.4.1. Chaux	27
6.4.1.2 Généralités.....	27
6.4.1.3. Efficacité et dosage.....	28
6.4.1.4. Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	28
6.4.2. Fibre.....	30
6.4.2.1. Différents types de fibres.....	30
6.4.2.1.1. Les fibres naturelles.....	30
6.4.2.2. Effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols.....	35
6.4.2.3. Effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des.....	35
6.4.2.4. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques.....	36
7. Conclusion.....	38

Chapitre II : Techniques Expérimentales

1. Introduction.....	38
2. Essais d'identification physique.....	38
2.1. Masse volumique.....	38
2.2. Analyse granulométrique	41
2.3. Equivalent de sable (NF P 18-598).....	42
2.4. Limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	46
2.5.Essais Bleu Méthylène (NF P 94-068).....	41
2.6.Essai de Proctor.....	51
3. Essais Mécaniques	54
3.1. Résistance à la compression simple (NF P 98-232-1).....	54

3.2. Résistance à la traction (NF P 98-232-3).....	54
4. Conclusion.....	59

Chapitre III : caractérisation de matériaux utilisé

1. Introduction.....	60
2. Caractérisations des matériaux.....	60
2.1. Echantillonnage.....	60
2.2. Caractéristiques des matériaux.....	61
2.2.1. Argile.....	62
2.2.2 Sable de dune.....	61
2.2.3.liant hydraulique.....	68
2.2.4.Les fibres	69
2.2.4.1.Définition.....	69
2.2.4.2.Composition chimique	69
2.2.4.3. Les caractéristiques physiques	70
3. Conclusion.....	73

Chapitre IV : Résultats et interprétations

1. Introduction.....	74
2. Programme expérimental.....	74
3. Essai de Proctor normal.....	80
4. Limites d'Atterberg.....	82
5. Résistance mécanique.....	71
5.1. Résistance à la compression en fonction d'âge.....	83
5.1.1. Mélange Argile pure +% fibres 1cm	83
5.1.2. Mélange 90% Argile et 10% sable +% fibres 1cm	84
5.1.3. Mélange 80% Argile et 20% sable +% fibres 1cm	85
5.1.4. 70% Mélange Argile et 30% sable +% fibres.....	86
5.1.5. 60% Mélange Argile et 40% sable +% fibres 1cm	87

5.2. Résistance à la compression en fonction d'âge.....	87
5.2.1. Mélange Argile pure +% fibres 2cm	88
5.2.2. Mélange 90% Argile et 10% sable +% fibres 2cm	89
5.2.3. Mélange 80% Argile et 20% sable +% fibres 2cm	90
5.2.4. Mélange 70% Argile et 30% sable +% fibres 2cm	91
5.2.5. Mélange 60% Argile et 40% sable +% fibres 2cm	92
5. 2.6 .Mélange Argile pure+6%fibres (1cm) traité à la chaux	93
5.2.7. Mélanges argile + sable de dune+6% de fibres (1cm).....	94
5.2.8. Mélanges Argile + sable+6% Fibres traité à la chaux (2cm).....	98
5.3 Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge de fibre 1 cm.....	103
5.4. Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge de fibre 2 cm.....	109
VI.4Conclusion	115
Conclusion Général	118
Références bibliographique	119

Introduction Générale

La terre, la pierre et le bois ont été les premiers matériaux de construction utilisés par l'homme. L'évolution des techniques de nouveaux matériaux ont été développés comme le béton ...etc reléguant ainsi les matériaux originaux au rang de « primitif ». L'en est peu à peu arrivé à oublier les avantages de la terre comme matériau de construction. Devant les problèmes écologiques et sociaux, on y revient progressivement. D'autre part, il est estimé à 30% la part de construction en terre dans le monde, essentiellement concentrée dans les pays dits « pauvres », la raison est simple et réside dans l'avantage économique que de telles constructions offrent aux habitants de ces pays où l'incontournable « ciment » provient pour la plupart du temps de l'importation. En plus, la plupart des peuples ont encore une traction non négligeable en matière de construction en terre ; on citera par exemple les pays comme le Yémen, le Maroc et les pays de l'Afrique noire en général.

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, 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.

Afin de nous assurer que les blocs en terre comprimée (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, fibre et rechercher, ces faisant, le mélange optimal satisfaisant en termes de résistance à la compression et à la traction 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, en mentionne les critères d'appréciation d'un matériau plus approprié, une historique qui donne une vue sur les techniques de mise en œuvre de la terre comme matériaux de construction, en présente aussi les actions influant sur sa durabilité.

➤ Le deuxième chapitre présente des techniques expérimentales ou 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, et à la résistance à la traction par fendage).

➤ Dans le troisième chapitre, en présente les résultats des essais d'identifications de deux matériaux radicalement différentes (Argile et Sable de dune), ainsi que la fibre utilisée pour confectionner les blocs en terre.

➤ le quatrième chapitre présente une étude expérimentale, ou 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 renforcement par des fibres et le traitement par liant hydrauliques (la chaux) sur les mélanges optimales (A+S+F) après durcissement sur le comportement mécanique.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur les résultats de l'étude expérimentale et des recommandations pour la suite des recherches.

.

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction :

La terre est un des premiers matériaux utilisés par l'Homme dans le domaine de la construction. Les choix technologiques liés aux matériaux de construction jouent un rôle important dans la recherche des solutions aux problèmes d'habitat économique et l'exploitation comme l'isolation thermique. Dans ce chapitre, on présente les différents aspects des constructions en terre à savoir ; l'histoire 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 stabilité, et de renforcement par des fibres,

L'utilisation de la terre dans le secteur de la construction, dans une optique de développement durable, implique l'analyse de la situation qui motive ce choix ; en prenant en considération les aspects écologiques, la viabilité culturelle et la durée temporelle des impacts positifs et négatifs résultant de ce choix.

En prendre la bonne formulation et faire un traitement pour améliorer la résistance. Plusieurs réalisations de construction en terre ont honoré leurs bâtisseurs.

I.2. Définitions :

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre de construction est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre (Houben, 1996).

I.2.1. Matériaux de terre :

I.2.1.1. Définition :

- **Sable** : Ce sont des granules de silice ou de quartz, avec parfois des roches calcaïques pulvérisées, mesurant entre 5 mm et 0,06 mm. Les grains sont visibles à l'œil nu. Le sable de mer, étant arrondi, est utile pour la maçonnerie, mais par contre il n'est pas bon pour

les enduits. Le sable de rivière est pointu et offre dans ses structures ouvertes l'espace pour le silt et l'argile de contribuer à la cohésion. La structure des sables ainsi stabilisés peut bien résister aux forces compressives.

- **Silt** : C'est la partie limoneuse, composée surtout de particules de silice ou de quartz de diamètre compris entre 0,06 mm et 0,002 mm. Cela se présente comme une couche de particules trop fines pour être vues séparément. Sa contribution à la stabilité d'une terre est due à sa friction interne en remplissant les ouvertures dans les sables. En excès, il augmente la perméabilité de la terre.

- **Eau** : Les réactions entre l'eau et les matières qui constituent la terre, y compris les éventuelles impuretés présentes dans la terre, expliquent toutes les qualités et imperfections que nous pouvons détecter.

L'eau de pluie est meilleure puisqu'elle fait intervenir des ions OH^- dans les liens entre micelles d'argile qui devient plus collante. Cet effet peut être obtenu en ajoutant des défloculants, tels que la soude et le silicate à raison de 0,1 à 0,4 % d'argile, ou en remplaçant l'eau intégralement avec de l'acide humique, de l'acide tannique ou de l'urine de cheval. Ces substances permettent d'employer moins d'eau, donne moins de retrait et un séchage plus rapide. L'acte de malaxage distribue les micelles d'argile plus ou moins également dans la mixture. Cette pénétration prend un certain temps, qui peut être réduit par une mouture fine. L'argile sèche est rigide comme du béton. L'addition d'eau fournit un matériel plastique que l'on appelle torchis. Plus d'eau donne une barbotine de moins en moins collante jusqu'au point de saturation où ça devient de l'eau trouble.

Jusqu'à saturation, l'addition d'eau au sable le rend plus cohésif. Le silt réagit de la même façon. Cette réaction, avec celle de l'argile qui la rend plus glissante, donne la consistance au mortier. La combinaison d'une barbotine de terre ou d'argile, des sables et du silt nous donne un mortier. L'humidité du sable et l'eau dans la barbotine doit être prise en compte pour obtenir un mortier ayant les bonnes proportions et une bonne consistance.

Les sels dans l'eau ou dans la terre peuvent entraîner des efflorescences qui abîmeront des enduits en Chaux, ciment ou plâtre en contact avec la terre mais pas les enduits en terre.

Argile : En effet, il en existe autant que de disciplines. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique.

L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllo silicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferri-fères (lépidocrocite, magnétite...).

Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2µm (Michot, 2008).

I.2.1.2. Les avantages du matériau terrent :

Le matériau terre de construction, partout et largement disponible, présente beaucoup d'avantages parmi lesquels on peut citer :

- La terre de construction est prélevée et exploitée sur site. Contrairement à d'autres matériaux, elle ne nécessite aucune énergie non renouvelable et polluante.
- De grandes quantités de terre extraites au cours de grands travaux d'utilité publique, comme les routes, les travaux des fondations des constructions peuvent être recyclés Et utilisées comme matériau de construction.
- Le matériau terre n'utilise que très peu d'eau de gâchage, ressource essentielle pour la vie des populations.
- Les coûts, des blocs comprimés en terre crue, en comparaison avec ceux de la maçonnerie en parpaing de ciment, de pierre ou même de brique de terre cuite, sont de 20 à 30 % inférieurs.
- Pendant sa fabrication ce matériau ne produit aucun rejet de déchets, Son utilisation garantit aussi l'absence d'effets nocifs dans le cadre de la vie quotidienne, il a en plus l'avantage d'être presque entièrement recyclable après son utilisation initiale.
- Le mode ainsi que les outils nécessaires à la production du matériau terre sont Simples et accessibles à tous.
- Il possède en outre une bonne inertie thermique, des qualités phoniques et une longévité avérée, elle résiste en feu.

I.2.1.3. Les inconvénients du matériau terre:

Malgré tous les avantages que peut présenter le matériau terre cependant, il présente aussi des inconvénients majeurs :

- Il s'érode facilement, ce qui rend son emploi délicat dans les régions à forte pluviométrie.
- Utilisée en couverture elle peut prendre l'eau, s'alourdir et provoquer des affaissements.
- n'adhérant pas au bois, cela fait apparaître des décollements autour des ouvertures.
- Il ne résiste pas à la flexion et à la traction.
- Les liaisons entre les particules du matériau laquelle sont d'ordre physique ?
en contact avec l'eau elles se fragilisent et même se neutralisent ce qui détériore le matériau et diminue sensiblement ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité dans le temps.
- La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante : même une petite structure représente : 15 tonnes de terre à travailler.
- Enduit anti-érosion en béton maigre et imperméable.

Ces inconvénients sont principalement liés à la solubilité à l'eau de la terre crue, qui cause des désordres dans les constructions qu'on désigne par pathologies de vieillissement qui varient selon les climats et dont la maîtrise peut être assurée grâce à des mesures préventives.

I.2.1.3. 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, la qualité, temporaire) Cette justification des conditions économiques se fait à partir, des moyens financiers disponibles, des potentialités industrielles et artisanales (exemples argile, fibre halfa, sable ,chaux...).

I.2.1.4. 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...).

I.2.1.5. 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- Demander, 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.

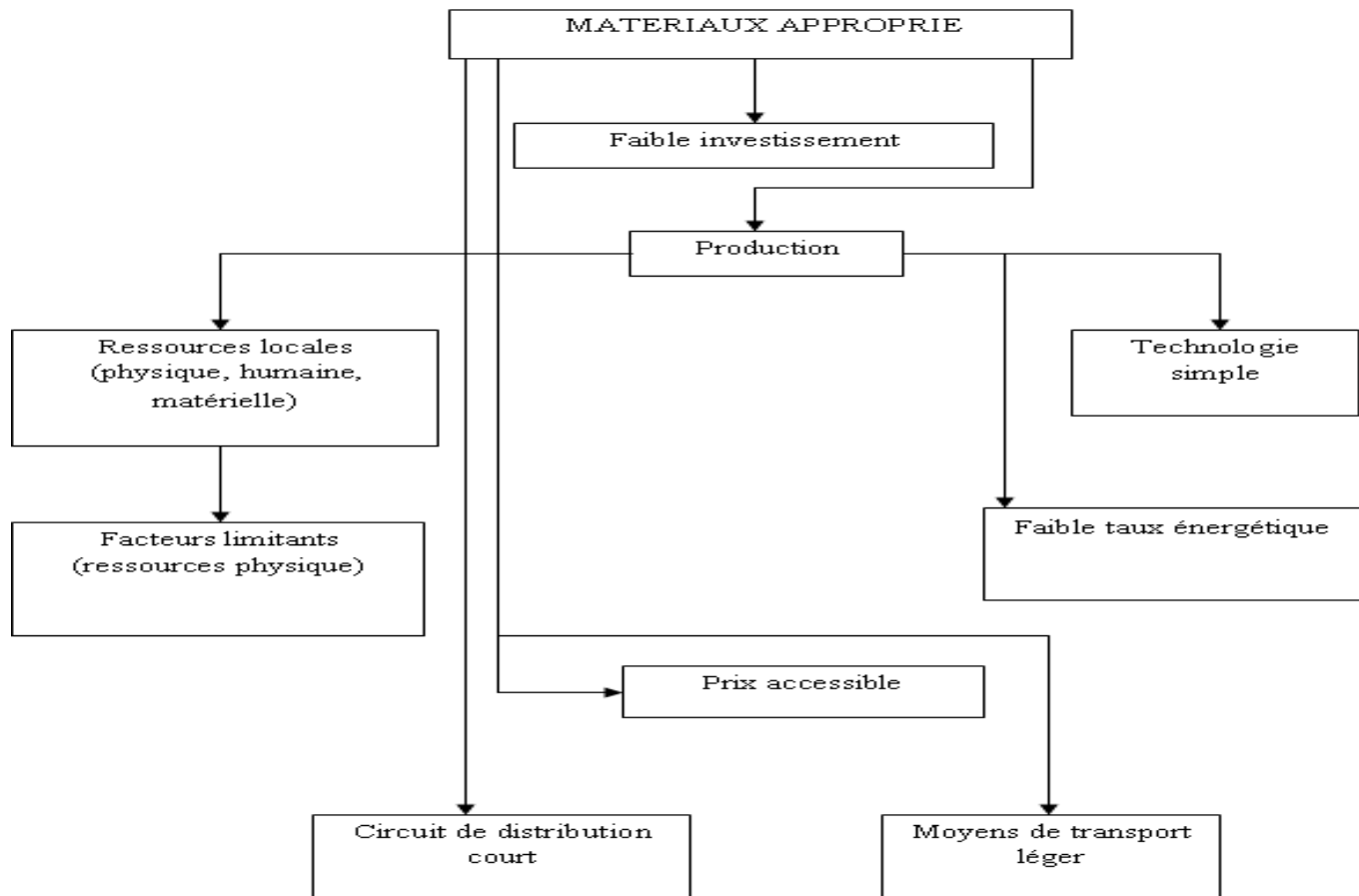


Figure I. 1 Critères d'appréciation d'un matériau approprié, (Bensaada.A, 2011)

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.

I. 3. Techniques de constructions :

I. 3.1. Description et caractérisation des principales techniques

constructives de la terre crue De l'Amérique latine jusqu'en Chine, le matériau terre et l'architecture en terre sont représentés sous différentes formes, avec différentes techniques de construction et de fabrication(Doat, P et al, 1983) Parmi les techniques les plus connues, on cite : le pisé, l'adobe, (ou thob) les blocs de terre comprimée (BTC), les blocs de terre stabilisée (BTS), la terre paille et le torchis. Elles font l'objet actuellement d'un développement technologique tant sur le plan de la maîtrise et de l'amélioration des performances que sur le processus de production.

Tableaux I. 2 : Les différentes techniques de construction en terre (CRATerre, 1995).

Terre découpée	Des blocs de terre sont directement découpés dans le sol.
Terre comprimée	Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.
Terre façonnée	La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.
Terre empilée	Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais.
Terre moulée	Terre moulée La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules de formes diverses
1984	Terre extrudée La terre est extrudée par une machine puissante.
Terre coulée	Terre coulée La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules, comme un béton.
Terre-paille	Terre-paille Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau léger.
Terre garnissant	La terre mêlée de fibres est appliquée en couches minces pour garnir le support.
1994	4 logts à Tamanrasset –OPGI- en Béton de Terre Stabilisé

I. 3.1.1. Torchis :Le torchis est une technique de hourdage qui consiste en l'application d'une terre mélangée à de la paille sur un clayonnage maintenu dans une ossature porteuse en bois

(Pignal, 2005). C'est un matériau de remplissage, donc non porteur. Des boules de terre sont amassées l'une sur l'autre et légèrement tapotées à la main ou avec les pieds pour former des murs monolithiques. La terre est renforcée en rajoutant des fibres, normalement de la paille provenant de toutes sortes de céréales et de fibres végétales, comme de l'herbe et des brindilles pour diminuer le retrait de la terre et améliorer la cohésion entre les particules de la terre.

le torchis est essentiellement composé de paille qui est trempée dans un mélange appelé "barbotine" (terre saturée d'eau). Le torchis joue beaucoup plus le rôle d'un isolant thermique et acoustique.



Photo I. 1 : étape de opération le torchis (<http://yserhouck.free.fr/Textes/torchis.htm>).

I. 3.1.2. Bauge (terre-paille) : (Salmi Safia 2014)

Technique la moins mécanisée, elle varie en fonction des régions, bien que le matériau de base soit toujours le même : une terre grasse mélangée à des fibres végétales ou animales afin de former une pâte souple. Cette technique consiste à construire des murs épais et massifs sans coffrage mais par couches successives d'environ 50 cm de hauteur. Le mélange est empilé à l'aide d'une fourche, puis battu avant d'être coupé avec un outil tranchant. En Bretagne, la construction en terre occupe essentiellement le bassin de Rennes, soit une zone allant de Rennes à Merdrignac. Cette architecture de terre semble faire son apparition au milieu du 16^e siècle mais les plus anciennes constructions connues datent du début du 17^e siècle



Photo I. 2 : étape de opération Bauge (<http://www.totem-terre-couleurs.fr/maconnerie-terre/mur-de-bauge.php>).

I. 3.1.2. La brique de terre crue moulée Adobe : (Salmi Safia 2014)

La terre utilisée dans ce cas, ne contenant ni gravier ni cailloux, est mélangée à de la paille, puis façonnée à la main ou moulée à l'état plastique avant de sécher à l'air libre. L'adobe permet de répondre à toutes les contraintes architecturales. De plus, elle est extrêmement économique.

Selon la définition scientifique contemporaine, l'adobe (dénomination espagnole dérivée de l'arabe *al thob*, (la terre) est un bloc de terre crue moulée et séchée (Bui.Q.B, 2008). On trouvera des multitudes d'adobes de tailles et de formes différentes, évoluant successivement selon l'archéologue José Imbeloni de la forme conique puis cylindro-conique, en demi-sphère, dentiforme et enfin en parallélépipède. Ce qui différencie les constructions de type appareillé avec la technique du pisé, c'est la possibilité de fabriquer et de stocker l'ensemble des matériaux nécessaires à la construction avant d'engager les travaux (Doat , P et al, 1983).



Photo I.3: étapes des opérations adobe (<http://www.cap-a.fr/construction-terre-crue-nouveau-mexique/>).



Photo I.4 Mur en adobe déjà monté (Source : Encyclopédie interactive Wikipédia)

I. 3.1.3. Le pisé: (Salmi Safia 2014)

Le pisé est un procédé de construction en terre crue, sans mélange de paille, c'est une maçonnerie monolithique réalisée par des couches superposées de terre compactée dans un coffrage appelé banches. La mise en place du coffrage est une entreprise qui prend 15 à 20 minutes. Le remplissage de ce coffrage se fait par couches successives de terre d'environ 12 cm, qui, une fois tassées, n'atteignent plus qu'une hauteur d'environ 8 cm (ce qui donne l'aspect lamellé des façades en pisé) (Pignal, 2005). Une fois, le remplissage terminé, le coffrage est démonté pour être remonté à côté. Le compactage se fait au moyen d'un passoir en bois.

I. 3.1.4. La terre compactée (B.T.C.) (Salmi Safia 2014)

La B.T.C. est d'une certaine manière, une version plus moderne de l'adobe. Les constructions en B.T.C. se développent aujourd'hui et constituent la forme la plus répandue de construction en terre crue. Ces briques présentent l'avantage d'être très résistantes et très souples quant à leur utilisation. Les briques de terre compactée sont stabilisées le plus souvent à la chaux ou au ciment (de 6 à 8 % en masse sec, le reste est composé de terre crue)(Doat, P et al, 1983). Le mélange de terre (avec stabilisant) est moulé puis compacté à l'aide d'une presse mécanique ou manuelle. La terre utilisée est plus proche de la terre à pisé que de la terre à adobe, elle est moins argileuse et plus sableuse.

I. 3.2. Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Houben , 2006) (voir figure 1.2):

a. Blocs pleins :

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples,

etc.). Leur usage est très varié.

b. Blocs creux :

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs.

Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

c. Blocs alvéolaires :

Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.

d. Blocs à emboitements :

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.

e. Blocs parasismiques :

Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure Intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.

f. Blocs spéciaux :

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.



Fig. 1.2: Différents produits de blocs de terre comprimée

I. 3.2.1. Caractéristiques de quelque type de brique de terre crue

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

Tableaux 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 mm/cm	1	1 - 2	0.2 - 1

I. 4. Historique :

L'emploi de Matériaux de la terre en construction a été développé dans les principaux foyers connus de civilisation :

Dans les plaines du Tigre et l'Euphrate, en Mésopotamie ; en Egypte, le long du Nil, du Delta à la Basse-Nubie ; au Pakistan (Baloutchistan), le long des rives de l'Indus et de la Harka ; en Chine, sur des plateaux dominant le Fleuve Jaune (Houang-Ho). Mais aussi en Amérique du sud, sur le littoral désertique de l'océan Pacifique drainé par les rios andins, et en Amérique centrale , Et bien sûr En Afrique, continent aux sources de l'humanité, et le même européenne. .

Photo I.5 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.7).

ARCHITECTURE DE TERRE DANS LE MONDE



Photo I.5: Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde, (www.craterre.org).

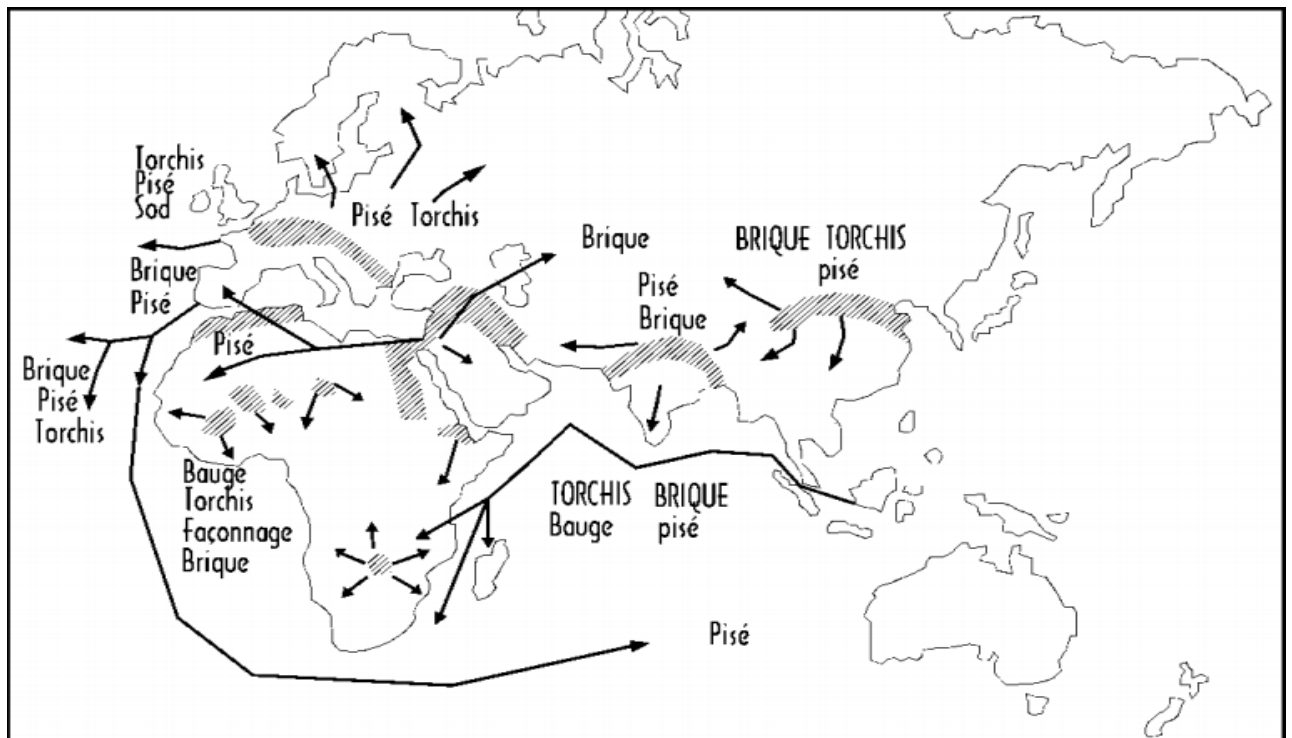


Figure I. 3: Les régions de développement de l'architecture de terre (Houben, H et al, 2006).



Photo I. 6 Pyramides d’Egypte, ([www. fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).



Photo I. 7 : La tour de Babel, ([www. fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).

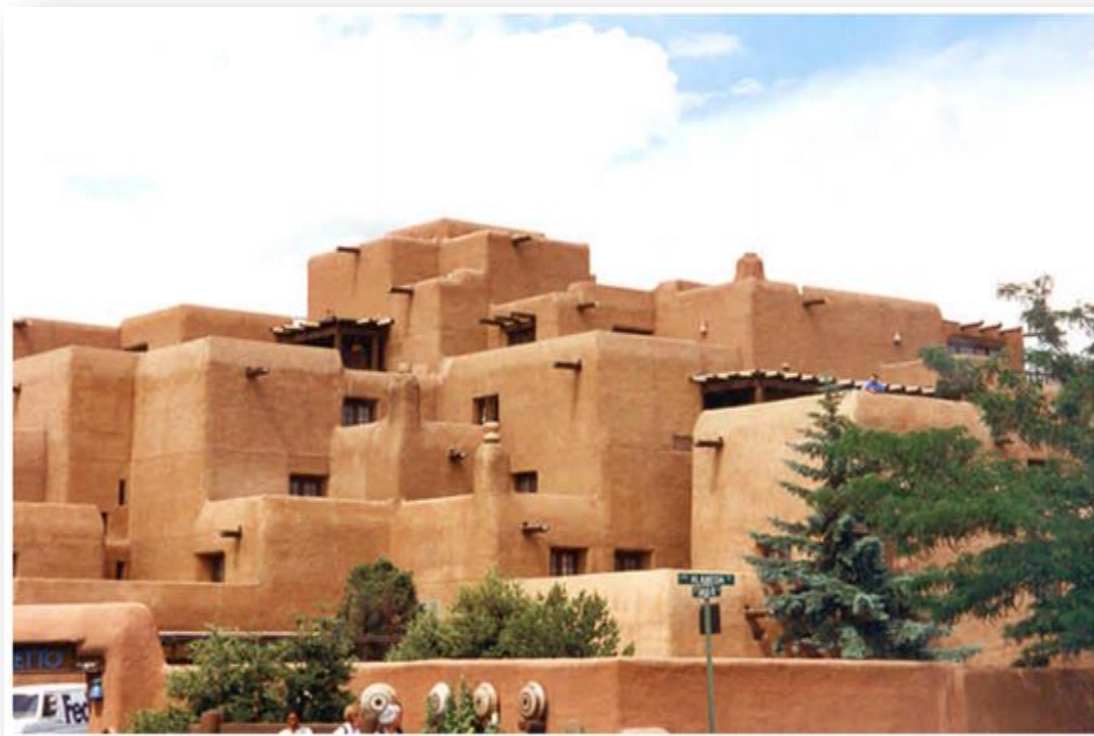


Photo I. 8 : Maison Vallée du Rio Grande : (Histoire de la construction en terre – C. Delbecque 21 octobre 2011).



Photo I. 9 : Tourfan, chine: Mosquée en pisé édiée en 1788 :(Histoire de la construction en terre – C. Delbecque – 21 octobre 2011).



Photo I. 10 : Une maison traditionnelle en pisé en région Rhône-Alpes (Bui.Q.B, 2008).

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'Egypte où les architectes étaient convaincus que la solution était 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 Cleghorn, 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.

L'idée de rendre la terre compacte pour améliorer sa qualité et exécution sous forme de blocs moulés cependant remonte au 18ème siècle (Bensaada.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**.

-Quelques repères chronologiques de la construction en terre?

- 11000 ans : premières traces de la construction en terre en Amérique du sud ;
- 10000 ans : en Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main ;
- 8500 ans : apparition de la brique de terre en Turquie ;
- 8000 ans : apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale (recouvrement de clayonnage)
- 5000 ans : apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.

Ses premières cités découvertes dans l'ancienne Mésopotamie date d'avant même l'invention de l'écriture. La terre crue étant matériau qui se dégrade plus rapidement que la pierre on a moins de vestiges aussi marquants que les pyramides d'Egypte.

Dans les vallées fertiles de la Mésopotamie, de l'Egypte, de l'Inde et de la chine, les terres Alluviales et la paille des céréales ont permis la mise au point de technologies multiformes et leur diffusion à partir de ces principaux foyers de civilisation pour ensuite se généralisé aux grés des migrations et des conquêtes.



Photo I. 10 : Tchoga zambil en Iran, (source : Encyclopédieinteractive wikipédia).

Dans le continent africain une très grande partie du parc immobilier des zones rurales et même urbaine est en terre utilisé sous une diversité linguistique qui exprime aussi une

Diversité des techniques de construction ainsi qu'une connaissance très affinée des possibilités qu'offre la terre. Les premières utilisations de la terre crue en Afrique remontent à 8000 ans, (des cabanes de bois enduites de terre). Les civilisations antiques maîtrisaient l'utilisation de ce matériau on peut citer par exemple la pyramide de Saqqarah, par la suite, son utilisation s'étend sur tout le continent, produisant une D'après les statistiques de l'UNHCR (United Nation High Commission for Refugees). Près de 30% de la population mondiale habite actuellement dans des constructions en terre, c'est un matériau stable, écologique et bon marché. (Il a été ainsi constaté que 60% des habitations du Pérou sont bâties en Adobe ou en pisé, à Kigali, 38% des logements sont en terre et le recensement de 1971 en Inde attestait que près de 72% du parc immobilier est construit en terre). Il est également important de remarquer que près de 17% des bâtiments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre, c'est dire la longévité qu'offre ce matériau de construction.

- Actualité de l'architecture de terre en Algérie

Aujourd'hui les attitudes ont changé, malgré l'échec de l'opération de Mustafa Ben Brahim¹⁸. En effet le BTS est un matériau reconnu officiellement et le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB) mène ses recherches sur ce sujet depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit :

En 1993, Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées 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.4:

Tableau I. 4 : Opérations des différentes réalisations en terre en Algérie (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 Chérage 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 Réggane 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 un projet intitulé "réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique"
2006	un projet intitulé "réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique" est lancée au CNERIB et financé par l'union européenne

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, adaptatives aux modèles sociaux algériens, les détails constructifs architecturaux et la durabilité des constructions en terre dans le temps (BERREHAIL .T, 2009).



Photo I. 11 Ksar Aïn Madhi Laghouat-



Photo I. 12: logements en B.T.C. à ,
Algérie tamanrasset (Le CNERIB)
(www.sidielhadjaissa.com)



Photo I. 13: Premières assises du prototype de Soudania1999 de (Le CNERIB)



Photo I.14: Prototype achevé soudanai 1999(Le CNERIB)



Photo I.14: Ghardaïa une ville anciennes, du Sud Algérien (Source : auteur).

I. 5. pathologies des constructions en terre :

Afin de mieux profiter des avantages des constructions en terre, il est nécessaire de se prémunir contre certaines pathologies. Les constructions en terre sont en effet très sensibles à l'eau. Ses dégradations peuvent être localisées :

- A la base du mur à cause des remontées capillaires.
- Au haut du mur à cause du rejaillissement ou du ruissellement des eaux pluviales ;
- A des endroits précis tels que les ouvertures, acrotères de nature du terrain terrasses Saillies.

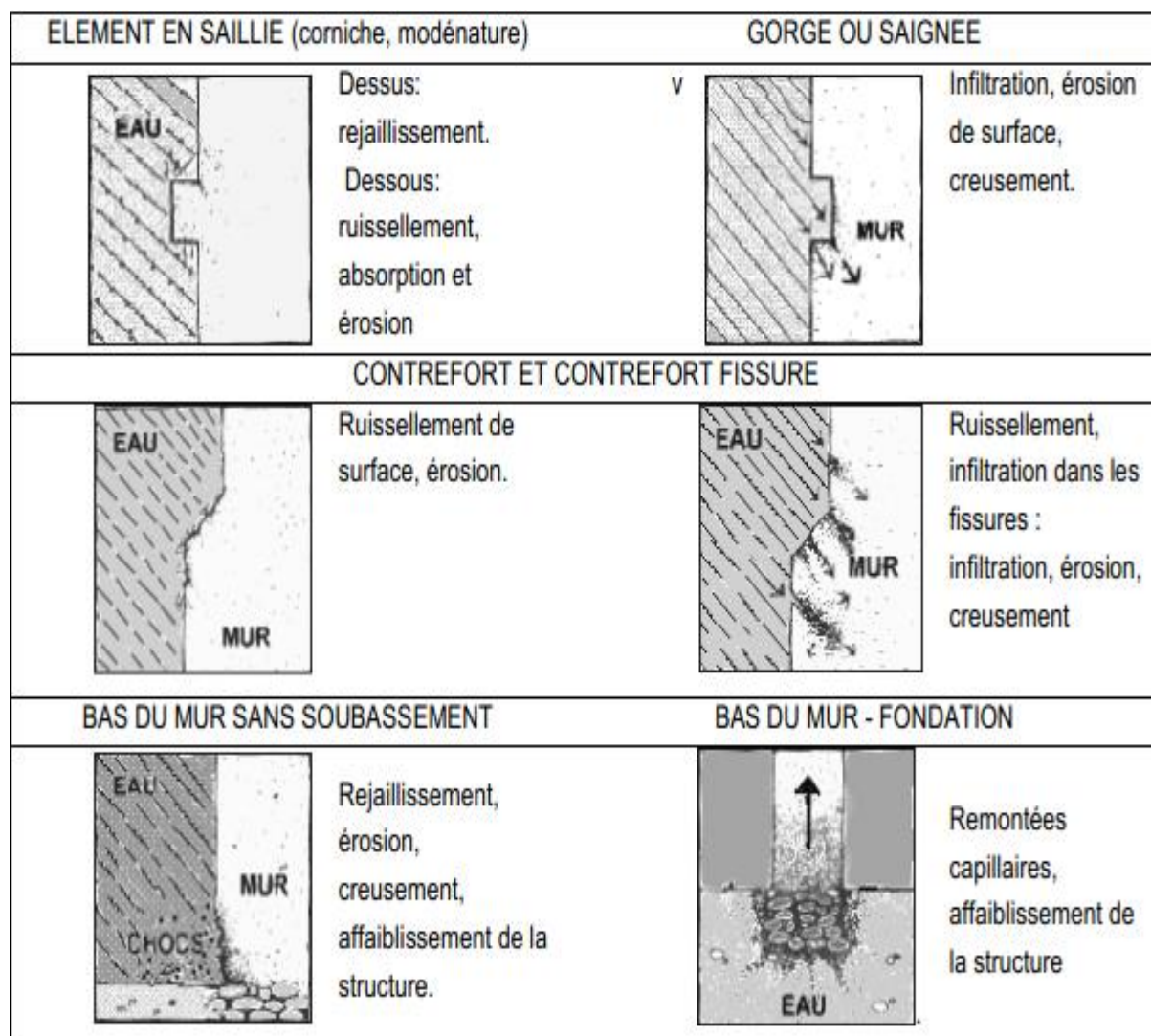


Figure 1.4 : La pathologie humide ou système de la goutte d'eau (Kebaili, 2006)

I. 5. 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 (érosion de la terre humide sous l'action des chocs de gouttes de pluies).

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 volumineusement 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'écoulent 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.

I. 6. Durabilité des constructions en terre, témoignage de l'histoire :

Nous pouvons présenter ici un témoignage du XVIII^e siècle sur la solidité d'un édifice en pisé: "Lorsque les murs en pisé sont bien faits, ils ne forment qu'une seule pièce, et lorsqu'ils sont revêtus à l'extérieur d'un bon enduit, ils peuvent durer des siècles. En 1764, je fus chargé de restaurer un ancien château dans le département de l'Ain, il était bâti en pisé depuis plus de 150 ans. Les murs avaient acquis une dureté et une consistance égales aux pierres tendres de moyenne qualité, telles que la pierre de St-Leu. On fut obligé, pour agrandir des ouvertures et faire de nouveaux percements, de servir de marteaux à pointe étau taillant, comme pour la pierre de taille".(Rondelet, J, 2006) 9.1.

Nous pouvons trouver encore, à travers le monde plusieurs ouvrages enterrés et en pisé traditionnel, qui ont été construits il y a des centaines d'années et qui se maintiennent à ce jour. Nous pouvons citer l'exemple du Temple d'Horyuji au Japon, (Figure 31) un patrimoine de l'UNESCO, âgé de 1300 ans. Une partie de ce temple a été construite en

pisé non stabilisé et reste encore en bon état aujourd'hui (Djebib & Hall, 2004),



Photo I.15: Le temple d' Horyu-Ji au Japon (Djebib & Hall, 2004),

Un autre célèbre exemple est le cas de la Grande Muraille de Chine (Figure 32). Cet ouvrage a été construit il y a 2000 ans avec du pisé, des pierres, des briques de terre cuite, du bois. selon le principe d'utilisation des matériaux locaux.



Photo I.16: à grande muraille de chine(BUI.Q.B.2008).

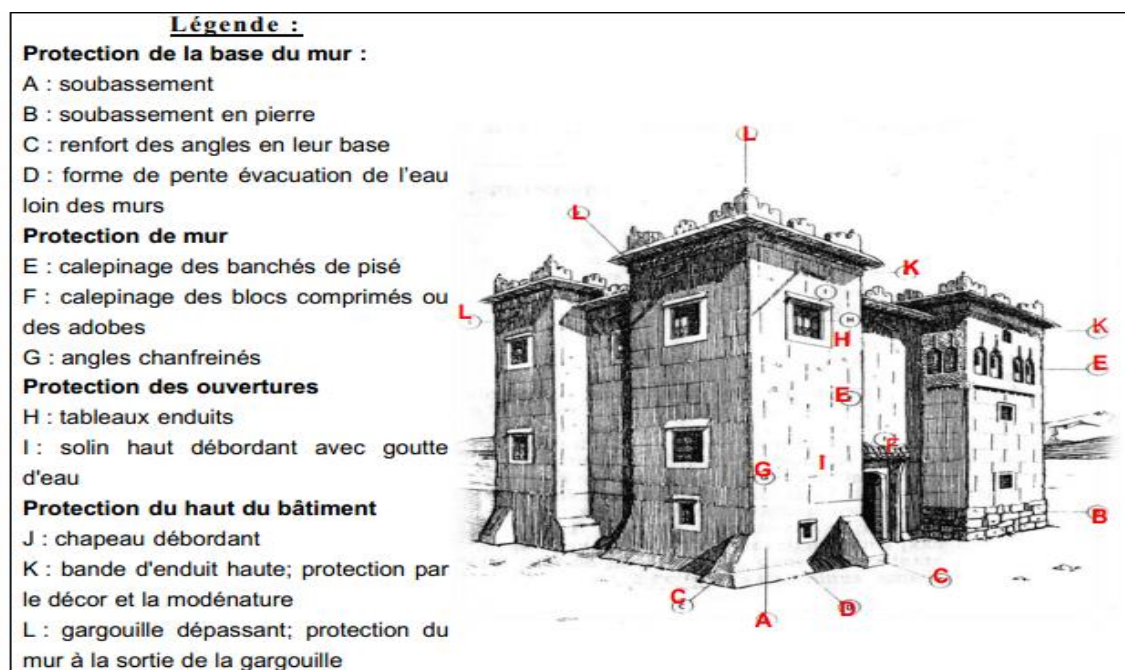


Figure I.5 : Le schéma de bonne conception architecturale d'un bâtiment en terre (source le CRA Terre)

I. 6. Stabilisation :

I. 6.1. Définition de Stabilisation : (TAALLAH Bachir),2014

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière (United Nations, 1992).

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées , l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

I. 6.2. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre :

D'une terre à l'autre, les propriétés sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des tractions granulaires qui les composent. C'est souvent la fraction granulaire dominante d'une terre qui caractérise ses propriétés fondamentales et régit son comportement.

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles que la

couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction (Rigassi, 1995).

I. 6.3. Procédés :

On dénombre trois procédés de stabilisation (Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992, Webb, 1994) :

I. 6.3.1. Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

I. 6.3.2 Stabilisation physique :

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

I. 6.3.3 Stabilisation chimique :

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité (Akpodje, 1985).

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- a. Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- b. Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges, chaux), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari, 1989).

• 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.

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.

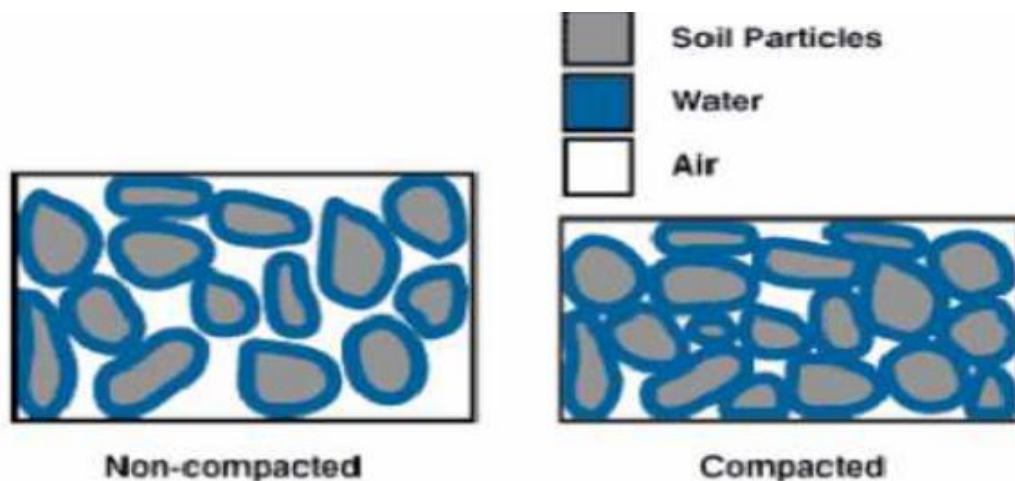


Fig. I.6 : Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).

• Modes de compactage :

La méthode de densification influe fortement sur la résistance finale du matériau (Doat, 1979). Il existe principalement quatre méthodes de compactage (Houben, 2006) :

- La compression statique ;
- La compression dynamique par vibration ;
- La compression dynamique par impact ;
- La compression par pétrissage.

I. 6.4. 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.

I. 6.4.1. Chaux :

I. 6.4.1.2 Généralités :

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité. Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes (Jarrige, 1989).

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par Décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états

chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction :

La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges (Le Roux, 1969) ; (Gresillon, 1976). Le Roux (Le Roux, 1987) a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme.

I. 6.4.1.3. Efficacité et dosage :

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. Le gain en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la grosseur des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement (Locat, 1990; Moore, 1987; Rogers et al, 1996b).

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un brisage des mottes. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre (Houben, 2006).

Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile, et à travers la réalisation d'éprouvettes traitées à la chaux et compressées, Toubreau (Toubreau, 1987) a pu suivre l'évolution des réactions sol-chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part, sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude, lui a permis de faire un classement, de favorables au moins favorables dans l'ordre : kaolinite, > illite, > smectite.

I. 6.4.1.4. Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé :

La résistance en compression simple augmente considérablement avec l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols (Akpokodje, 1985; Symons, 1999).

Akpokodje (1985) a étudié la stabilisation des sols des zones arides d'Australie en utilisant de la chaux. Il a employé dans cette étude un loam sableux (59% de sable, 28% de limon, 13% d'argile), un loam limoneux (15%, 75%, 10%), et un loam argileux (36%, 27%, 37%). Pour le loam argileux et loam sableux, une teneur en chaux de 2% a donné une résistance à la compression de 7 jours d'environ 0,7 MPa, mais en augmentant la teneur de 4%, la résistance à la compression obtenue est de l'ordre de 1.2 à 1.3 MPa (figure I.7). Mais des teneurs en chaux

plus de 12 % n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance des échantillons. Des résultats similaires sont obtenus par Millogo (Millogo, 2008) (figure I.8).

D'après Ausroads (Ausroads,1998), des teneurs élevées en chaux ne donnent pas nécessairement des résistances initiales élevées. La figure 1.32 montre la variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps. Il indique que le gain de résistance précoce (résistance à 7 jours) est faible, alors qu'après 28 jours il est significatif.

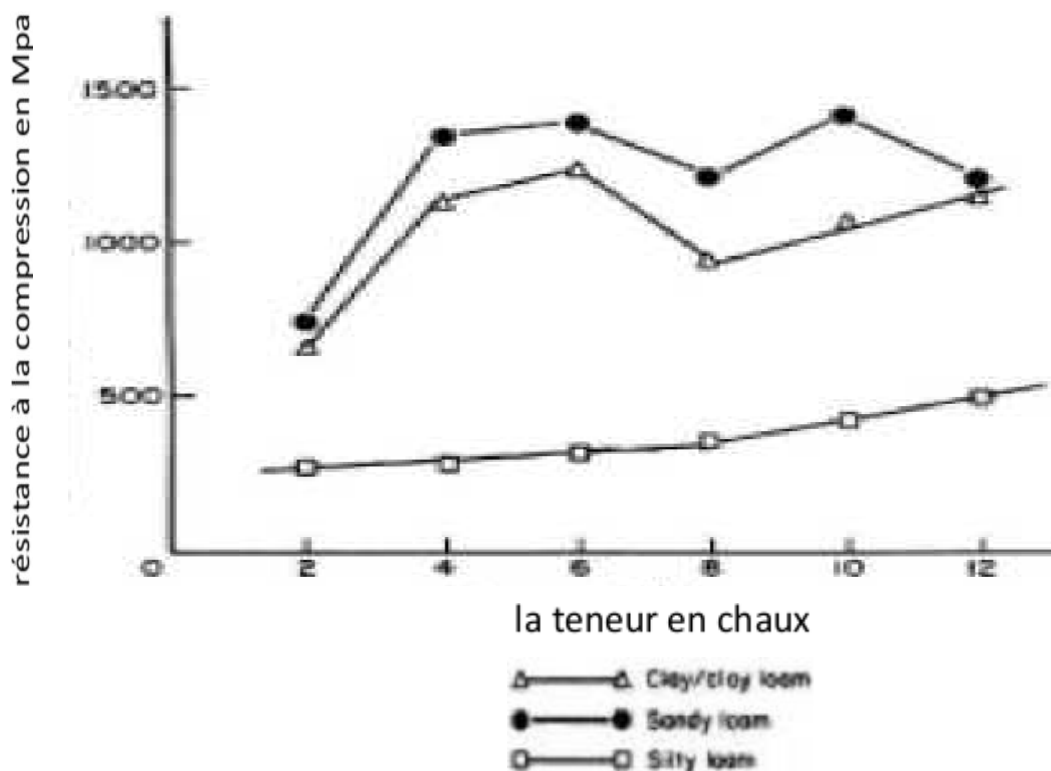


Fig. 1.7: Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne (Akpokodje ,1985).

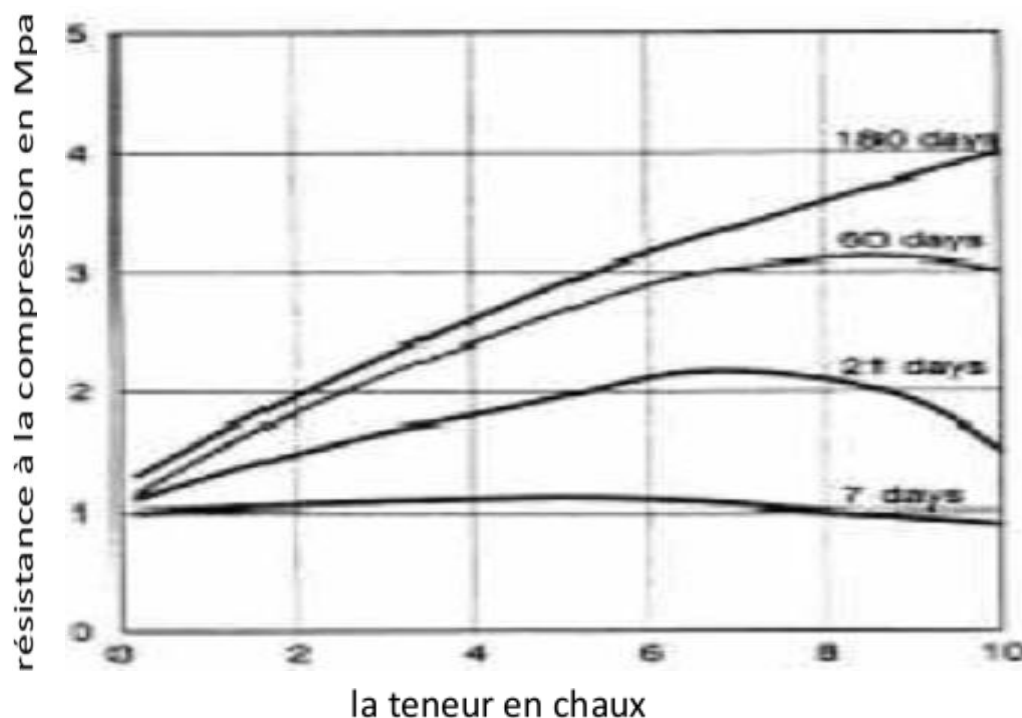


Fig. 1.8: La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur En chaux et l'âge (Ausroads, 1998).

I. 6.4.2.Fibre :

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

I. 6.4.2.1. Différents types de fibres :

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille:

I. 6.4.2.1.1. Les fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1.8) (Baley, 2013) :

- Les fibres végétales : l'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur

utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites. Les fibres végétales comprennent :

- des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;

I. 6.4.2.1.1.1. Fibre d' alfa :

La fibre d'Alfa est une fibre aux caractéristiques uniques, de par sa nature fine, courte et assez rigide, la fibre d'alfa constitue l'une des rares matières premières permettant de fabriquer un papier fin de haute qualité. Grâce à la finesse de ses fibres et ses parois minces, l'alfa permet d'obtenir un nombre de fibres par gramme plus élevé que pour les fibres courtes d'autres origines.

L'extraction de fibres est un procédé classique dans le textile. Souvent les fibres naturelles se présentent sous une forme qui ne permet pas leur filage, donc il faut transformer par extraction et purification la matière première ou brute en une forme filable.

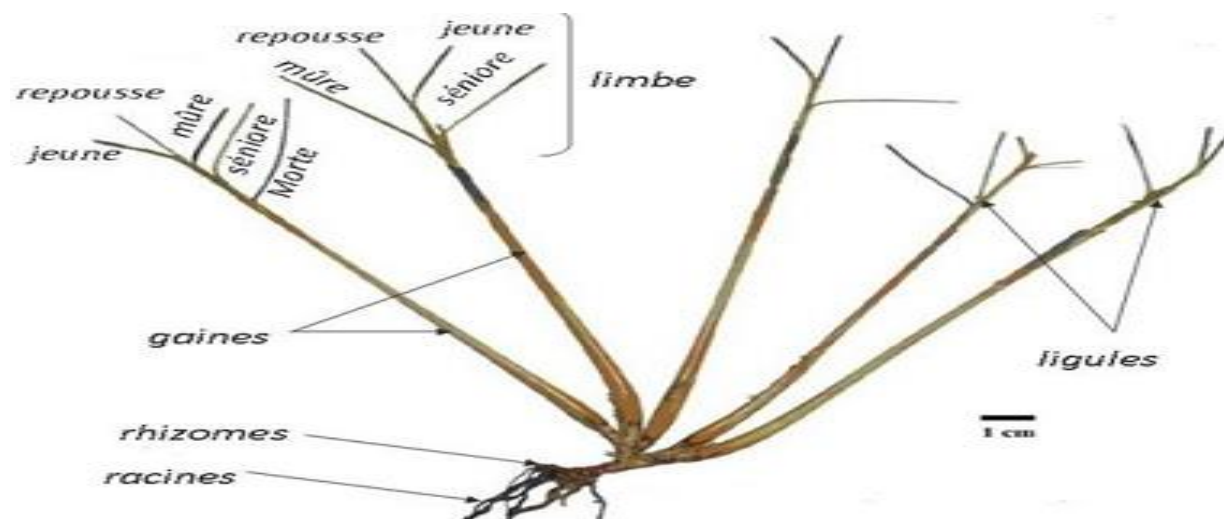


Fig. 1.8.1: Photo de la plante alfa avec indication des parties principales

- **Composition chimique : [1]**

- **La lignine :** La lignine est le composant liant dans les tiges d'alfa et en général dans les plantes. C'est le liant entre les fibres formant des faisceaux ou des tiges. Sans la lignine, les tiges d'alfa n'existeraient pas. L'extraction des fibres consiste en la libération des fibres ultimes en dégradant les composants non-cellulosiques comme la lignine. L'élimination de la lignine est appelée la délignification.

- **L'hémicellulose :** L'hémicellulose est présente avec la cellulose dans les parois des cellules des plantes. Sa structure correspond fortement à celle de la cellulose. Néanmoins quelques différences importantes existent ; la cellulose a une structure cristalline mais l'hémicellulose est amorphe et donc moins forte. De plus la cellulose est faite de β -glucose comme seul monomère, mais pour la polymérisation L'hémicellulose plusieurs monomères glucidiques, comme le xylose, le mannose, le galactose, le rhamnose (un désoxy-hexose du mannose) et l'arabinose, sont possibles. Donc tout comme la lignine, L'hémicellulose existe également sous différentes formes, parmi lesquelles le xylène est la molécule la plus abondante. Ce qui fait, que la cellulose est un composant désiré et non pas L'hémicellulose.

-Les pectines :

Les pectines font également partie des plantes, plus spécifiquement de leurs tiges et de leurs fruits. Quant à l'alfa, les pectines se trouvent dans les tiges.

La fonction des pectines est la liaison des faisceaux de fibres. Leurs structures ressemblent beaucoup à celles des hémicelluloses. En outre, pendant la maturation des fruits, des pectines sont souvent transformées en hémicelluloses, ce qui montre la similarité entre les deux structures.

Les pectines sont donc, comme les hémicelluloses, composées de polysaccharides, c'est-à-dire des polymères formés à partir de monomères glucidiques. Une différence entre la structure chimique des pectines et celle des hémicelluloses est le fait que les pectines possèdent des groupes carboxyl ($-\text{COOH}$) tandis que l'hémicellulose n'en a pas.

De plus, l'arrangement des pectines est similaire à celui de la cellulose, c'est-à-dire des chaînes linéaires grâce à la rotation des monomères par rapport aux monomères voisins. La combinaison des chaînes linéaires avec les groupes carboxyl rend possible les fortes liaisons dihydrogène entre les chaînes.

-Les cires :

Les cires sont des lipides qui se trouvent dans une fine couche à l'extérieur des tiges. Les cires ont plusieurs fonctions, comme la protection physique contre des conditions environnementales défavorables et des insectes. Les structures peuvent être très complexes, mais parmi les lipides les plus courants se trouvent les hydrocarbures (C21-C35), les esters de cire (C34-C62), les cétones (C23-C33), les alcools (C22-C33) et les acides gras (C16-C32) [13]. La structure et la composition de la couche des cires peuvent varier tout au long de la plante et de la tige.

• Propriétés mécaniques de f : [2]

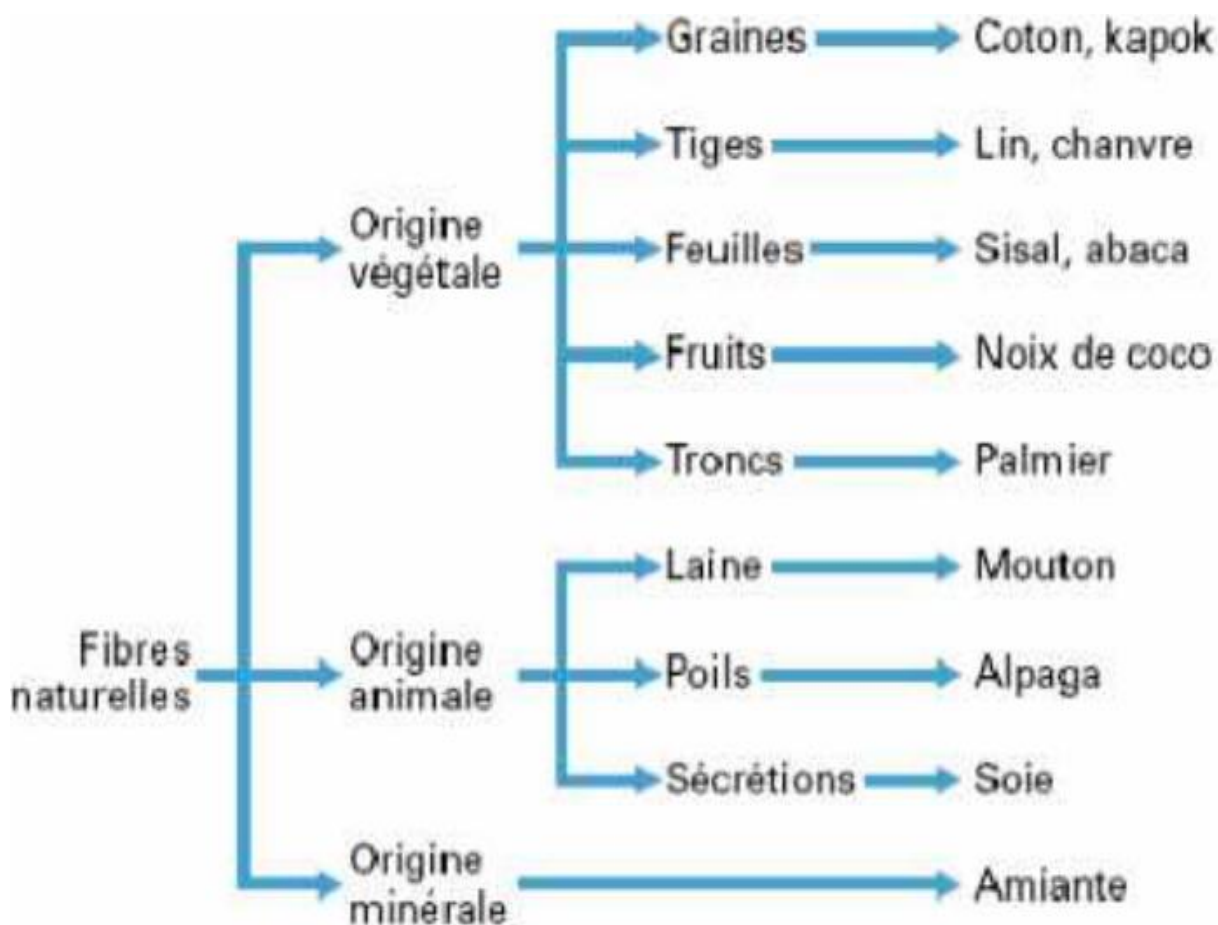


Fig.1.9: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013).

• **Les fibres animales :** La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, Cachemire,...).

- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée .

- **Les fibres minérales** : L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente (Service, 2004).

- **Fibres artificielles :**

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les Fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

-Les fibres végétales :

(Le palmier dattier, Palmes, Jeune palme, Régime de dattes, Régime de dattes, Dattes Gourmand, Stipe, Cicatrices annulaires, Rejet, Bulbe, Racines)

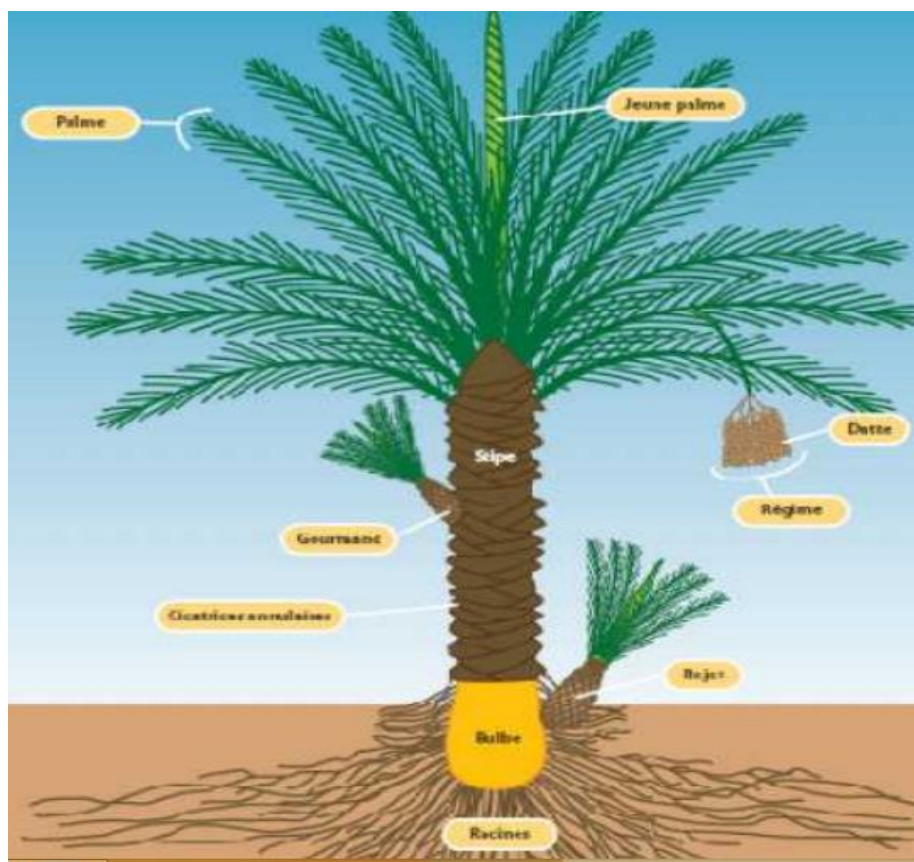


Fig. 1.10 : Structure générale d'un palmier dattier
(www.relais-sciences.org/odj/doc/palmier_dattier)

Les fibres de palmier dattier :

Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse, avec quatre types de fibres (Kriker,2005):

- les fibres de feuilles dans le pédoncule.
- les fibres de baste dans les tiges .
- les fibres de bois dans le tronc .
- les fibres de surface autour du tronc (appelées localement : lif ou leaf) .

I. 6.4.2.2. Effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols :

La stabilisation des sols a été effectuée depuis l'antiquité. Le principe de la stabilisation du sol est une action de la nature, on peut le voir à travers la présence des racines des plantes dans les sols. Les fibres qui forment ces racines pénètrent et s'orientent dans le sol de façon aléatoire. Ces fibres végétales améliorent la résistance du sol et la stabilité des pentes naturelles (Kaniraj,2003). Par conséquent, le concept de stabilisation par des fibres a été reconnu il ya plus de 5000 ans. Par exemple, les civilisations anciennes mélangent la paille dans le matériau terre afin de créer des blocs de construction renforcés (Abtahi, 2009). Il existe plusieurs exemples de renforcement du sol comme la Grande Muraille de Chine (premier exemple de terre renforcée en utilisant des branches d'arbres comme éléments résistant à la traction (Rao,1996).

Dans l'histoire moderne de la stabilisation des sols, le concept et le principe du Renforcement des sols a été développé par Vidal (Vidal, 1969). Il a démontré que l'introduction d'éléments de renforcement dans le sol augmente sa résistance au cisaillement. Par conséquent, les efforts pour utiliser des matériaux fibreux ont été lancés. Depuis l'invention par Vidal en 1969, près de 4000 structures ont été construites dans plus de 37 pays à ce jour en utilisant le concept de renforcement du matériau terre (Azeem, 1992).

Plusieurs recherches ont été effectuées sur la stabilisation des sols par des fibres naturelles ou synthétiques, on donne ci-après quelques détails sur deux types de fibres, le premier est naturel, il s'agit des fibres de palmier, et le deuxième est synthétique, c'est les fibres de polypropylènes.

I. 6.4.2.3. Effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des adobes :

L'ajout des fibres naturelles est un moyen de stabilisation couramment utilisé dans la fabrication des adobes et autres produits de terre, et ceci depuis des milliers d'années (Mesbah,2004), (Ghavami,1999).

Le rôle des fibres est multiple, elles augmentent d'une part la résistance à la traction et par conséquent la souplesse du matériau. Une terre ordinaire, en effet, ne peut supporter que de faibles efforts de flexion, alors qu'un sol armé sera capable de subir des déformations importantes sans se fissurer. Cette élasticité empêche le mur de se craqueler au séchage, les fibres répartissent dans toute la masse du matériau les tensions provoquées par le retrait de l'argile. D'autre part, le volume qu'elles occupent dans le mur diminue sa densité et améliore ses qualités iso thermiques (Doat, 1979). Les recherches actuelles réalisées sur l'adobe en utilisant plusieurs types de fibres végétales ont abouti à des résultats différents.

Ghavami et al. (Ghavami,1999) se sont intéressés à l'étude d'un sol, sans fibres et stabilisé parfois avec des fibres de sisal et d'autres fois avec de noix de coco. Ils ont constaté que la rupture du sol non fibré est très rapide et presque sans avertissement. En revanche, dans le cas du sol avec fibres, ils ont remarqué qu'après que la charge de rupture a été atteinte, les échantillons se déforment encore. D'après les auteurs, ceci peut être due à la répartition des forces internes de la matrice du sol vers les fibres de renforcement (figure 1.11).

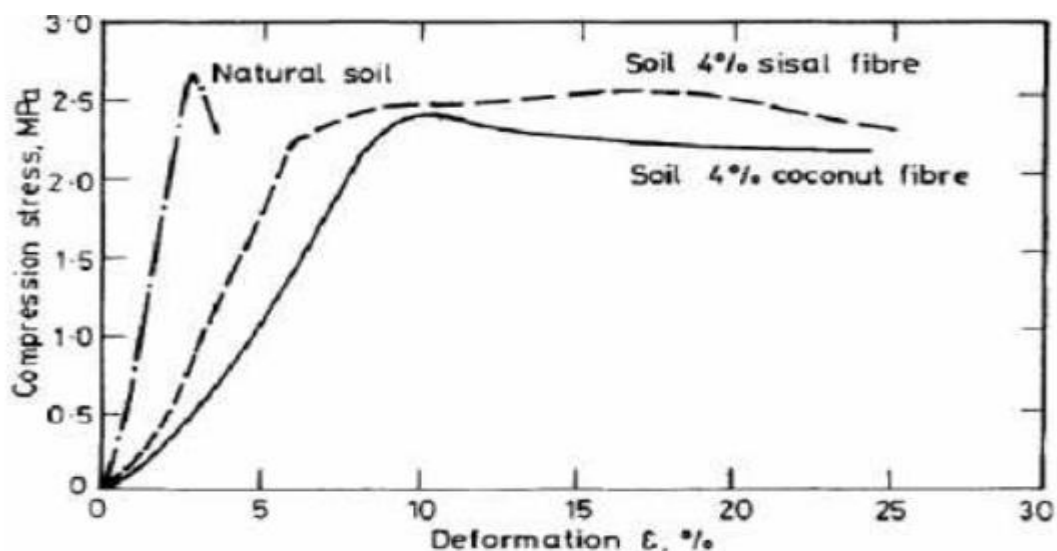


Fig.1.11 : Influence de 4% de fibres sur la relation contrainte-déformation du sol (Ghavami, 1999).

I. 6.4.2.4. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques :

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction (Ramaswamy, 1983 ; Ziegler, 1998 ; Filho, 2000).

Dans un travail de recherche publié en 2014 (Millogo,2014), Millogo et al. se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres d'hibiscus cannabinus (Kénaf), pour fabriquer des blocs de terre comprimée sans aucun stabilisant chimique. Les BTC ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et avec deux longueurs de fibres 30 mm et 60 mm. Les résultats montrent que la présence des fibres d'hibiscus cannabinus a amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. L'important effet a été observé avec le cas de 30 mm de longueur de fibre (figure 1.49), (figure 1.11).

Les auteurs ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques à la non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après les auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile.

Lors de sa discussion sur les types de stabilisants Stulz et Mukerji reconnaissent la paille (blé, seigle, orge, etc.) et les fibres végétales (sisal, chanvre, le coco et bagasse) comme une importante catégorie de stabilisants des BTC, mais ils ne l'ont pas justifié par des résultats de travaux de recherches (Stulz, 1988).

Sallehan et Yaacob ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier a amélioré la résistance à la compression des briques fibrées (Sallehan, 2011).

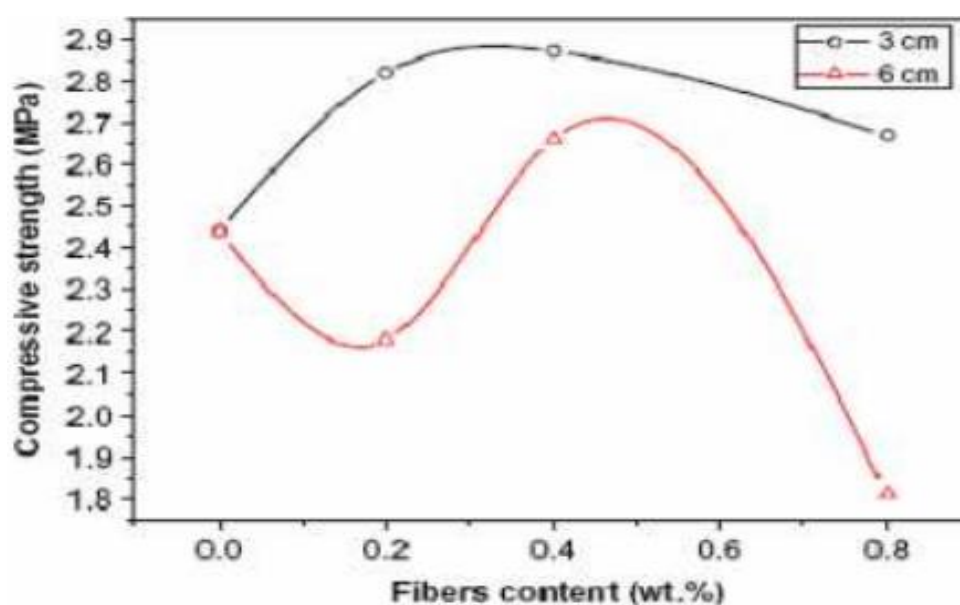


Fig. 1. 12: Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo, 2014).

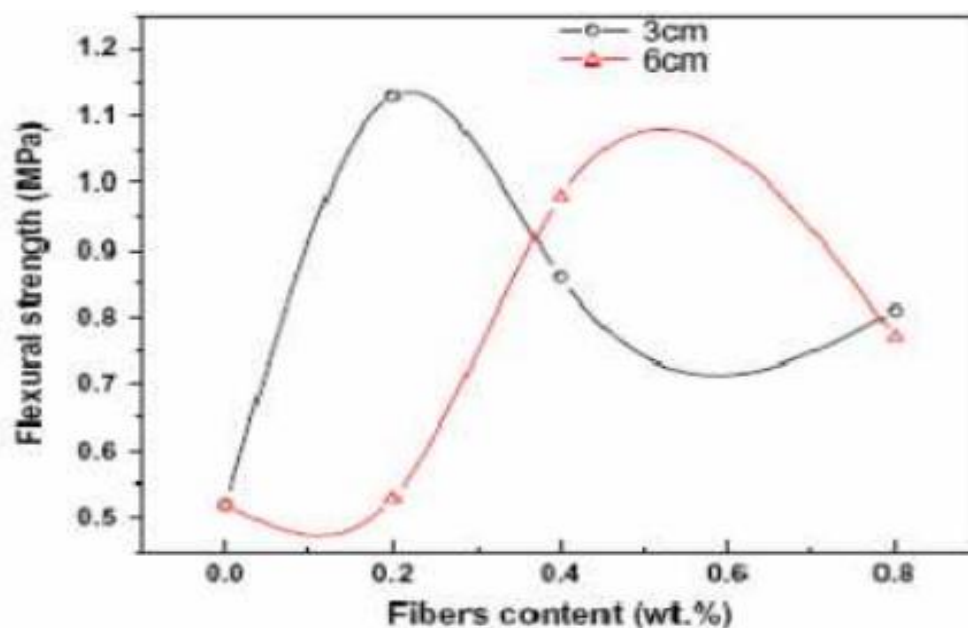


Fig. 1. 13: Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo, 2014).

10. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les constructions en terre. Il est divisé en trois parties, la première est consacrée à la présentation des définitions des matériaux locaux ou on n'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).

Aussi que le renforcement des BTC par les fibres.

Chapitre II : Techniques Expérimentales

II .1.Introduction:

À travers la synthèse bibliographique, on a pu voir que les phénomènes physico-chimiques jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique des murs de terre comprimée et sur leur durabilité.

Donc une recherche sur les matériaux et les procédures en vue d'améliorer la qualité du murs s'avère indispensable. La nature du sol et celle des liants utilisés comme stabilisants ainsi que la nature des fibres employées sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement du murs.

pour étudier correctement les propriétés du BTC fibré, on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants. Dans ce chapitre, on présentera les procédures des essais:

- 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).

II .2.Essais d'identification physique

II .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 ou c'est la masse d'un corps par unité de volume totale .

$$\gamma=(M/V) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

-Volume apparent : c'est le volume de matériaux plus le volume de vide.

-Volume absolue : c'est le volume de matériaux sans le volume de vide.

II.2.1.1. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau c'est la masse de l'unité de volume d'un corps avec pores (vide) ou c'est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, ainsi que les vides entre particule c'est la masse de l'unité de volume d'un corps avec pores(vide).

on exprime généralement cette masse volumique en gramme par centimètre cube (g/cm³), elle est donnée par la formule suivante:

$$\gamma_{app} = M/V \text{ (g/cm}^3\text{)}.$$

M : masse de corps.

V : volume apparent avec vide.

. Matériels utilisés :

- un récipient sous volume V défini
- une balance précise à 0,001g près.
- matériaux utilisés.
- une règle.
- un anneau, son diamètre égal au diamètre de récipient.

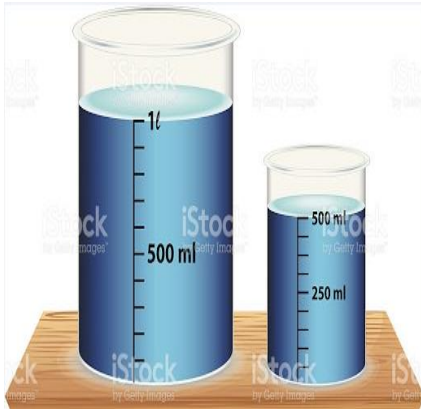


photo II.1: becher utilise pour la détermination de γ_{app}



photo II.2: balance utilise pour la détermination de γ_{app}

II .2.1.1.1. étape de l'essai :

- on pèse un récipient vide, soit M1.
- on met un anneau sur le récipient.
- on met 200g de matériaux dans le récipient .
- on vert le bouchon et remplir le récipient.
- on pèse le récipient remplie matériaux soit M2 .

En recommence l'essai 2eme fois on pèse le récipient remplie de matériaux.

On calcule: $\gamma_{app} = (M2 - M1)/V$

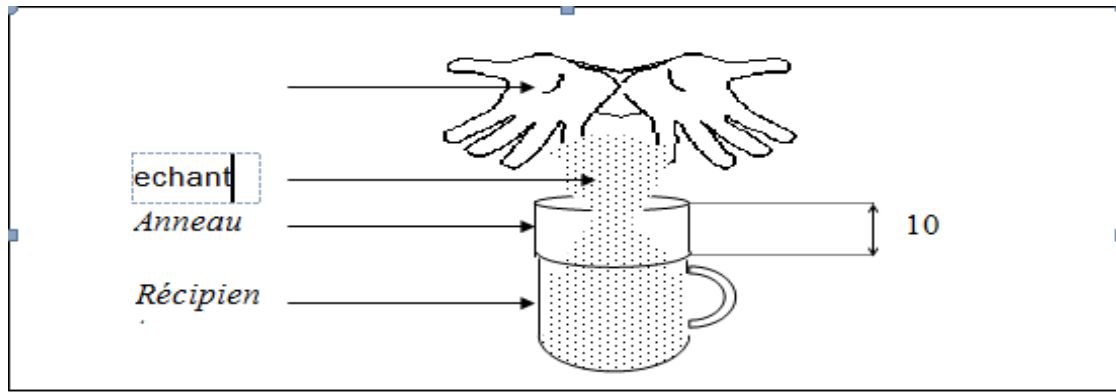


fig II.1: principe de l'essai

II.2.1.2. Masse volumique absolue :

(masse spécifique) c'est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains

$$\gamma_{abs} = M / (V - v) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

M : masse d'agrégats.

v : volume total d'agrégats.

V : volume de vide.

.Matériels utilisés :

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



photo II.3: balance utilisée pour
determination de γ_{abs} .

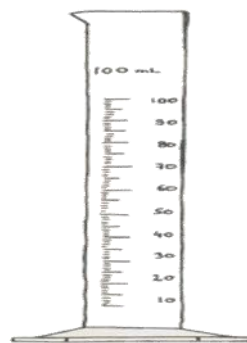


fig II.2: eprouvette graduée utilisée pour la
determination de γ_{abs} .

2.2.5.1. Principe de l'essai :

On opère en comparant la masse d'un volume connu d'échantillon à la masse d'un même volume d'un liquide .

• **Mode opératoire (Figure II.3):**

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 .
4. On calcule: $\gamma_{abs} = (M / (V_2 - V_1)) \text{ (g/cm}^3\text{)}$

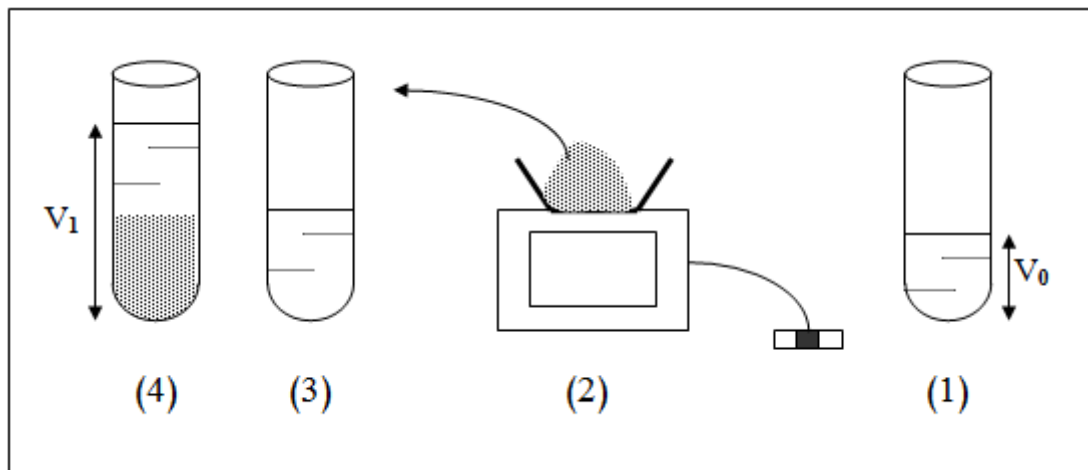


Figure II. 3 Procédure de l'essai masse volumique absolue.

II .2.2. Analyse granulométrique

➤ **Le but d'essai :**

- Déterminer la classification des granulats (sable) de terrain selon les diamètres de grains.
- 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.



photo II.4: les matériels utilisés pour l'analyse granulométrique.

Partie théorique :

- On calcule le refus cumulé : $M_C \% = (M_C/M) \times 100$
- On calcule le passant : $P \% = 100\% - M_C \%$
- On calcule le coefficient de Hozen $C_u = (D_{60}/D_{10})$

D60: Le diamètre qui correspond à 60% de passant.

D10: Le diamètre qui correspond à 10% de passant.

- $C_u < 2$ La granularité serrée.
- $C_u > 2$ La granularité étalée.

- On calcule le coefficient de courbure : $C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$

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

➤ but de l'essai :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition de l'argile. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

➤ 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 réglet 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 la vante 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 déterminées :

Es à vue (Es_v) et Es à piston (Es_p) (voir les photos II.3 et II.4).

Es_v : Equivalent de sable Visuel

Es_p : Equivalent de sable à Piston

$$Es = 100 * h_2 / h_1$$

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.1.

Tableau II.1: Nature et qualité du sable selon Es ou Esp.

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. 5 :Appareillage d'équivalent de sable.

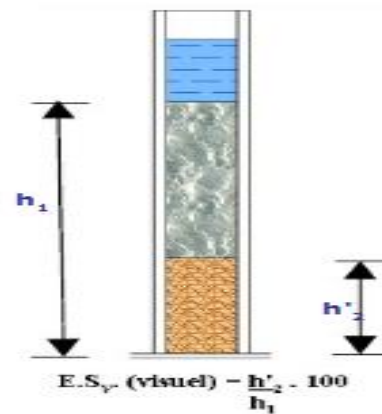


Photo II. 6: La méthode de calcul visuel.

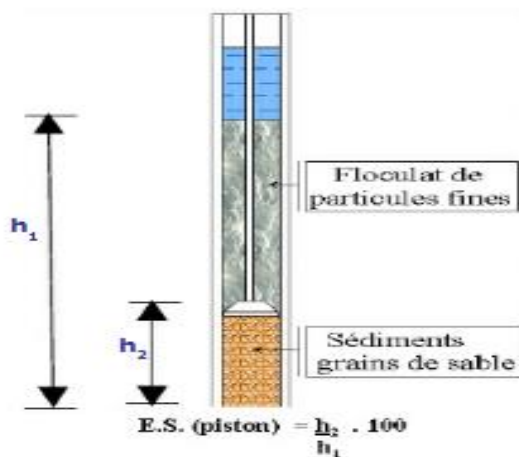


Photo II. 7: La méthode de calcul par piston.

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

II .2.4. 1. Introduction :

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un argile , et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du argile et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance, ce qui permet de faire une classification du sol.

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 400µm.

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

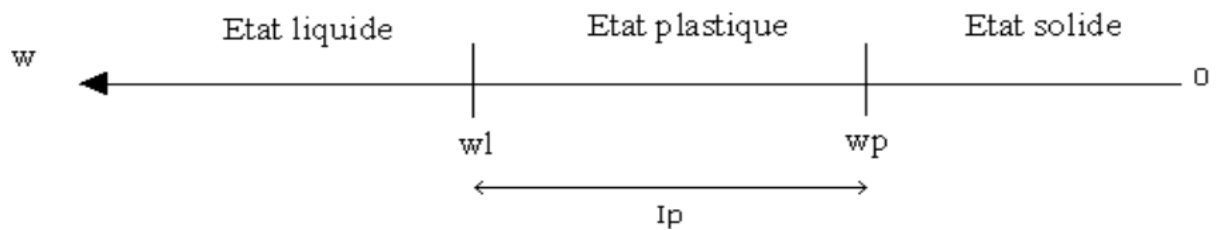


Fig II.4: états des limites d'Atterberg.

II .2.4. 2. .But :

Le but de ces tests est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique, et liquide. Il est important de noter que ces tests ne s'appliquent que pour les sols fins, définis comme ayant des grains de diamètres inférieurs à 0.04 [mm].

➤ Principe de détermination des limites de consistance :

Cette recherche des limites d'Atterberg comporte deux opérations:

-Recherche de la limite de liquidité W_L à l'aide de l'appareil de Casagrande. C'est la teneur en eau du sol qui correspond à une fermeture sur un centimètre des lèvres de la rainure après 25chocs à l'appareil de Casagrande.

- Recherche de la limite de plasticité W_P

par formation de rouleau de 3mmde diamètre. C'est la teneur en eau pour laquelle le sol commence des'effriter lorsqu'on le transforme en rouleau de 3mm de diamètre.

• 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.7)

Pour ce, on utilise la coupole de Casagrande, qui consiste en un appareillage composé d'un bol et d'un arbre à came permettant de transformer le mouvement de rotation en translation, on arrive donc à élever le bol d'une certaine hauteur et de le laisser retomber sur un plan rigide. Pour réaliser ce premier test, il faut :

- Humidifier l'échantillon de sol fin .
- L'homogénéiser.

- Etaler l'échantillon dans le bol, de manière à avoir une épaisseur à peu près constante, de 1 [cm], avec une surface horizontale.
- Appliquer une rainure au milieu, séparant l'échantillon en deux parties distinctes et égales, de manière à voir le fond du bol.
- Tourner la manivelle en comptant la norme de fois que le bol s'est élevé puis rabattu jusqu'à ce que la fente se referme.
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.

- **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 cm. On exécute en général, 2 essais pour déterminer cette limite. (Voir Photo II.9)

Détermination de la limite de plasticité :

Pour déterminer cette limite, le procédé est le suivant :

- Prendre un échantillon séché de sol fin
- Y ajouter un peu d'eau et homogénéiser le mélange
- Former trois fil de 3 [mm] de diamètre et de 10 [cm] de longueur sur le modèle d'une petite barre de fer
- Rouler les fils sur une planche de bois, servant à l'assécher au fur et à mesure, jusqu'à l'apparition des premières fissures. Les rétrécir si nécessaire pour maintenir la même longueur (10 [cm])
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.

- **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.6: présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau.

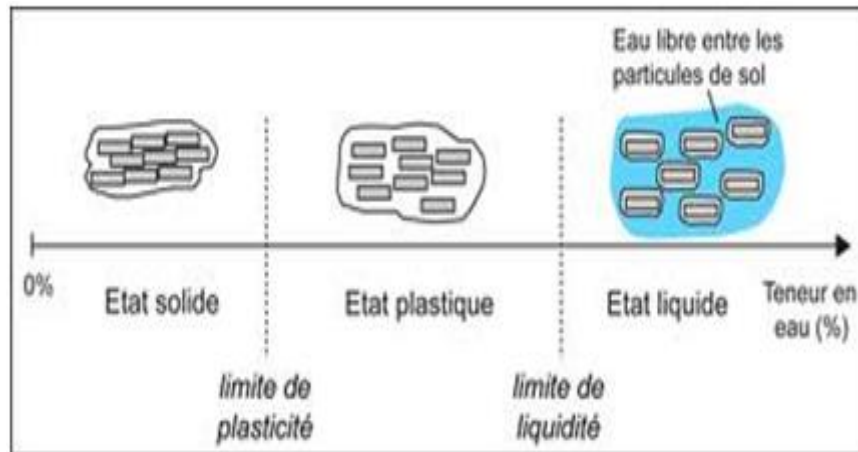


Figure II. 5 Etat de teneur en eau (<http://geoslab.fr/>).

La classification des sols selon la limite de liquidité et l'indice de plasticité est présenté sur le tableau II.2.

Tableau II.2: 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.3.

Tableau II.3: 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

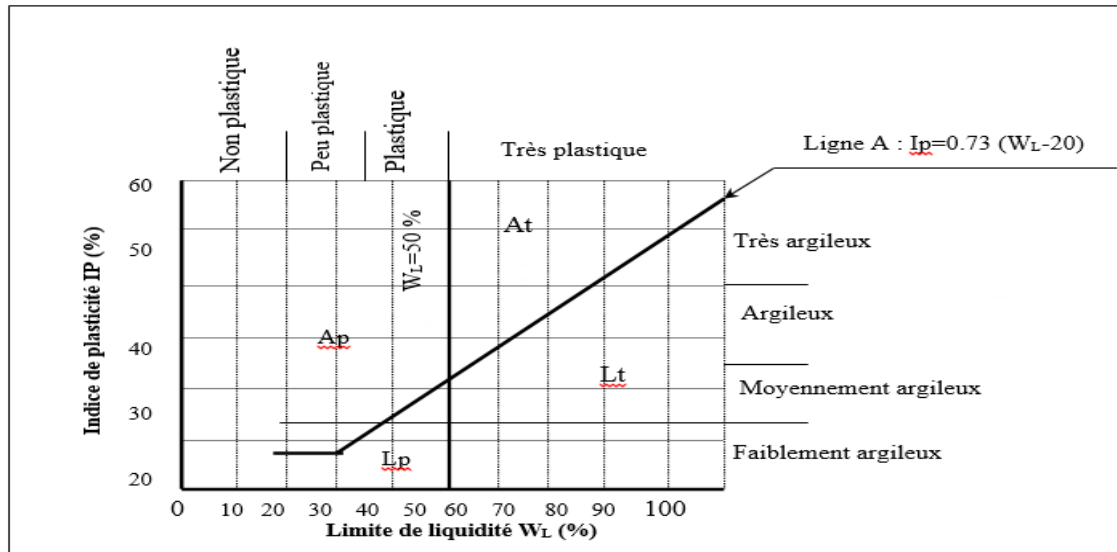


Figure II.6: Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997).

Avec :

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

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

➤ **Appareillage:**

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



Photo II. 8 : Boite de Casagrande (limite de liquidité).



Photo II. 9 Essai de limite de plasticité.

2.6. 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.10).

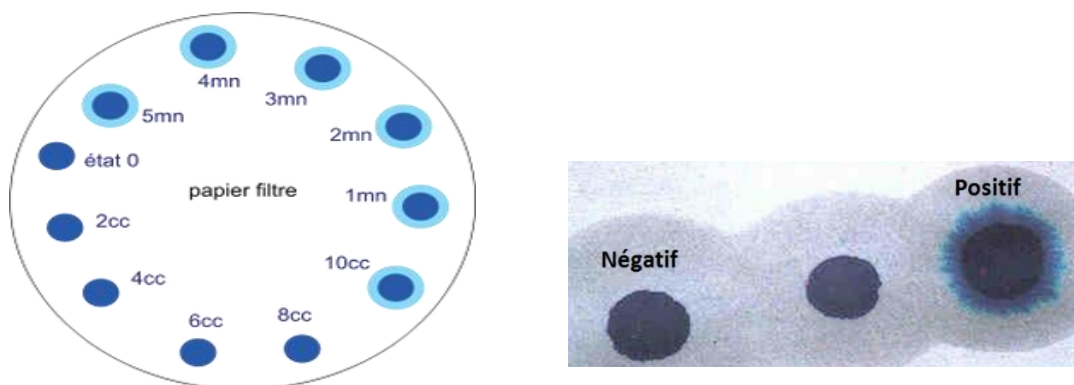


Photo II. 10 Le cas positif et négatif de l'essai de bleu.

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 μm) 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

II .2.5. Essai de Proctor

II .2.5.1. Définition :

C'est un essai de compactage, qui consiste à appliquer suffisamment d'énergie sur un sol pour y réduire l'indice des vides .

II .2.5.2. Le but de l'essai:

Le compactage d'un sol vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols.

Il est fonction de quatre principales variables :

- la masse volumique du sol sec.
- la teneur en eau .
- l'énergie de compactage .
- le type de sol (étalement granulométrique, présence de minéraux argileux, ...)

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

II .2.5.3. 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_d^{max} 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 du directeur du L.C.P.C numiro (2128) : « l'essai proctor normale et l'essai proctor modifié dont les caractéristique sont données dans le tableau II. 4 : n 2128

- **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 : $\varnothing = 101.6 \text{ mm}$, $H = 117 \text{ mm}$

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. 11: Moule Proctor Normal avec la dame dans laboratoire de Génie Civil (Laghout).



Photo II. 12: Moule Proctor Normal avec la dame.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et l'on trace la courbe des variations de cette masse en fonction de la teneur en eau. Chaque point tracé sur la courbe représente un essai de compactage. La détermination complète de la courbe requiert généralement 5 points.

- **masse volumique sèche** $\rho_d = \rho / (1 + W)$
- **masse volumique totale** $\rho = M_t / V_t$

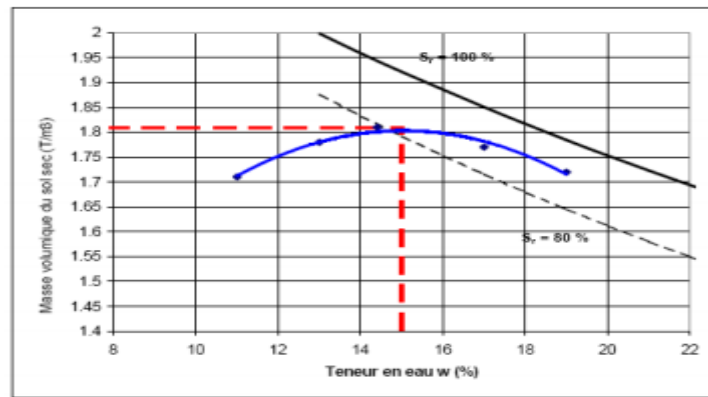


Figure II.7: courbe de la masse volmique en fonction en eau.

II .3. Essais Mécaniques

➤ But des essais:

Ces essais consistent à soumettre les éprouvettes compactées à des efforts de compression simple et de traction.

II .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.8 et figure II.12).

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

II 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.10), parmi ces essais nous citons

➤ Matériaux utilisés :

- Moule :

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu une moule selon le modèle de Guettala et al. (Guettala, 2006). Il est en acier trempé, et

il esomposé de 5 éléments formant après montage un volume de 10x10x20 cm Le moule es muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse amélange.

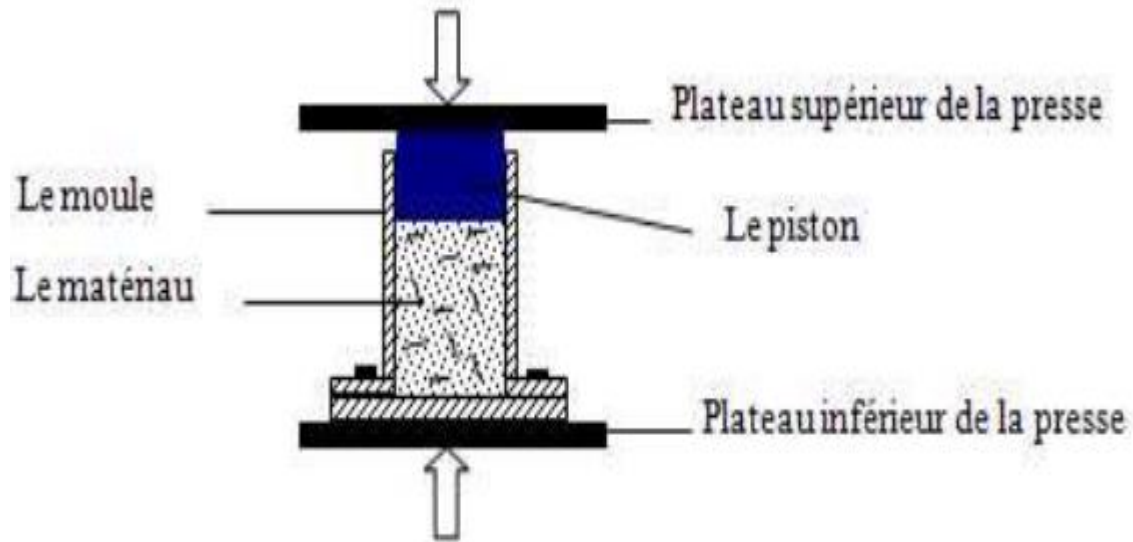


Fig II.8: Le schéma du moule dans la presse .

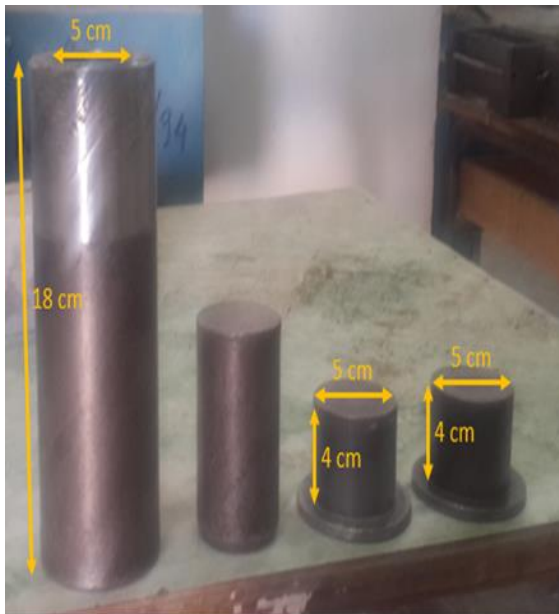


Photo II.14 : Moule utilisé dans le compactage



Photo II.13 : La presse de lecrasement en Laboratoire (G.C) laghaut



Photo II.15 : La presse(systemme afertissement par ordinateur).



Photo II.16 : materiel utilisé pour coupe les fibre l' halfe

➤ Préparation des échantillons

Partie1 :

Couper une longueur de fibre halfa (1cm ,2cm)

Les essais sont réalisés sur des échantillons des melanges(argile+sable) et compactés a 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) tout les mélange ajoute (2% fibre halfa, fibre halfa 4% ; fibre halfa 6%) on a procede a une ajoute de(2%,4%,6%) de fibre pour tout les melange.

Les longuers des fibres sont 1cm et 2cm.

les melange(% A+ % S+% F) sont etestabilise par ajout de liant hudraulique °chaux° de 3 % et 6% .

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.14).

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

Partie 2 :

Pour le traitement ajoute quantité de (3 % chaux,% 6chaux) dans les échantillons qui donne plus Résistance à la compression simple

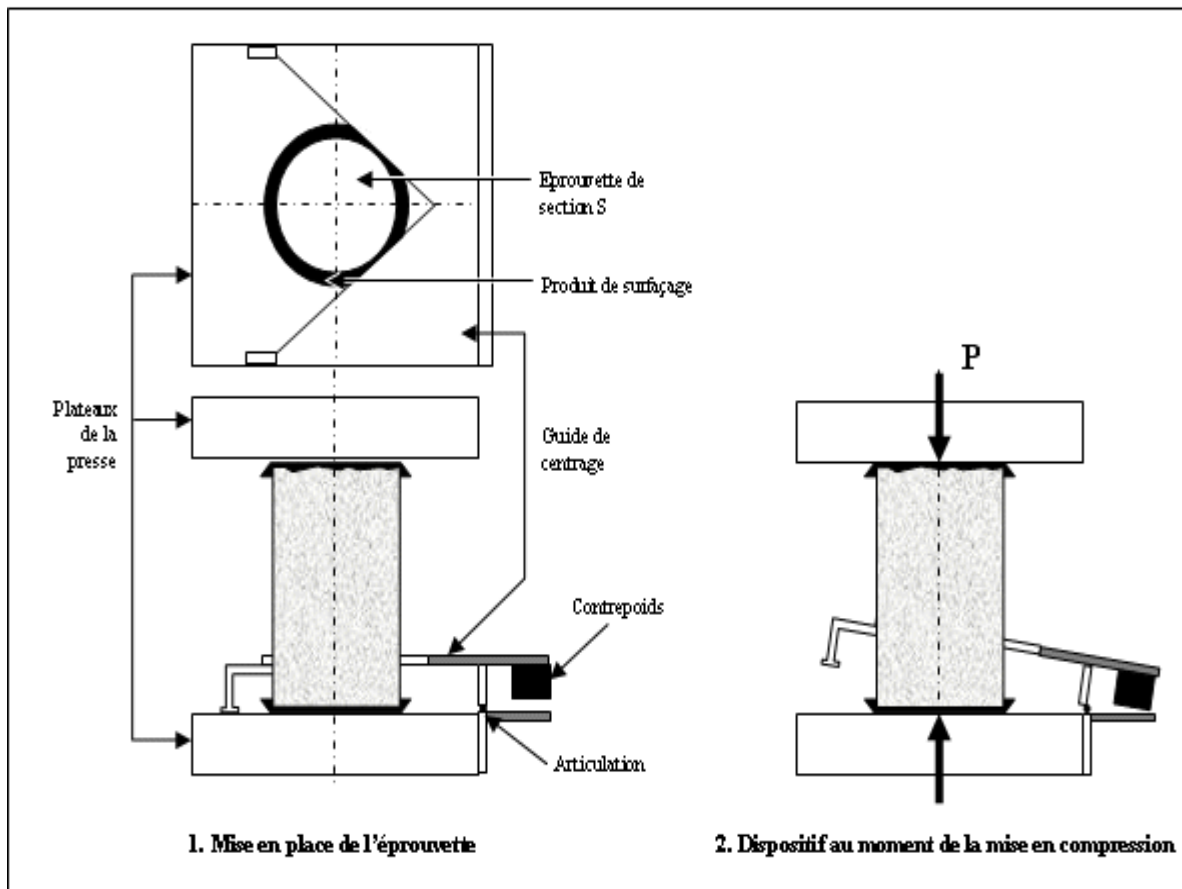


Figure II. 9: Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse.

- 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.10 et figure II.11)

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

R_t : Résistance à la traction

R_{tb} : Résistance à la traction par fendage

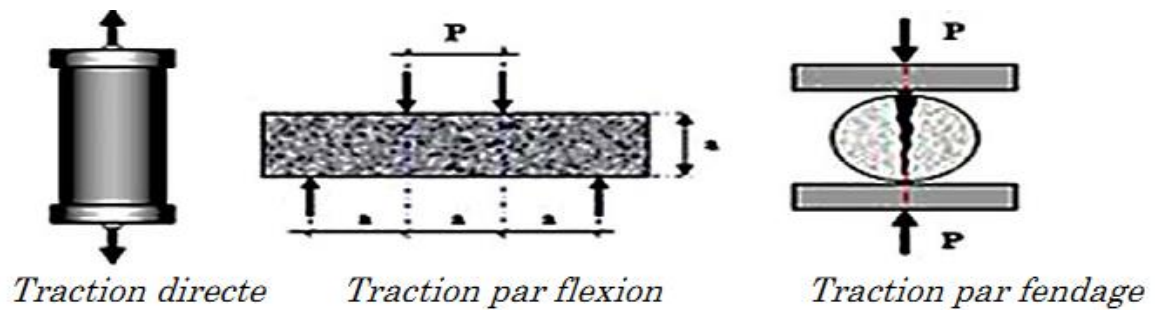


Figure 10: Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.

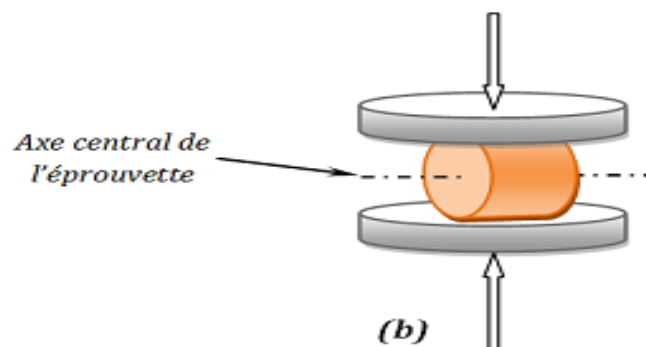


Figure II. 11: Schéma du mode d'application de l'effort de Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale.

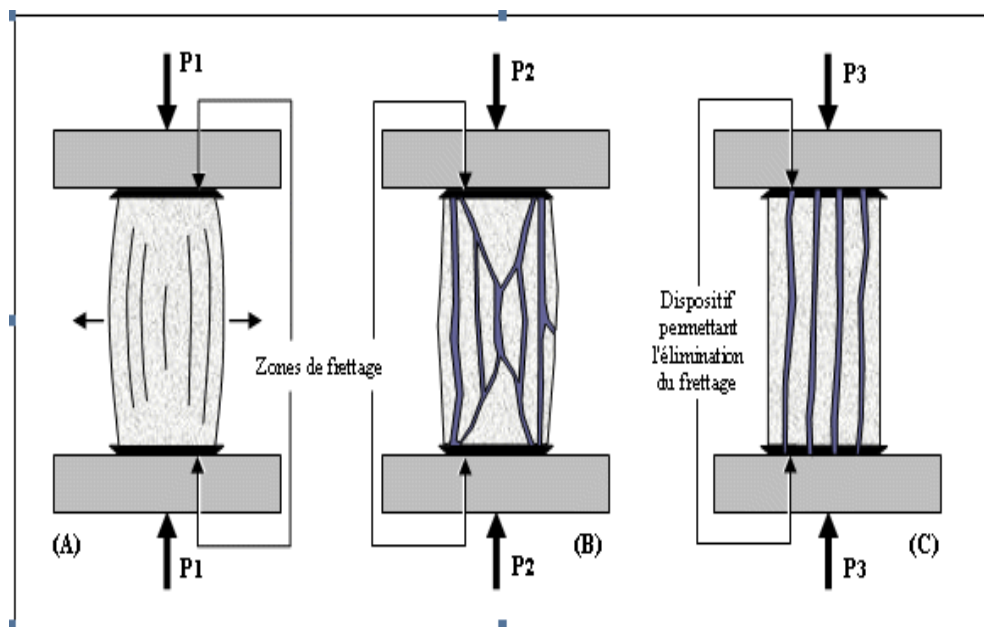


Figure II. 10: Schéma Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression

II .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

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 trois matériaux radicalement différents (Argile, Sable de dune et fibre) utilisé pour confectionner les blocs en terre.

2. Caractérisations des matériaux

2.1. Echantillonnage :

2.1.1. 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.

2.1.2. 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).



Photo III 2 : zone de provenance du sable de dune (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 (apparentes et absolues).
- 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 :

2. Analyse granulométrique.
3. Essais « équivalent de sable ».
4. Essai au bleu méthylène.

2.2.1. Argile :

➤ Masse Volumique :

- Les résultats des masses volumiques représentent 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.

γ_{app} moyenne (g/cm^3)	1.415
γ_{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.

γ_{ab} moyenne (g/cm^3)	1.93
γ_{ab} moyenne (kg/m^3)	1930

➤ Analyse Chimique :

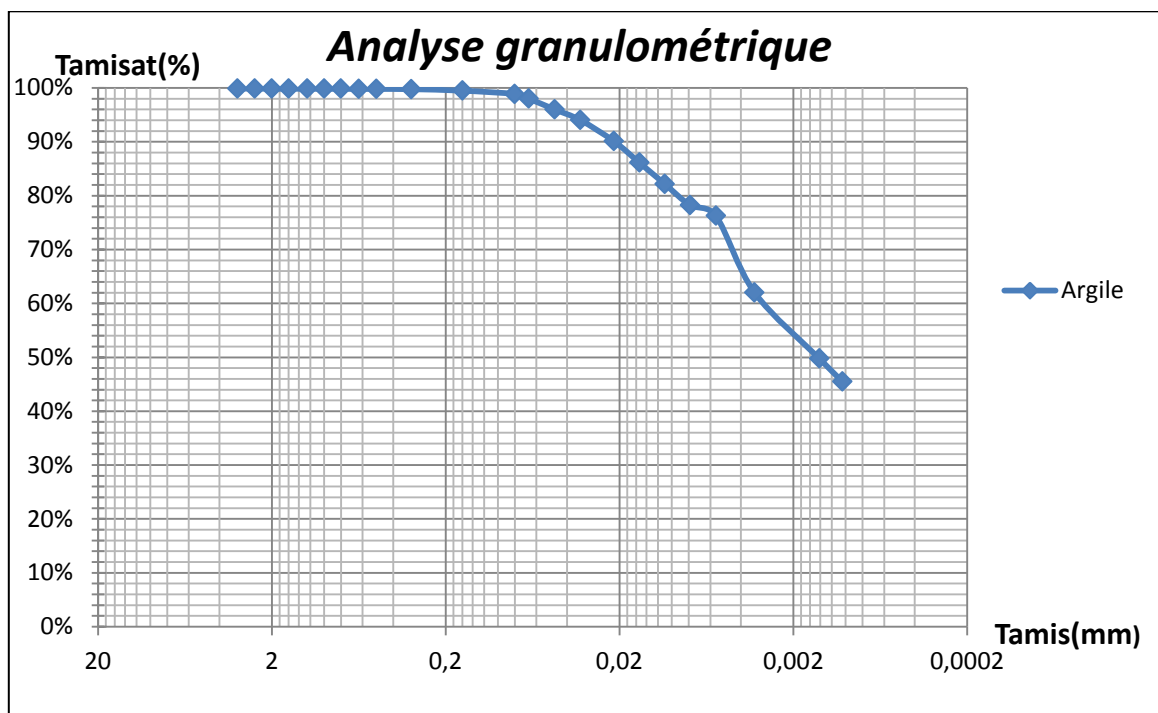
Le **Tableau III.3** : présente les résultats analyses chimiques de l'argile.

Tableau III. 3 Analyse chimique de l'argile.

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

➤ **Analyse Granulométrique :**

Les résultent de l'analyse granulométrique de l'argile sont le figure III.3.



Le Figure III. 1 : Courbe granulométrique de l'argile.

D'après le tableau III.2, plus que 98% du passant sont inférieur à 0.08 Ø (80 µm) et 50% la norme du passant sont inférieur à 0,001Ø.

➤ **Les limites d'Atterberg :**

Les résultants des limites de l'argile ont présentés dans le tableau III.3

Tableau III. 4 Les limites d'Atterberg de l'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.2).

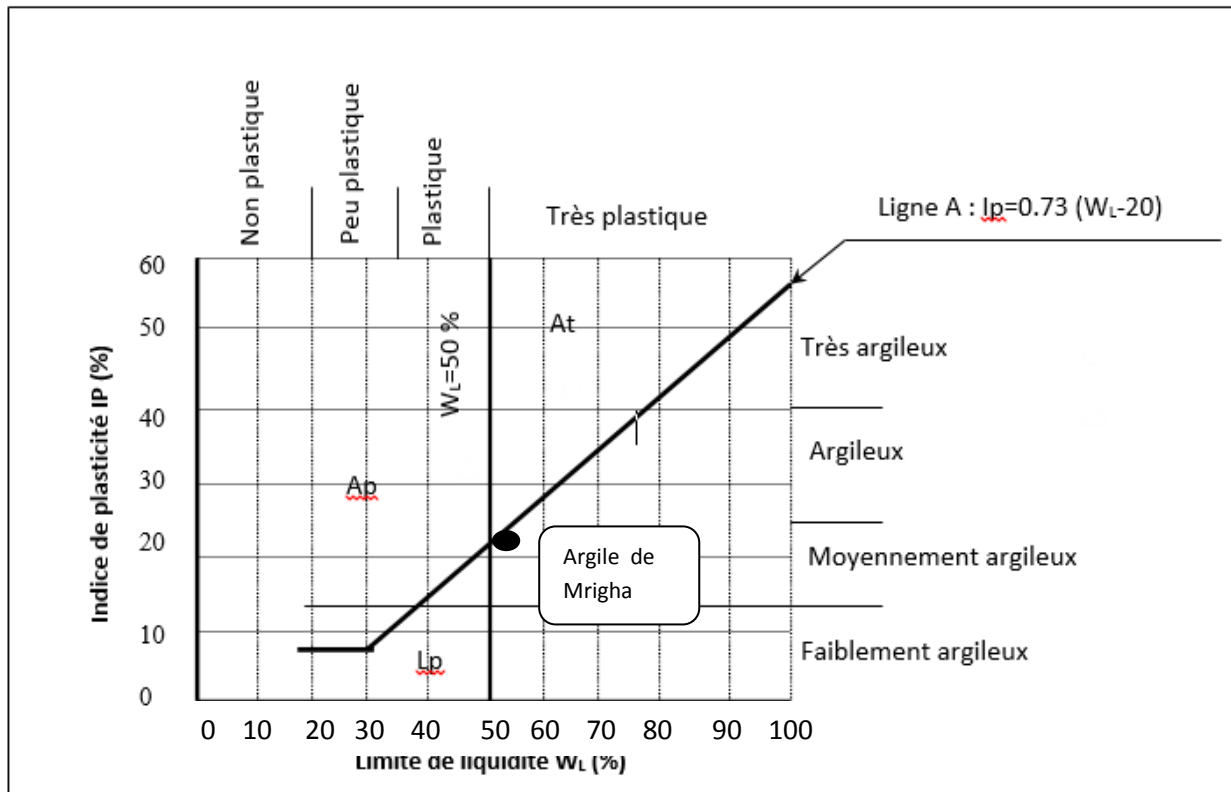


Figure III. 2 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert., 1997).

- notre sol se classe parmi les sols plastiques à très plastique moyennement argileux.

➤ Essai de Proctor Normal :

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.5 représente la courbe de Proctor Normal du sol utilisé (Argile).

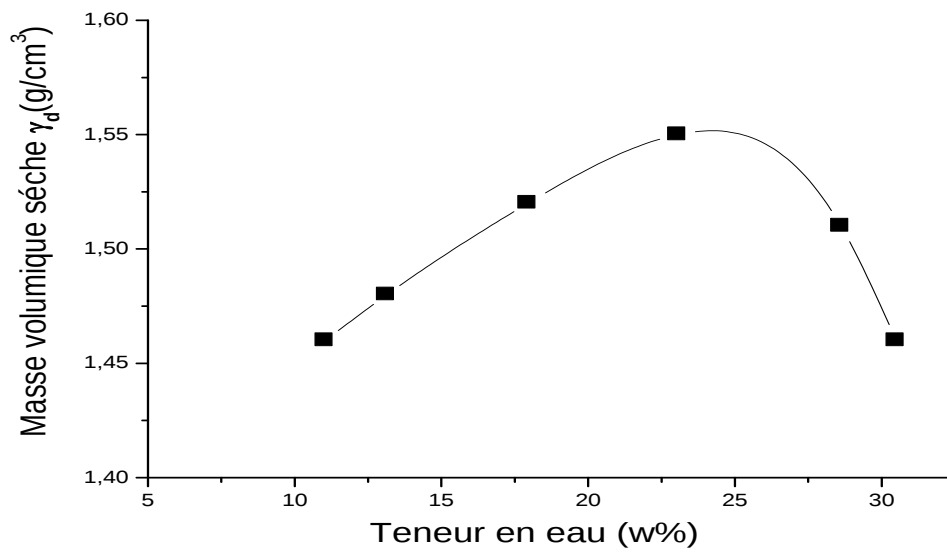


Figure III. 3 : Courbe Proctor d'argile utilisé

Les résultats de l'essai Proctor Normal montre que l'argile remède 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.5

Tableau III. 5 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 page 38, l'argile étudiée est classée comme une 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.6 (Gueddouda.K, 2005)

Tableau III.6 : 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 :

L'essai normalisé (NF P 18-560), par voie 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.6

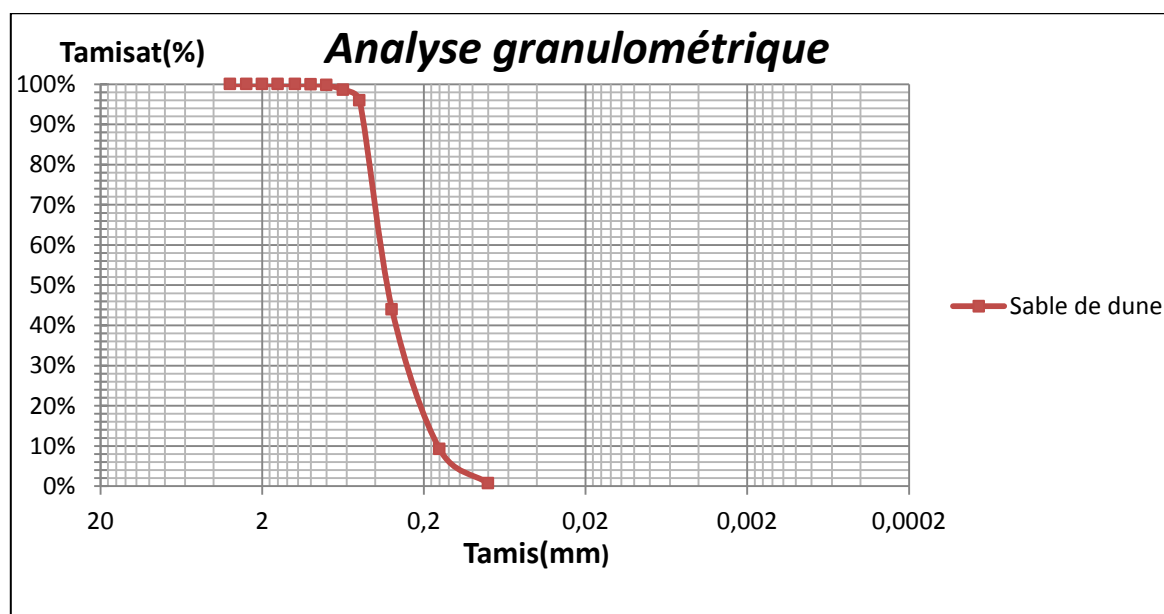


Figure III. 4 : Courbe granulométrique du sable de dune.

Tableau III. 7 : Paramètres d'identifications de sable de dune.

	Granulométrie	
Paramètres	Cu	Cc
Sable	1,67	1,1

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

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

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (technique de l'ingénieur.208), 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.8.

Tableau III. 8 : Résultats de l'essai équivalent de sable.

	Equivalent de sable	
Paramètres	ES _v	ES _p
sable	86.17	74.20

Le sable de dune est classé parmi les sables propres. Selon le tableaux de chapitre II

➤ **Essai au bleu de méthylène :**

Les résultats de cet essai sont inclus dans le tableau III.8.

Tableau III. 9 Paramètres d'identifications de sable de dune.

	Bleu de méthylène	
Paramètres	V _B	Sst (m2/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 (Bensaâda.A ,2011)

➤ 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 SiO_2 , et aluminates Al_2O_3 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.10

Tableau III. 10: 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_2O_3	< 2%	< 2%
Al_2O_3	< 1,5%	< 1%
SiO_2	< 2,5%	< 2,2%
SO_3	< 0,5%	< 1%
$\text{K}_2\text{O}+\text{NaO}$	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%

➤ Propriétés physiques de la chaux Saida : [5]

2.2.4. Les fibres de l'alfa

2.2.4.1. Définition :

La fibre d'Alfa est une fibre aux caractéristiques uniques, de par sa nature fine, courte et assez rigide, la fibre d'alfa constitue l'une des rares matières premières permettant de fabriquer un papier fin de haute qualité. Grâce à la finesse de ses fibres et ses parois minces, l'alfa permet d'obtenir un nombre de fibres par gramme plus élevé que pour les fibres courtes d'autres origines.

L'extraction de fibres est un procédé classique dans le textile. Souvent les fibres naturelles se présentent sous une forme qui ne permet pas leur filage, donc il faut transformer par extraction et purification la matière première ou brute en une forme filable.



Photos III.3 : Les fibres d'Alfa.

2.2.4.2. Composition chimique

- Tout d'abord il est intéressant de connaître la répartition des différents composants de l'alfa. O. Akchiche, et al ont publié en 1987 des résultats d'analyses chimiques. Ils ont trouvé 74.5% hydrocarbures, parmi lesquelles la cellulose, hémicellulose et les pectines, et 18.5% de lignine. Les taux des composants varient selon la source.

Tableau III.10 : Composition chimique des fibres :

Matière	(%) [8]	(%) [6]	(%) [7]	(%) [9]
Cellulose	43 ,81	45	45	47 ,63
Laignine	18,76	23	24	17,71
Cendres	4,66	2	2	5,12
Silica	1,76			
Hémicellulose/Pectines	28,4	24	25	22,14
Cires		5	5	
Extraction et autres	2,61			7,39
Somme (%)	100	100	100	100

2.2.4.3. Les caractéristiques physiques : [3]**Mesure la masse volumique des fibres de 1cm:**

Les masses volumiques apparentes des fibres de 1 cm non traitées et séchées à masse constante sont de l'ordre de 0,714 g /ml .

.

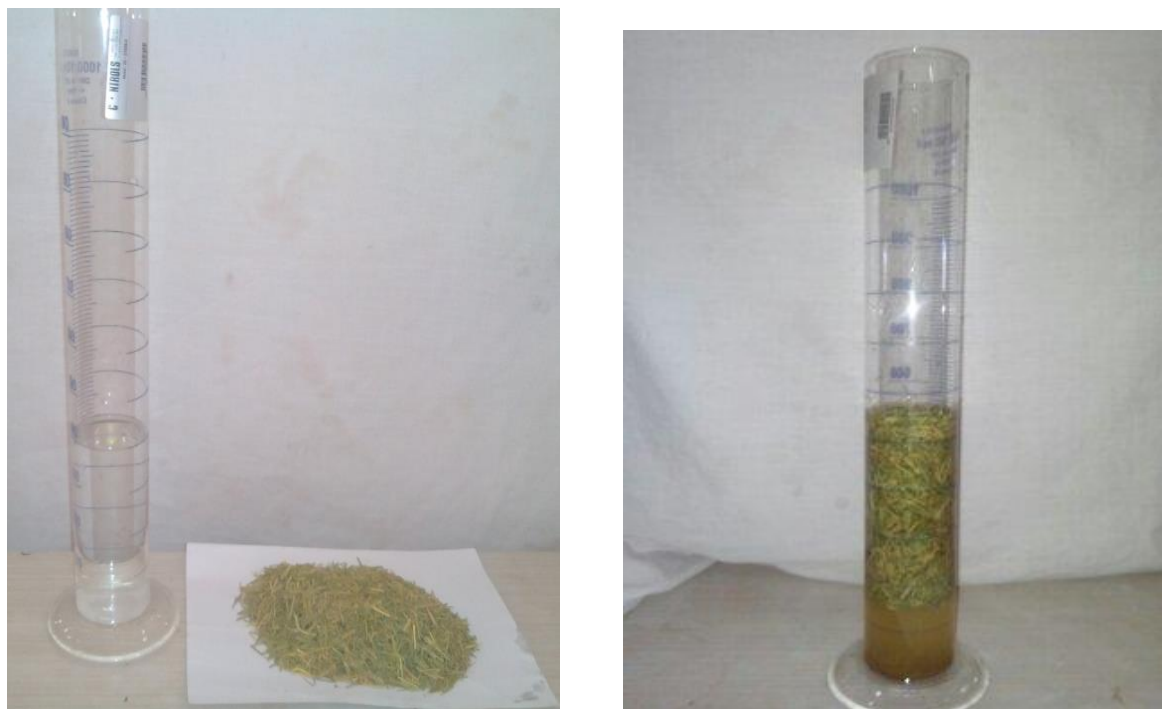
$$v_0 = 400 \text{ ml} \quad v_1 = 540 \text{ ml} \quad M = 100 \text{ g} \quad P = \frac{M}{V_1 - V_0}$$

$$p = 0.714 \text{ ml/g}$$

Mesure la masse volumique des fibres de 2cm

$$v_0 = 400 \text{ ml} \quad v_1 = 564 \text{ ml} \quad M = 100 \text{ g} \quad P = \frac{M}{V_1 - V_0}$$

$$p = 0,609 \text{ ml/g}$$



Photos III 4 : mesure la masse volumique de des fibres de 1cm et 2cm.

Les essais mécaniques :

Les essais mécaniques exécutés sur les fibres longues sont des essais de traction. L'appareil de traction est équipé du capteur le plus petit car il s'agit de fibres fines et fragiles.

Les courbes de traction donnent la force en fonction de l'allongement. Normalement la contrainte est exprimée en fonction de la déformation relative. La conversion d'un allongement en une déformation relative est facile à calculer en divisant l'allongement par la longueur initiale. Cette longueur initiale est la distance entre les deux pièges de l'appareil. Elle est choisie au début et reste constante tout au long des essais mécaniques.

La force est transformée en une contrainte en la divisant par la surface de la fibre, mais le problème est que le diamètre, et donc également la surface, des fibres est inconnu. Néanmoins le diamètre est estimé pour que la conversion soit possible.



photosIII.5 : essais de traction des fibres de 1cm et 2cm et 3cm.

.Problèmes de faire l'essai :

- Coupage des fibres d'alfa.
- disposition de fibre d'alfa dans les mélanges et dans l'échantillon.
- difficile de malaxé la chaux et les fibre d'alfa

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 : Résultats et interprétations

IV.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- fibre 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) pour arriver à un mélange optimal qui satisfait les réglementations en vigueur en vue de construire des blocs en terre comprimé...)

IV.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),

Les essais réalisés sur chaque mélange sont présente sur figer IV.1

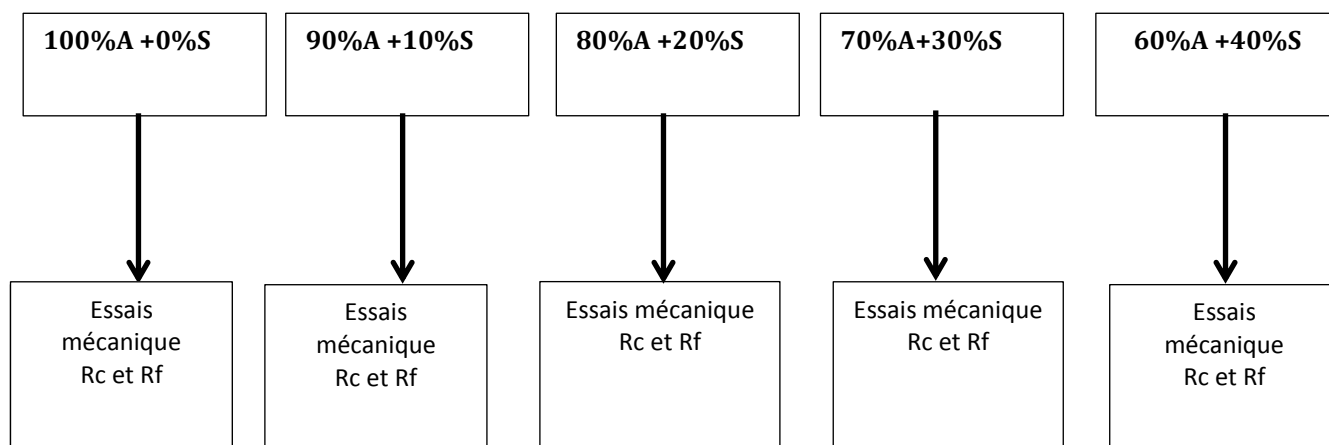


Figure IV.1 : organigramme présente programme d'essais.

R_c : résistance à la compression.

R_t : résistance à la traction.

- **1^{er} partie** : la mélange A% +S% sont renforcés par des fibres de 1 et 2 cm à différents pourcentages (2% ,4%,6%).



Figure IV.1 : organigramme présente programme d'essais de mélange 1 cm.

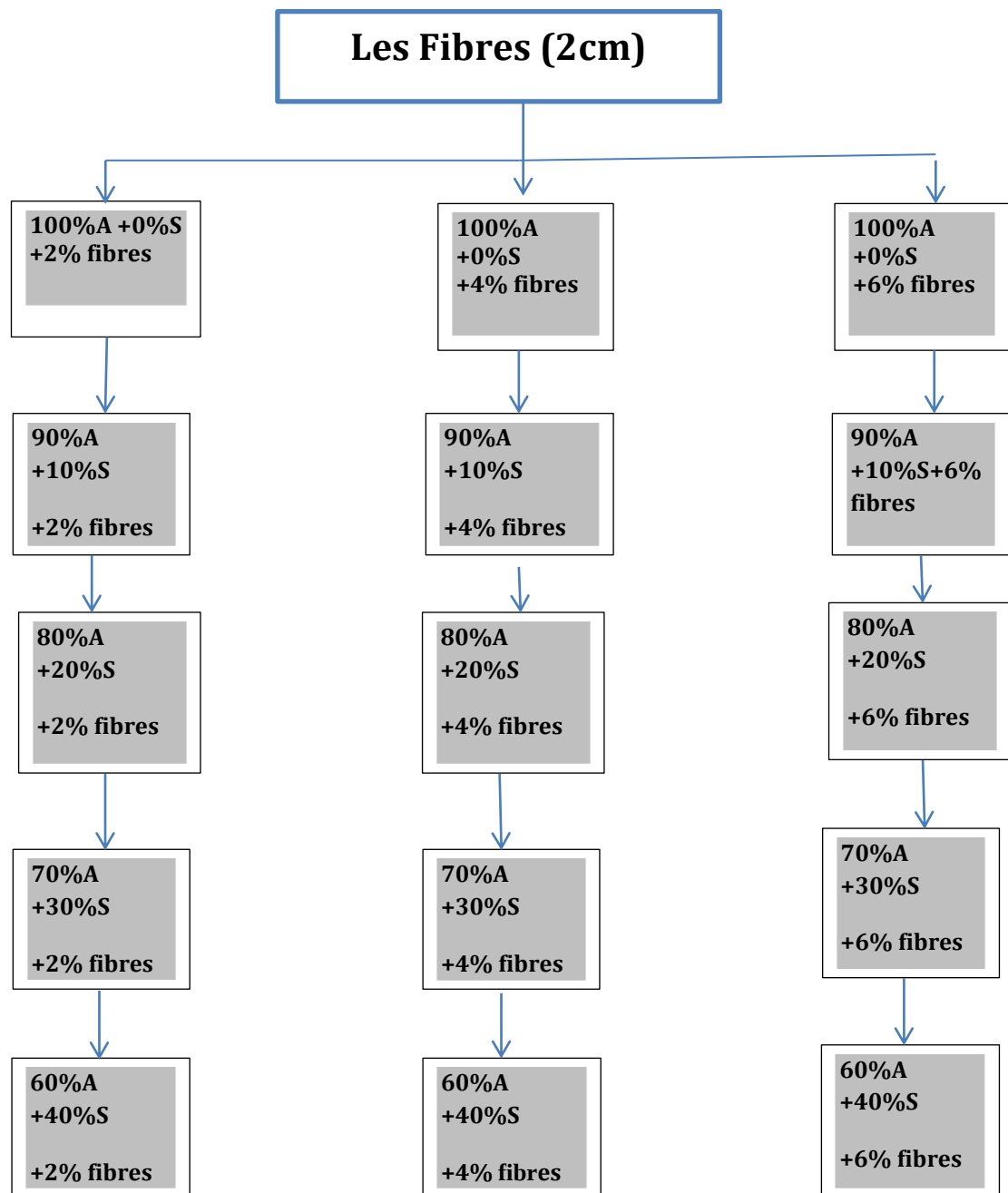


Figure IV.1 : organigramme présente programme d'essais de mélange 2cm.

2^{ème} parte : les mélange optimale obtenus a' partir des résistances a' la compression sont traites par différent pourcentage la chaux (3% et 6%).

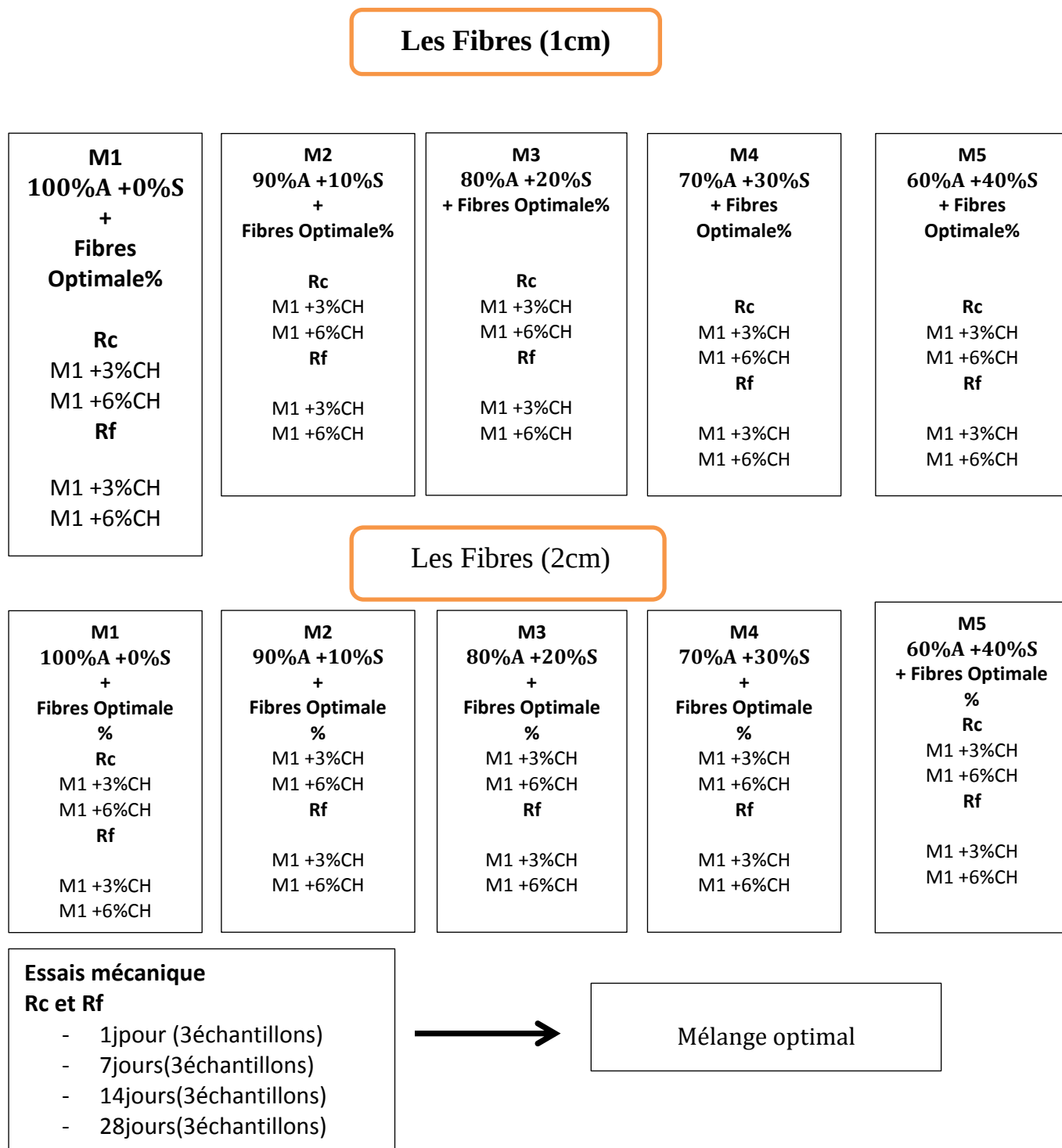


Figure IV.2. Plan de travail de la partie expérimentale.

A : Argile.

S : Sable de dune.

F : fibre

OPN : Optimum Proctor Normal.

Les mélanges étudiés correspondent à 1100 éprouvettes sont réparties comme suit :

- (2× 300) éprouvettes soumis à la compression simple pour les mélanges non traités renforcés par des fibres de 1 cm et 2 cm (Voir tableau IV.1).
- (2×125) éprouvettes soumis à la compression simple pour les mélanges traités à la chaux (3% et 6%) .
- (2×125) éprouvettes soumis à la traction par fendage pour les mélanges traités à la chaux (3% et 6%) .
- Les résultats des essais mécaniques représentent la moyenne de 3 essais ..

Tableau IV.1 Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude (essais de compression pour les fibres de 1cm).

N° de mélange	Mélange	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibres %	Nombre des épreuves	Nombre totale
1	100% A	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	2%	20	60
				4%	20	
				6%	20	
2	90% A + 10 % S	$\gamma_{dopt}=1,63$	$W_{opt}=16,04$	2%	20	60
				4%	20	
				6%	20	
3	80% A + 20 % S	$\gamma_{dopt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$	2%	20	60
				4%	20	
				6%	20	
4	70% A + 30 % S	$\gamma_{dopt}=1,7$	$W_{opt}=17,52$	2%	20	60
				4%	20	
				6%	20	
5	60% A + 40 % S	$\gamma_{dopt}=1,75$	$W_{opt}=16,86$	2%	20	60
				4%	20	
				6%	20	
					Totale	300

- ❖ Le même nombre pour les essais de compression pour les fibres de 2cm.



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



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



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

3. Essai de Proctor normal :

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.

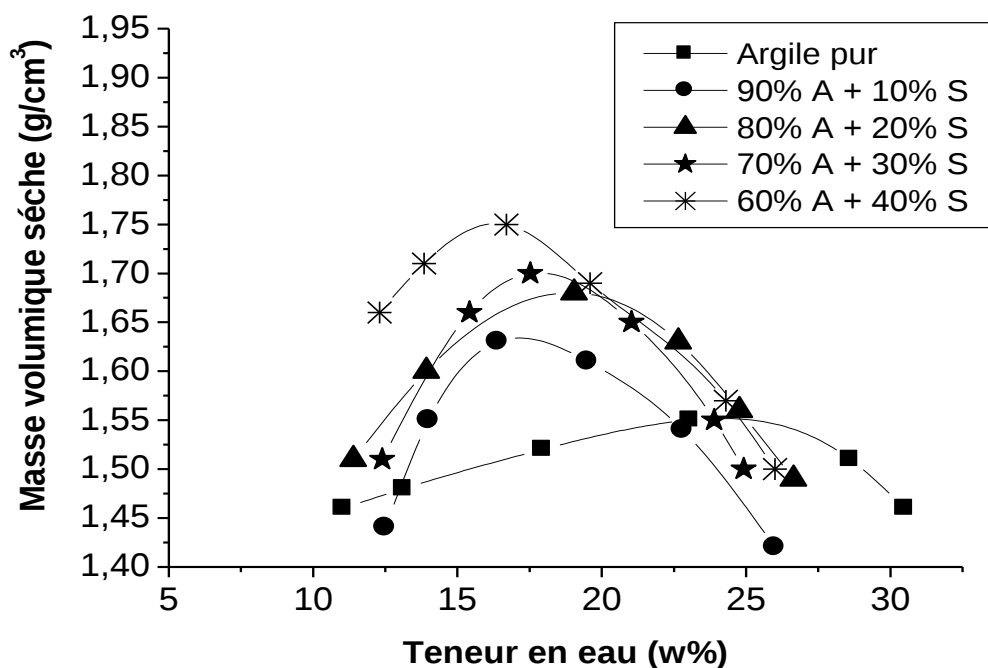


Figure IV.3. Courbes Proctor normal des différentes quantités de sable de dune ajouté

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.4 : 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.

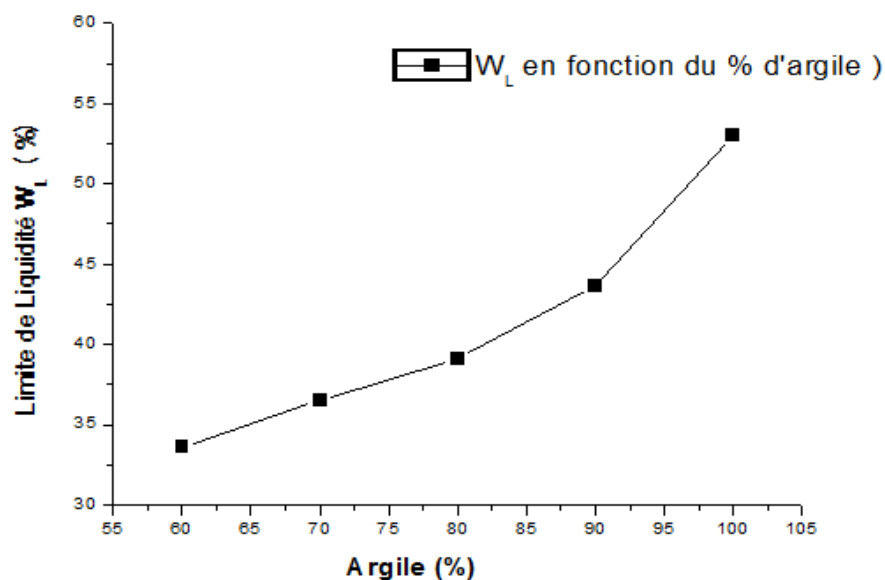


Figure IV.4 : Les limites de liquidité (W_L) en fonction de % d'argile.

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. Mélange Argile pure +% fibres 1cm :

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 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (100%A) en fonction d'âge :

100%A	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6 % Fibre
	γ_{dopt} =1,55	W _{opt} =23,05		1J	0,51	0,68	0,91
				7J	0,87	0,92	0,96
				14J	0,96	1,02	1,15
				28J	0,97	1,06	1,2

D'après le tableau IV .4 on trace les courbes de la figure IV.5 :

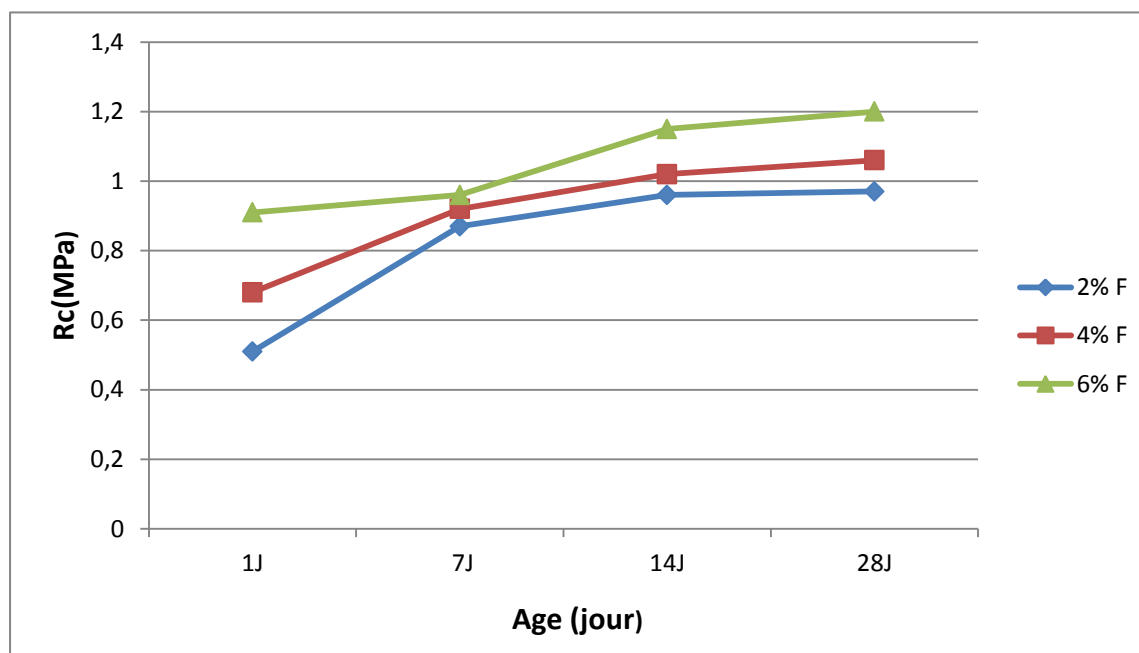


Figure IV.5 Mélange (100%A+F%).

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc).

pour le même mélange une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,2 MPa à 28 jours et 6%F ajoutés.

la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

argumentation l'adroitement de la résistance avec l'ajoute des fibres, à cause de l'effet de l'orientation.

5.1.2. Mélange 90% Argile et 10% sable +% fibres 1cm :

Tableau IV.5 : Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90%A+10%S+F%) en fonction d'âge :

90%A+10%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	$\gamma_{d1}=1,55$	$W_2=22,25$		1J	0,7	0,66	0,99
				7J	1,02	1,06	1,15
				14J	1,14	1,1	1,32
				28J	1,12	1,16	1,37

D'après le tableau IV. 5 on trace les courbes de la figure IV.6.

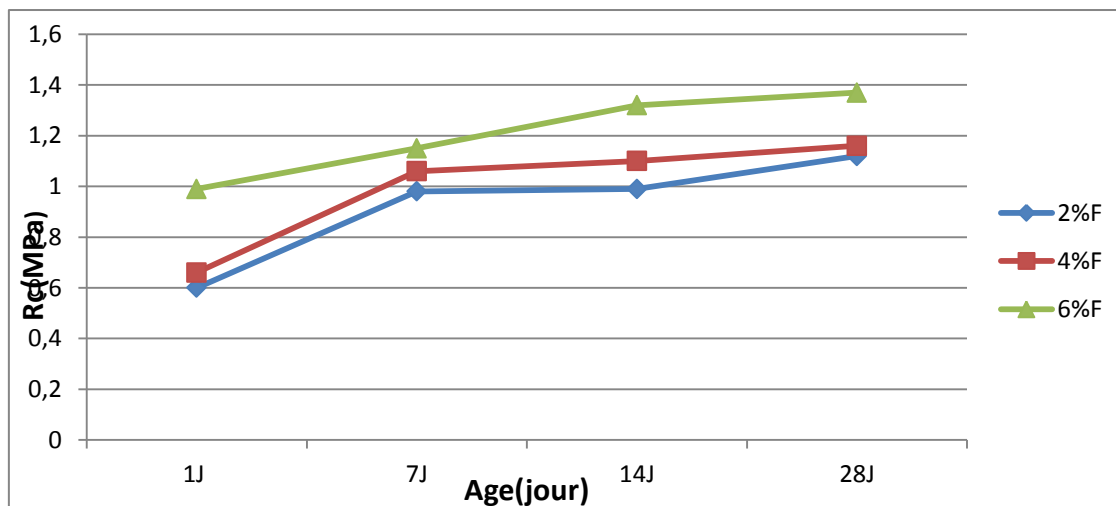


Figure IV.6. Mélange (90%A+10%S+F%).

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c). pour le même mélange une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,37 MPa à 28 jours et 6%F ajoutés. La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.1.3. Mélange 80% Argile et 20% sable +% fibres 1cm :

Tableau IV.6 : Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80%A+20%S+F%) en fonction d'âge :

80%A+20%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	$\gamma_{dopt}=1,67$	$W_{opt}=19,03$		1J	0,7	0,75	0,60
				7J	1,02	1,15	0,695
				14J	1,14	1,23	0,95
				28J	1,22	1,28	1,42

D'après le tableau IV. 6on trace les courbes de la figure IV. 7 :

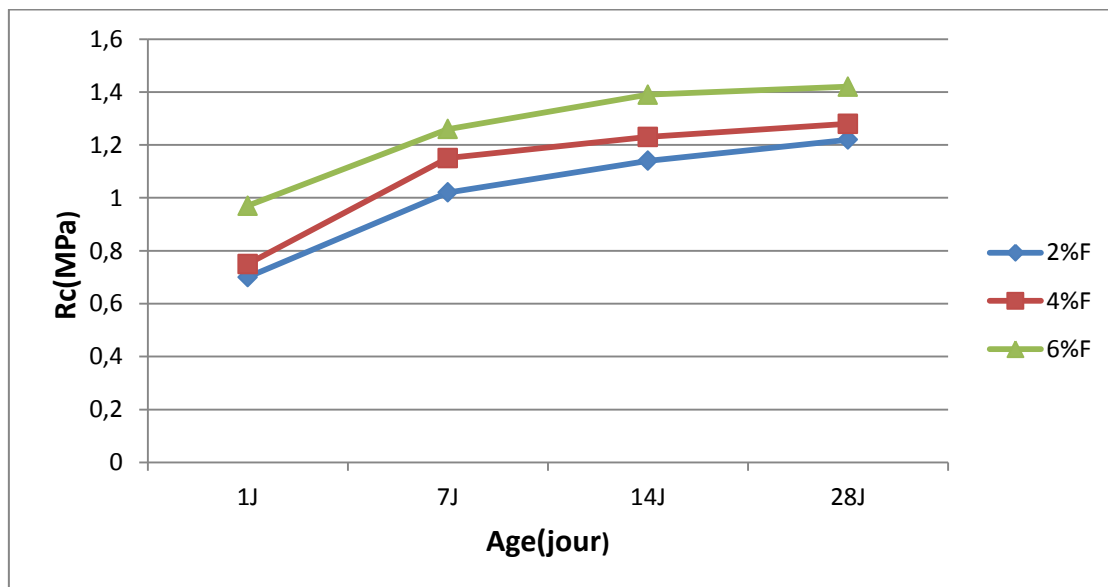


Figure IV.7 : Mélange (80%A+20%S+F%).

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc).

pour le même mélange une augmentation de la résistance à la compression (Rc) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,42 MPa à 28 jour et 6%F ajoutées.

La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.1.4. 70% Mélange Argile et 30% sable + % fibres 1cm :

Tableau IV.7 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70%A+30%S+F%) en fonction d'âge :

70%A+30%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	$\gamma_{d2}=1,66$	$W_{opt}=17,52$		1J	0,82	0,89	1,08
				7J	0,88	1,02	1,20
				14J	0,86	1,00	1,32
				28J	0,92	0,99	1,46

D'après le tableau IV. 7 on trace les courbes de la figure IV. 8 :

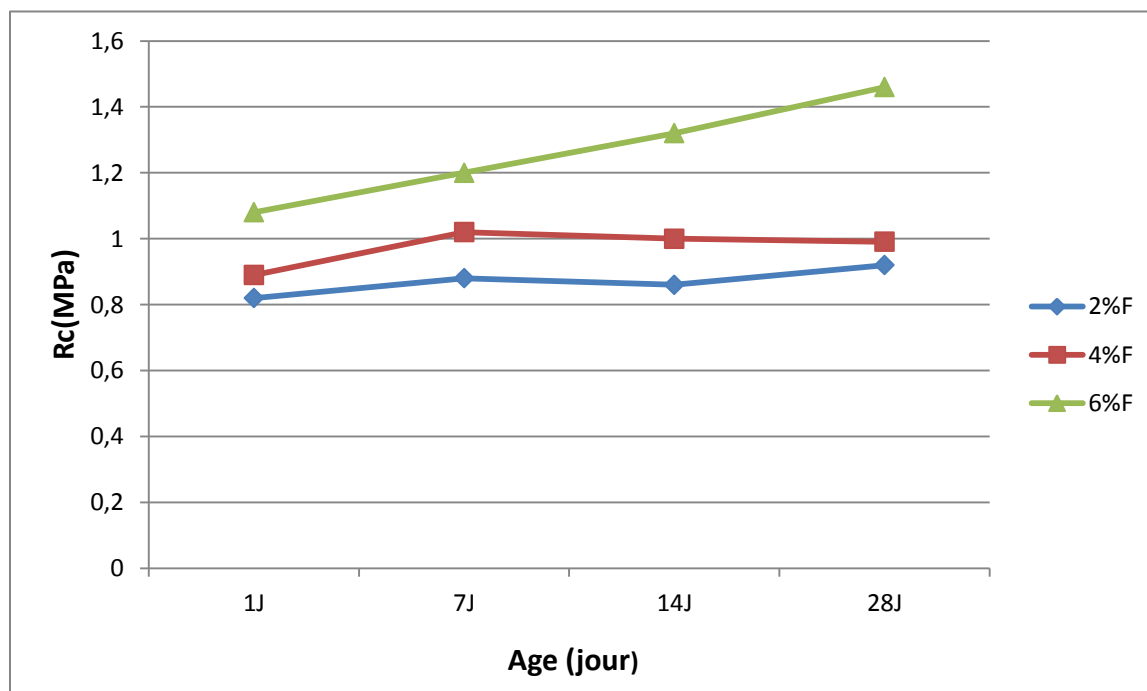


Figure IV.8 Mélange (70%A+30%S+F%).

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc). Elle atteint la valeur de 1,46 MPa à 28 jours et 6%F ajoutées.

La résistance à la compression augmente linéairement avec du pourcentage de 6% de fibres.

- Pour les parentages d 2%et 4% de fibres, l'augmentation est faible, elle tend vers un palier.

5.1.5. 60% Mélange Argile et 40% sable +% fibres 1cm :

Tableau IV.8 : Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60%A+40%S+F%) en fonction d'âge :

60%A+40%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour	2%	4%	6%
	$\gamma_{d2}=1,72$	W ₂ =18,00		1J	0,93	1,403	1,418
				7J	0,98	1,41	1,42
				14J	0,97	1,38	1,432
				28J	1,02	1,39	1,451

D'après le tableau IV .8 on trace les courbes de la figure IV. 9 :

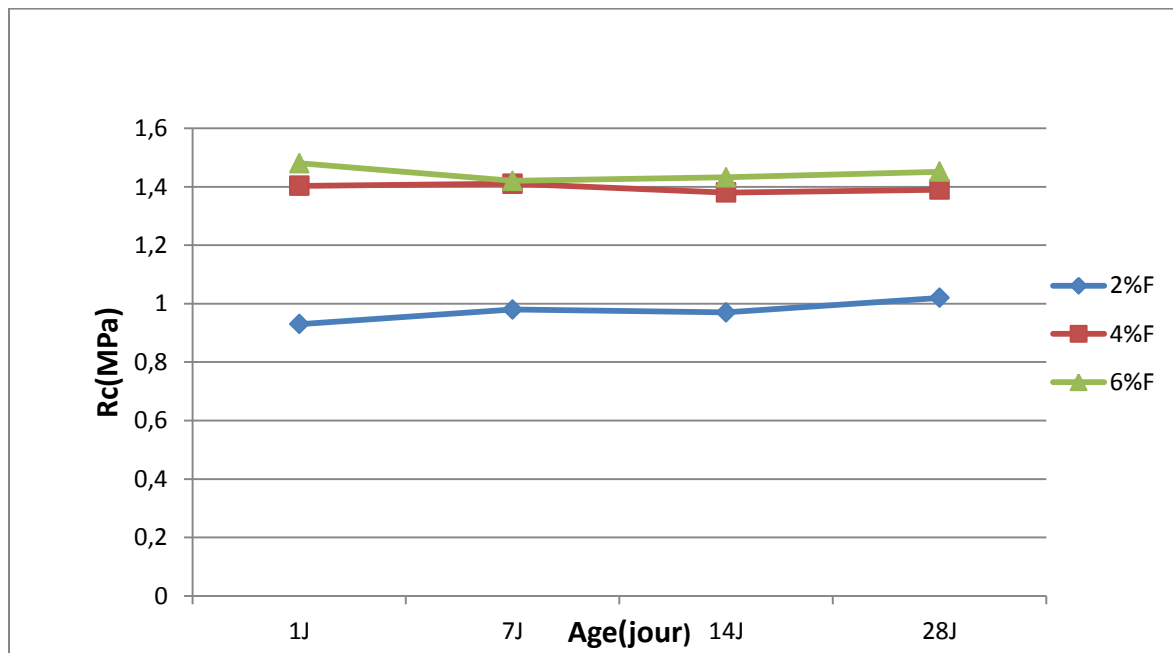


Figure IV.9. Mélange (60%A+40%S+F%)

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc). Elle atteint la valeur de 1,451 MPa à 28 jour et 6%F ajoutées.

.La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

- On remarque pour le même mélange, la résistance à la compression semble être constante en fonction de l'âge.

5.2. Résistance à la compression en fonction d'âge

5.2.1. Mélange Argile pure +% fibres 2cm :

Après l'écrasement l'évolution de la résistance (MPa) en fonction d'âge, les résultats sont présentés sur le tableau IV.9.

Tableau IV.9 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (100%A+F%) en fonction d'âge :

100%A	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6 % Fibre
	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$		1J	0,879	0,72	0,474
				7J	1,06	1,007	1,42
				14J	0,86	1,15	1,42
				28J	1,08	1,18	1,63

D'après le tableau IV.9 on trace les courbes de la figure IV.10 :

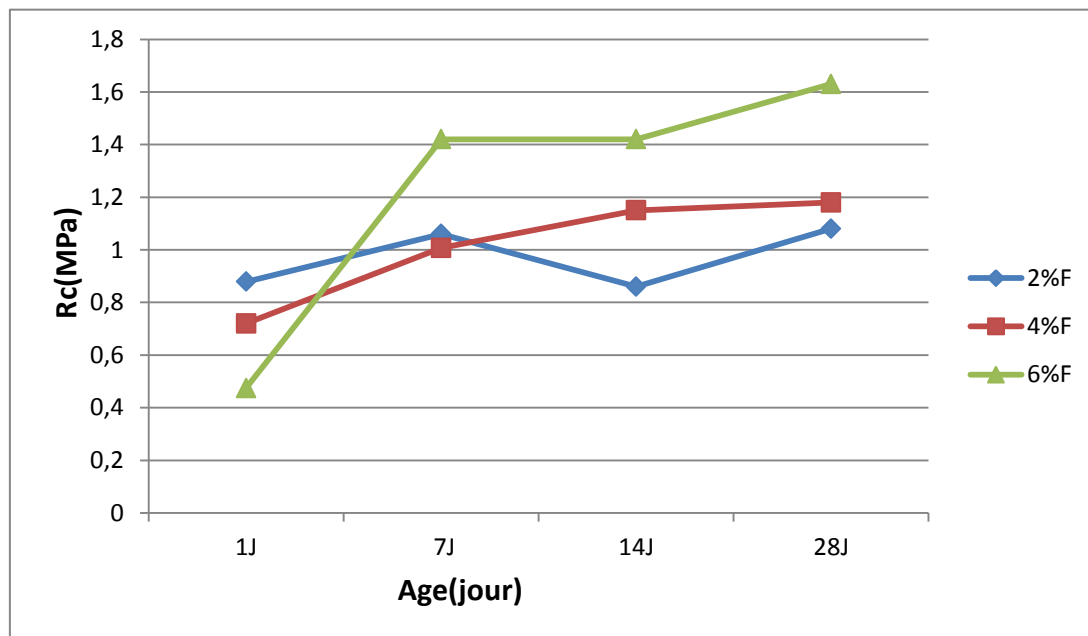


Figure IV.10 : Mélange (100%A+F%).

Pour les mêmes mélanges et pour même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,63 MPa à 28 jour et 6%F ajoutées.

En générale, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.2.2. Mélange 90% Argile et 10% sable +% fibres 2cm :

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

90%A+10%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	γ_{d1} =1,55	W ₂ =22,25		1J	0,60	0,69	0,678
				7J	1,10	1,549	2,547
				14J	1,625	1,90	1,586
				28J	1,85	1,88	2,659

D'après le tableau IV.10 on trace les courbes de la figure IV.11 :

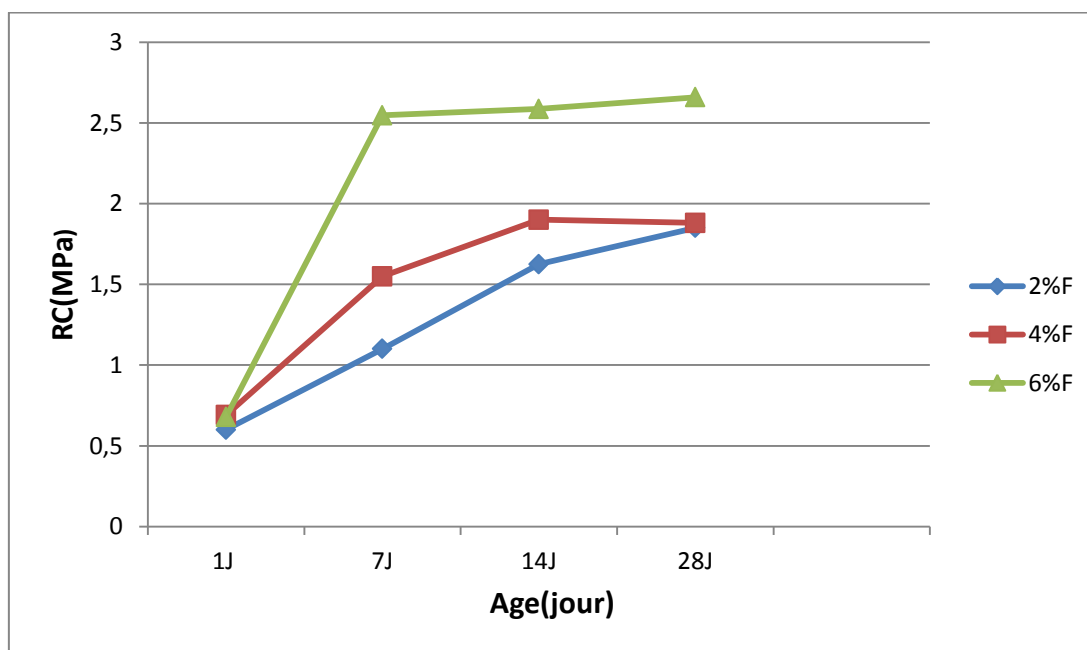


Figure IV.11 Mélange (90%A+10%S+F%).

Pour le même mélange optimum, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 2,65 MPa à 28 jour et 6%F ajoutés.

En générale, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.2.3. Mélange 80% Argile et 20% sable +% fibres 2cm :

Tableau IV.11 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80%A+20%S+F%) en fonction d'âge :

80%A+20%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	γ_{dopt} =1,67	W_{opt} =19,03		1J	1,015	1,50	1,12
				7J	1,872	1,44	1,22
				14J	1,843	1,389	1,34
				28J	2,06	1,55	1,89

D'après le tableau IV.11 on trace les courbes de la figure IV.12 :

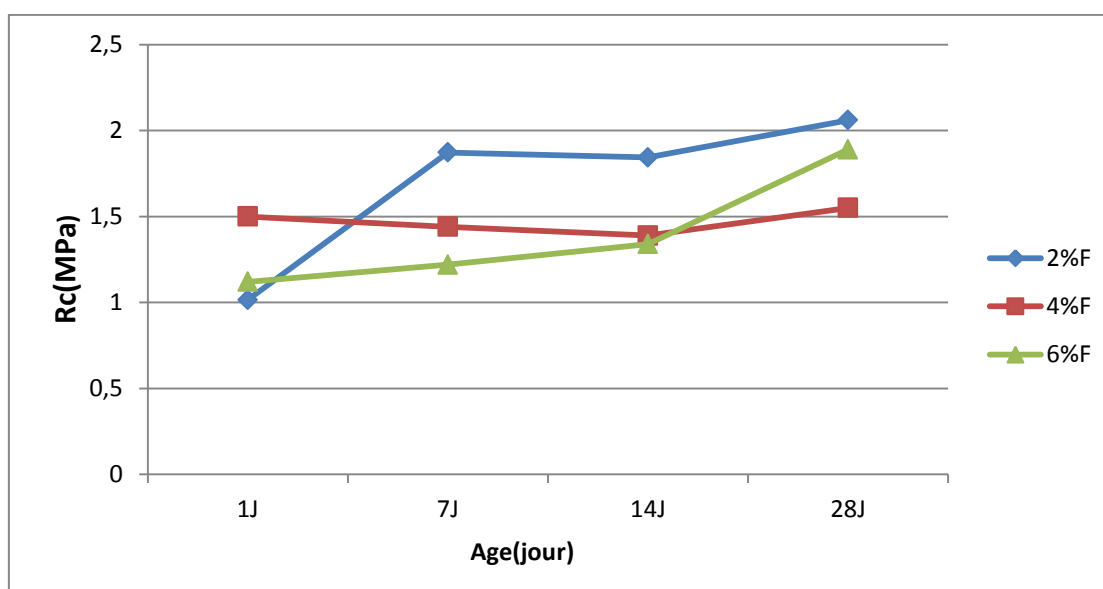


Figure IV.12 : Mélange (80%A+20%S+F%).

Pour le même mélange, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,89 MPa à 28 jours et 6%F ajoutées..

En générale, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.2.4. Mélange 70% Argile et 30% sable +% fibres 2cm :

Tableau IV.12 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70%A+30%S+F%) en fonction d'âge :

70%A+30%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour)	2% Fibre	4% Fibre	6% Fibre
	γ_{d2} =1,66	W_{opt} =17,52		1J	1,13	1,008	1,244
				7J	1,119	1,183	1,397
				14J	1,32	1,20	1,42
				28J	1,093	1,11	1,49

D'après le tableau IV.12 on trace les courbes de la figure IV.13 :

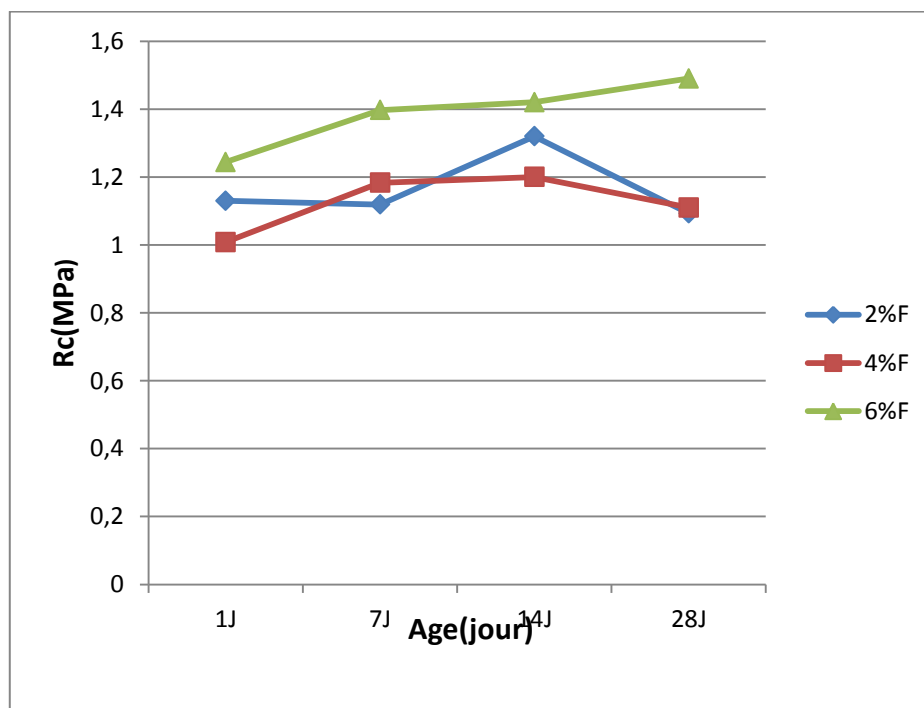


Figure IV.13 : Mélange (70%A+30%S+F%).

Pour le mélange optimum, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteinte la valeur de 1,49 MPa a' 28 jour et 6%F ajoutes.

En générale la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

5.2.5. Mélange 60% Argile et 40% sable +% fibres 2cm :

Tableau IV.13 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60%A+40%S+F%) en fonction d'âge :

60%A+40%S	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc (MPa)	Age (jour	2%	4%	6%
				Fibre	Fibre	Fibre	
	γ_{d2} =1,72	W ₂ =18,00		1J	1,141	0,811	0,950
				7J	1,357	1,352	1,351
				14J	0,678	1,18	1,341
		28J	1,00	0,901	0,474		

D'après le tableau IV.13 on trace les courbes de la figure IV.14 :

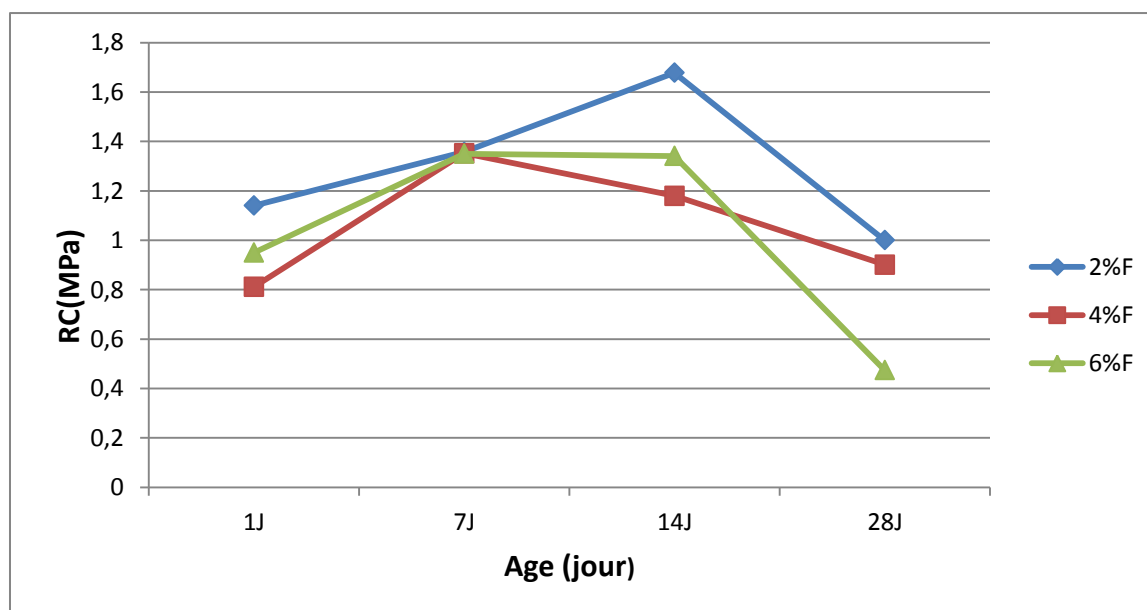


Figure IV.14 : Mélange (60%A+40%S+F%).

Pour le même mélange, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (R_c) à différent âge. Elle atteint la valeur de 1,35 MPA à 7 jour et 6%F ajoute.

Les meilleures résistances à la compression obtenus à 28 jour pour les différents mélanges sont présentes sur le tableau IV.14 :

	Fibre 1cm	Fibre 1cm
100%A+6%F	1,2	1,63
90%A+10%S+6%F	1,37	2,659
80%A+20%S+6%F	1,42	1,83
70%A+30%S+6%F	1,46	1,49
60%A+40%S+6%F	1,45	1,35 (7j)

- Pour 6% des fibres de 1cm, on constate que la résistance à la compression augmente avec le pourcentage de sable ajouté jusqu'à 30% ; Au-delà de ce pourcentage, on remarque que la résistance devient constante.
- Pour 6% fibres de 2cm, on constate une augmentation de la résistance jusqu'à atteindre 10% de sable. Mais, au-delà de ce pourcentage (10%), la résistance à la compression diminue d'une façon significative, le mélange optimal est 90%A+10%S+6%F(2cm).

5. 2.6 .Mélange Argile pure+6%fibres (1cm) traité à la chaux :

Tableau IV.15 Résistance à la compression simple (R_c) en fonction d'âge :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
100%A+6%F+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0.71	0.82	1.02	1.244
100%A+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0.695	1,28	1,89	1,678

D'après le tableau IV.15, on constate que le traitement d'argile +6%fibres avec différents pourcentage de chaux et pour le même âge conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple. Les résultats de ces essais sur l'argile traitée pour le même pourcentage de chaux augmente pour les différents âges, Donc, on choisit l'argile traitée à 6% chaux comme un mélange le plus résistant pour garder l'aspect économique.

D'après le tableau IV.15, on a tracé les courbes de la variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge (Figure IV.15)

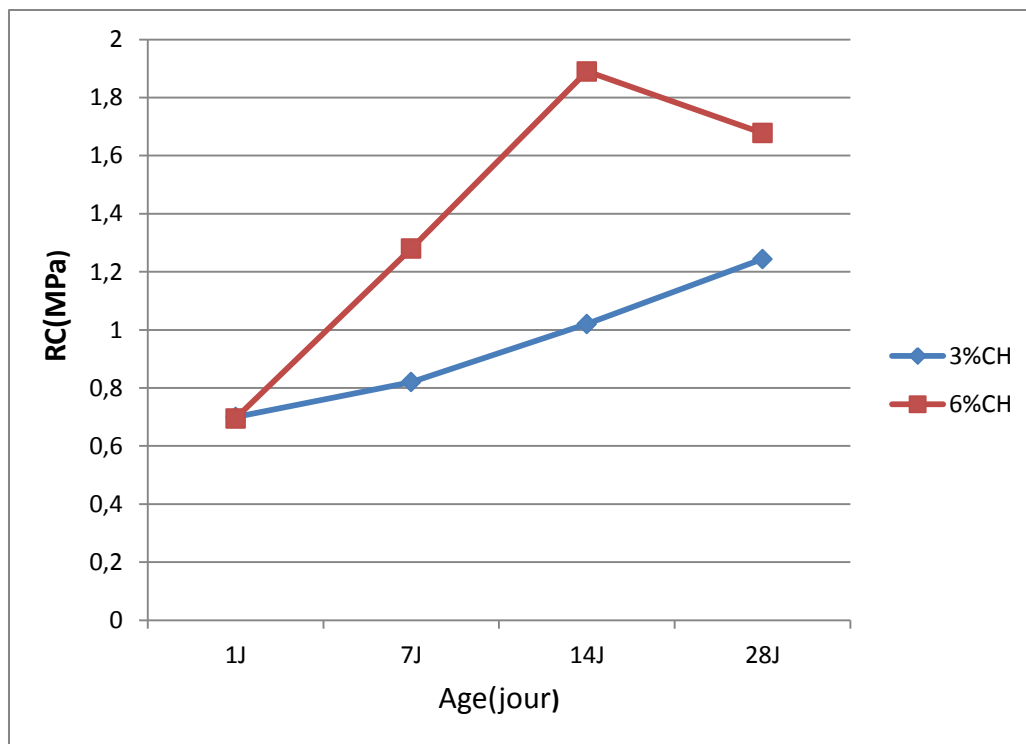


Figure IV.15 : Les résistances à la compression simple de mélange traité à (3%, 6% chaux).

5.2.7. Mélanges argile + sable de dune+6% de fibres (1cm) :

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.16.(17 ,18,19)

Tableau IV.16 : Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (90% A + 10% S) en fonction d'âge :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
90%A+10%S+6%F+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,60	1,15	1.365	1.50
90%A+10%S+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt}=16,4$	6%	0.990	1.08	1.678	2.547

Tableau IV.17 : Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (80% A + 20% S) en fonction d'âge.

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
80%A+20%S+6%F+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	6%	0.678	1.44	1.10	1.17
80%A+20%S+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	6%	0.76	1,183	2.44	1.244

Tableau IV.18 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (70% A + 30% S) en fonction d'âge :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
70%A+30%S+6%F+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0.69	1,06	1.24	0.879
70%A+30%S+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0,86	1.13	1.549	1.38

Tableau IV.19 Evolution de la résistance à la compression simple pour le mélange (60% A + 40% S) en fonction d'âge :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
60%A+40%S+6%F+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt}=16,68$	6%	0.852	1.07	1.403	1,25
60%A+40%S+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt}=16,68$	6%	0.74	0.82	1.52	0.914

Les résultats des essais de compression simple de tous les mélanges sont traduits par des courbes des figures IV.16,(1 7,1 8 et1 9).

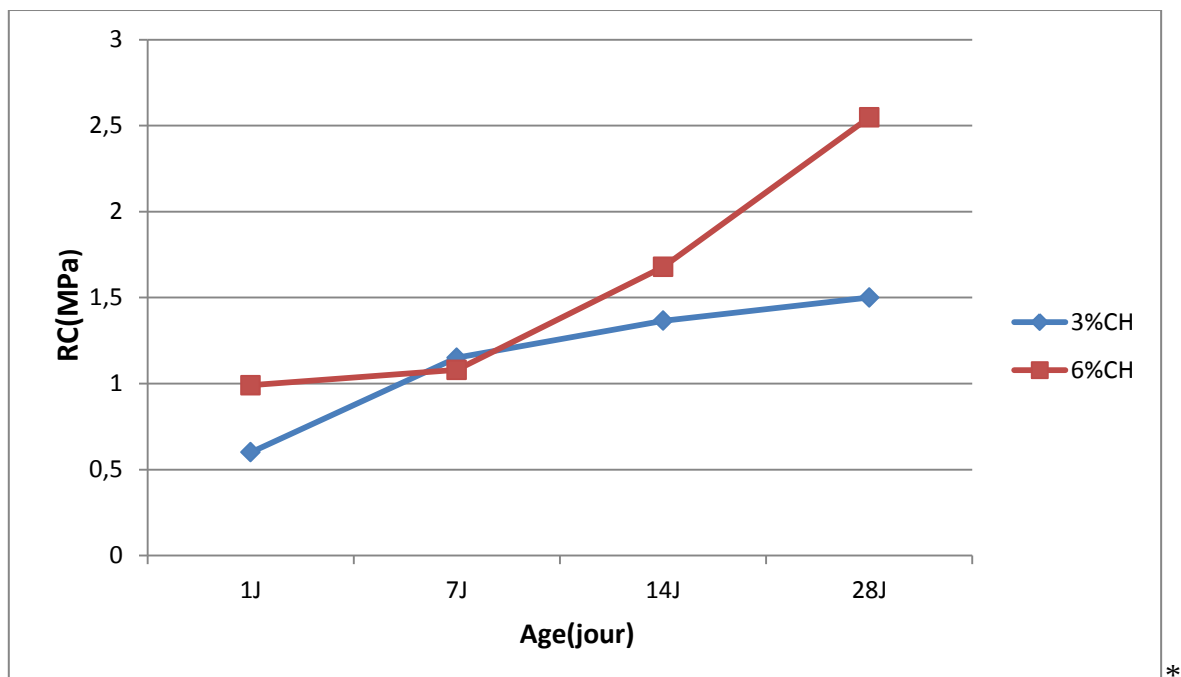


Figure IV.16 : Mélange (90%A+10%S+6%F(1cm)) traité par la chaux .

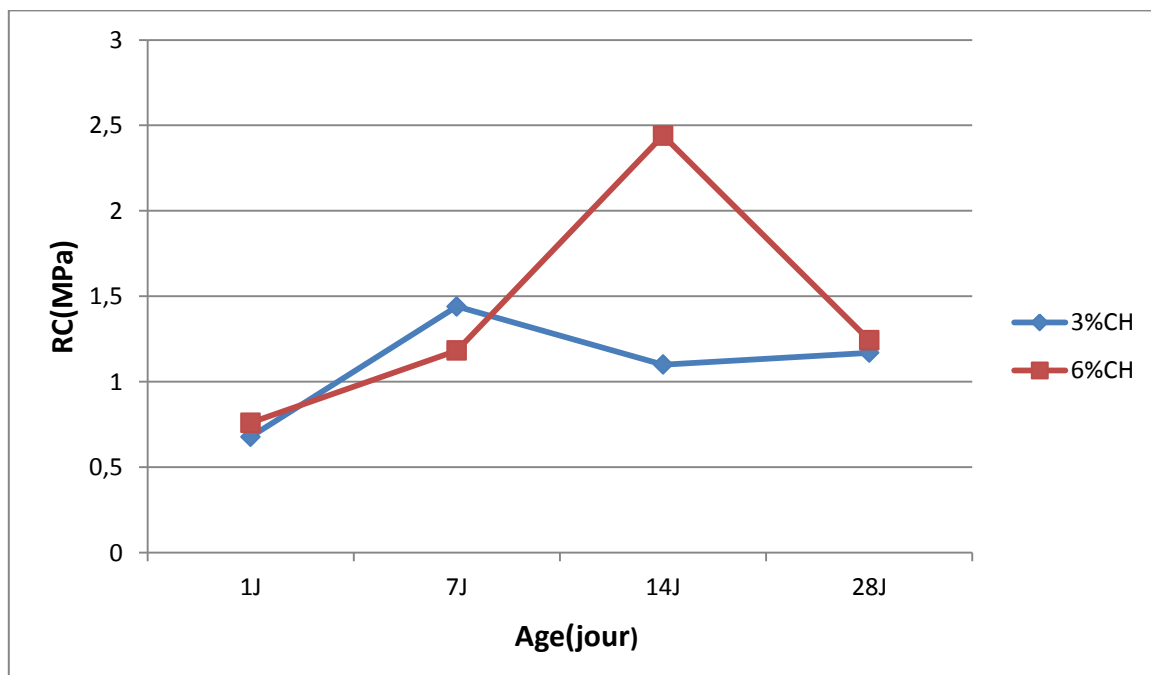


Figure IV.17 : Mélange 80%A+20%S+6%F(1cm) traité par la chaux.

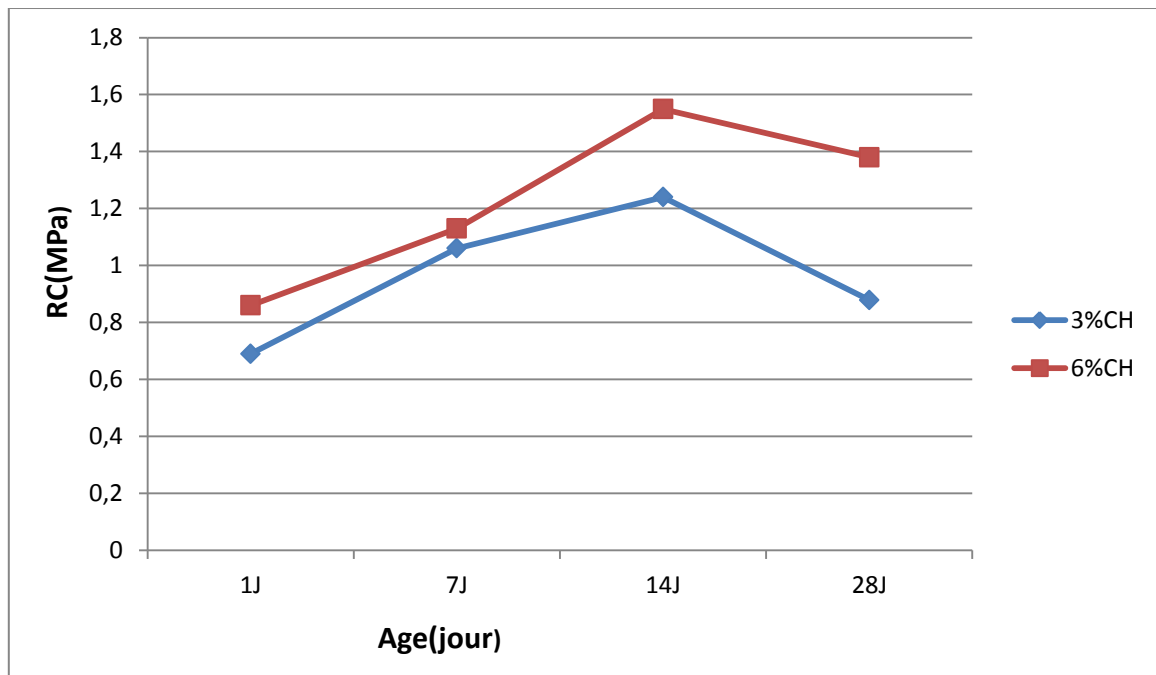


Figure IV.18 : Mélange 70%A+30%S+6%F(1cm) traité à la chaux.

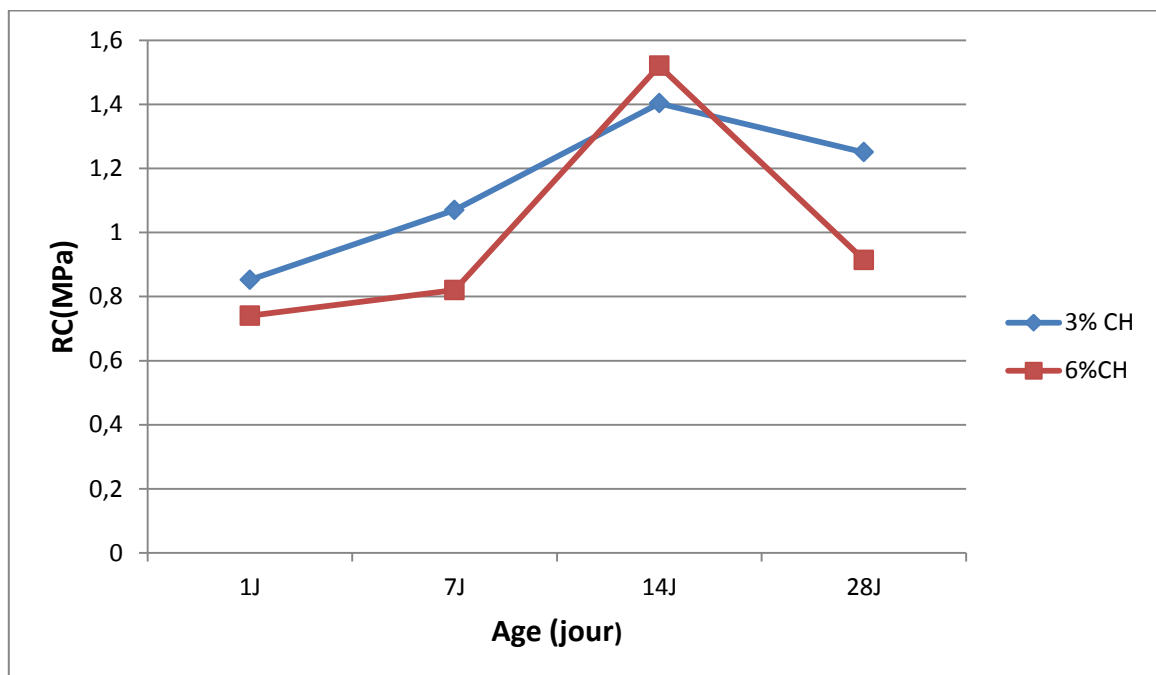


Figure IV.19 : Mélange 60%A+40%S+6%F (1cm) traité à la chaux.

Pour tous les mélanges A+S+F et pour $\gamma_d = \gamma_{dmax}$ et $w = w_{opt}$, on constate que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge jusqu'à 14j, exception faite pour le mélange 10%S+90%A +6%fibres+6%CH (tableau IV.10).. sa résistance Rc atteint 2,54 MPa à 28j qui représente la valeur maximale pour tous les mélanges et pour différents âges (tableau IV.10).

Ou cantate aussi les mélange (A%+S%+F%) traites par 6% de chaux donnent des valeurs de la résistance à la compression supérieurs aux même mélange traite a 3%de chaux. Pour les fibre(1cm)

Les valeurs de la résistance (Rc) optimale sont regroupées dans le tableau IV.20. Ces résultats sont traduits par des courbes de la figure IV.1 :

Tableau IV.20 : Les variations de la résistance à la compression simple :

Mélange	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Rc ₂₈ (MPa)
100%A+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	1,678
90%A+10%S+6%F+6%CH	$\gamma_{d1}=1,55$	$w_2=22,25$	2,547
80%A+20%S+6%F+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	2,44
70%A+30%S+6%F+6%CH	$\gamma_{d2}=1,66$	$w_{opt}=17,52$	1,549
60%A+40%S+6%F+6%CH	$\gamma_{d2}=1,72$	$w_2=18,00$	1,52

Le tableau IV.20 représente les variations de la résistance à la compression, en fonction du pourcentage de sable. Nous remarquons que l'augmentation de sable jusqu'au 10% S+6%CH+6%Fibres a permis d'améliorer les performances mécaniques de l'argile où Rc₂₈=2,547 MPa. Mais au-delà de ce pourcentage il y'a eu une diminution de résistance mécanique.

Le mélange optimal avec traitement est 10% S+90%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).

5.2.8. Mélanges Argile + sable+6% Fibres traité à la chaux (2cm) :

Cette partie est consacrée au traitement par un type de liants hydraulique (chaux) À différents pourcentages (3%,6%) pour les mélanges A+S+F qui ont présentés des résistances aux compressions maximales (voir tableau IV.21).

Tableau IV.21 présente les mélanges étudiés et le nombre des éprouvettes confectionnées pour la réalisation des essais de compression simple.

Tableau IV.21 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	100% A + 3% CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	25
	2	100% A + 6% CH+6%F			25
90%A +10%S	3	90% A + 3% CH + 10% S+6%F	$\gamma_{d1}=1,55$	$w_2=22,25$	25
	4	90% A + 6% CH + 10% S+6%F			25
80%A +20%S	5	80% A + 3% CH + 20% S+6%F	γ_d $_{opt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	25
	6	80% A + 6% CH + 20% S+6%F			25
70%A +30%S	7	70% A + 3% CH + 30% S+6%F	$\gamma_{d2}=1,66$	$w_{opt}=17,52$	25
	8	70% A +6% C + 30% S+6%F			25
60%A +40%S	9	60% A + 3% CH + 40% S+6%F	$\gamma_{d2}=1,72$	$w_2=18,00$	25
	10	60% A + 6% CH + 40% S+6%F			25
				Totale	250

Les Tableau IV.21, (16, 17, 18 et 19) présente les résultats des écrasements des mélanges optimums indiqués dans le tableau IV.21.

Tableau IV.22 : Les résultats d'écrasement de mélange (100%A+6%F) ; en différent pourcentage de (chaux) traité :

	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
100%A+3%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	6%	0,51	0,88	1,096	0,93
100%A+6%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,55$	$W_{opt}=23,05$	6%	0,87	0,93	1,1	0,97

Tableau IV.22 : Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S+6%F) traité :

	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
90%A+10%S+3%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,51$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,603	0,67	0,98	1.78
90%A+10%S+6%CH6%F	$\gamma_{dopt}=1,51$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,66	0,758	0,77	1.83

Tableau IV.23 Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S+6%F) traité :

	γ_d (g/cm ³)	W (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
80%A+20%S+3%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,37$	$w_{opt}=19,03$	6%	0.775	0.914	1.20	1.61
80%A+20%S+3%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,37$	$w_{opt}=19,03$	6%	0.82	1.188	1,72	1.47

Tableau IV.24 : Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S+6%F) traité :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
70%A+30%S+3%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0.916	1.50	1.13	1,22
70%A+30%S+6%CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0.824	1.44	1,841	1,70

Tableau IV.25 : Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S+6%F) traité :

	γ_d (g/cm ³)	w(%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
60%A+40%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0.73	1.188	1 ,243	1,42
60%A+40%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0.775	1,25	1,37	1,52

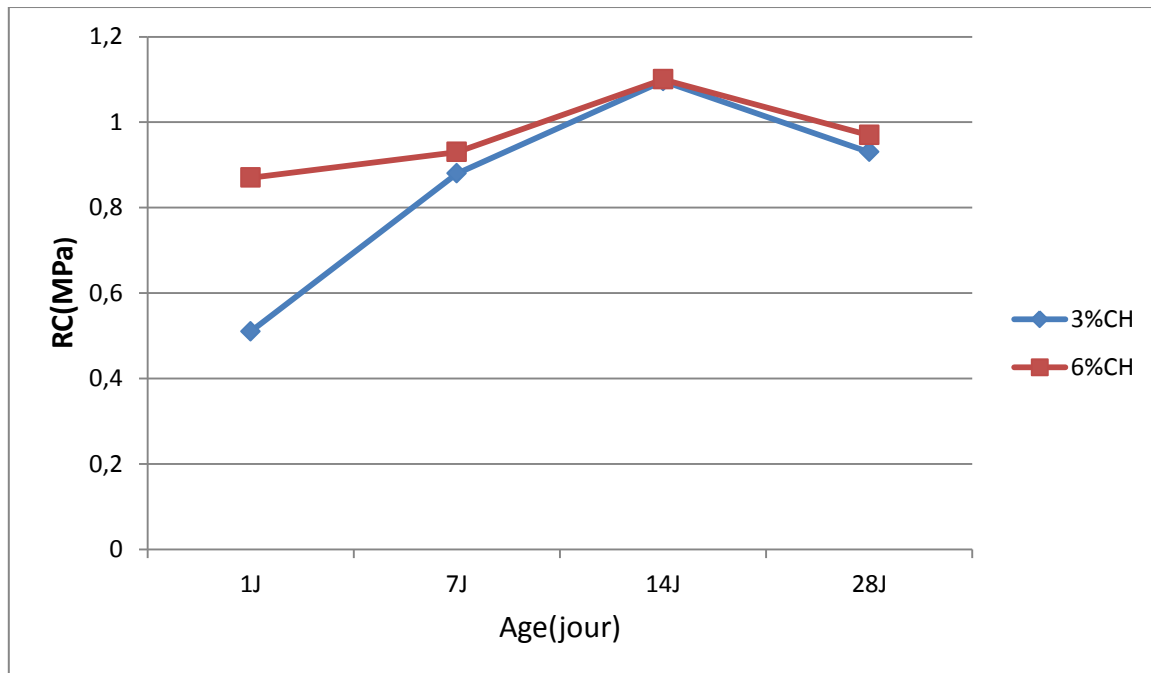


Figure IV.20 : La courbe de mélange 100%A+6%F (2cm) traité par la chaux.

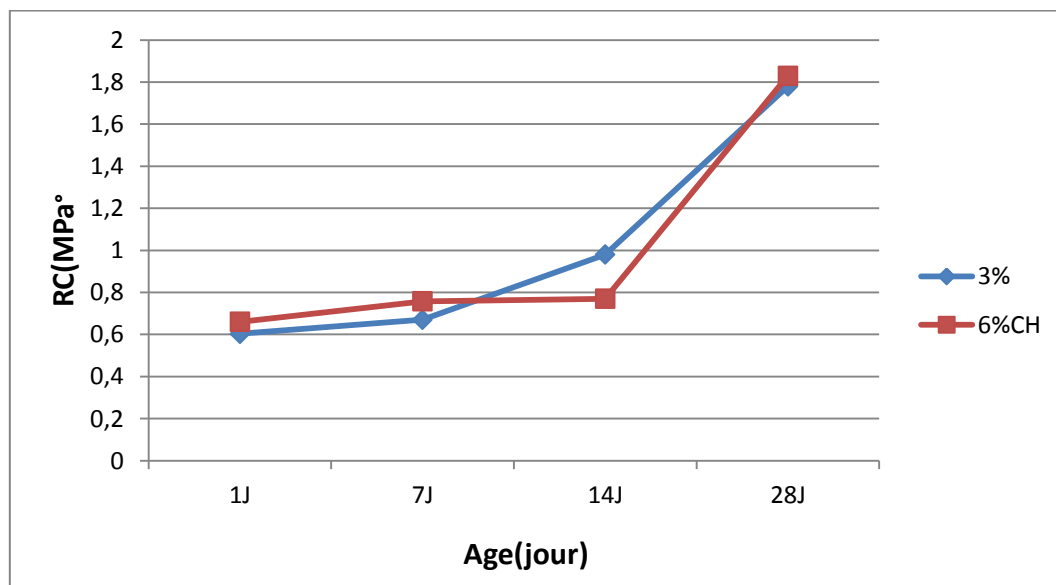


Figure IV.21 : La courbe de mélange 90%A+10%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.

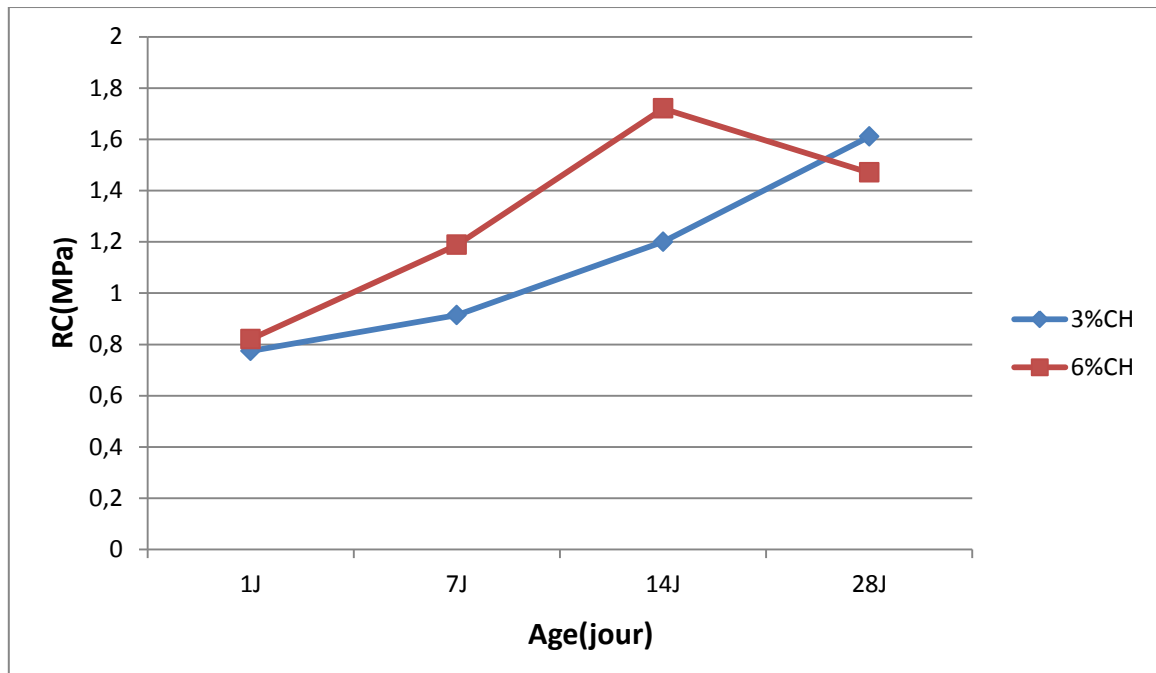


Figure IV.22 : La courbe de mélange 80%A+20%S + 6%F (1cm) traité par la chaux .

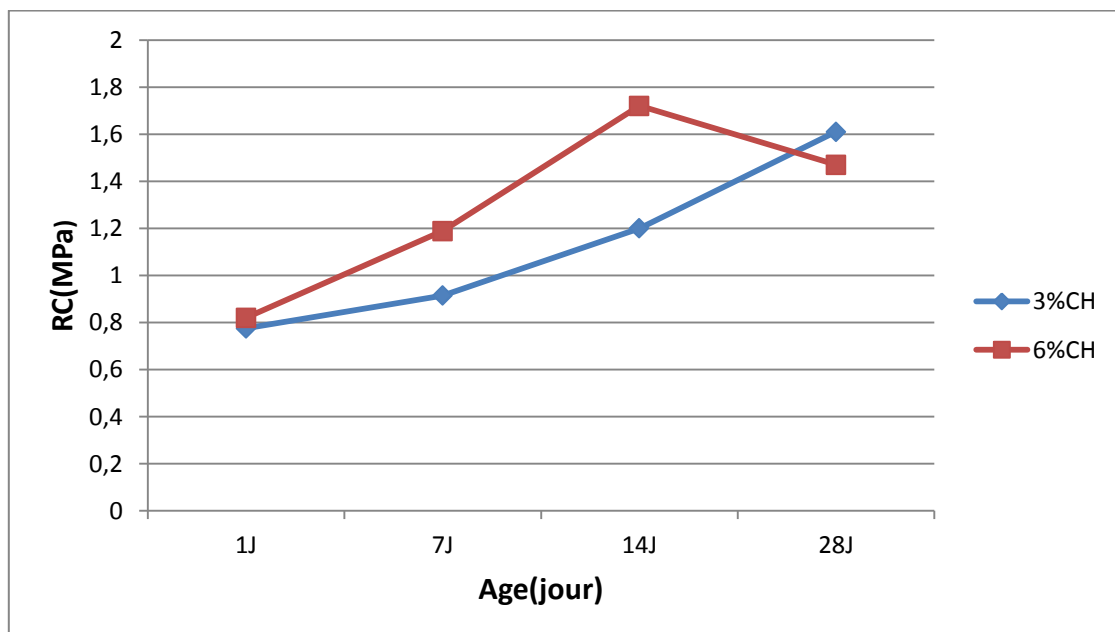


Figure IV.23 : La courbe de mélange 70%A+30%S+6%F (2cm) traité par la chaux.

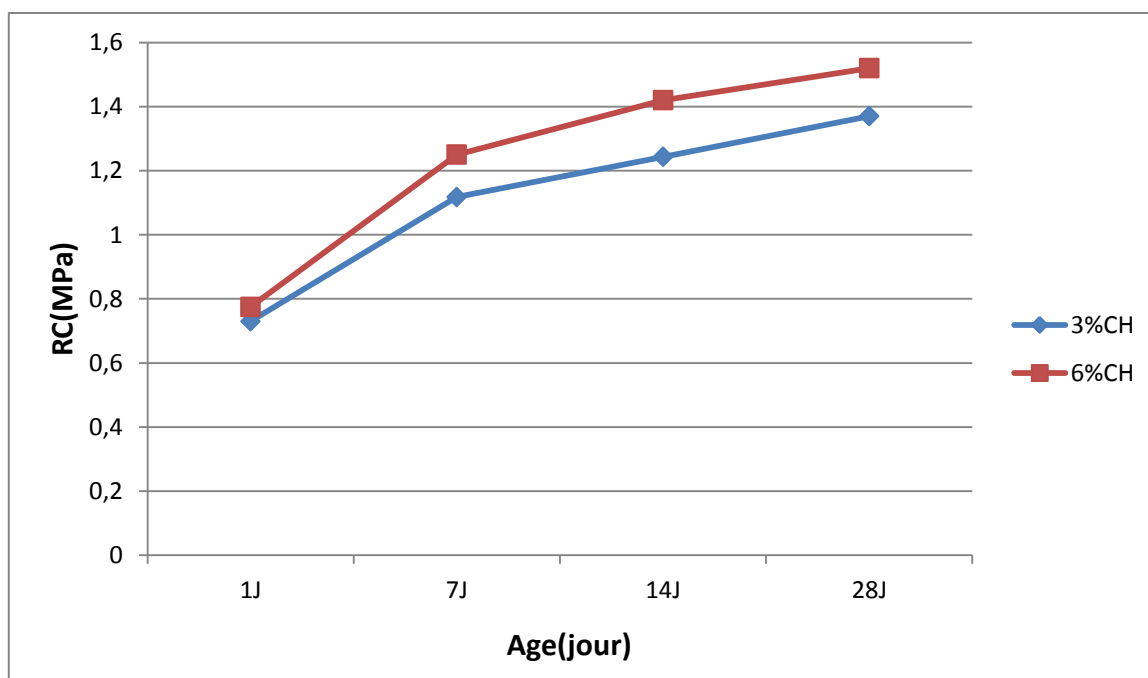


Figure IV.24 : La courbe de mélange 60%A+40%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux :

Les figures IV. 24 présentent l'évolution de la résistance (Rc) en général, 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 les 'gés testés.

Une exception pour le mélange (90%A+10%S), la résistance des mélanges traités avec 6% de chaux a pour différents âges respectivement 1.83MPa supérieure à la résistance de mélange non traité, 1,65 MPa.

Même constrictio pour les fibres de 1cm,c,a,d les résultats pour 6% CH sont légèrement supérieurs à ceux obtenues pour 3%CH.

5.3 Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge de fibre (1 cm) :

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.26 présente les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude de la traction par fendage de fibre 1cm et 2cm.

Tableau IV.26 : Les mélanges et le nombre des éprouvettes qui ont été testés lors de l'étude :

	N° de mélange	Mélange	γ_d	w (%)	Nombre des éprouvettes
100%A	1	100% A + 3% CH+6%F	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	25
	2	100% A + 6% CH+6%F			25
90%A +10%S	3	90% A + 3% CH + 10% S+6%F	$\gamma_{d1}=1,55$	$w_2=22,25$	25
	4	90% A + 6% CH + 10% S+6%F			25
80%A +20%S	5	80% A + 3% CH + 20% S+6%F	$\gamma_{d\ opt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	25
	6	80% A + 6% CH + 20% S+6%F			25
70%A +30%S	7	70% A + 3% CH + 30% S+6%F	$\gamma_{d2}=1,66$	$w_{opt}=17,52$	25
	8	70% A +6% C + 30% S+6%F			25
60%A +40%S	9	60% A + 3% CH + 40% S+6%F	$\gamma_{d2}=1,72$	$w_2=18,00$	25
	10	60% A + 6% CH + 40% S+6%F			25
				Totale	250

On expose les résultats de cet essai dans les tableaux suivants :

Tableau IV.27 : Les résultats d'écrasement de mélange argile pure :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
100%A+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0,33	0,52	0,772	0,877
100%A +6%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0,46	0,505	0,66	0,91

Tableau IV.28 : Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
90%A+10%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,31	0,53	0,72	0,95
90%A+10%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,47	0,642	0,833	0,873

Tableau IV.29 : Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
80%A+20%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	6%	0,27	0,55	0,751	0,93
80%A+20%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	6%	0,43	0,611	0,825	0,851

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

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
70%A+30%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0,451	0,523	0,76	0,851
70%A+30%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0,411	0,6	0,810	0,94

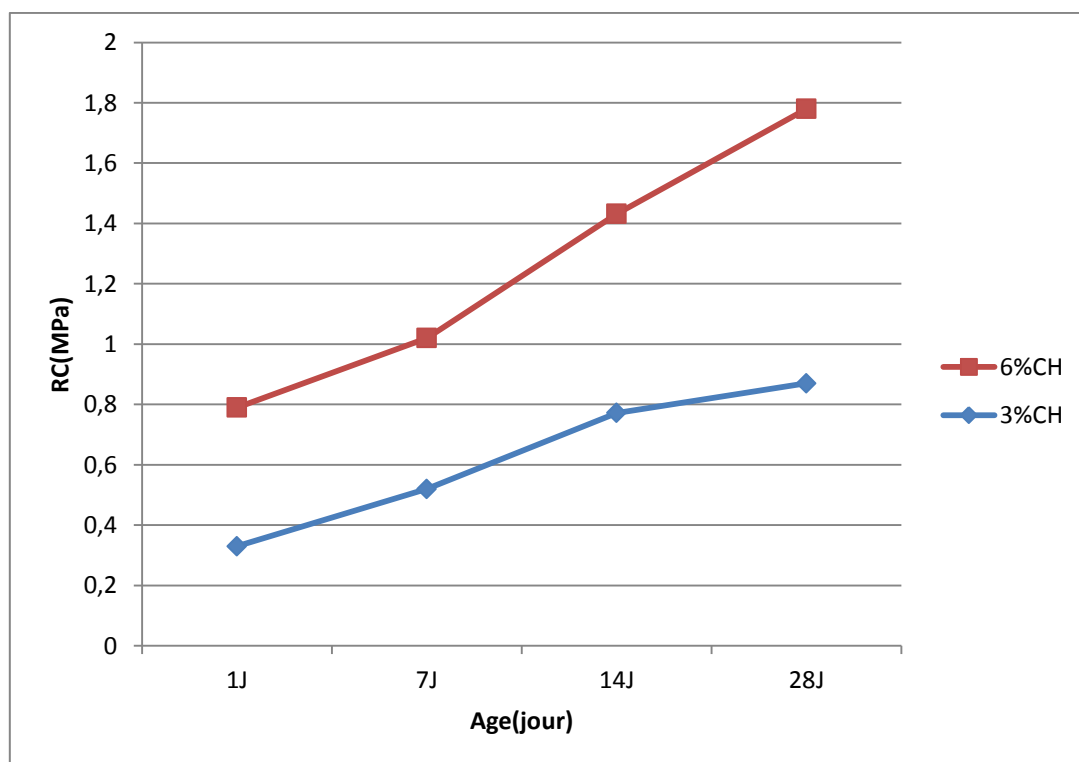
Tableau IV.31 : Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
60%A+40%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt}=16,68$	6%	0,255	0,46	0,65	0,731
60%A+40%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt t}=16,68$	2%	0,37	0,62	0,68	0,814

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

Le mélange optimal obtenu a 'par de l'essai de traction et 90%A+10%S+6%F+3%CH

D'après les tableaux on trace les courbes ci-dessous :

**Figure IV.25** : La courbe de mélange argile + 6%F (1cm) traité par la chaux.

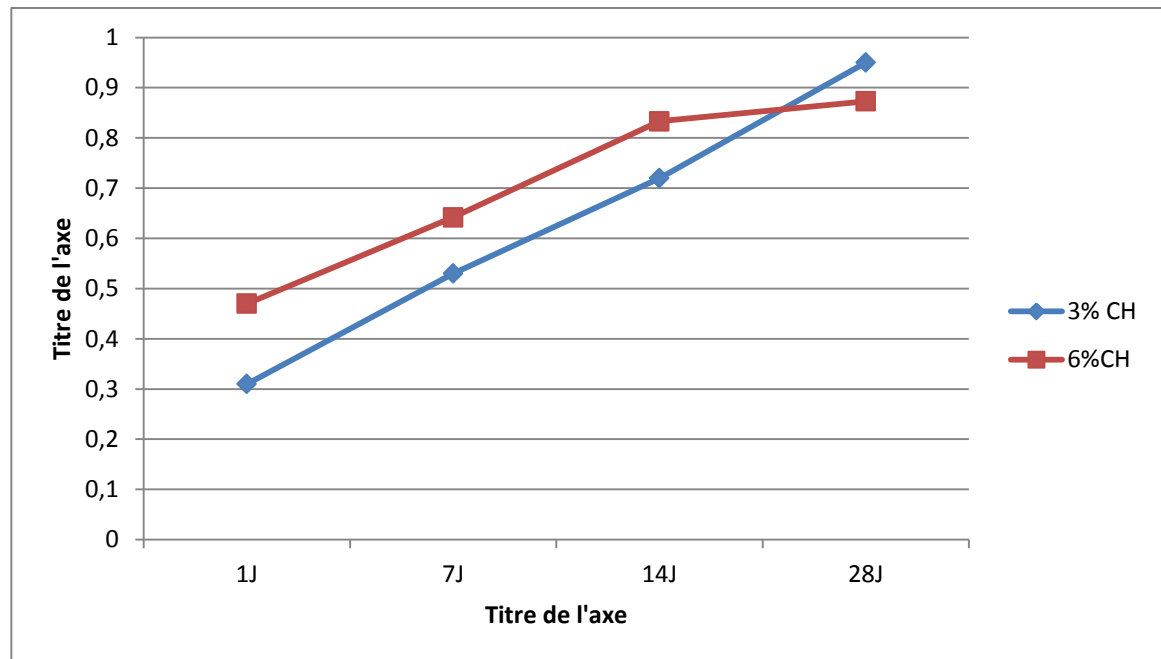


Figure IV.26 : La courbe de mélange 90%A+10%S + 6%F (2cm) traité par la chaux .

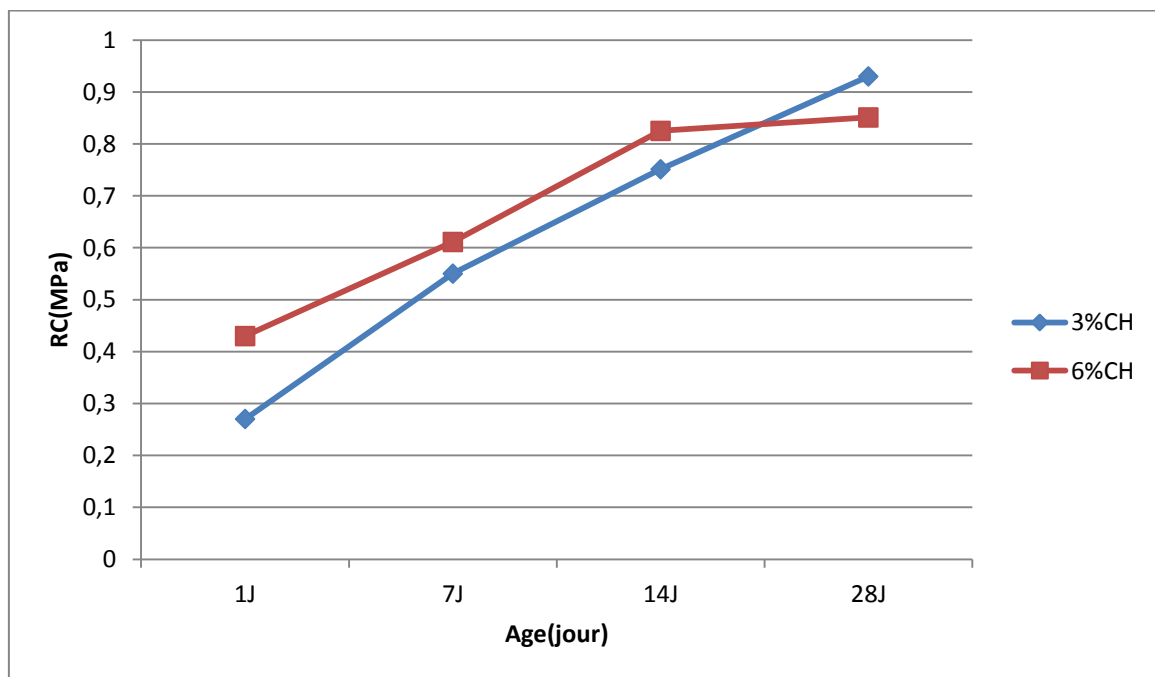


Figure IV.27 La courbe de mélange 80%A+20%S+ 6%F (2cm) traité par la chaux.

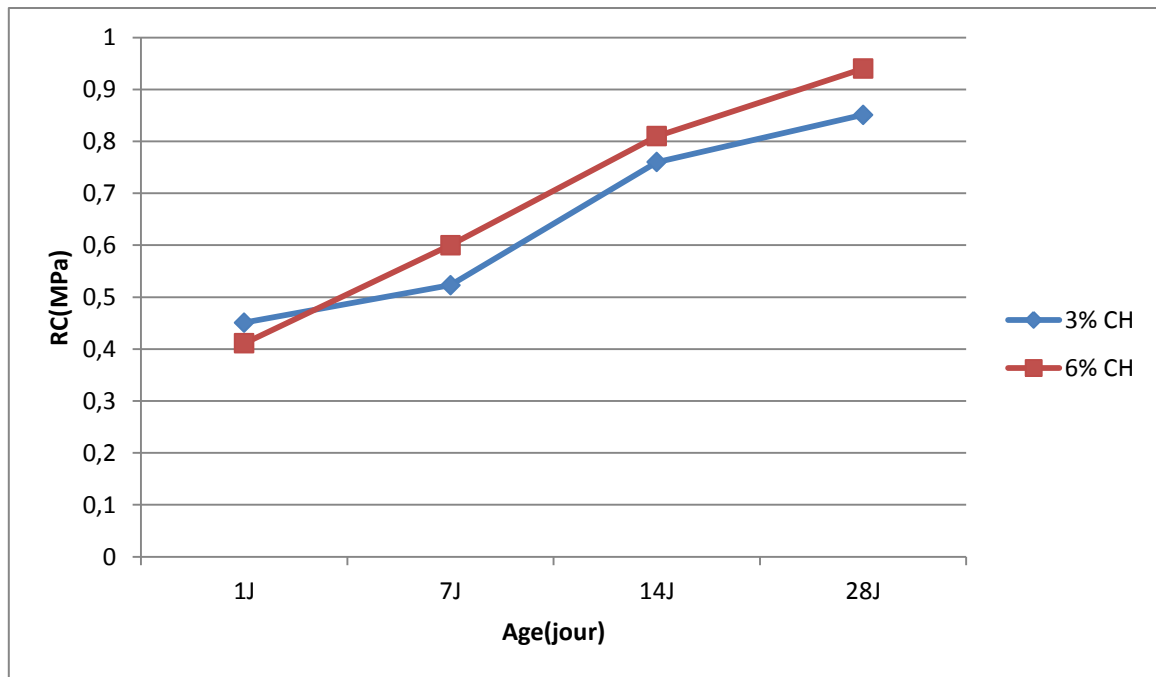


Figure IV.28 : La courbe de mélange 70%A+30%S + 6%F (2cm) traité par la chau.

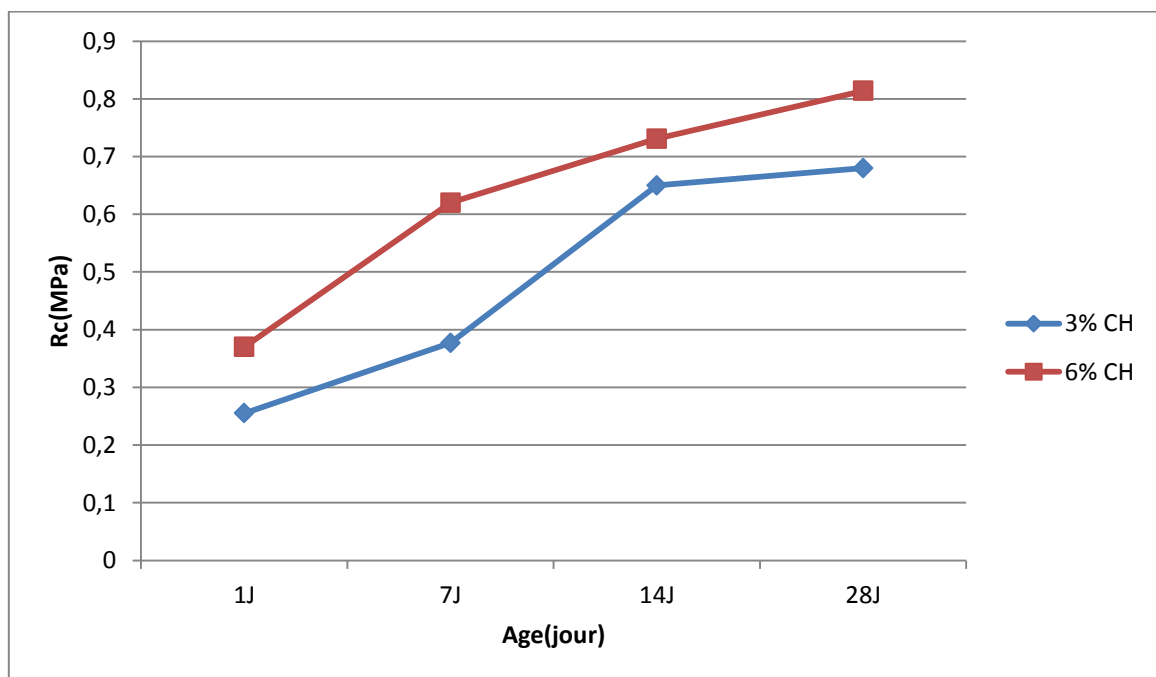


Figure IV. 29 : La courbe de mélange 60%A+40%S + 6%F (1cm) traité par la chaux

On remarque que la résistance optimale à la traction par fendage dans les mélanges (90%A+10%S+6%F) traité par chaux 3 % est de 0,95 MPa.

5.4. Résistance à la traction par fendage en fonction d'âge de fibre 2 cm :

Tableau IV.32 Les résultats d'écrasement de mélange argile pure :

	γ_d (g/cm ³)	w(%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
100%A+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt}=23,05$	6%	0,54	0,571	0,73	0,851
100%A +6%CH	$\gamma_{dopt}=1,55$	$w_{opt} =23,05$	6%	0,43	0,64	0,78	0,904

Tableau IV.33 : Les résultats d'écrasement de mélange (90%A+10%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
90%A+10%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt}=16,4$	6%	0,55	0,73	0,82	0,952
90%A+10%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,63$	$w_{opt} =16,4$	6%	0,61	0,65	0,921	1,04

Tableau IV.34 : Les résultats d'écrasement de mélange (80%A+20%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
80%A+20%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt}=19,03$	6%	0,32	0,56	0,74	0,84
80%A+20%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,67$	$w_{opt} =19,03$	6%	0,46	0,63	0,821	0,93

Tableau IV.35 : Les résultats d'écrasement de mélange (70%A+30%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
70%A+30%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0,41	0,47	0,57	0,72
70%A+30%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,7$	$w_{opt}=17,52$	6%	0,36	0,49	0,613	0,83

Tableau IV.36 : Les résultats d'écrasement de mélange (60%A+40%S) :

	γ_d (g/cm ³)	w (%)	Fibre %	Age (jour)			
				1 j	7 j	14 j	28 j
60%A+40%S+3%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt}=16,68$	6%	0,35	0,52	0,74	0,67
60%A+40%S+6%CH	$\gamma_{dopt}=1,75$	$w_{opt}=16,68$	2%	0,46	0,62	0,80	0,72

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

.le mélange optimal obtenu de l'essai de traction et 90%A+10%S+6%F+6% CH.

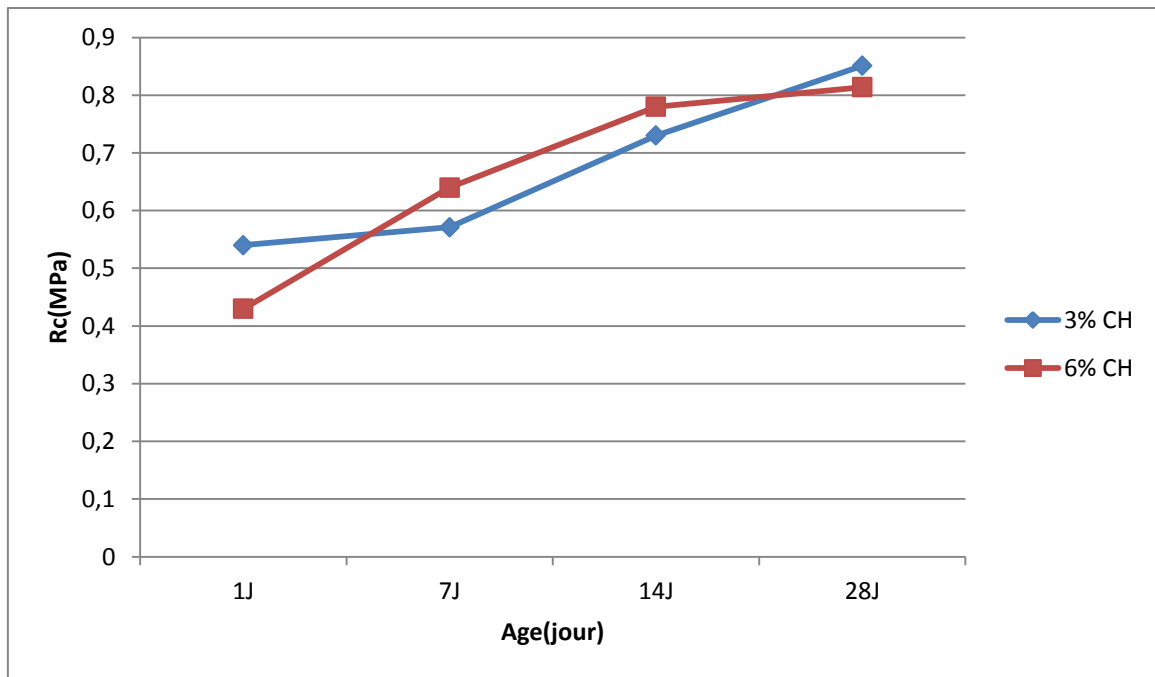


Figure IV.30 : La courbe de mélange argile + 6%F (2cm) traité par la chaux .

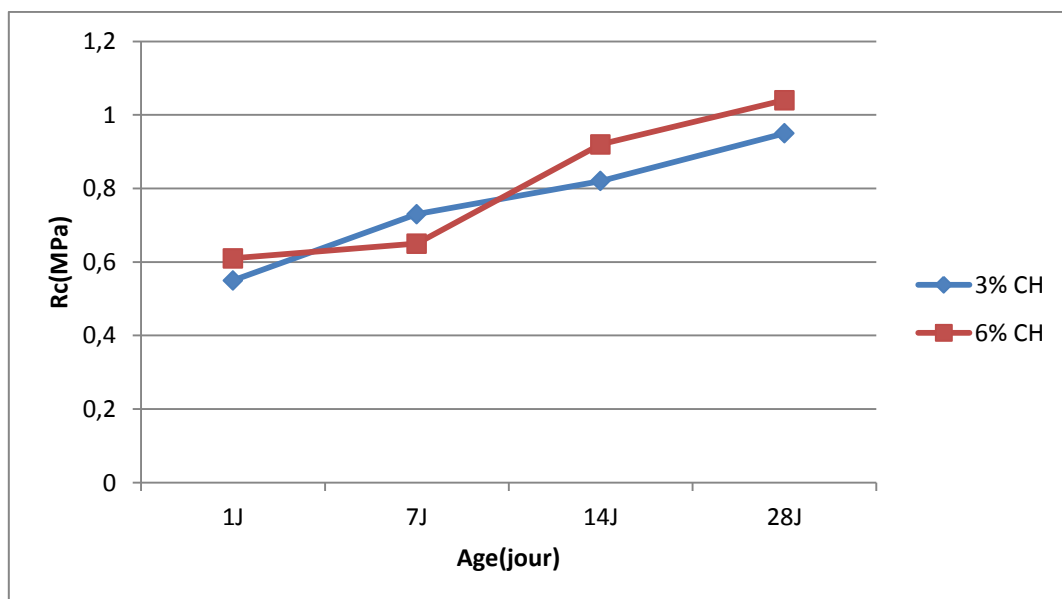


Figure IV.31 : La courbe de mélange 90%A+10%S + 6%F (2cm) traité par la chaux .

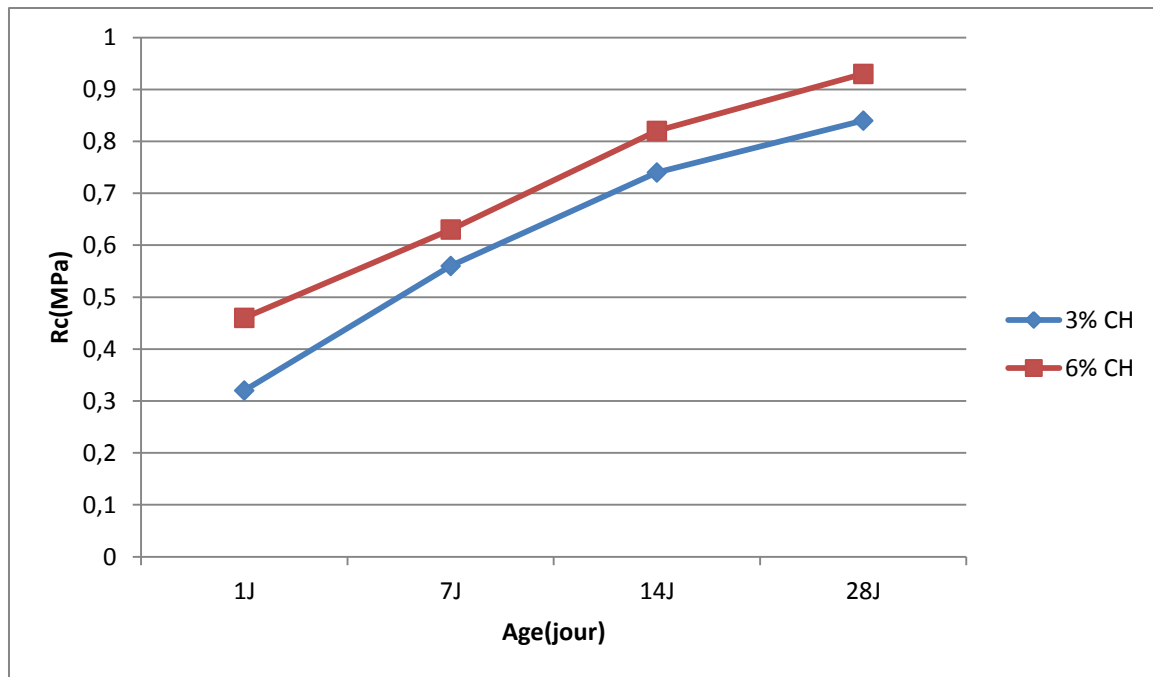


Figure IV.32 : La courbe de mélange 80%A+20%S + 6%F (2cm) traité par la chaux .

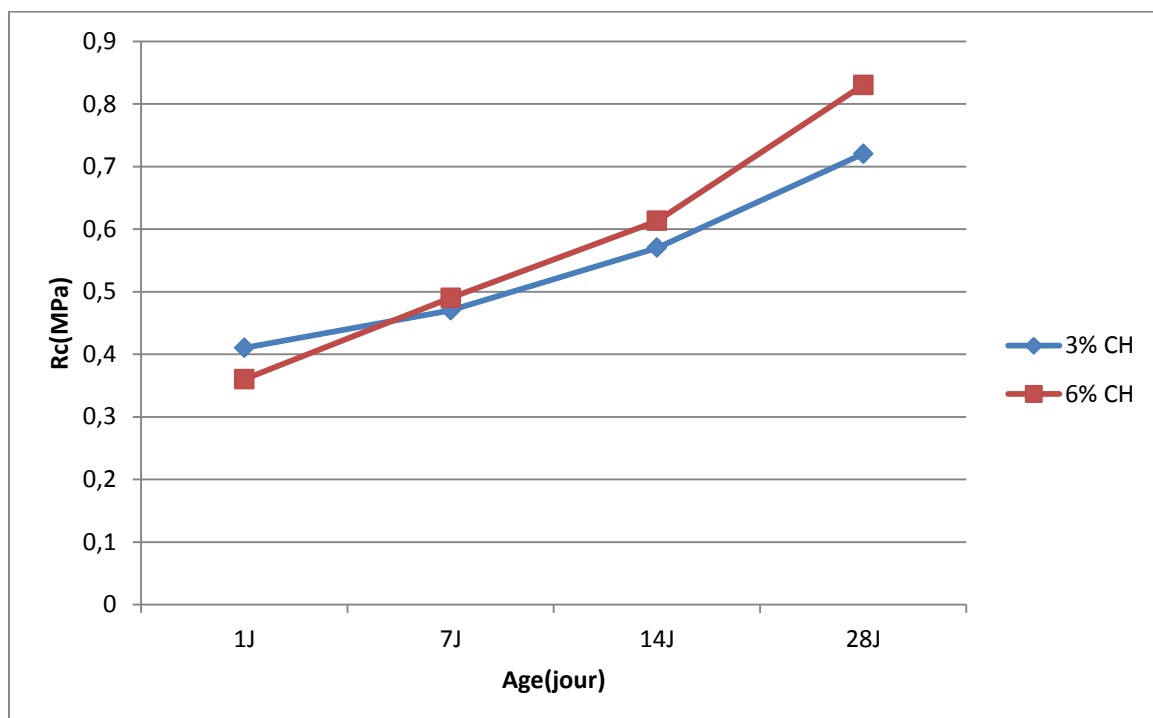


Figure IV.33 : La courbe de mélange 70%A+30%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.

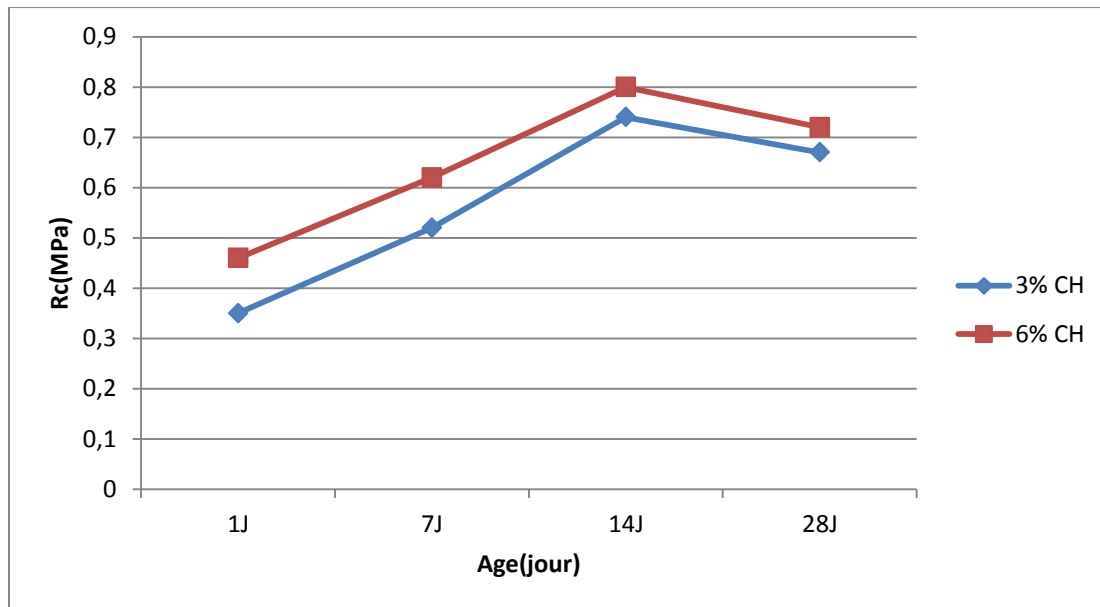


Figure IV. 34 : La courbe de mélange 60%A+40%S + 6%F (2cm) traité par la chaux.

On remarque que la résistance optimale à la traction par fendage dans les mélanges est celle de mélange (90%A+10%S+6%F) traité par 6 % chaux sa valeur est de 1,04 MPa .

Pour le même pourcentage de chaux, la résistance à la traction en fonction de l'âge augmente.



Photo IV.4 : Essai de compression simple en laboratoire de Génie Civil (Laghouat).



Photo IV.5 : Essai de traction simple par fendage en laboratoire de Génie Civil (Laghouat).

Tableau IV.37 : 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

•remarque :

La chaux améliore l'interface (matériaux + fibre) qui contact avec la presse donc augmente la résistance.

VI.4. 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 renforcés par de fibres avec différentes longueurs (1cm, 2cm).

Pour une meilleure stabilisation des blocs de terre comprimée (BTC), on a utilisé de différent pourcentage de chaux.

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

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque généralement une augmentation de la résistance à la compression (Rc).

pour le même mélange une augmentation de la résistance à la compression (Rc) à différent âge. La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre.

➤ L'ajout de 6% Fibres aux mélanges A%+S% conduit une augmentation de la résistance a la compression.

➤ L'ajout des liants (chaux) à l'argile pure améliore leur comportement mécanique (Rc).

➤ il y a une proportionnalité positive entre l'augmentation de sable de 10% à 20% et la résistance à la compression simple, au-delà de 20% on remarque une variation dans le sens inverse talque la résistance à la compression simple début démunie

➤ Le mélange optimal non traité 90% argile + 10% sable +6%F (Rc₂₈ = 2,54MPa) .

➤ Le pourcentage optimal est entre 10% et 20% de sable (90%A+10%S+6%F+6%CH) ou (_80%A+20%S+6%F+6%CH), ce qui est en accord avec le pourcentage usuellement utilisé dans la production des briques industrielles qui est de 30%.

Conclusion Générale

Notre recherche porte sur l'étude du Comportement mécaniques des murs porteurs en blocs de terre renforcés par des fibres de l'alfa, et traité par la chaux en vue de leurs utilisations dans les régions arides de l'Algérie (Construction en région saharienne). Pour la confection de ces dernier blocs, nous avons utilisé dans le cadre d'une valorisation des matériaux locaux ; le sable de dunes, la terre et des fibres Végétales de **l'alfa** permettant d'atteindre les objectifs recherchés. Ainsi cette étude nous a permis de conclure que :

Les résultats montrent que le choix d'un meilleur mélange constituant le bloc en terre comprimé sur la base d'un comportement mécanique, c'est le mélange (90%A+10%S) d'une valeur de résistance à la compression **Rc28 = 2,65 MPA** dans la phase de BTC non traitée.

Les résultats du traitement des mélanges argile-sable-fibre à différents pourcentages pour différents pourcentages des liants (chaux) 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, l'effet sur le comportement mécanique (résistance à la compression et la résistance à la traction) est similaire.

Pour les différents mélanges et pour le même âge, on remarque une augmentation de la résistance à la compression (Rc).

pour le même mélange une augmentation de la résistance à la compression (Rc) à différent âge. La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibre

Pour 6% des fibres de 1cm, on constate que la résistance à la compression augmente avec le pourcentage de sable ajoute jusqu'à 30% ;

Pour 6% fibres de 2cm, on constate, une augmentation de la résistance pour 10% de sable,

Mais, au-delà de ce pourcentage (10%), la résistance à la compression diminue d'une façon significative, le mélange optimal est 90%A+10%S+6%F (2cm).

- l'ajout de 6% Fibres aux mélanges A%+S% conduit à l'augmentation de la résistance à la compression
- Le mélange optimal non traité (90% argile + 10% sable +6%F), donne une meilleure résistance (**Rc28 = 2,54MPa**).

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 de vérification la possibilité de réaliser des BTC avec ce type de matériaux locaux en particulier dans les régions arides.

1. Amélioration de l'adhérence entre les fibres d'alfa et une matrice en terre comprimée stabilisée.

2. Etude des propriétés thermiques du bloc de terre comprimée avec fibres d'alfa

3. Etude de la durabilité du bloc de terre comprimée avec fibres d'alfa .

1. Si la résistance mécanique est prise comme critère de choix dans la fabrication du bloc de terre comprimée à renfort en fibres végétales, Les fibres doivent subir un traitement préalable ou durant la mise en œuvre de manière à augmenter l'adhérence fibre/matrice.
2. Si l'isolation thermique est prise comme critère de choix dans la fabrication des BTC tout en assurant une résistance mécanique modérée meilleure que celle de l'adobe, lors là on peut procéder à une optimisation de la teneur en fibres végétales.
3. les méthodes et technique de de choix d'enduisage du mur de BTC.
4. l'essai de durabilité de bloc de terre.

Tableau III.10 : Composition chimique des fibres : [1]

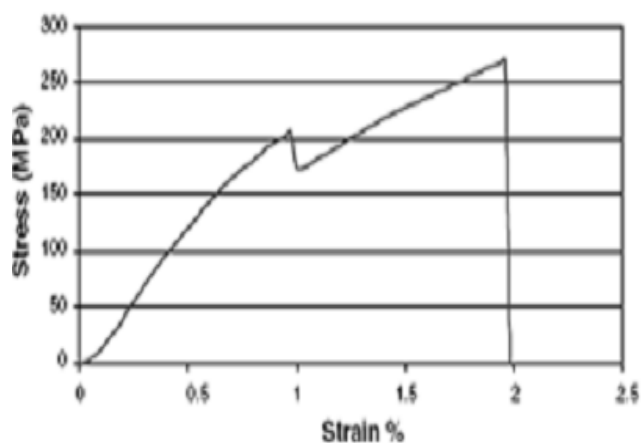
Matière	(%) [8]	(%) [6]	(%) [7]	(%) [9]
Cellulose	43,81	45	45	47,63
Laignine	18,76	23	24	17,71
Cendres	4,66	2	2	5,12
Silica	1,76			
Hémicellulose/Pectines	28,4	24	25	22,14
Cires		5	5	
Extraction et autres	2,61			7,39
Somme (%)	100	100	100	100

Tableau : Résultats des essais mécaniques sur des faisceaux de fibres d'alfa:[2]

Tensile properties of the long Alfa fibers

	Average value	Variation ratio (%)
Young Modulus (GPa)	21.5	18
Stress at break (MPa)	247	29
Strain at break (%)	1.96	27

Figure : La courbe de traction sur des faisceaux de fibres d'alfa:[2]



Propriétés physiques de la chaux Saida :[3]

Apparence physique	Poudre blanche sèche
Densité spécifique (g/cm ³)	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600-900

References bibliographiques

- **Ausroads.** Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- **AFNOR (XP P13 901),** (Association française de normalisation), Blocs de terre comprimée, définitions, spécifications, méthodes d'essai et conceptions ,2001.
- **Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly,Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985
- **Ausroads.** Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- **Azeem A, Ati A.** Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings. In: Ind geotech conf, Calcutta; 1992.
- **Baley C.** Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Les techniques de l'ingénieur, AM 5 130, 2013.
- **BENOUALI.H,** "La réglementation technique Algérienne de construction avec les Matériaux locaux". Festival ArchiTere, 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.
- **Bui.Q.B. (2008).** Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques, thèse de
- doctorat, Lyon : INSA.
- **Burrough VS.** Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction, PhD Thesis , University of New South Wales, Australia, 2001.
- **CASAGRANDE. A,** "Research os the Atterberg Limits of Soi1s", *Public Road.*, vol. 13, 1932.
- **CRA Terre.** GATE. Bloc de terre comprimée. Eléments de base. , Eschborn, Allemagne, 28 p, 1991.
- **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.

- **DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, Swan JB.** Soil Compaction: Causes, Effects and Control. University of Minnesota Extension Service. 2001.
- **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.
- **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1983.
- **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.
- **Ghoumari F.** Matériau en Terre Crue Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.
- **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 doctorat 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.
- **GUILLAUD. 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.
- **Houben H, Guillaud H.** Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, , 355 p, 2006.
- **Houben H, Rigassi V, Garnier P.** Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.EAG,Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne,104 p, 1995.
- **ILO,** "Background document for the high-level meeting on employment and structural adjustment". Geneva, 1987.
- **ILO/UNIDO,** Small-scale Brickmaking, Memorandum Tecnico N° 6, International Labour Office (ILO), Ginebra, Suiza, 1984.
- **Jarrige JF.** Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgarh, Pakistan. pp. 21-28 in South Asian Archaeology, ed. B. Alichin, Cambridge University Press, 1989.

- **KEDI & CLEGHORN**, «Brick Manufacture in Developing Countries ".Scottish Academic Press Ltd .Edinburg, Scotland, 1980.
- **Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer MM, Chabannet M**. Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate. Cem Concr Compos;27(5):554–64, 2005.
- **Kriker A**. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud sec. Thèse de Doctorat d’Etat , ENP ;2005.
- **LAMBE. T**, "The engineering behavior of compacted clay: Jour. Soil Mech. and Fdns. Div., Am. Soc. Cir. Engrs". 1985.
- **Le Roux A**. Contribution à l’étude du traitement à la chaux des matériaux argileux. Thèse de doctorat Université des Sciences d’Orsay ; 106 p, 1969.
- **Locat J, Bérubé MA, Choquette M**. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. Revue canadienne de géotechnique. Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ont. Volume 27, numéro 3. 10 p, 1990.
- **Le Roux A**. Traitement des sols argileux par la chaux. Bull. liaison Labo P. et ch. Sept.-oct.,n° 40, pp 59-96, 1969.
- **MASTERS et al**, "Yeast mitochondrial RNA polymerase" is homologous to those encoded by bacteriophages T3 and T7. 1978.
- **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.
- **Michot A**. Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France,116 p, 2008.
- **Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R**. Microstructure and physical properties of lime-clayadobe bricks. Construction and Building Materials , 2386-2392. Volume 22, 2008.
- **ORAN**, (Organisation Africaine de Normalisation) Edition; "Blocs de terre comprimée : Normes Technologie N°11.CDI et CRA Terre- EAG" , Belgique ,1998.
- **PHILIPPONNAT et HUBERT**, Classification géotechnique des sol s basée sur la classification U.S.C.S. 1997.

- **Ramaswamy HS, Ahuja BM, Krishnamoorthy S.** Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *Int J Cem Compos Lightweight Concr*;5(1):3–13, 1983
- **Rao J.** Jute geotextile for improving the performance of highway embankment on soft marine soil. In: *Proc nat sem jute based geotextiles*, New Delhi, India; 1996.
- **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre
- **UNIDO**, "Appropriate Industrial Technology for Construction and Building Materials", No. 12, Naciones Unidas, New York, 1980.
- **Salehan I, Yaacob Z.** Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika J Sci Technol*;19(1):33–43, 2011.
- **SALMI Safia. GOUAL. I, " GOUAL. I, " LA CONSTRUCTION EN PISE ENTRE PERFORMANCES ENERGETIQUES ET PERCEPTION DES USAGERS CAS DU VILLAGE KABYLE AIT ITCHIR ". Thèse de magister 2014. UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI – TIZI OUZOU**
- **Stulz R, Mukerji K.** **Appropriate Building Materials:** A catalogue of Potential Solutions. Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.
- **United Nations.** Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- **TAALLAH Bachir, " ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES ". Thèse de Doctorat 2014. Université MOHAMED KHIDER – BISKRA.**
- **(<http://yserhouck.free.fr/Textes/torchis.htm>).** Photo I. 1 : étape de opération le torchis
- **(<http://www.totem-terre-couleurs.fr/maconnerie-terre/mur-de-bauge.php>).**Photo I. 2 : étape de opération Bauge
- **(<http://www.cap-a.fr/construction-terre-crue-nouveau-mexique/>).**Photo I.3: étape de opération Bauge
- **<http://www.craterre.org/>,** figure I.2 Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde.
- **[http://www. fr.wikipedia.org/](http://www.fr.wikipedia.org/),** photo I.7 la tour de babel, photo I.6 pyramides d’Egypte,
- **<http://www.sidielhadjaissa.com/>,** photo I.4 Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie.
- **<http://www.papercrete.com/>,** photo I.2: Différents produits de blocs de terre comprimée