

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière: *Génie Civil*

Spécialité: *Structures*

Thème

**Effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés
physiques et mécaniques de la brique de terre
stabilisée à la chaux et aux déchets de palmiers
dattiers**

L'étudiante :
ATTIA Ghania

Encadreur :
Dr. TAALLAH Bachir

Promotion: Juillet 2019

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur **Dr. TAALLAH Bachir** pour ces précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, celle qui a sacrifiée et souffert les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussir

Ma chère mère

A mon cher père, le plus noble qui par son courage a consacré tous ses efforts, et ses moyens pour m'aider à accomplir ce mémoire, et pour me faire réussir.

A mes chers frères

A toutes les étudiants des années master en Génie Civile structure (année universitaire 2018/2019)

Et tout qui j'ai les oubliés d'écrire, ils sont toujours dans mon cœur.

ATTIA GHANIA

RESUME

Le coût excessif des matériaux de construction, ainsi que la forte augmentation de la facture de consommation en énergie, a poussé les responsables et les chercheurs dans tous les pays développés ou en voie de développement à rechercher des matériaux plus économique et durable et qui ne nuisent pas à l'environnement. Dans ce contexte, on s'est intéressé à la valorisation des matériaux locaux, notamment les produits en terre à base de matériaux bio-sources.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet du superplastifiant , entant qu'adjuvant fluidifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi sur la sensibilité à l'eau des briques de terre crue à base de chaux et de déchets de palmiers dattiers. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé avec le sol, sept teneurs de chaux vive (1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11% et 13%), cinq teneurs de déchets de palmiers dattiers (0,2% 0,4% , 0,6%, 0,8% et 1%), trois teneurs de superplastifiant (1%, 2.5% et 4%) .

Les résultats obtenus ont montré un effet très bénéfique de l'utilisation du superplastifiant avec la réduction de la teneur en eau sur la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des briques de terre avec ou sans déchets. L'amélioration enregistrée sur les résistances à la compression et à la flexion a été de 54% et 105% successivement. Pour l'absorption totale d'eau et le gonflement, la réduction de 60% et 70% successivement a été observée.

Mots clés:

Brique de terre crue, superplastifiant, résistance mécanique, déchets de palmier dattiers, absorption d'eau, gonflement.

الملخص

إن التكلفة الكبيرة لمواد البناء، وكذلك الزيادة الكبيرة في فاتورة استهلاك الطاقة، دفعت الكثير من المسؤولين والباحثين في جميع البلدان المتطورة والسائرة في طريق النمو إلى البحث عن مواد اقتصادية تتسم بالديمومة، ولا تؤثر على البيئة.

في هذا السياق انصب اهتمامنا على ترمين المواد المحلية وبشكل خاص المواد المكونة من التربة والمواد ذات المصدر النباتي.

يهدف هذا العمل بشكل رئيسي إلى دراسة تأثير الملدن المتفوق باعتباره مادة مضافة مسيلة على الخصائص الريولوجية والميكانيكية للبنات التربة الطازجة المكونة من الجير ونفايات نخيل التمور وكذا درجة تأثيرها بالماء.

لتحقيق هذا الهدف قمنا باستخدام التربة مع سبع نسب من الجير الحي (1%، 3%، 5%، 7%، 9%، 11%، 13%) وخمس نسب من نفايات نخيل التمور (0.2%، 0.4، 0.6، 0.8، 1%).

النتائج المتحصل عليها بينت التأثير الجيد ايجابي لاستخدام الملدن المتفوق على المقاومة الميكانيكية والحساسية للماء على لبنات التربة مع أو بدون نفايات النخيل، وقد تم تسجيل تحسن في مقاومة الضغط والانحناء، بنسبة 54%، و105%، على التوالي، كما لوحظ انخفاض في نسبة الانتفاخ والامتصاص الكلي للماء بنسبة 60% و70% على التوالي.

الكلمات المفاتيح:

لبنات التربة الطازجة، الملدن المتفوق، المقاومة الميكانيكية، نفايات نخيل التمور، الامتصاص الكلي للماء، الانتفاخ.

ABSTRACT

The excessive cost of building materials, as well as the sharp increase in the energy bill, has led managers and researchers in all developed and developing countries to seek more economical and sustainable materials that do not to the environment. In this context, we have been interested in the valorisation of local materials, especially earthen products based on plant materials.

The main objective of this work is to study the effect of the superplasticizer, as fluidifying additive on the rheological and mechanical properties as well as on the water sensitivity of earth bricks made of lime and date palm waste. To achieve this objective, we used with the soil, seven contents of quicklime (1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11% and 13%), five contents of date palm waste (0, 2% 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1%), three contents of superplasticizer (1%, 2.5% and 4%).

The results obtained showed a very beneficial effect of the use of the superplasticizer with the decrease of the water content on the mechanical strength and insensitivity to water of earth bricks with or without date palm waste. The improvement recorded on compressive and flexural strengths was 54% and 105% successively. For total water absorption and swelling, the decrease of 60% and 70% successively was observed.

Key words:

Raw earth brick, superplasticizer, mechanical strength, date palm waste, water absorption, swelling.

Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACE

RESUME.....	I
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	X
Introduction Générale.....	2

PREMIÈRE PARTIE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

chapitre 1: L’adobe (Brique De Terre Moulee).....	
1.1. Introduction	6
1.2. Définition	7
1.3. La composition des briques de terre crue	7
1.4. Les proportions	8
1.5. Modes de fabrication de l'adobe	9
1.5.1. Le mode de fabrication manuel.....	9
1.5.2. Le mode de fabrication mécanisé	10
1.6. Les produits	10
1.7. La production d’adobe	11
1.7.1. Test permettant de vérifier la convenance du sol.....	11
1.7.2. Les étapes de production des briques	12
1.8. Les avantages de l’adobe	13
1.9. Les inconvénients de l’adobe	13
1.10. La terre, un matériau de construction	14
1.10.1. Définition.....	14
1.10.2. Composition.....	14
1.10.3. Rappel sur les argiles	15
1.10.3.1. Définition	15
1.10.3.2. Principaux types d’argiles	15
1.10.3.3. Texture ou Granularité	18
1.10.3.4. La plasticité.....	19
1.10.3.5. La compressibilité	19
1.10.3.6. La cohésion	20
1.11. Propriétés et techniques de stabilisation	20
1.11.1. Stabilisation	20

1.11.2. Objectifs	21
1.11.3. Les procédés de stabilisation	21
1.11.4. Les moyens de stabilisation	22
1.11.5. Modifier la texture et la structure.....	23
1.11.6. La correction de texture.....	24
1.11.6.1. Principe	24
1.11.6.2. Etablir la courbe granulométrique	24
1.11.7. Stabilisation à la chaux	25
1.11.7.1. Généralités	25
1.11.7.2. Mécanismes.....	26
1.11.7.3. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques	27
1.11.7.4. Efficacité et dosage.....	27
1.11.8. Stabilisation par l'ajout de fibres	28
1.11.8.1. Principe	28
1.11.8.2. Rôle.....	28
1.11.8.3. Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction.....	30
1.11.8.4. Les fibres végétales (déchets de palmiers dattiers)	30
1.11.8.4.1. Le palmier dattier	30
1.11.8.4.2. Déchets de palmiers dattiers	30
1.12. Conclusion	31
chapitre 2: L'effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés de la brique de terre crue renforcée par des fibres végétales	
2.1. Introduction	33
2.2. Effet des adjuvants fluidifiants sur les matériaux cimentaires	34
2.2.1. Définition [norme EN 934-2].....	34
2.2.2. Catégories [Norme NF EN 934-2].....	34
2.2.3. LES FLUIDIFIANTS.....	35
2.2.4. But de l'utilisation des adjuvants fluidifiants	36
2.2.5. Effet du fluidifiant.....	36
2.2.6. Modification de l'ouvrabilité du béton	37
2.2.7. Modification des résistances mécaniques du béton.....	37
2.2.7.1. Différences d'appellation	37
2.2.7.2. Influence du dosage en fluidifiant.....	38
2.2.7.3. Influence de la température	38
2.2.7.4. Influence du malaxage	38
2.2.7.5. Influence du dosage en ciment.....	38
2.2.7.6. Influence d'un retardateur	38
2.2.7.7. L'entraînement d'air	38
2.3. Les superplastifiants	39
2.3.1. Définition [norme EN 934-2].....	39
2.3.2. Ajout du superplastifiant	40
2.3.3. Mécanismes d'actions	41
2.4. Superplastifiant nommée GLENIUM 27	43
2.5. L'effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés de la brique de terre crue renforcée par des fibres végétales	43
2.6. Conclusion	45

DEUXIEME PARTIE:ETUDE EXPERIMENTAL

Chapitre 3: Matériaux De L'étude Et Techniques Expérimentales

A. Caractéristiques des Matériaux utilisés

3.1. Introduction	48
3.2. Matériaux utilisés	48
3.2.1. Sol.....	48
3.2.1.1. Origine du sol	48
3.2.2. Sable concassé	52
3.2.3. La chaux	53
3.2.4. L'eau	54
3.2.5. Le superplastifiant	55
3.2.5.1. Essai sur le superplastifiant	55
3.2.6. Les déchets de palmiers dattiers	56

B. L'étude expérimentale

3.3. Introduction	58
3.3.1. Formulation des blocs	58
3.3.1.1. Matériels spécifiques	58
3.3.1.2. Mélanges	59
3.3.1.3. Codification des mélanges.....	62
3.3.1.4. Préparation des mélanges	63
3.3.1.5. La cure des blocs.....	63
3.3.2. Réalisation des essais	64
3.3.2.1. la maniabilité du mélange a l'état frais	64
3.3.2.1.1. Principe	64
3.3.3. Propriétés mécaniques	65
3.3.3.1. Résistance à la compression	65
3.3.3.2. Résistance à la flexion	65
3.3.4. Propriétés physique	66
3.3.4.1. Masse volumique (ρ).....	66
3.3.4.2. Absorption totale	66
3.3.4.3. Gonflement	67
3.3.5. Conclusion	68

Chapitre 4: Présentation et discussion des résultats

4.1. Introduction	70
4.2. Etude des propriétés de l'adobe à l'état frais	70
4.2.1. Effet de la teneur en eau sur la maniabilité de l'adobe	70
4.2.2. Effet de l'utilisation du superplastifiant sur la maniabilité de l'adobe	71
4.3. Les propriétés mécaniques de L'adobe	74
4.3.1. Résistance à la compression	74
4.3.1.1. L'effet de superplastifiant sur la résistance à la compression d'une brique sans déchets	74
4.3.1.2. L'effet de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique sans superplastifiant	75
4.3.1.3. L'effet de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique avec superplastifiant	76
4.3.2. Résistance à la flexion	77
4.3.2.1. L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la résistance à la flexion	77
4.3.2.2. L'effet du dosage en superplastifiant sur la résistance à la flexion d'une brique de terre avec déchets de palmiers dattiers	78

4.4. Les propriétés physiques de L'adobe	79
4.4.1. La masse volumique apparente	79
4.4.2. Gonflement	79
4.4.2.1. L'effet du superplastifiant sur la gonflement des briques de terre dans le temps	79
4.4.2.2. L'effet du superplastifiant sur la gonflement des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers	81
4.4.3. Absorption totale d'eau	83
4.4.3.1. L'effet du superplastifiant sur l'absorption totale d'eau dans le temps	83
4.4.3.2. L'effet de superplastifiant a l'absorption en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers	85
4.5. Conclusion	87
Conclusion Générale	90
Références Bibliographiques	95

Liste des figures

Fig.1.1: Moulage et séchage des blocs adobes.....	7
Fig.1.2: Composition des briques de terre crue	8
Fig.1.3: moule de l'adobe	10
Fig.1.4: Types des produits en adobe.....	11
Fig.1.5: Test permettant de vérifier la convenance du sol	12
Fig.1.6: Etapes de production des briques.....	13
Fig.1.7: Schéma de la structure de kaolinite.....	16
Fig.1.8: Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	16
Fig.1.9: Schéma de la structure de la montmorillonite	17
Fig.1.10: Structure de la montmorillonite	17
Fig.1.11: Schéma de la structure de l'illite.....	18
Fig.1.12: Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 μm	18
Fig.1.13: Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur en sable	25
Fig.1.14: Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids 26	26
Fig.1.15: Schéma représentative de palmier dattier	31
Fig.1.16: Déchet de palmier dattier	31
Fig.1.17: S Schéma d'une palme de palmier dattier.....	31
Fig.2.1: Compositions et classes granulaires des ciments, mortiers et bétons.....	34
Fig.2.2: utilisation de fluidifiant	36
Fig.2.3: Effet du fluidifiant.....	36
Fig.2.4: Modification de la résistances mécaniques du béton	37
Fig.2.5: dosage en adjuvant	37
Fig.2.6: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	39
Fig.2.7: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton 40	40
Fig.2.8: Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment 41	41
Fig.2.9: Mécanismes d'actions des superplastifiants Le ressuage.....	42
Fig.2.10: a) effet du SP et CSA sur la terre avec 55% de particules fines et. b) développement précoce de résistance à la compression dans le temps mesurée au pénétromètre.....	44
Fig.3.1: courbe granulométrique non corrigée.....	49
Fig.3.2: la courbe granulométrique corrigé	50
Fig.3.3: Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)	51
Fig.3.4: Analyse granulométrique du sable concassé.....	53
Fig.3.5: essai de densité d'adjuvant.....	56
Fig.3.6: Déchet du palmier dattiers issus d'un broyage des palmes.....	56
Fig.3.7: déchets de palmiers dattiers.....	57
Fig.3.8: déchets de palmiers dattiers (daimetere)	57
Fig.3.9: Moule utilisé pour la fabrication des blocs (compression).....	58
Fig.3.10: Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes (flexion).....	58
Fig.3.11: mélangés à sec.....	59
Fig.3.12: un malaxeur.....	59
Fig.3.13: Combinaison des mélanges des blocs.....	59
Fig.3.14: Optimisation à la teneur en cheau des mélanges	61
Fig.3.15: Présentation des limites d'Atterberg.....	62
Fig.3.16: Cure des blocs à l'étuve	63
Fig.3.17: Table à secousses.....	64

Fig.3.18: Principe d'essai de la consistance du mortier de terre	64
Fig.3.19: blocs adobe.....	65
Fig.3.20: Machine de compression	65
Fig.3.21: éprouvette 4-4-16.....	66
Fig.3.22: presse hydraulique pour l'essai de flexion.....	66
Fig.3.23: Schéma de principe de l'essai de résistance en flexion sur éprouvette 4-4-16 (AFNOR. NF EN 1015-11).....	66
Fig.3.24: Essai (Absorption totale).....	67
Fig.3.25: Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901).....	67
Fig.3.26: L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901).....	68
Fig.3.27: Essai (gonflement).....	68
Fig.4.1: Effet de la variation de la teneur en eau sur l'étalement de l'adobe sans superplastifiant avec et sans déchets	71
Fig.4.2: Effet de la variation du dosage en superplastifiant sur l'étalement du béton de terre sans déchets.....	73
Fig.4.3: Effet de la variation du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets sur l'étalement du béton de terre	74
Fig.4.4: Effet de la variation du dosage en superplastifiant sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue sans déchets.....	75
Fig.4.5: Effet de la variation de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue sans superplastifiant.....	75
Fig.4.6: Effet de la variation de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue avec superplastifiant	76
Fig.4.7: Evolution de la résistance à la compression d'une brique de terre crue avec superplastifiant en fonction de la masse volumique apparente).....	77
Fig.4.8: L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la résistance à la flexion d'une brique en terre sans superplastifiant	78
Fig.4.9: L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la résistance à la flexion d'une brique en terre avec superplastifiant.....	78
Fig.4.10: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la masse volumique apparente d'une brique en terre crue	79
Fig.4.11: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur le gonflement dans le temps d'une brique en terre crue	81
Fig.4.12: L'effet du superplastifiant sur le gonflement des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers.....	83
Fig.4.13: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur l'absorption dans le temps d'une brique en terre crue.....	85
Fig.4.14: L'effet du superplastifiant sur l'absorption des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers	86

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Moyens de stabilisation des terre remaniées	23
Tableau 2.1: Liste des plastifiants et superplastifiants pour ciment	42
Tableau 3.1: Les masses volumiques du sols.....	50
Tableau 3.2: Les limites d'Atterberg du sol	50
Tableau 3.3: Granularité du sol	51
Tableau 3.4: Classification du sol.....	52
Tableau 3.5: Valeur du bleu de méthylène	52
Tableau 3.6: Caractéristiques physiques du sable	53
Tableau 3.7: La composition chimique de la chaux	54
Tableau 3.8: les caractéristiques du GLENIUM 27.....	55
Tableau 3.9: caractéristique des de superplastifiant	56
Tableau 3.10: caractéristique physiques des déchets de palmiers dattiers	57
Tableau 3.11: Composition chimique des déchets de palmes sèches	57
Tableau 3.12: Composition des différents mélanges employés dans cette étude ...	60
Tableau 3.13: Codification des mélanges	62

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le coût excessif des matériaux de construction, ainsi que la forte augmentation de la facture de consommation en énergie, a poussé les responsables et les chercheurs dans tous les pays développés ou en voie de développement à rechercher des matériaux plus économique et durable et qui ne nuisent pas à l'environnement.

Contrairement au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. En effet, il est notoire que les constructions en terre souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau. La stabilisation de la terre est utilisée pour pallier à ces problèmes, à travers différentes méthodes : physique, chimique et mécanique, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre à savoir : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimé, etc.

L'adobe est une technique très ancienne, qui utilise fréquemment la paille comme stabilisant. Pour sa préparation on utilise une quantité importante d'eau pour que le mélange soit plastique, en vue de faciliter sa mise dans les moules. Mais cette procédure engendre une fissuration importante et une augmentation de la porosité, ce qui se traduit par une baisse des performances mécaniques, ainsi qu'une faible insensibilité à l'eau.

Pour contourner ce problème dans les matériaux cimentaires, on procède à l'utilisation des fluidifiants. En s'adsorbant à la surface des particules de ciment ou en se positionnant entre elles, les fluidifiants augmentent les forces de répulsions électrostatique entre elles, ce qui induit moins de contact entre ces particules et donc un meilleur écoulement du matériau frais. Les fluidifiants sont des réducteurs d'eau, ce qui permet d'améliorer les performances mécaniques.

L'objectif de ce travail est la valorisation des matériaux locaux, notamment le matériau terre et les déchets de palmiers dattiers, et l'étude de l'effet de l'introduction des adjuvants fluidifiants dans la fabrication des adobes stabilisés à la chaux, de manière à augmenter leurs performances mécaniques et leur insensibilité à l'eau.

Cette thèse structurée en deux parties (synthèse bibliographique et partie expérimentale), qui sont scindées en quatre chapitres:

- La première partie est composée de deux chapitres:
 - Le chapitre 1 est consacré à un aperçu général sur L'adobe, les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.
 - Le chapitre 2 fait le point sur l'effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés de la brique de terre crue renforcée par des fibres végétales .
- La deuxième partie, composée de deux chapitres, est consacrée à l'étude

Expérimentale :

- Le chapitre 3 fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (sol, chaux, sable concassé de palmier dattier , le superplastifiant et l'eau.). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des blocs, et les techniques de conservation, et finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.
- Le chapitre 4 fait le point sur les résultats et les discussions de l'étude expérimentale.

Enfin, une conclusion générale qui résume les principaux résultats.

PREMIÈRE PARTIE
Synthèse Bibliographique

CHAPITRE 1:
L'adobe (brique de terre moulée)

1.1. Introduction

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire, traduisant l'identité des lieux et des cultures. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentées sur le diagramme établi par le groupe CRATERRE en 1986 (Houben,2006). Parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales (CRATerre, 1991):

- **Adobe** : la terre a l'état de pâte plastique souvent amendée de paille ou autres fibres, moulée sous forme de briques séchées au soleil.
- **Pisé** : la terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée par banchée, avec une dame.
- **Terre-paille** : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.
- **Torchis** : la terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, recouvre en une ou plusieurs couches des claies qui hourdent une structure en colombages.
- **Terre façonnée** : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.
- **Terre extrudée** : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.
- **Bauge** : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois.
- **Terre comprimée** : la terre est comprimée sous forme de bloc dans un moule. Auparavant, on compactait la terre dans un moule à l'aide d'un petit pilon, ou en rabattant avec force un couvercle très lourd dans le moule. Aujourd'hui, on utilise des presses dont il existe une grande variété.

1.2. Définition

Les premiers éléments de construction utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », on est une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde.

L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de paille hachée ou d'autres fibres. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle.

Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexible. (RICHARD ,2010; MAKRI, 2010 ; CRATerre , 1991).

Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon fabriquée des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (Figure 1.1).

La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15x25x10cm soit 30x60x 10cm.

La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen –Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique (RICHARD, 2010 ; MAKRI,2010 ; CRATerre ,1991).



Fig.1.1: Moulage et séchage des blocs adobes (les grands voisins,2018).

1.3. La composition des briques de terre crue

La composition est de terre et de fibre (en général de la paille) et d'eau. La proportion d'argile et de sable dans la terre est à peu près identique. Si les briques sont trop argileuses, elles auront tendance à fissurer lors du séchage, trop sableuses, elles se décomposeront, trop

riches en matières organiques, elles seront poreuses. (Pierre Delot, 2015). Avec un peu de pratique, vous trouverez vite le bon dosage (Fig. 1.2).



Fig. 1.2: Composition des briques de terre crue(Pierre Delot, 2015).

1.4. Les proportions

La première étape consiste à trouver la juste proportion d'argile et d'agrégats. La plupart du temps, la terre du jardin est une excellente base pour fabriquer des briques. Elle est souvent trop argileuse, ce qui oblige à ajouter du sable.

Les proportions sont très variables en fonction du type de terre argileuse à disposition: dans le cas d'une terre "agricole", on peut partir sur des proportions de 1 à 2 parts de sable pour 5 parts de terre et, dans le cas d'une terre très argileuse, de à 2 ou 3 parts de sable pour 1 part d'argile.

L'idéal n'est pas de trouver une terre très argileuse, mais une terre qui présente déjà le bon ratio argile/sable. C'est moins de travail.

Le sable utilisé doit avoir une granulométrie étalée. Du sable 0-5 mm convient parfaitement. Il faut éviter de prendre des sables plus fins qui conduiraient à une fissuration des briques.

En revanche, on peut choisir du sable plus grossier dans une certaine mesure. Un mélange classique de sable et de gravier à béton n'est par exemple pas adapté à la fabrication d'adobes parce que les graviers empêchent d'avoir des arêtes propres. On peut en revanche tamiser le sable (ou directement la terre si elle est caillouteuse) avec du grillage de 13 mm.

L'objectif est d'obtenir des briques qui ne fissurent pas au séchage et qui sont suffisamment argileuses pour que, lorsqu'on les frotte à la main, il n'y ait pas de sable qui

s'effrite. Un mélange proportionnellement trop riche en argile aura tendance à fissurer tandis qu'un mélange trop sableux s'effritera et sera globalement moins solide.

L'idée est d'obtenir une brique solide, avec le plus fort taux d'argile possible et qui ne fissure pas.

1.5. Modes de fabrication de l'adobe

On distingue deux principaux modes de fabrication des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de fabrication traditionnel et un mode de fabrication modernisé.

1.5.1. Le mode de fabrication manuel

• Moules simples

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (Figure 1.3), la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi-ferme.

La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi-molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage).

Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour deux ouvriers.

• Moules multiples

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion.

Les moules doivent être manipulés facilement par deux ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante. (Figure 1.3).

Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8000 à 10 000 blocs par jour (DJOUHRI ,2007).



Fig.1.3: moule de l'adobe (DJOUHRI ,2007).

1.5.2. Le mode de fabrication mécanisé

La Fabrication mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux Etats Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Stumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au-dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés.

Ce type de machine permet une fabrication pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour.

1.6. Les produits

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux), (Figure 1.4).

Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée. Les dimensions les plus fréquentes de 40 x40x15 cm ou 40x30x15 cm, ou 40x20x10 cm). On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits

classique, produits spéciaux, produits antisismiques, (HOUBEN,1987; VERNEY,1988 ; GUILAUD,1997).



Fig.1.4: Types des produits en adobe (HOUBEN, 1987 ; VERNEY,1988 ; GUILAUD,1997).

1.7. La production d'adobe

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction (DJOUHRI ,2007; CORPUS, 2006).

La production d'adobe est basée sur le principe de moulage d'une terre préparée à l'état plastique, séchée naturellement sur le sol. La quantité d'eau nécessaire est d'environ un quart du volume de la terre sèche.

La technique de production (sélection de la qualité de la terre et du temps de séchage) participe largement à la prolongation de la vie d'une construction en terre crue.

Les sols les plus adéquats à la fabrication des briques de terres crues sont constitués de sable (55- 75%), de limon (10-28%) et d'argile (15-18%). Cependant, il arrive parfois que la composition de la terre ne soit pas idéale. On constate alors l'apparition de fissures dans les briques lors du séchage (trop d'argile), ou que la cohésion de la pâte est trop faible (trop de sable).

Cependant, un simple test permettra de vérifier et d'ajuster la qualité de la terre à employer.

1.7.1. Test permettant de vérifier la convenance du sol

1. Rouler avec la paume de la main un "boudin" de pâte de terre (forme de cigare).
2. Faire le "ruban" le plus long possible.

3. Tenir le ruban entre les doigts.
4. Mesurer la longueur du ruban au moment de sa rupture.
5. Si la rupture se manifeste entre 5-15 cm: la terre est convenable pour le mélange.
6. Ajouter de l'argile si la rupture se manifeste avant 5 cm.
7. Ajouter du sable si la rupture se manifeste après 15 cm.

Pour la production des briques on procède aux étapes suivantes.

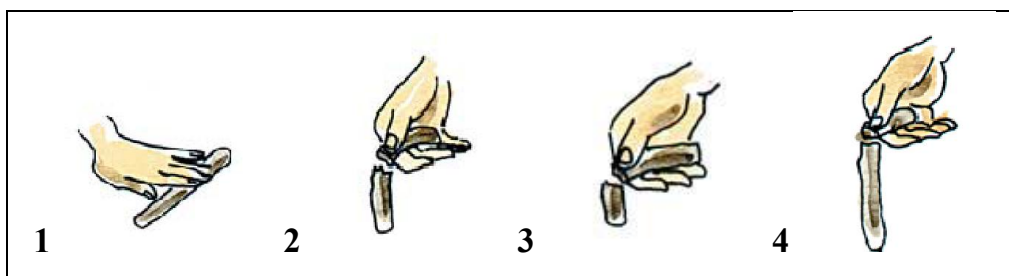


Fig.1.5: Test permettant de vérifier la convenance du sol

1.7.2. Les étapes de production des briques

1. Creuser une fosse dans le terrain qui servira de récipient pour mélanger la terre avec la paille et l'eau. Mélanger les ingrédients avec une pelle et laisser reposer deux jours.
2. Remuer le mélange une fois durant les deux jours, en marchant les pieds nus sur la pâte obtenue.
3. Fabriquer des moules en bois de dimension 40x40x10 cm. Diviser chaque moule en deux compartiments égaux avec une planche de dimension 40x10 cm.
4. Verser la pâte préparée dans chaque compartiment, secouer les moules pour aider à compacter la pâte. Le moule doit être propre et préalablement mouillé pour faciliter le démoulage. A la fin, niveler la surface avec une truelle. Les briques présentent un retrait assez important et leur qualité doit être soignée.
5. Laisser bien sécher durant 5 à 10 jours.
6. Renverser les moules sur la terre pour libérer les briques. Taper sur le dos des moules si nécessaire.

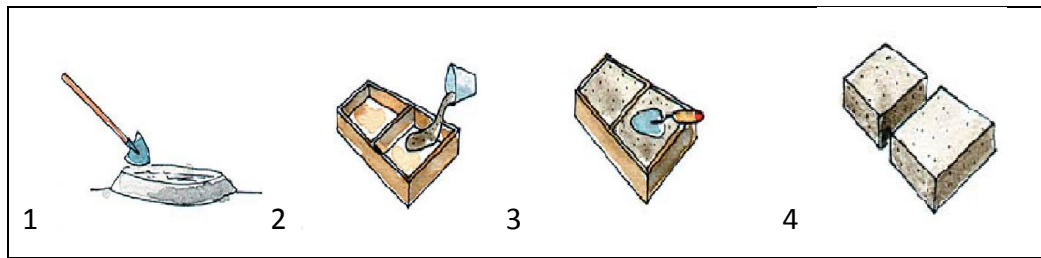


Fig.1.6: Etapes de production des briques

1.8. Les avantages de l'adobe

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels qui se résument en :

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- D'emmagasiner la chaleur.
- Réduire la consommation d'énergie.
- De ne produire virtuellement aucune pollution.
- Construction peu coûteuse.
- N'entraîne pas la production de gaz (RICHARD , 2010).

1.9. Les inconvénients de l'adobe

- Fragile.
- Nécessite des travaux d'entretien
- Consommation d'eau élevée.
- Aire de séchage étendue.
- Temps de séchage tributaire du climat.
- Bloc de faible résistance à l'eau.

1.10. La terre, un matériau de construction

1.10.1. Définition

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 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).

1.10.2. Composition

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments :

Les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (<2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles).

Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben, 1996).

Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables.

Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979).

1.10.3. Rappel sur les argiles

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition de roches. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuil et.

Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux.

Dans cette partie et pour définir cette nature physico-chimique, on présente la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles.

1.10.3.1. Définition

Il n'y a pas de définition universelle du terme « 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 phyllosilicates ; 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 ferrifères (lépidocrocite, maghémite...).

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 2 μm (Michot, 2008).

1.10.3.2. Principaux types d'argiles

Il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

a. La kaolinite

Les kaolinites sont des argiles di octaédriques (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å (figure 1.7 ; 1.8). Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les O- présents sur la surface supérieure et les H+ de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, assurant avec les liaisons de Van der Waals une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau.

Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites (association de plusieurs feuillets) (Tessier, 1984), qui résultent de cet empilement, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et qui ne permettent pas la pénétration de l'eau au sein de l'espace inter foliaire et la substitution entre les feuillets.

La liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite (de quelques dizaines à quelques centaines de feuillets solidement liés l'un à l'autre) et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45 m²/g.

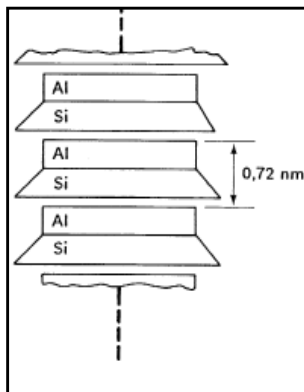


Fig. 1.7. Schéma de la structure de kaolinite, (d'après Lambe, 1953)

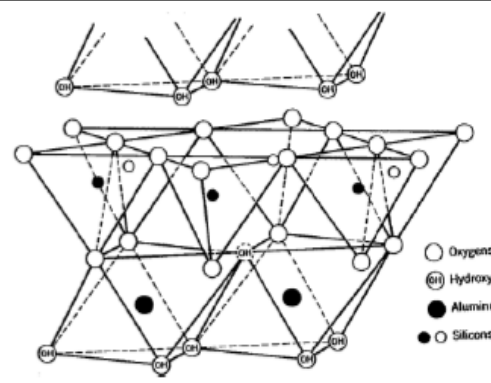


Fig. 1.8. Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim, 1986)

b. La montmorillonite:

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné: chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å (figure 1.9 ; 1.10).

Ce désordre de feuillets et la constitution des faces inférieures/supérieures de ces argiles ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace inter foliaire qui s'écarte. Par conséquent, la montmorillonite est très sensible à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets.

L'épaisseur du feuillet peut alors varier de 9,6 Å à 15 Å, voire plus selon la nature du cation compensateur et l'hydratation de l'espace inter foliaire. Les montmorillonites sont généralement calciques, plus rarement sodiques suivant la nature du cation prédominant (calcium, sodium).

Il est connu que le sodium confère des propriétés de gonflement supérieures à celles permises par la présence de calcium comme cation échangeable dans une argile (Saiyouri, 1996).

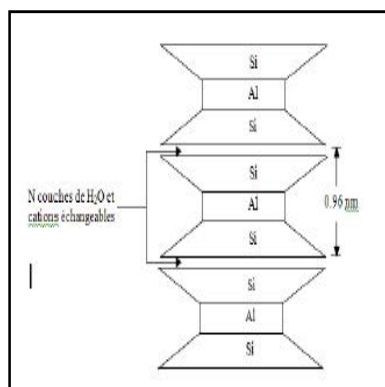


Fig. 1.9: Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe, 1953)

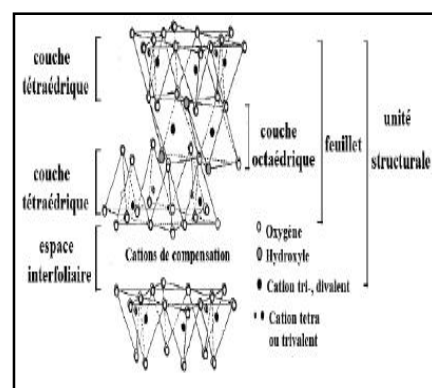


Fig 1.10: Structure de la montmorillonite (Reinholdt, 2001)

c. L'illite

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite mais elle possède un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations inter foliaires de potassium K^+ (figure 1.11 ; 1.12).

Les cations K^+ ont la particularité de posséder exactement la même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables.

Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des montmorillonites et la constitution de particules de grandes tailles.

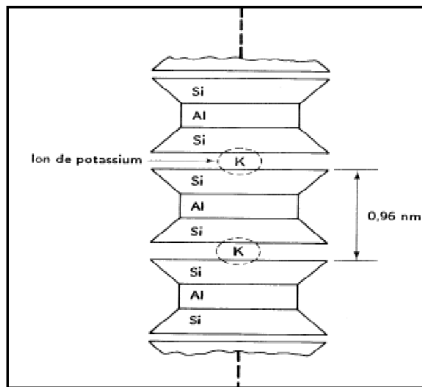


Fig. 1.11: Schéma de la structure de l'illite D'après (Lambe, 1953)

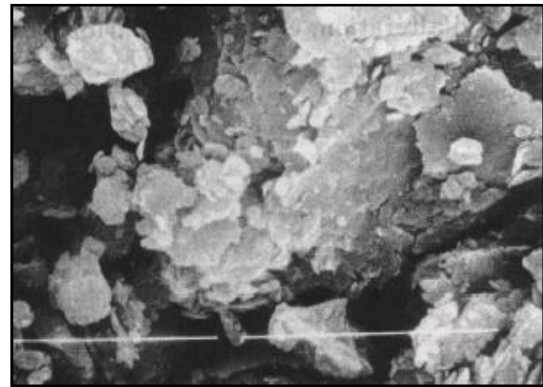


Fig. 1.12: Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz, 1991)

1.10.3.3. Texture ou Granularité

Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédiment métrique pour les fractions fines argileuses.

Les éléments tels que les graviers et les sables sont les éléments résistants du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement (Walker, 1995).

En plus, les réactions chimiques entre l'argile et la chaux (la réaction pouzzolanique) forment de nouveaux produits qui contribuent effectivement dans la valeur finale de la résistance d'une terre stabilisée à la chaux et ciment (Akpodje, 1985; Bell, 1996). Les silts ont une fonction intermédiaire, moins nette.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et réfèrent aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante (Houben, 2006):

- Cailloux : 200 mm - 20 mm
- Graviers : 20 mm - 2 mm
- Sables grossiers : 2 mm - 0.2 mm
- Sables fins : 0.2 mm - 0.06 mm
- Silts : 0.06 mm - 0.02 mm

- Silts fins : 0.02 mm - 0.002 mm
- Argiles : 002 mm - 0 mm

1.10.3.4. La plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité LP, l'indice de plasticité IP). Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols.

En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols (Burrough, 2001).

Pour un sol à gros grains, ou pour un sol à grains fins contenant une faible teneur en argile, une faible augmentation de l'humidité au-dessus de la limite plastique détruit les forces d'attraction, qui fournissent la résistance au cisaillement. Cela signifie que la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquide est faible, et l'indice de plasticité est également faible. Alors que, pour un taux élevé d'argile dans un sol, il faut une importante quantité d'eau pour détruire les forces d'attractions.

Dans ce cas, l'indice de plasticité est élevé. Ainsi, l'indice de plasticité est un moyen in direct pour mesurer les quantités et les affinités de l'humidité de l'argile dans le sol. Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées.

Les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent (USACE, 2000).

1.10.3.5. La compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO).

Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée et moins l'eau pourra y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.

La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et, de ce fait, incompressibles. L'essai Proctor, l'essai le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté est beaucoup plus adapté aux sols pulvérulents.

1.10.3.6. La cohésion

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $\Phi < 2 \text{ mm}$) qui lie les grains inerte entre eux.

Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles.

Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante (Houben, 2006):

- Mortier Sableux,
- Mortier Maigre,
- Mortier Moyen,
- Mortier Gras,
- Argiles.

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

1.11. Propriétés et techniques de stabilisation

1.11.1. Stabilisation

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).

Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées grâce à l'ajout de stabilisants.

La stabilisation consiste donc à modifier les caractéristiques d'une terre en vue de les améliorer. Elle induit des processus de modification qui agissent directement sur le système terre/eau/air et permet l'obtention de propriétés permanentes qui peuvent convenir à une ou des applications particulières du matériau terre en construction (Techniques de l'Ingénieur 2014)

1.11.2. Objectifs

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont (Winterkorn , 1975 ; Nations Unies, 1992 ; Symons, 1999):

- l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- la réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),
- l'amélioration de la résistance à l'érosion des vents et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

1.11.3. Les procédés de stabilisation

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

a. 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.

b. 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).

c. 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:

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



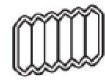

1.11.4. Les moyens de stabilisation

Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon Rigassi (Rigassi,1995), il y a six modes de stabilisations :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés physique et chimique (Houben,2006) (tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Moyens de stabilisation des terre remaniées (Houben,2006)

Stabilisant	Nature	Procédé	Moyens	Principe	Symbole	
Sans apport de stabilisant		Mécanique	Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires		
Avec apport de stabilisant	Stabilisants inertes	Minéraux	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement		
		Fibres				
	Stabilisant physico-chimique	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement	
				Liaisonner	Former des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile	
		Hydrophobants	Chimique	Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux	
				Hydrofuger	Éliminer au maximum l'adsorption et l'absorption d'eau	

1.11.5. Modifier la texture et la structure

Il est en fait possible d'intervenir sur deux des principales caractéristiques d'une terre qui sont la texture et la structure.

Ces interventions visent notamment à agir sur trois propriétés principales qui sont la porosité, la perméabilité et la résistance mécanique.

Les principaux objectifs que l'on poursuit en intervenant sur ces caractéristiques et ces propriétés sont :

- la réduction de la porosité.
- la diminution du gonflement.
- le retrait de la terre.
- l'obtention d'une meilleure cohésion.
- l'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface.
- l'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On remarquera que la stabilisation est un problème complexe qui fait intervenir de nombreux paramètres exigea:

- la connaissance des propriétés de la terre

- la définition précise des améliorations envisagées
- l'économie du projet (coûts et délais)
- les techniques de production et de construction employées
- le parti architectural et notamment la relation entre la structure et la forme du bâtiment, l'entretien du bâtiment.

1.11.6. La correction de texture

1.11.6.1. Principe

Pour obtenir la meilleure résistance d'une terre, tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il faut réduire la proportion des vides et multiplier les contacts entre les grains (Houben,2006).

La correction de texture consiste à modifier la texture initiale de la terre, soit par tamisage (écrêtement) de fractions de grains excédentaires, soit par apport de fractions de grains faisant défaut.

L'opération de tamisage est en général pratiquée sur les terres trop riches en éléments grossiers (cailloux et graviers), et l'opération d'apport sur des terres trop riches en fractions de grains fins (argiles notamment) en augmentant les quantités de grains grossiers (apport de gros sables, graviers et cailloux).

1.11.6.2. Etablir la courbe granulométrique

Ces procédures sont délicates, particulièrement celle consistant à ajouter des fractions de grains faisant défaut.

On aura préalablement pris soin d'établir le tracé de la courbe granulométrique de la terre initiale, et l'on prendra un soin égal à bien vérifier les résultats obtenus en traçant la nouvelle courbe granulométrique après avoir modifié la texture initiale de la terre.

Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire. Il est possible de corriger une teneur trop forte ou trop faible en graves, en sables ou en fines. Un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant qu'un sol trop peu plastique le sera par apport de fines. La figure (1.13) présentées variations de plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange sable-argile pour différentes proportions de sable et d'argile (Doat,1979).

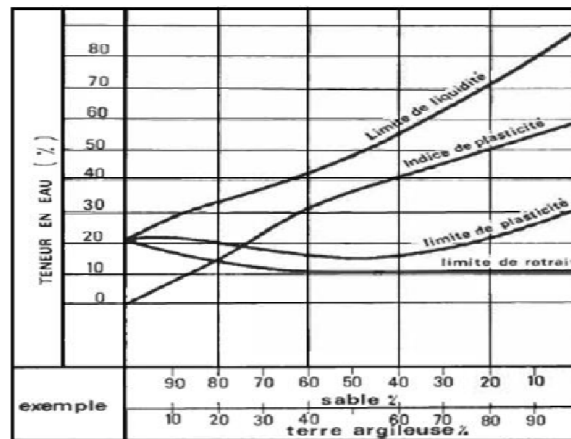


Fig.1.13. Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur en sable (Doat,1979).

1.11.7. Stabilisation à la chaux

1.11.7.1. 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 vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).
- La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau.

Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO₂ de l'air.

- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.
- les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques (Doat, 1979). La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant IP > 17 et LL > 40.

➤ 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 (Fig.1.13.) Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979) jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de % de chaux se caractérise à moyen et à long terme.

1.11.7.2. Mécanismes

Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux ; l'échange cationique, la floculation et l'agglomération des argiles, la carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques entre la chaux, la silice et/ou l'alumine (Choquette, 1988 ; Locat, 1990 ; Roger, 1996a).

Dans un premier temps, les deux premières réactions augmentent la plasticité, la maniabilité ainsi que la résistance du sol et réduisent typiquement l'indice de plasticité. Cette première phase est reconnue comme étant la période de modification du sol

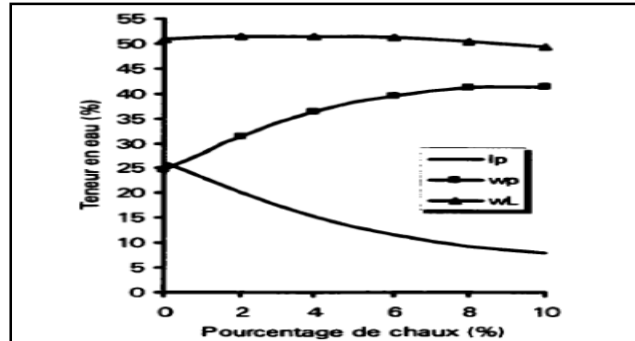


Fig. 1.14. Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979)

La deuxième phase est celle de la stabilisation qui englobe le troisième et quatrième type de réaction. Cette période entraîne une cimentation du produit qui augmente progressivement la résistance au cisaillement et la durabilité du sol. Il est reconnu qu'une température inférieure à 13 °C peut décélérer le processus de stabilisation alors qu'une température plus élevée l'accélère (Moore, 1987).

En utilisant de la chaux vive, la diminution de la teneur en eau sera plus forte en raison de la chaleur dégagée par la réaction (réaction exothermique). Quoiqu'il en soit, la chaleur dégagée par la réaction soit en grande partie responsable de l'évaporation de l'eau, le malaxage peut

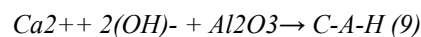
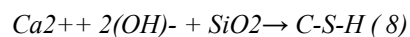
également provoquer une aération qui, elle aussi, est bénéfique à l'évaporation. Un apport de matériaux secs peut aussi contribuer au processus d'assèchement.

1.11.7.3. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques

La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques sont les deux réactions secondaires responsables de ladite stabilisation. La carbonatation de la chaux est la réaction entre cette dernière et le CO₂ de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium (Choquette, 1988).

Le calcium augmente le pH du sol augmentant ainsi la solubilité et la réactivité de la silice et de l'alumine présentes dans les particules d'argile (Herzog, 1963).

Les ions de calcium s'associent à l'alumine et à la silice pour former des agents de cimentation (équations 8 et 9) (Moore, 1987). Ces produits sont donc des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) (Choquette, 1988).



Les réactions pouzzolaniques peuvent se produire lentement, pouvant s'échelonner sur plusieurs mois et même des années.

Durant cette période, le sol gagnera de la résistance en cisaillement et la plasticité sera diminuée. Pour qu'une réaction pouzzolanique ait lieu, le pourcentage d'argile doit être >20% et la somme d'argile et de silt doit être >35 % (Broms, 1991).

A défaut d'atteindre ces valeurs, il n'y aura pas suffisamment de silice ni d'alumine disponibles pour les réactions pouzzolaniques. Par contre, même si une stabilisation n'a pas lieu, une modification du sol peut être atteinte par le biais de la floculation et de l'agglomération.

1.11.7.4. 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 ; 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 braisage 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, Toubeau (Toubeau,1987) a pu suivre 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, >semectite.

1.11.8. Stabilisation par l'ajout de fibres

1.11.8.1. Principe

La stabilisation par ajout de fibres est couramment employée dans les techniques traditionnelles de construction en terre.

Elle consiste notamment à ajouter de la paille dans les terres qui sont travaillées par pétrissage puis appliquées sur des clayonnages en bois ou moulées sous forme de blocs de terre séchés au soleil, technique présente dans de nombreuses régions du monde depuis des millénaires.

1.11.8.2. Rôle

L'ajout de fibres joue plusieurs rôles :

- Réduction, voire élimination de la fissuration de retrait
- Accélération du séchage par drainage de l'humidité vers l'extérieur du matériau
- Allègement du matériau

- Augmentation de la résistance à la traction, ce qui est sans doute le meilleur avantage. (Guillaud ; Houben, 1995).

La terre stabilisée avec des fibres présente donc une très bonne résistance à la fissuration ainsi qu'à la propagation des fissures car elles s'opposent au clivage lorsque la contrainte augmente.

Selon la résistance à la traction des fibres utilisées, la résistance au cisaillement sera augmentée d'un certain degré. Selon la quantité de fibres utilisées et leur résistance à la traction et selon la résistance à la compression de la terre et la friction interne existant entre les fibres et la terre, on pourra obtenir une bonne résistance à la compression grâce à l'armature de fibres mise en place.

Si l'on compare la résistance d'un matériau renforcé avec des fibres au matériau original sans fibre, on observe une résistance supérieure d'environ 15% pour le matériau contenant les fibres sauf dans le cas d'un matériau trop sableux où les fibres peuvent avoir un effet négatif.

Si on prend l'exemple de l'ajout de fibres de laine de mouton à la terre, on observe une augmentation de la résistance en compression d'environ 37%. En cas de déformations, on observe également une plus grande capacité à absorber l'énergie dans le cas de la terre renforcée de fibres, ce qui sera très intéressant dans les régions parasismiques.

Cela s'explique par le fait que les fibres modifient le comportement de la terre au-delà du point de rupture (Guillaud, Houben, 1995 ; Galán-Marín, 2010).

Il existe une quantité optimale de fibres à ajouter au-delà de laquelle on observe une perte de résistance. En effet, si l'on ajoute une quantité exagérée de fibres, la masse volumique sera trop diminuée et il y aura insuffisamment de points de contact entre les fibres et la terre. Ceci implique que les déformations ne seront plus transmises correctement, ce qui diminuera la résistance de la terre.

Des résultats probants sont déjà obtenus avec un dosage à 4% en volume. Les fibres sont placées préférentiellement dans toutes les directions afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Pour que ces derniers soient encore améliorés, on peut associer les fibres avec un second stabilisant comme le ciment, la chaux ou le bitume.

Les fibres peuvent être d'origine végétale, animale ou synthétique. On utilise ainsi généralement les pailles de toutes espèces, des balles de céréales, du chanvre, des fibres de noix de coco, des fibres de palmier, etc. pour les fibres végétales ; des poils et des crins de bétail pour les fibres animales ; de l'acier, des fibres de verre et de la cellophane pour les fibres synthétiques (Guillaud ; Houben, 1995).

1.11.8.3. Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- Les fibres métalliques (acier, fonte)
- Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes)
- Les fibres minérales (amiante, verre, carbone)
- Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier)
- Les fibres animales (poil, laine, soie)

1.11.8.4. Les fibres végétales (déchets de palmiers dattiers)

1.11.8.4.1. Le palmier dattier

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Celui originaire d'Afrique du Nord, est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golf Persique, ou il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage (Sbiai, 2011).

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties à savoir (figure 1.16): Palmes, Jeune palme, Régime de dates, Dattes, Gourmand, Stipe, Cicatrices annulaires, Rejet, Bulbe, Racines.

1.11.8.4.2. Déchets de palmiers dattiers

Il y a plusieurs types de fibres végétales utilisées dans la fabrication des produits en terre, comme le cas de la paille, le sisal et les fibres de palmiers dattiers. Ces dernières sont considérées comme déchets des travaux d'entretiens des palmeraies. Il faut signaler que certains déchets de palmiers dattiers sont sous forme de granulats.

L'Algérie a produit en 2001, 850 million de tonnes de déchets (IFEN, 2002), environ 50% de ces déchets sont recyclés en agriculture : les déchets agricole (palmier datte), une partie des déchets des collectivités et des ménages (boues issue de l'épuration des eaux, composts de déchets verts, d'ordures ménagères) (Michel, 2005).

Un déchet est défini dans le code de l'environnement comme étant tous résidu d'un Processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon.

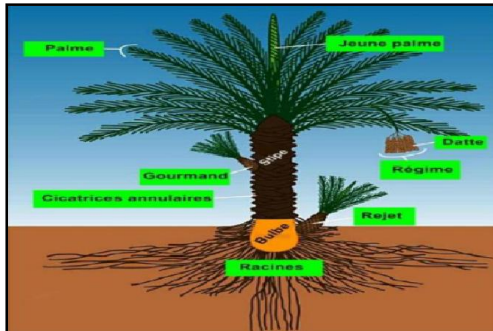


Fig.1.15: Schéma représentative de palmier dattier sciences.org/odj/doc/palmier_dattier



Fig.1.16: Déchet de palmier dattier (Cheiakh, 2018)

–Palmes

Les palmes sont les feuilles du palmier. Elles sont finement découpées et longues de 4 à 7 mètres. Les feuilles âgées peuvent rester contre le stipe quelques mois voire plusieurs années avant de tomber. L'ensemble des feuilles au sommet du stipe est appelé couronne; elle peut faire de 6 à 10 mètres d'envergure

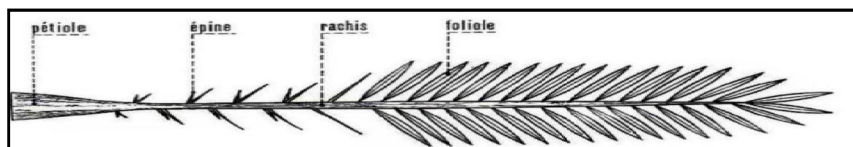


Fig.1.17. Schéma d'une palme de palmier dattier (Gagui 2015)

1.12. CONCLUSION

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général sur la construction en Terre crue, notamment la technique d'adobe.

L'ensemble des processus physico-chimiques engendrés par l'ajout de la chaux dans le sol ont été présenté. Ensuite, on a présenté l'effet de la chaux et les fibres végétales sur stabilisation du sol, notamment l'ajout des déchets de palmier dattier. Ceci va être certainement très bénéfique pour l'étude expérimentale.

CHAPITRE 2:

L'effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés de la brique de terre crue renforcée par des fibres végétales

2.1. Introduction

Les traces de l'architecture en terre remontent à 10 000 ans et sont toujours utilisées dans la plupart des climats et sociétés (Anger ; Fontaine, 2009). Sans transport et avec des possibilités de recyclage infinies, la terre fait partie des matériaux de construction ayant le plus faible impact sur l'environnement (Morel, 2007 ; Shukla, 2009), suivis d'une analyse très efficace. Régulation de la température et de l'humidité des espaces de vie intérieurs (Parra;Batty, 2006).

Nous pouvons actuellement observer un fort développement de la construction en terre, probablement en raison de préoccupations environnementales. Cependant, ce développement est limité en raison de la technique de construction en terre conventionnelle très rapide et économique consommant une grande quantité d'eau pour le cas des adobes et présente une grande sensibilité à l'eau.

D'autre part, nous avons le ciment, qui est un matériau incroyablement facile à utiliser, mais qui a un impact environnemental significatif (Schneider, 2011).

Dans ce dernier matériau, beaucoup d'ingénierie et la science a été investie afin d'améliorer la compréhension de l'utilisation du ciment dans la fabrication du béton.

Tandis que dans le cas de la terre il y a beaucoup à faire pour améliorer ses propriétés, que ce soit à l'état frais ou durci. L'objectif était d'améliorer les produits en terre en fabricant un matériau qui est aussi facile à mouler et aussi économique à utiliser que les produits de béton actuels, en utilisant tous les produits récents. Cette amélioration technologique peut se faire car le ciment et les argiles ont beaucoup d'analogie en termes d'interactions colloïdales et de forces d'adhésion, même si les forces de cohésion entre les particules sont beaucoup plus faibles pour les particules d'argile (Pellenq, 2008). Pour améliorer l'ouvrabilité et la résistance mécanique, ainsi que la sensibilité à l'eau, un contrôle minutieux de la rhéologie des argiles nécessite une meilleure compréhension de l'interaction colloïdale entre les particules (Pellenq, 2008).

2.2. Effet des adjuvants fluidifiants sur les matériaux cimentaires

2.2.1. Définition [norme EN 934-2]

L'emploi d'adjuvants doit répondre à la norme NF EN 934-2 (2009). Les adjuvants sont des produits dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortier ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de certaines de leurs propriétés, à l'état frais (le temps de prise, le processus de durcissement et l'ouvrabilité) ou durci (la résistance et la durabilité). Chaque adjuvant est défini par une unique fonction principale, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. (Thomas, 2014).

L'emploi d'adjuvants répond à des considérations techniques et économiques. On peut par exemple obtenir une meilleure ouvrabilité en remplaçant une partie de l'eau de gâchage par un plastifiant et réduire ainsi la capillarité, ce qui améliore la durabilité du béton.

L'efficacité des adjuvants dépend d'une quantité de facteurs qui sont, entre autres, le dosage de l'adjuvant, le type et le dosage en ciment, le dosage en eau ainsi que la consistance, les conditions de malaxage et la température. (Holcim ,2009).



Fig.2.1. Compositions et classes granulaires des ciments, mortiers et bétons (Ghomari , 2011).

2.2.2. Catégories [Norme NF EN 934-2]

- Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton
- ✓ Accélérateurs de prise
- ✓ Accélérateurs de durcissement
- ✓ Retardateurs de prise

- Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton(adjuvants fluidifiants)
- ✓ Plastifiants - Réducteurs d'eau
- ✓ Superplastifiants -Haut réducteurs d'eau (C'est l'utilisateur dans la recherche).

2.2.3. Les Fluidifiants

De plus en plus, l'utilisation d'adjuvants fluidifiants permet la conception de bétons possédant une ouvrabilité supérieure avec un rapport E/C de plus en plus faible. Il est primordial de maîtriser parfaitement l'ouvrabilité et de contrôler l'évolution de slump de tels bétons. La fluidité et le temps de prise du béton sont affectés par l'ajout de dispersant, le type de dispersant utilisé et l'échéance de l'incorporation de l'adjuvant.

De nos jours, il existe encore des adjuvants qui contribuent donc à la maîtrise

- Des caractéristiques finales d'un béton durable en influençant :
 - ✓ Sa résistance mécanique,
 - ✓ Sa résistance aux chocs,
 - ✓ Sa résistance à l'abrasion,
 - ✓ Sa résistance au gel,
 - ✓ Sa résistance chimique,
 - ✓ Sa couleur et son esthétique,
 - ✓ Son imperméabilité.
- Des contraintes de mise en œuvre :
 - ✓ En optimisant les coûts de production,
 - ✓ En optimisant les cadences de rotation des coffrages, les cadences de manutention des pièces,
 - ✓ En optimisant les délais et difficultés d'exécution et de remise en service,
 - ✓ En optimisant les conditions d'application : température, humidité, immersion,
 - ✓ En améliorant les conditions de travail,

La norme NF EN 934-2 et le Référentiel de la marque NF "Adjuvant pour béton, mortiers et coulis" donnent la définition suivante :

«Produit incorporé au moment du malaxage du béton ou mortier à une dose inférieure ou égale à 5% en masse de la teneur en ciment du béton ou mortier, pour modifier les

propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci». La qualité finale du béton dépend essentiellement des paramètres de composition et de mise en œuvre.

2.2.4. But de l'utilisation des adjuvants fluidifiants

L'utilisation de fluidifiant peut conduire à :

- ✓ Faciliter le mélange eau, ciment, granulats.
- ✓ Améliorer la plasticité de la pâte et faciliter sa mise en œuvre,
- ✓ Diminuer le rapport eau/ciment de 5 à 15% pour une même plasticité. Ainsi, du fait de la diminution de sa porosité finale, la résistance mécanique du matériau durci est considérablement améliorée. (Figure 2-2)

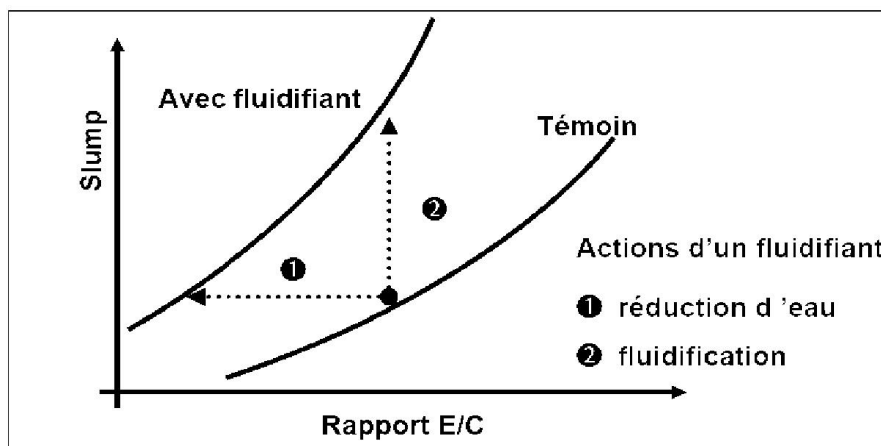


Fig. 2.2: utilisation de fluidifiant

2.2.5. Effet du fluidifiant

La défloculation des grains de ciments est observable dans la figure suivantes:

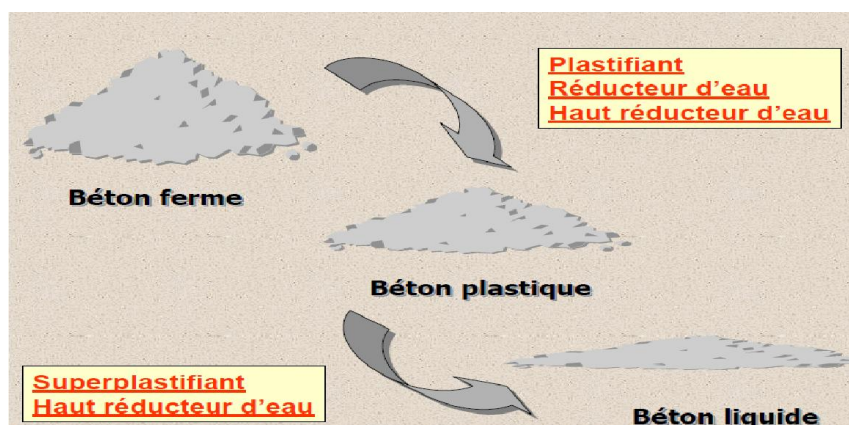


Fig.2.3: Effet du fluidifiant

2.2.6. Modification de l'ouvrabilité du béton:

La défloculation des grains de ciments permet une réduction d'eau ou une fluidification du béton.

2.2.7. Modification des résistances mécaniques du béton

La réduction d'eau accompagnant la fluidification du béton permet d'augmenter les résistances mécaniques du béton.

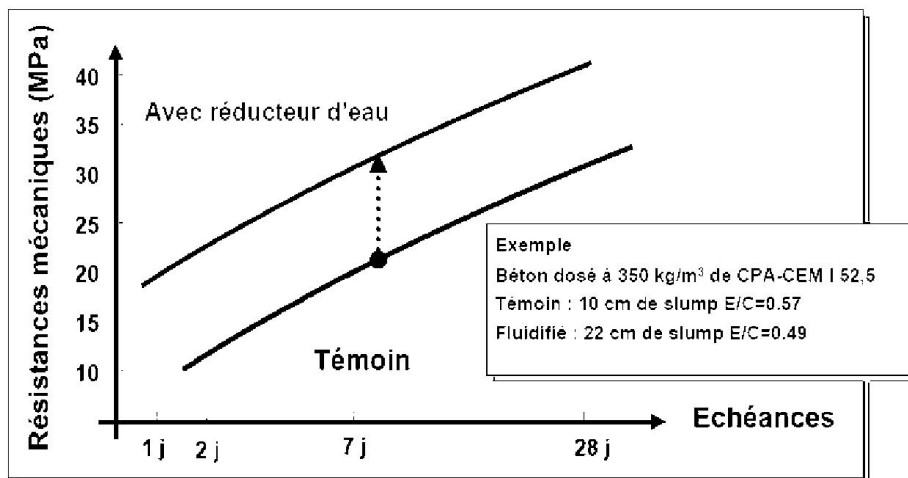


Fig.2.4: Modification de la résistance mécanique du béton

2.2.7.1. Différences d'appellation

Evolution de la consistance d'un béton de qualité à E/C constant en fonction de la nature de l'adjuvant et de son dosage.

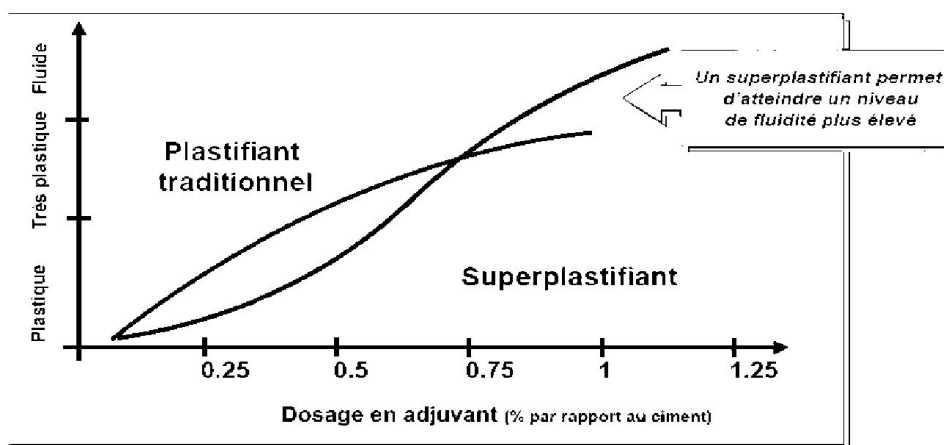


Fig.2.5: dosage en adjuvant

2.2.7.2. Influence du dosage en fluidifiant

Les effets d'un adjuvant sont généralement croissants avec la concentration en adjuvant. Toutefois, pour chaque formulation d'un béton il existe un dosage au-delà duquel l'effet de l'adjuvant est insignifiant : ce dosage est appelé point de saturation.

Les bétons ainsi surdosés présentent alors un fort ressuage et une ségrégation des gros granulats.

2.2.7.3. Influence de la température

La perte de maniabilité est d'autant plus rapide que la température est élevée. De plus, la stabilité des dispersants peut être très notablement altérée, ce qui diminue leur efficacité.

2.2.7.4. Influence du malaxage

Un malaxage violent, avant ou après l'addition de fluidifiant, augmente la diminution du slump. Ceci est aussi remarqué sans utilisation de dispersant.

2.2.7.5. Influence du dosage en ciment

La vitesse de perte du slump dans le temps est d'autant plus grande que la quantité de ciment dans le béton est plus importante. Ceci s'explique par la "consommation" (absorption) de l'adjuvant par le ciment.

2.2.7.6. Influence d'un retardateur

Il est parfois utile d'utiliser un retardateur pour pallier la perte d'ouvrabilité (surtout en période estivale).

En retardant les premières réactions d'hydratation, l'efficacité du fluidifiant est alors prolongée.

2.2.7.7. L'entraînement d'air

Un autre effet secondaire important de la plupart des fluidifiants et des réducteurs d'eau est l'entraînement d'air. Toutes ces molécules comportent à la fois des sites hydrophiles et hydrophobes, et jouent un rôle tensio-actif.

Ceci peut constituer un obstacle à l'amélioration des performances mécaniques en essayant de réduire le rapport E/C dans le but de diminuer la porosité. L'effet retardateur inattendu On peut observer un effet retardateur des fluidifiants dus à leur interaction avec l'hydratation de C3S.

2.3. Les superplastifiants:

L'apparition des bétons auto plaçant et des bétons Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP).

Les superplastifiants permettent en effet de dé flocculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau

Disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange figure (2.6). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place (CHANVILLARD G, 1993).

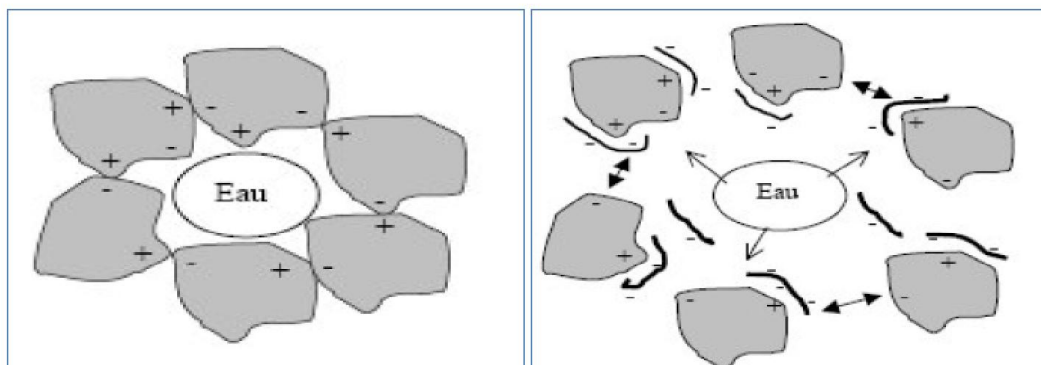


Fig.2.6: Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment

Hanaa,2009

2.3.1. Effets des superplastifiants sur les bétons

a. Effet sur le béton frais

- ✓ Amélioration du l'ouvrabilité.
- ✓ Diminution de la teneur en eau.

- ✓ Maintien de l'ouvrabilité dans le temps
- ✓ Diminution de ressuage et de la ségrégation
- ✓ Amélioration de la pompabilité du béton.
- ✓ Réduction du retrait hydraulique.

b. Effet sur le béton durcis

- ✓ Amélioration des résistances mécaniques à court et à long terme.
- ✓ Diminution du retrait.
- ✓ Amélioration de compacité du béton.
- ✓ Diminution de coefficient de compacité de la matrice du ciment

2.3.2. Ajout du superplastifiant

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement.

La figure (2.7) montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant.

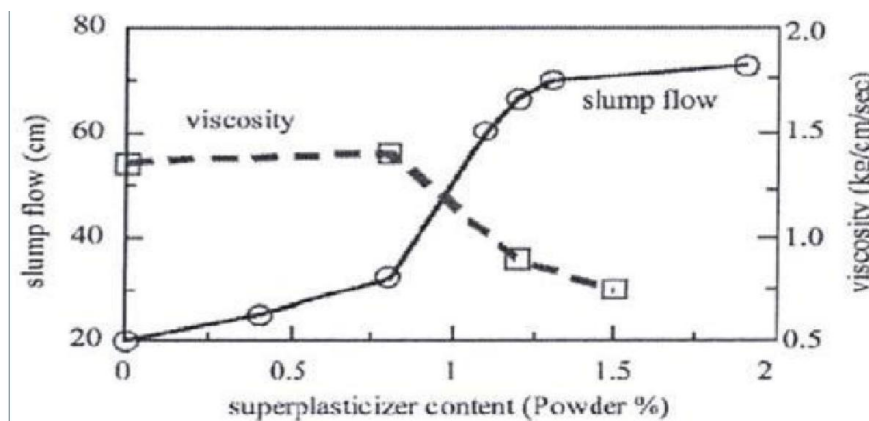


Fig.2.7: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton

En l'absence de superplastifiants, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiants, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement. De plus, lors de la dispersion.

Des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement.

La figure (2.8) reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment. (Edwige Nicolas2010).

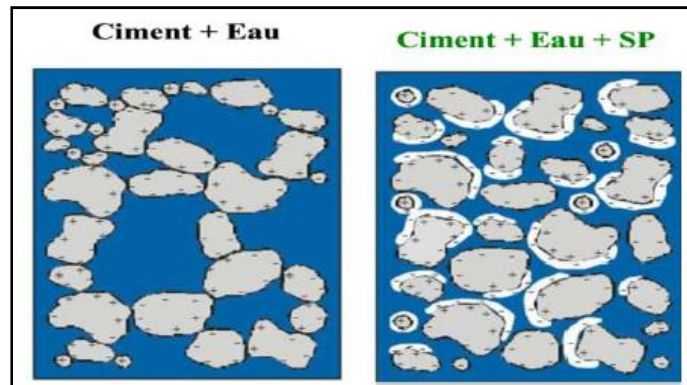


Fig.2.8: Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment (Edwige Nicolas2010).

Or, nous avons vu que l'étalement et le seuil d'écoulement étaient liés. Les superplastifiants permettent donc également de réduire le seuil d'écoulement. Par ailleurs, l'interprétation physique du modèle de Bingham et du modèle de Herschel-Bulkley montre que le seuil d'écoulement est généré par les frottements intergranulaires et que la viscosité dépend du degré de défloculation.

2.3.3. Mécanismes d'actions

Plusieurs mécanismes d'adsorption régissant le mode d'action des dispersants sont possibles :

1- les superplastifiants s'adsorbent sur la surface des particules et changent ainsi leurs propriétés inter faciales dans les suspensions : la charge des particules devient très négative et les particules n'ont plus tendance à s'agglomérer.

2- les polymères adsorbés à la surface peuvent empêcher le rapprochement des particules entre elles par encombrement stérique surtout si les chaînes polymériques sont suffisamment longues ;

3- l'adsorption d'une couche de polymère peut agir comme lubrifiant en permettant un meilleur glissement des particules, les unes par rapport aux autres. Les suspensions peuvent ainsi s'écouler plus aisément et elles deviennent plus maniables.

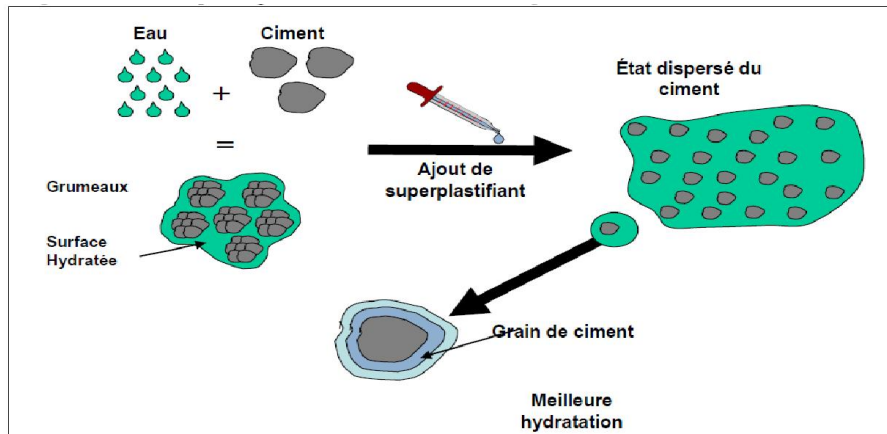


Fig.2.9: Mécanismes d'actions des superplastifiants Le ressuage

Les superplastifiants réduisent considérablement le ressuage des bétons comparativement aux bétons témoins de slump égal. Cette tendance s'explique par la diminution de la quantité d'eau libre due à l'effet réducteur d'eau. Au contraire, à E/C équivalent, le ressuage et la ségrégation sont augmentés par l'emploi de fluidifiants à fort dosage.

Tableau 2.1 : Liste des plastifiants et superplastifiants pour ciment

Ductal A2 (Chryso)	
Sikaplast Techno7 (Sika)	Plastifiant pour béton de ciment réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés; liquide brun.
Viscocrete Tempo 10 (Sika)	Superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non Chloré, à base de copolymère acry liquide; liquide brun clair.
314 Lankofluid (Parex Lanko)	Adjuvant superplastifiants des bétons et mortiers formulé à partir de polymères de synthèse. Liquide brun.
Glenium27 (BASF)	Adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylique modifié.

2.4. Superplastifiant nommée GLENIUM 27

Ce produit est un superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.

Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton et mortier où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises. Le **GLENIUM** se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

2. 5. L'effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés de la brique de terre crue renforcée par des fibres végétales

Actuellement, nous pouvons observer un fort développement de la construction en terre, probablement en raison de préoccupations environnementales, cependant, ce développement est limité sur le plan de recherche comparativement au béton à base de ciment. Ce dernier, est considéré comme un matériau incroyablement facile à utiliser mais qui a un impact significatif sur l'environnement (Bui, 2009).

Pour le ciment, beaucoup d'études ont été entreprises afin d'améliorer sa compréhension et son utilisation dans la fabrication du béton. Tandis que dans le cas de la terre, il ya moins d'études qui ont investi dans la technologie de fabrication du béton de terre via les technologies récentes, en vue d'améliorer ces performances mécaniques et sa sensibilité à l'eau. Mais l'exploitation de la technologie du béton à base de ciment dans la fabrication du béton de terre est faisable, vu que le ciment et les argiles présentent de nombreuses analogies en termes d'interactions colloïdales et de forces d'adhérence, même si les forces de cohésion entre particules sont beaucoup plus faibles pour les particules d'argile (Bui, 2011), du fait de la différence de la composition du liant (l'absence des réaction d'hydratation pour la terre).

Pour améliorer l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques des matériaux, des tentatives récentes ont été faites pour fluidifier le matériau de la terre afin de pouvoir le couler avec les mêmes techniques que le béton.

Le laboratoire français CRAterre et l'Université de Mokpo en Corée du Sud ont expérimenté de la terre moulable, dans laquelle des plastifiants pour ciment sont utilisés pour réduire la limite d'élasticité et environ 8 à 10% en poids de ciment sont utilisés pour que la

prise se fasse ce qui assure une résistance suffisante pour permettre le démoulage du coffrage. Ceci à fonctionné, mais la compréhension du comportement exact des argiles n'est pas atteinte (Kang, 2011). De plus, en tant que liant unique dans la terre, l'argile, une particule chargée inorganique, peut avoir une interaction superficielle modifiée à l'aide d'un plastifiant organique, comme le ferait une particule de ciment, afin d'obtenir une pâte fluide. La défloculation peut être atteinte en utilisant ce type d'adjuvant (Granli, 2014). Dans cette étude, Granli et al. ont comme objectif de confectionner un béton de terre auto plaçant à faible coût et pouvant atteindre une résistance mécanique suffisante pour un démoulage le plus tôt possible. Pour atteindre cet objectif, ils ont utilisé les matériaux suivant : la terre, ciment à faible impact environnemental, super plastifiant haut réducteur d'eau (0.5%, 1% and 2%) et avec un faible rapport eau/terre (0,35).

Les résultats obtenus montre effectivement la possibilité de produire un matériau fluide à base de terre, auto stable pouvant être démoulable après 24 heures voir(figure 2.9). Ce résultat est expliqué par la défloculation induite par l'introduction du super plastifiant dans le mélange avec la réduction de la quantité d'eau, et par l'effet de la prise de ciment.

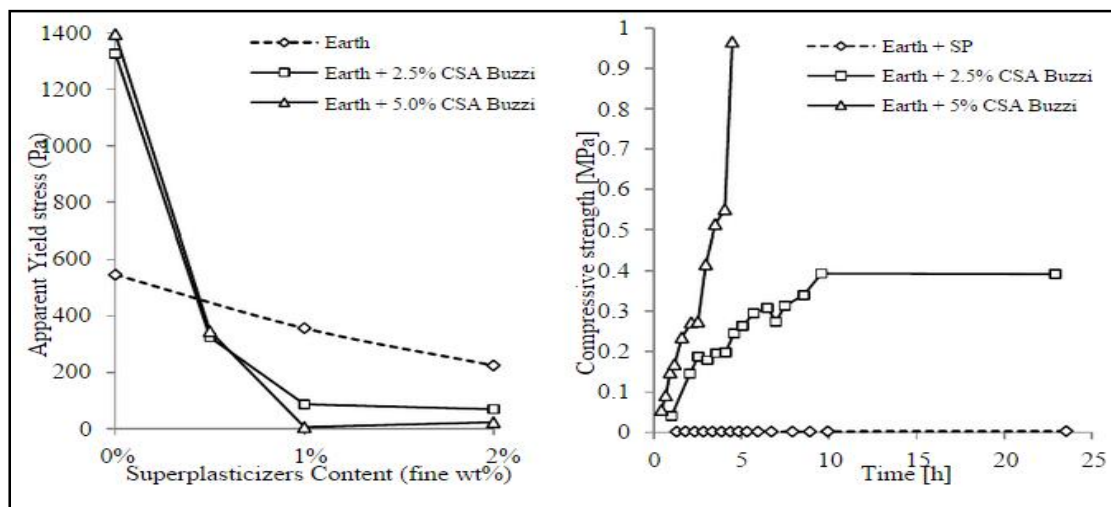


Fig.2.10: a) effet du SP et CSA sur la terre avec 55% de particules fines et. b) développement précoce de résistance à la compression dans le temps mesurée au pénétromètre

2.6. Conclusion

A travers la synthèse bibliographique on conclues il ya une possibilité d'améliorer les performances mécaniques d'un béton de terre en introduisant dans le mélange un adjuvant fluidifiant et un réduisant rapport eau/sol

Laut en assurant que le mélange à l'état ferme reste à l'état plastique ou fluide, ce que permet un coulage facile dans les moules.

En ce pesant sur cette conclusion, on s'intéressé dans la partie expérimentale à la fabrication de brique de terre crue avec des fibres végétales avec l'utilisation d'un superplastifiant.

DEUXIEME PARTIE:
Etude Expérimental

CHAPITRE 3:
MATÉRIAUX DE L'ÉTUDE ET
TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

A. Caractéristiques des Matériaux utilisés

3.1. Introduction

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des briques de terre exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des briques en fonction de leur utilisation.

Dans ce chapitre nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés.

3.2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont:

le sol, le sable concassé, la chaux, les déchets de palmiers dattiers, et les adjuvants fluidifiants (le super plastifiant).

3.2.1. Sol

3.2.1.1. Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Biskra (Algérie), il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

Nous avons effectué les essais suivants sur le sol:

➤ Caractéristiques physiques

- Analyse granulométrique sédimentation
- Poids volumique apparent
- Poids volumique absolu
- Essai au bleu de méthylène et surface spécifique
- Limite d'Atterberg

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. Houben (Houben, 1994) a indiqué que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10 mm; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression.

a. Composition granulaire

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais : les analyses granulométriques et sédiment normes NF P 18-560 et NF P 94-057 ont montré que les échantillons de carrière sont des sols argileux.

La courbe granulométrique sort du fuseau recommandé.

La figure suivante montre le graphe de la courbe granulométrique non corrigée de l'échantillon étudié.

Ainsi une stabilisation au sable était faite afin de corriger l'allure de la courbe granulométrique du matériau étudié (voir figure 3.1).

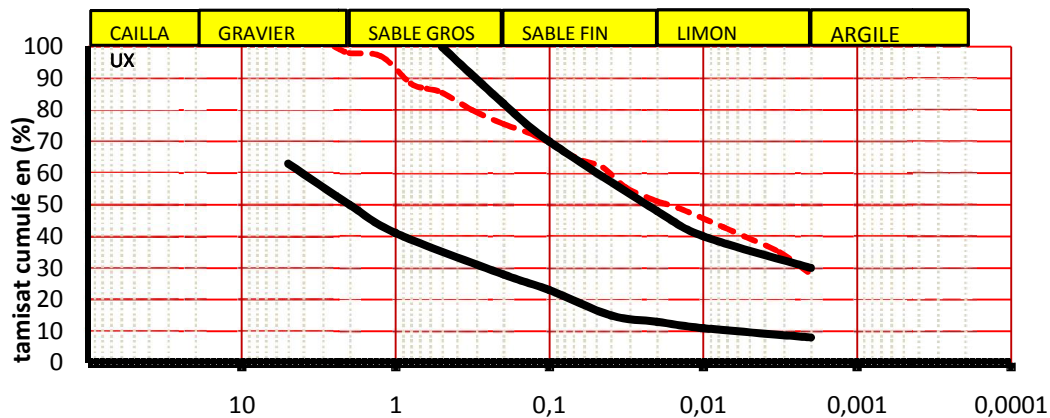


Fig.3.1: courbe granulométrique non corrigée

b. Correction granulaire du sol

Il est corrigé granulaire du sol en ajoutant du sable concassé.

Les résultats des essais sont présentés sur la (figure 3.2).

On constate selon la courbe granulométrique du sol, qu'elle se situe bien dans le fuseau limite recommandé par la norme des blocs de terre XP P 13-901. Cette norme recommande pour un sol destiné à la fabrication de blocs de terre, qu'il ne doit pas être trop argileux au risque d'entraîner des fissurations de retrait fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} < 30\%$) (figure 3.2).

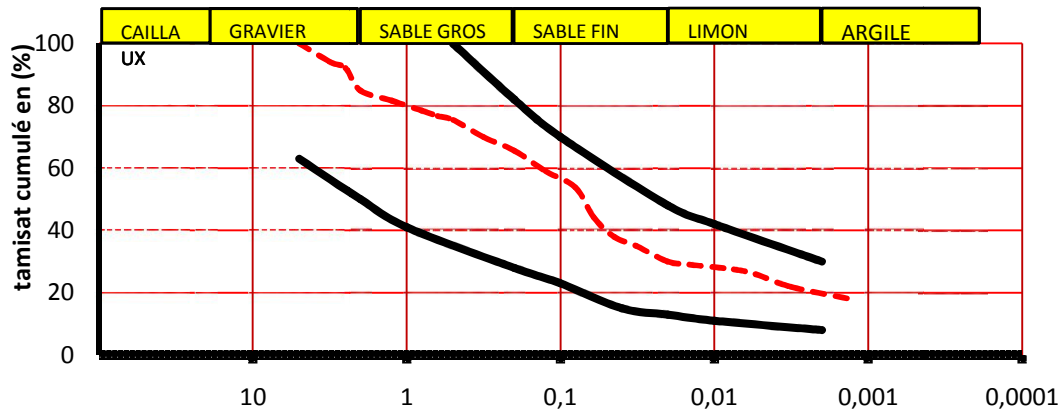


Fig.3.2: la courbe granulométrique corrigé

c. Les masses volumiques

Le tableau 3.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau 3.1 : Les masses volumiques du sol

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
1290	2560

d. Limites d’Atterberg (Norme NF P 94-051)

Les limites d’Atterberg permettent d’analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d’Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d’un sol (Doat, 1979).

Les essais définis par Casagrande s’effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4$ mm) selon la procédure de la norme NF P 94 051.

Les résultats des essais sont présentés sur le (tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Les limites d’Atterberg du sol

Limite de liquidité LL (%)	Limite de plasticité LP (%)	L’indice de plasticité IP (%)
39.7	19.2	20.5

D’après Atterberg et Burmister, on peut classer notre argile par son indice de plasticité ($IP = 20.5$) la nature de l’argile est une argile plastique.

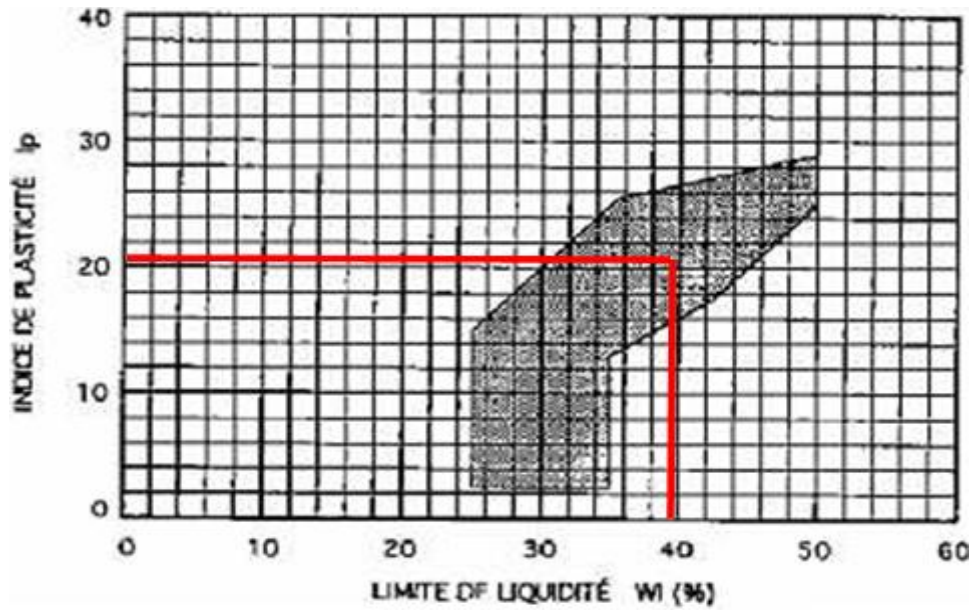


Fig.3.3: Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)

e. Classification géotechnique

Selon la classification du "triangle des textures" de l'INRA (Doat, 1979), on peut dire qu'il s'agit d'un (sol argile –plastique) et il est en général bien adapté pour la stabilisation des sols (Tableau 3.2).

La terre doit posséder, après façonnage, une bonne cohésion naturelle, c'est-à-dire que la teneur en argile doit être suffisamment élevée : supérieure à 10 % (c'est le cas de notre sol qui a 28 % d'argile).

Tableau 3.3 : Granularité du sol

Echantillon	Sable %	Argile %	Limon %	Nature du sol
Sol de Biskra	48.79	28	23.21	sols argileux

f. Essai au bleu de méthylène (ANF P 18-592)

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol.

L'essai a donc pour objet de mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, qui est la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono moléculaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

On appelle cette quantité, **la valeur de bleu**, notée VB et exprimée en grammes de bleu par 100 g de sol.

d.1. Classification du sol

On distingue les valeurs suivantes :(Tableau 3.4).

Tableau 3.4: Classification du sol

VBS	Classification du sol
$VBS \leq 0,2$	(sol insensible à l'eau).
$0,2 < VBS \leq 2,5$	sol peu plastique et sensible à l'eau)
$2,5 < VBS \leq 6$	sol de plasticité moyenne.
$6 < VBS \leq 8$	sols argileux.
$VBS > 8$	sols très argileux

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.5

Tableau 3.5: Valeur du bleu de méthylène

Echantillon	Valeur de bleu de méthylène VB	Classification des sols
Sol Biskra	2.8	sol de plasticité moyenne.

3.2.2. Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des briques est un sable concassé provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol.

Nous avons effectué les essais suivants :

- Analyse granulométrique.
- La masse volumique absolue.
- La masse volumique apparente.
- Equivalent de sable.

Les caractéristiques physiques du sable, déterminées selon les normes AFNOR , sont présentées sur le (tableau 3.6)

Tableau 3.6: Caractéristiques physiques du sable(AFNOR)

	Masse volumique absolues(Kg/m ³)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Equivalent de sable ES (%)		Distribution de la taille des grains (%)		
			visuel	au piston	0.01-0.08 mm	0.08-1.25 mm	1.25-5 mm
Sable concassé	2460	1390	65.2	64.8	4.2	51.8	44

La courbe granulométrique du sable est représentée sur la (figure 3.4)

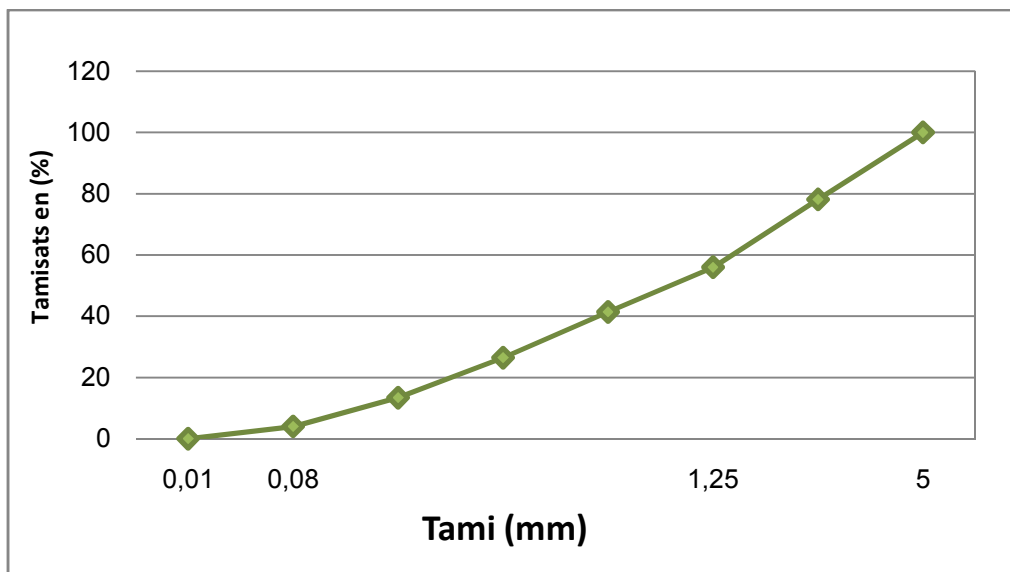


Fig.3.4: Analyse granulométrique du sable concassé

3.2.3. La chaux

La chaux est un matériau écologique utilisé aussi bien pour la maçonnerie que pour la décoration. Remplacé depuis le XXème siècle par le ciment, la chaux suscite un regain d'intérêt en raison de ses qualités intrinsèques qui en font l'élément incontournable d'un habitat sain.

Dans cette étude on a utilisé la chaux vive produite par l'unité de chaux de Saida (Algérie).

La composition de la chaux, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le Tableau (3.7).

Tableau 3.7. La composition chimique de la chaux

Designation	NHL	
Provenance	Usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saida, Algérie)	
Proprieties physiques	Densite apparente (g/l)	600-900
	Plus de 90 µm (%)	< 5
	Plus de 630 µm (%)	<30
	Plus de 630 µm (%)	0
Composition chimique	CaO(%)	> 73,3
	MgO(%)	<0,5
	Fe2O3(%)	< 2
	Al2O3(%)	< 1,5
	SiO2(%)	< 2,5
	SO3(%)	<0,5
	Na2O(%)	0,4-0,5
	CO2(%)	< 5
	CaCO3(%)	<10
	Materiau insoluble (%)	< 1

3.2.4. L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau qui contient peu de sulfate et ayant une température de 20 ± 1 ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

En référence à la norme NF EN 1008, l'eau potable toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui se trouvent donc l'eau de gâchage doit être vérifiée trois critères (chimique, physique et mécanique), si elle présente un doute pour éviter tout risque nous avons opté pour

une eau de gâchage qui est l'eau potable qui ne présente aucun risque d'après la norme suscitée.

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau de robinet) fournie au laboratoire de génie-civil à l'université de Biskra.

3.2.5. Le superplastifiant

Lors de cette étude, nous avons utilisé est un superplastifiant nommée GLENIUM 27 .ce produit est un superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.

Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton et mortier où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises. Le GLENIUM se différencie des super plastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Ses caractéristiques sont présentées (tableau 3.8)

Tableau 3.8: les caractéristiques du GLENIUM 27

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique	1.05±0.02 g/cm ³
pH	7±1
Teneur en chorures	0.1
Extrait sec	20±2
Na ₂ O eq	2
Étiquetage	Pas de symbole exigé

3.2.5.1. Essai sur le superplastifiant:

a. Essai d'extraits secs superplastifiant :

Quand il se présente sous forme liquide les adjuvants sont dissous dans de l'eau, donc, il faut savoir quelle proportion d'extrait sec (c'est-à-dire d'adjuvant proprement dit) contient l'adjuvant du commerce. Pour cela on procédera conformément à la norme NF P 18-380 :

- pesée d'une masse m₁ d'adjuvant dans un cristalliseur (m₁ =10g évaporation de l'eau.

Le cristalliseur étant sur une plaque chauffante à 60°C. Mise du cristalliseur à l'étuve à 105°C pendant 6 heures.

Soit m₂ la masse d'adjuvant après passage à l'étuve. Le pourcentage d'extrait sec est :
 Extrait sec(%)=100*m₂/m₁.

b. Essai de densité superplastifiant :

Pour étudier l'effet d'un adjuvant, il est important de savoir sa densité pour le calcul de son dosage entrant de la formulation du mortier.



Fig.3.5. essai de densité de superplastifiant.

Les résultats des essais sont présentés dans le (tableau 3.9).

Tableau 3.9: caractéristique des de superplastifiant

L'adjuvant	Extrait sec %	La densité
GLENIUM 27	24.6	1.086

3.2.6. Les déchets de palmiers dattiers

Les déchets de palmiers dattiers sont le produit des opérations d'entretien

Des palmeraies .Mais les constituants du palmes utilises dans ce travail sont les palmes broyés seulement.

Ces déchets sont ramènes de L'institut technique pour le développement de l'agriculture dans le désert, état d'Ain bin Nawi Biskra.



Fig.3.6: Déchet du palmier dattiers issu d'un broyage des palmes

On a utilise dans ce travail les résultats suivants:

a. Caractéristiques physiques

Les résultats des essais sont présentés dans le (tableau 3.10)

Tableau 3.10: caractéristique physiques des déchets de palmiers dattiers

Propriété	Diamètre (mm)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Absorption d'eau de saturation (%)
Valeurs	0-15	125.67	142.85	170



Fig.3.7: déchets de palmiers dattiers



Fig.3.8: déchets de palmiers dattiers (diamètre)

b. Composition chimique des déchets

Le tableau (3.11) montre une analyse de la composition chimique pour déchets de palmier dattiers

Tableau 3.11 : Composition chimique des déchets de palmes sèches.

Composition	MS % de mat frais	MO	MM	MAT	CB	NDF	ADF	CV	HCO SE	LIGN	CI
déchets de palmier	94,37 ± 0,50	84,74 ±0,13	15,25 ±3,13	3,90 ±0,40	30,70 ±0,30	89,44 ±0,16	65,30 ±0,74	32,83 ±2,31	23,98 ±2,81	20,45 ±2,36	12,02 ±0,69

B. L'étude expérimentale

3.3. Introduction

L'étude expérimentale de notre travail consiste à déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques de la brique de terre stabilisée à la chaux et aux déchets de palmiers dattiers.

Ces essais sont effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Biskra.

3.3.1. Formulation des blocs

3.3.1.1. Matériels spécifiques

Les éprouvettes prismatiques (10x10x10) cm³ ont été réalisées pour les essais de compression, gonflement, Absorption ; les éprouvettes de (4x4x16) cm³ pour les essais de flexion, dans des moules en acier (Figure 3. 9);(Figure 3.10).



Fig. 3.9: Moule utilisé pour la fabrication des blocs (compression)



Fig. 3.10: Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes (flexion)

3.3.1.2. Mélanges

D'après Michel (1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Alors, après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 63°C les matériaux (sol+sable +chaux),(Fig. 3.11) sont d'abords mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à chaux de 5 litres avec une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant trois minutes (Fig. 3.12).



Fig. 3.11: mélangés à sec



Fig. 3.12: un malaxeur

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé aussi sur l'étude réalisée par Guettala et al. (Guettala, 1997), qui a montré que la concentration du sable dans le bloc de terre a peu d'influence sur la résistance mécanique, mais des dosages entre 25 % et 40 % ont données les meilleurs résultats. Par suite, on a introduit 30 % de sable concassé dans tous les mélanges utilisés dans cette étude.

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la (figure 3.13) et le(tableau 3.12).

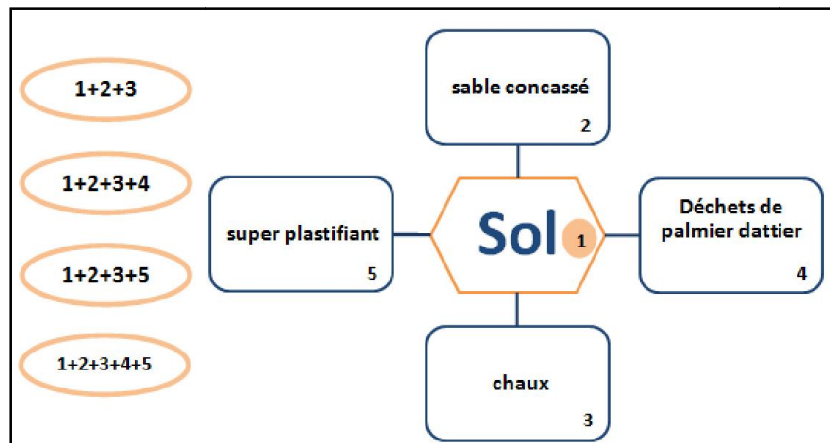


Fig.3.13: Combinaison des mélanges des blocs

Tableau 3.12: *Composition des différents mélanges employés dans cette étude*

Numéro du Mélange	Sol (%)	Sable Concassé (%)	Chaux (%)	déchets de palmier dattier	Superplastifiant
	par rapport au mélange sec (sol-sable)				
1	70	30	11	0	0
2	70	30	11	0.2	0
				0.4	
				0.6	
				0.8	
				1	
3	70	30	11	0	0.2
					0.4
					0.6
					0.8
					1
4	70	30	11	0.2	1
				0.4	
				0.6	
				0.8	
				1	
5	70	30	11	0.2	2.5
				0.4	
				0.6	
				0.8	
				1	
6	70	30	11	0.2	4
				0.4	
				0.6	
				0.8	
				1	

a. Optimisation à la teneur en chaux

On va discuter de l'effet de la chaux à travers les résultats de la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux qui sont présentés sur la figure 3.14. D'après cette figure, on constate que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux de 1 jusqu'à 11, mais après de 11 % à 13% on constate une réduction de la résistance de 15.2 %.

Pour l'interprétation de ces résultats, on s'est basé sur l'étude de Millogo et al. (Millogo,2008) réalisée sur les briques d'adobe stabilisées à la chaux. D'après les

auteurs, l'augmentation de la résistance est due à la formation d'une importante quantité de CSH devant une faible quantité de calcite et de pentlandite, alors que la réduction de la résistance est due la quantité de calcite et de pentlandite plus importante que celle de CSH.

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).

Donc la teneur en chaux optimale coïncide avec la teneur **11%**.

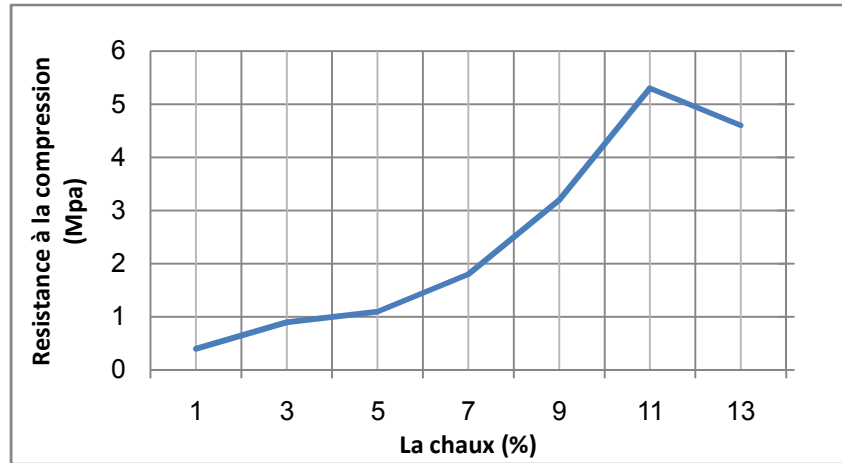


Fig.3.14: Optimisation à la teneur en chaux des mélanges

b. Optimisation à la teneur en eau des mélanges

L'objectif de ce travail est de confectionner une brique de terre crue facile à mouler, mais avec le moins d'eau possible dans le mélange, en vue de limiter la fissuration et réduire la porosité ce qui va se répercuter sur la résistance mécanique. Ceci exige que les mélanges doivent être préparés à l'état plastique, avec ou sans déchets, en prenant en considération la présence de la chaux vive et le sable concassé.

La mise en œuvre et l'examen de l'état des mélanges sont réalisées manuellement, apprécier visuellement et quantifier à la table à secousse à travers leurs étalement.

La teneur eau initiale est déterminée à travers les limites d'Atterberg issues des résultats de caractérisation du sol (Figure 15):

Les résultats obtenus sont comme suit :

- WL=39.7 : limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
- WP=19.2 : limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

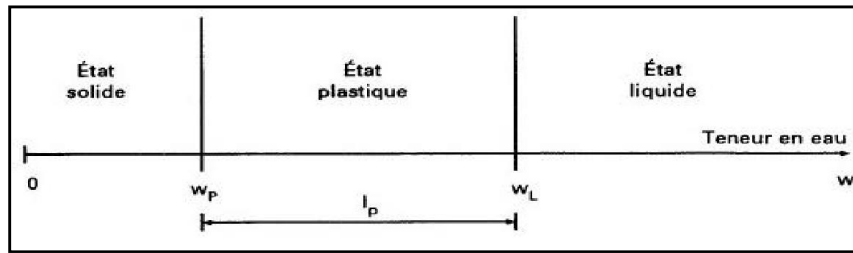


Fig.3.15: Présentation des limites d'Atterberg

L'appréciation de l'état du mélange de sol avec du sable concassé nous a permis de prendre $W= 21\%$ comme teneur en eau initiale.

L'ajout d'un liant au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Cet effet est plus sensible avec la chaux qu'avec les liants hydrauliques.

D'après Nicolas CABANE (CABANE, 2005), Il est admis que chaque pour cent de chaux vive introduite dans le sol permet de réduire d'un pour cent la teneur en eau. Par suite, pour la préparation d'un mélange à base de **11%** de chaux vive on utilise **32%** comme teneur en eau.

3.3.1.3. Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules, attitre d'exemple, BXSD désigne un bloc adobe à base de chaux sans déchets de palmier dattier.

La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le (tableau 3.13).

Tableau 3.13: Codification des mélanges

Code	Designation
W32sp0	Bloc d'adobe à base de chaux, confectionné avec teneur en eau 32 % sans superplastifiant
W27sp1	Bloc d'adobe à base de chaux, confectionné avec teneur en eau 27% et superplastifiant%
W22sp2.5	Bloc d'adobe à base de chaux, confectionné avec teneur en eau 22% et superplastifiant 2.5%
W17sp4	Bloc d'adobe à base de chaux, confectionné avec teneur en eau 17% et superplastifiant 4%

3.3.1.4. Préparation des mélanges

D'après Michel (Michel, 1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Alors, après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C, les matériaux (sol + sable + liant) sont d'abord mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres avec une vitesse de 139 tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant cinq minutes pour le mélange de ciment et cinq minutes la chaux. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes. Finalement on procède à l'ajout des déchets de palmier dattier en faisant le malaxage manuellement.

3.3.1.5. La cure des blocs

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure de 7 jours est indispensable. Pendant cette période, on maintiendra le matériau en atmosphère humide, à l'abri du soleil, en prenant garde au vent; ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions de conservation réelles, les blocs doivent être protégés avec du plastique durant les premiers jours avant leur utilisation.

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à assurer son étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, le bloc est conservé au à l'étuve à une température $T = 65 \pm 2^\circ\text{C}$ (figure 2.15). Les blocs concernés par ce mode pendant 7 jours, selon la procédure de T (Tallah; 2016) .Pour étudier l'effet sur les propriétés mécaniques du adobe.

les blocs aux essais, ils doivent être dessécher à l'étuve jusqu'à masse constante (figure2.16).



Fig. 3.16: Cure des blocs à l'étuve.

3.3.2. Réalisation des essais

3.3.2.1. la maniabilité du mélange a l'état frais

3.3.2.1.1. Principe

Pour chaque formulation de mortier à base de terre, la consistance est évaluée suivant la norme NF 1510-3 (AFNOR. NF EN 1015-3199) sur l'évaluation de la consistance des mortiers frais à la table à secousses. Le principe est de remplir de mortier une embase tronconique en 2 couches. Chacune des couches est piquée pour homogénéiser la matière dans l'embase. Après avoir retiré l'embase, une série de 15 secousses à une cadence d'une par seconde est appliquée au mortier Figure (3-17). L'étalement est mesuré avec un pied à coulisse et les valeurs sont arrondies au millimètre près. Pour chacun des mortiers, 3 points de mesures sont effectués et une moyenne permet de définir le diamètre d'étalement du mortier. L'étalement de référence est pris suivant (Figure3-18)



Fig.3.17: Table à secousses

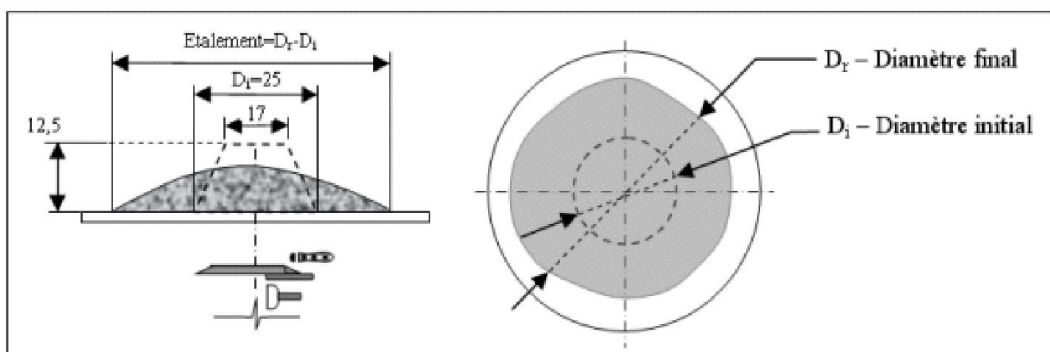


Fig.3.18: Principe d'essai de la consistance du mortier de terre

L'objectif de cette étude de consistance à la table à secousses est de comprendre le comportement des mélanges vis-à-vis de l'eau. Pour rappel, la limite de liquidité des mélanges mesurée à l'appareil de Casagrande. Par conséquent, la barbotine exclusivement

constituée des mélanges et d'eau est étudiée sur une plage de teneur en eau allant de 30% à 44%. Au-delà de cette teneur en eau, les mélanges sont trop fluides et l'étalement dépasse les limites du plateau de la table à secousses. L'étalement est mesuré pas de 2% et pour chaque teneur en eau, une moyenne de trois valeurs est réalisée.

3.3.3. Propriétés mécaniques

3.3.3.1. Résistance à la compression

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes: la résistance en compression des adobes Pour chaque essai, trois blocs ont été testés Figure (3.19); (3.20)



Fig.3.19: blocs adobe



Fig.3.20: Machine de compression

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_e = \frac{F}{S}$$

Où :

RC : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les eux demi-blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm²

3.3.3.2. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion des mortiers de terre est obtenue par l'intermédiaire des barrettes prismatiques. Le principe de l'essai est de poser l'éprouvette sur deux appuis ponctuels et de venir charger ponctuellement celle-ci en son centre.



Fig.3.21: éprouvette 4-4-16



Fig.3.22: presse hydraulique pour l'essai de flexion

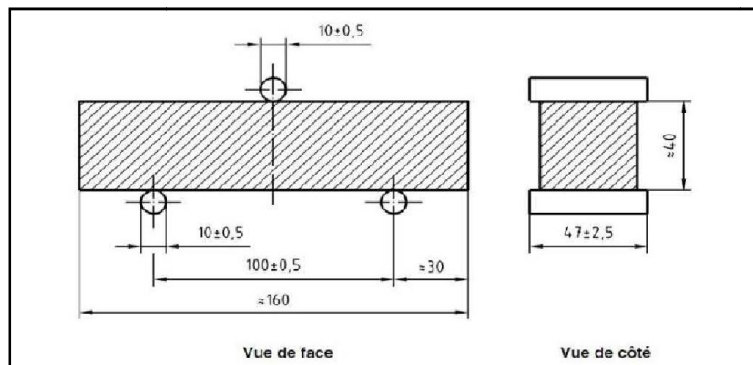


Fig.3.23: Schéma de principe de l'essai de résistance en flexion sur éprouvette 4-4-16 (AFNOR. NF EN 1015-11)

3.3.4. Propriétés physique

3.3.4.1. Masse volumique (ρ)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

3.3.4.2. Absorption totale

Cet essai consiste à immerger le bloc dans un bac à eau pendant des durées différentes: 1, 2, 3 et 4 jours, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids du bloc à l'état sec P_s ; Figure (3. 24).

L'absorption totale est déterminée par la formule suivante

$$A \% = (P_h - P_s) \cdot 100 / P_s$$



Fig.3.24. Essai (Absorption totale)

3.3.4.3. Gonflement

La mesure du gonflement de l'adobe se fait selon la procédure suivante (norme XP 13-901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure selon la figure(3.25.)
- mesurer la distance entre plots : l_0 .
- Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.26.
- D'immersion, durées différentes: 1, 2, 3 et 4 jours, et mesurer l'augmentation laisser égoutter, puis mesurer la distance entre plots : l_1 .

L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$lg (mm/m) = (l_1 - l_0) / l_0$$

l_0 : la distance avant immersion

l_1 : la distance après immersion

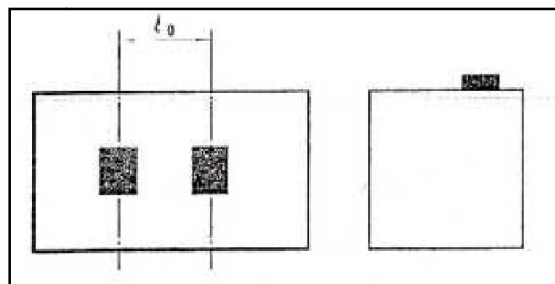


Fig.2.25 : Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901)

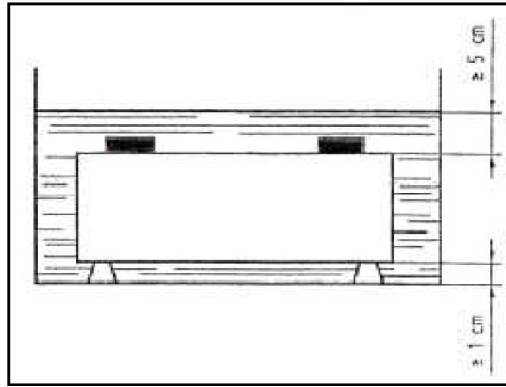


Fig.2.26: L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901)

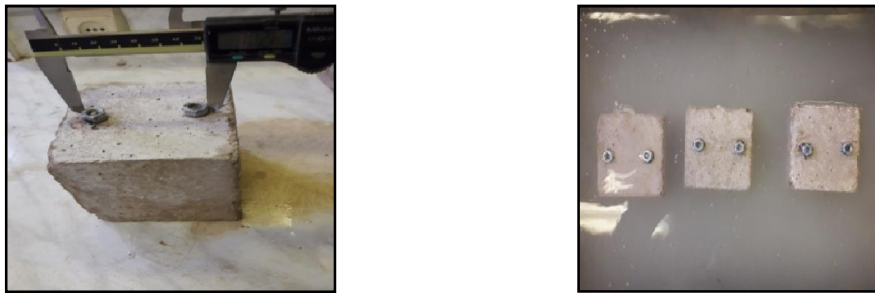


Fig.3.27. Essai (gonflement)

3.3.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs d'adobe fibrés développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable concassé, la chaux, le superplastifiant et les déchets de palmiers dattiers.

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude.

La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des briques dans ce chapitre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés de l'adobe.

CHAPITRE 4:
PRÉSENTATION ET
DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental, qui a comme but, l'étude de l'effet des adjuvants fluidifiants (le superplastifiant) sur les propriétés de l'adobe à l'état frais et à l'état durci:

a. L'état frais :

- L'effet sur la maniabilité à la table à secousse.

b. L'état durci :

- L'effet sur les propriétés mécaniques:

- La résistance à la compression.

- La résistance à la flexion.

- L'effet sur les propriétés physiques

- La masse volumique apparente.

- L'absorption totale à l'eau.

- Le gonflement

Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre et le sable concassé, une teneur en chaux vive de 11%, cinq teneurs en déchets de palmiers dattiers vive (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 et 1 %), trois teneurs en superplastifiant, (1, 2.5 et 4 %) et quatre rapports d'eau (32, 27, 22, 17) ont été utilisés. La réduction de la teneur en eau a pour objectif la réduction de la porosité, par suite l'amélioration de la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau.

4.2. Etude des propriétés de l'adobe à l'état frais:

a. Etude de la maniabilité

4.2.1. Effet de la teneur en eau sur la maniabilité de l'adobe

La figure 4.1 présente les valeurs de l'effet de la teneur eau sur la maniabilité de l'adobe sans superplastifiant. Les résultats montrent que l'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en eau, et que l'état du mélange passe d'un mélange peu plastique pour une teneur en eau de $W = 30\%$ jusqu'à l'état très fluide pour $W = 44\%$. On a constaté aussi qu'un étalement de 116 mm correspond à un mélange plastique préparé avec une teneur en eau $W = 32\%$, caractérisé par une possibilité de

moulage facile, chose visée comme un des objectifs de l'étude. Cet étalement est pris comme référence le long de cette étude. Les résultats montrent aussi que la présence des déchets n'a pas de grand effet sur la maniabilité à cause de leur saturation en eau.

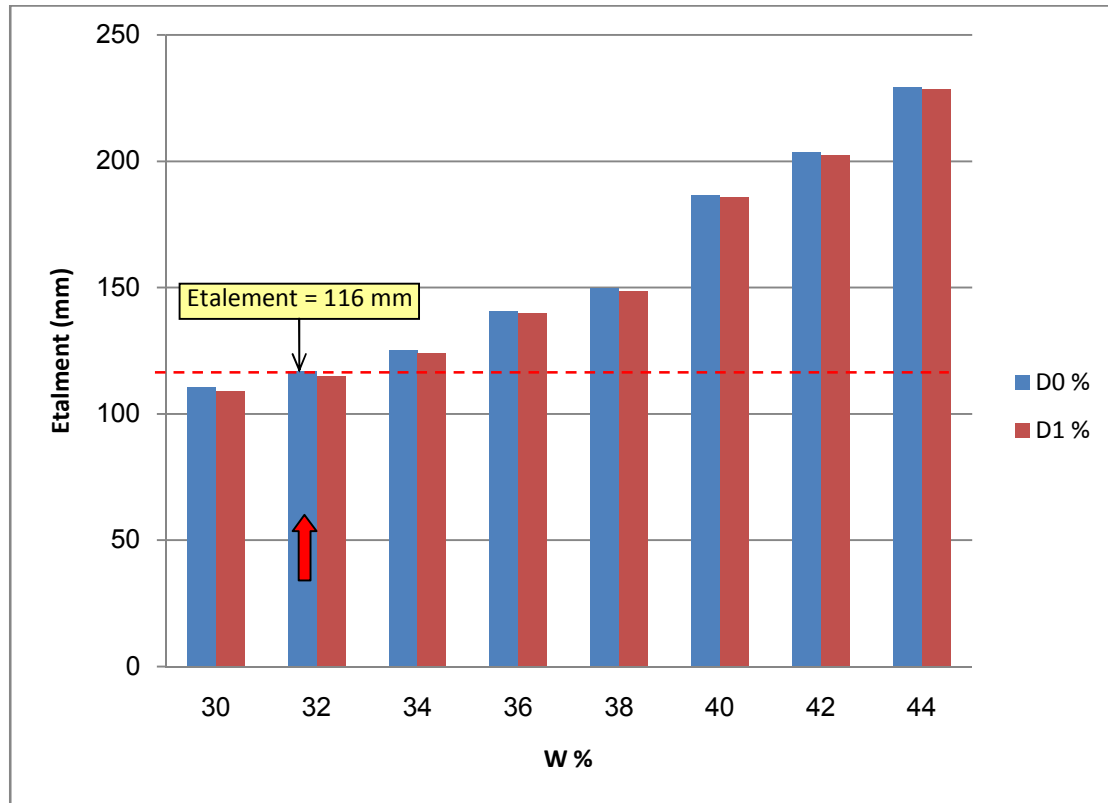


Fig.4.1: Effet de la variation de la teneur en eau sur l'étalement de l'adobe sans superplastifiant avec et sans déchets.

4.2.2. Effet de l'utilisation du superplastifiant sur la maniabilité de l'adobe

Pour évaluer l'effet de l'introduction du superplastifiant sur la maniabilité de l'adobe à l'état frais, on a procédé en deux étapes, tout en visant la préparation d'un mélange dont la maniabilité correspond à un étalement presque similaire à l'étalement de référence (Etalment= 116 mm):

1. Réduire la teneur en eau W;
2. Varier le dosage en superplastifiant SP tout en gardant la teneur en eau constante.

Les résultats obtenus concernant les mélanges sans déchets sont présentés sur la figure 4.2.a. A travers ces résultats, on constate que pour la même teneur en eau, l'augmentation du dosage en superplastifiant provoque une augmentation de

l'étalement. Dans le même contexte, en maintenant le dosage en superplastifiant constant, l'augmentation de la teneur en eau conduit à une augmentation de l'étalement.

Mais on doit mentionner que d'après la recherche bibliographique, pour le cas des bétons et des mortiers en ciment cette augmentation de l'étalement est confirmée jusqu'au point de saturation, alors qu'après ce point l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a pas d'effet sur la maniabilité.

Pour le cas du béton en terre, objet de notre étude, l'étalement ne peut pas dépasser 300mm qui est le diamètre de la table à secousse utilisée.

A travers l'ensemble des cas étudiés (variation de la teneur en eau et le dosage en superplastifiant), on a constaté que seulement trois cas ont présentés des étalements proches de l'étalement de référence (état plastique du mélange-Etalement= 116 mm-cas du mélange à base de 0% en superplastifiant et 32% de teneur en eau), il s'agit des mélanges(figure 4.2.b) :

- Superplastifiant = 1% - teneur en eau =27% ;
- Superplastifiant = 2.5% - teneur en eau =22% ;
- Superplastifiant = 4% - teneur en eau =17% .

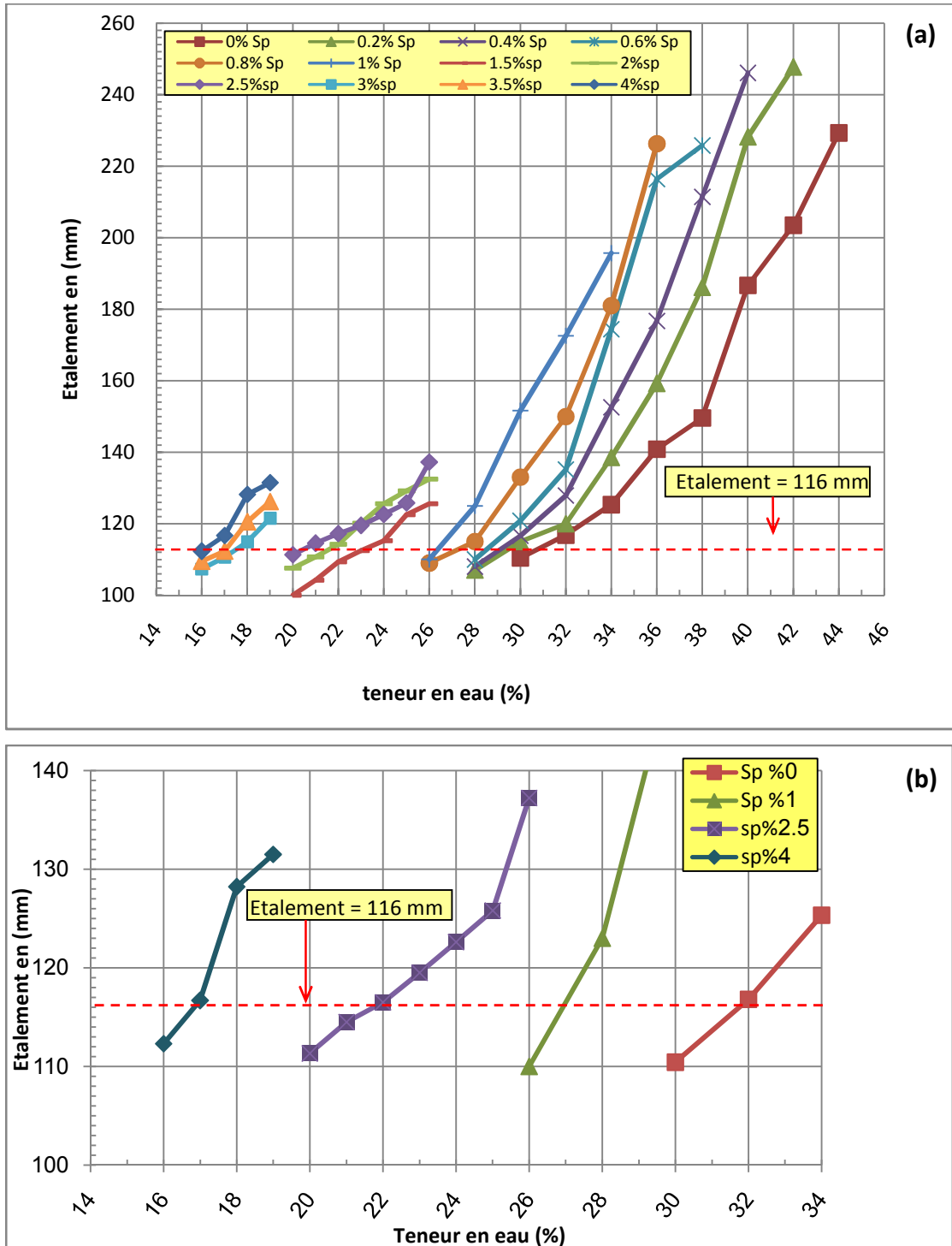


Fig.4.2: Effet de la variation du dosage en superplastifiant sur l'étalement du béton de terre sans déchets:

- a. L'ensemble des cas étudiés
- b. Les cas présentant des étalements proches de l'étalement de référence

Pour le cas des mélanges avec déchets, on constate d'après les résultats présentés sur la figure 4.3, que l'étalement des mélanges avec déchets augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant et diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets.

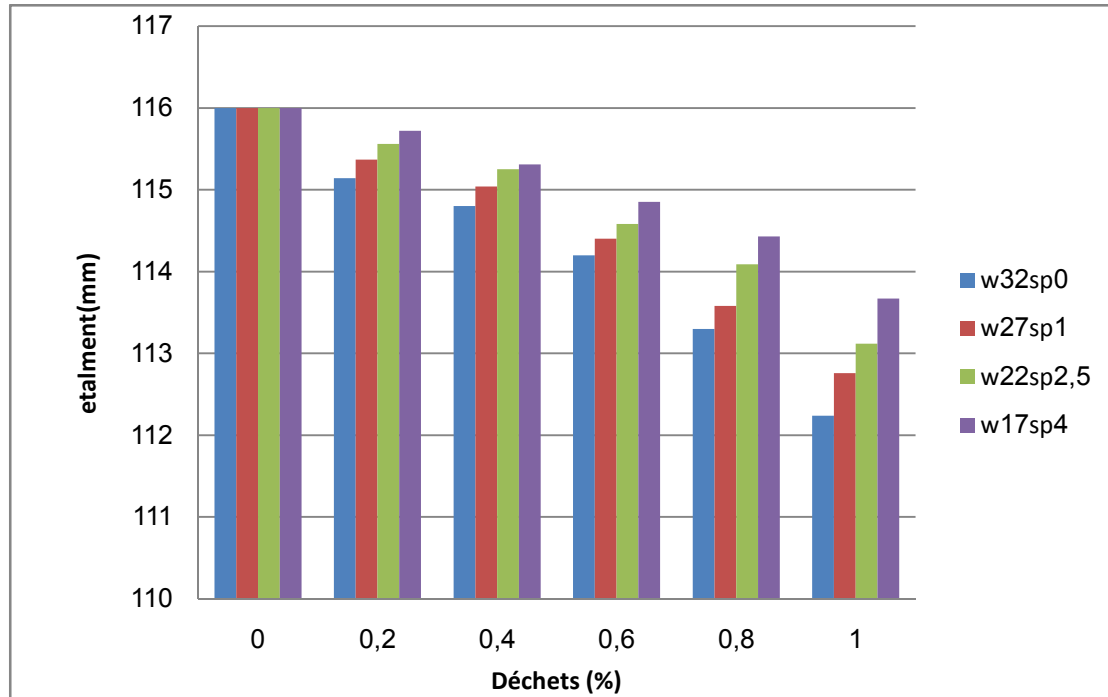


Fig.4.3: Effet de la variation du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets sur l'étalement du béton de terre

4.3. Les propriétés mécaniques de L'adobe

4.3.1. Résistance à la compression

4.3.1.1. L'effet de superplastifiant sur la résistance à la compression d'une brique sans déchets

Pour étudier l'effet du superplastifiant sur la résistance à la compression de l'adobe sans déchets, on s'est intéressé au mélange avec $W = 27\%$. Les résultats sont présentés sur la figure 4.4. D'après cette figure on constate que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant et ceci de 0% à 1%, alors qu'après 1% on constate une diminution de la résistance. On peut dire que ceci est dû à l'atteinte de la saturation au dosage de 1%. On doit mentionner que l'augmentation de la résistance d'une brique avec adjuvant comparativement à celle sans adjuvant a atteint une valeur très importante, il s'agit de 151.7%.

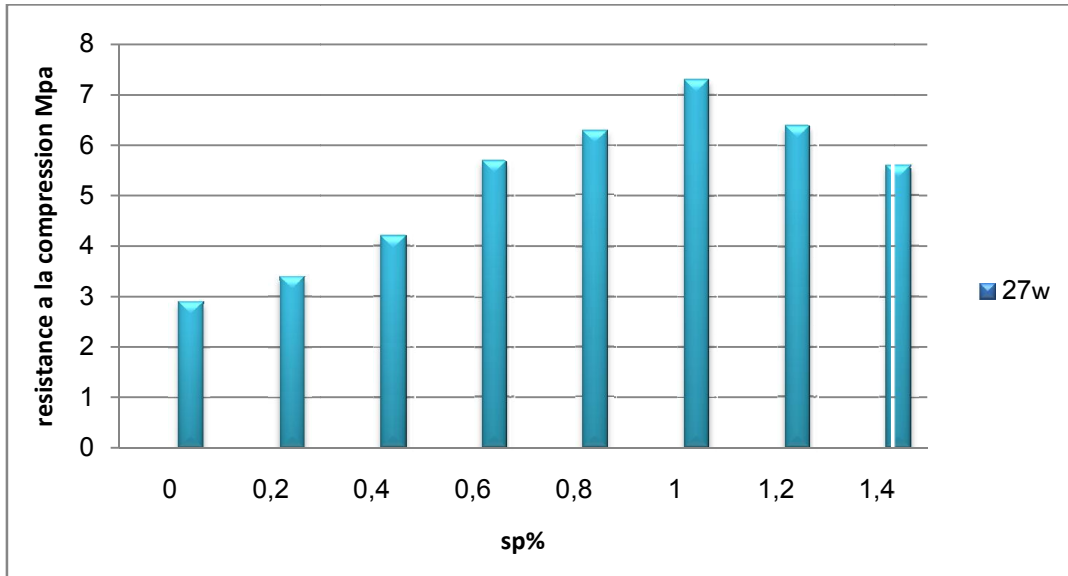


Fig.4.4 : Effet de la variation du dosage en superplastifiant sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue sans déchets.

4.3.1.2. L'effet de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique sans superplastifiant

L'ajout des fibres végétal est utilisé dans la fabrication de l'adobe et d'autres produits de terre afin de réduire la fissuration de retrait et d'améliorer la résistance à la traction. Par contre leur effet sur la résistance à la compression est généralement négatif. Ceci est confirmé par les résultats présentés sur la figure 4.5, ou on a constaté que R_c diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets. Cette diminution de la résistance à la compressions atteint 33.1% avec l'augmentation de la teneur en déchet de 0 a 1%.

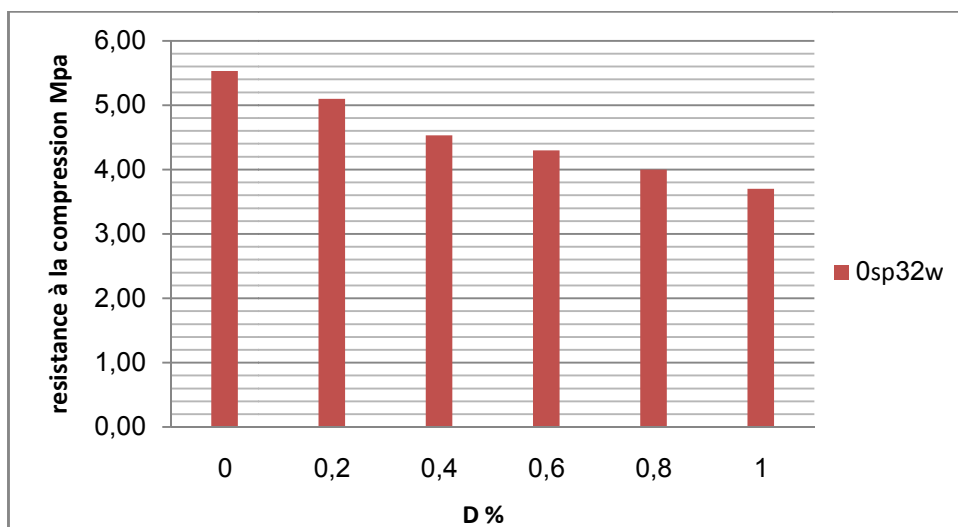


Fig.4.5: Effet de la variation de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue sans superplastifiant.

4.3.1.3. L'effet de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique avec superplastifiant

Pour l'étude de l'influence de la teneur de superplastifiant sur la résistance à la compression, on analyse les résultats de la figure (4.6). Cette figure nous montre que les valeurs de la résistance à la compression sont entre 5.53MPa et 8.46 MPa. On remarque sur cette figure, que pour chaque teneur en déchets, une augmentation de la teneur en superplastifiant de 0 % ,1% ,2.5%, 4% conduit à une augmentation de Rc.

Pour l'effet de superplastifiant l'ensemble des cas étudiés, il y a une faible réduction de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en déchets, qui va de 2.81 pour **w27sp1** ,2.63 % pour **w22sp2.5**,et 1.06% pour **w17sp4**.

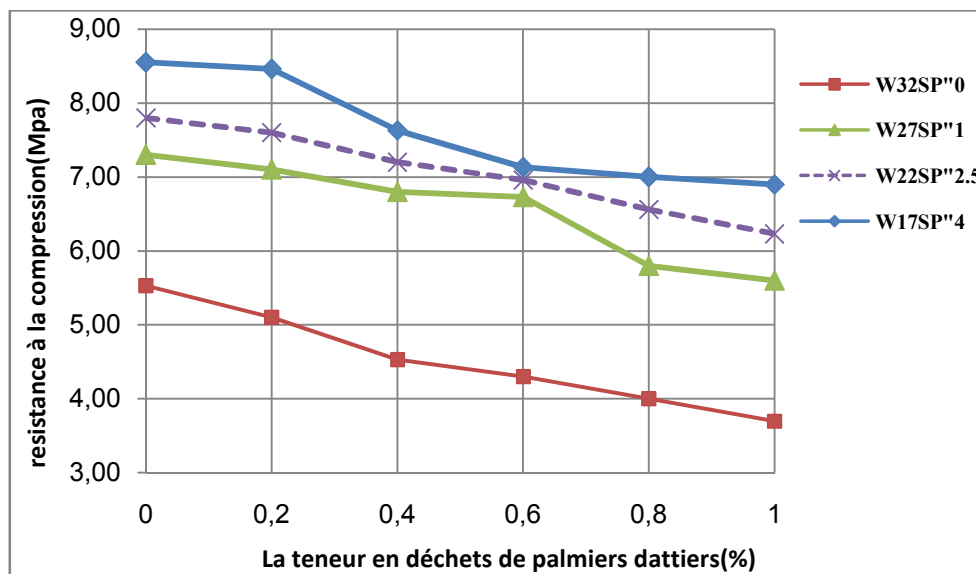


Fig.4.6: Effet de la variation de la teneur en déchets sur la résistance à la compression d'une brique de terre crue avec superplastifiant.

d. L'effet de superplastifiant sur la résistance à la compression en fonction de la masse volumique

La variation de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique

est présentée sur la figure (4.7).

On enregistre que la résistance à la compression de la brique augmente avec l'augmentation de la masse volumique apparente. La masse volumique apparente des

briques étudiées dont l'étalement est proche de 116 mm qui représente un mélange plastique varie entre 1527kg/m^3 et Nous trouvons en **w 32sp0** la masse volumique de était la résistance a la comprissions **3.7Mpa**. a **1602kg/m³**, la résistance est passée à **5.3Mpa** ce qui explique que plus la masse volumique est grande, plus la résistance.

Avec l'ajout le superplastifiant il y avait une l'augmentation du rapport de masse volumique à **4.9%** en raison du faible nombre de pores ceci va se répercuter sur la résistance, ainsi augmenter la résistance a la compression de **43.24%**.

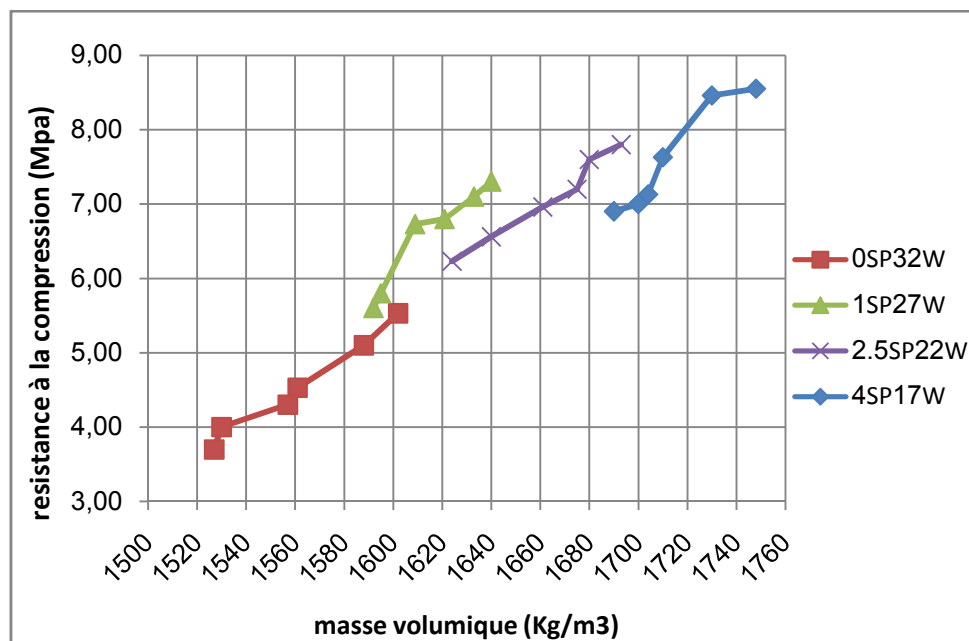


Fig.4.7: Evolution de la résistance à la compression d'une brique de terre crue avec superplastifiant en fonction de la masse volumique apparente

4.3.2. Résistance à la flexion

4.3.2.1. L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la résistance à la flexion

La variation de la résistance à la flexion d'une brique de terre sans superplastifiant en fonction de la teneur en déchets est présentée sur la figure (4.8).

Sur la figure (4.8), on observe, qu'en variant la teneur en déchets de palmier dattier de 0% à 1% une augmentation de la résistance à la flexion qui atteint un taux de 75% par rapport à la résistance de référence. Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Gabriela et al. (Gabriela, 2015).

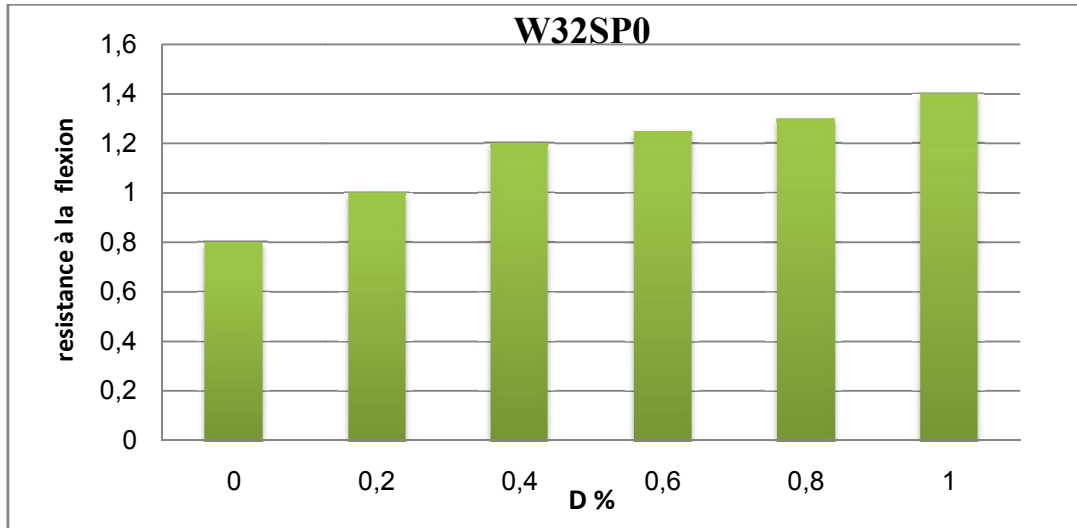


Fig.4.8: L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur à la résistance à la flexion d'une brique en terre sans superplastifiant

4.3.2.2. L'effet du dosage en superplastifiant sur la résistance à la flexion d'une brique de terre avec déchets de palmiers dattiers

La figure 4.9 présente les valeurs de la l'effet du dosage en superplastifiant sur la résistance à la flexion d'une brique de terre avec déchets de palmiers dattiers. Les résultats montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant dans les mélanges de briques avec déchets de palmiers dattiers engendre une importante augmentation de la résistance à la flexion comparativement aux mélanges sans superplastifiant. On a déjà constaté qu'un mélange de 1% de déchets engendre une augmentation de la R_f de l'ordre de 75%, mais avec l'introduction du superplastifiant cette augmentation atteint le taux de 105%.

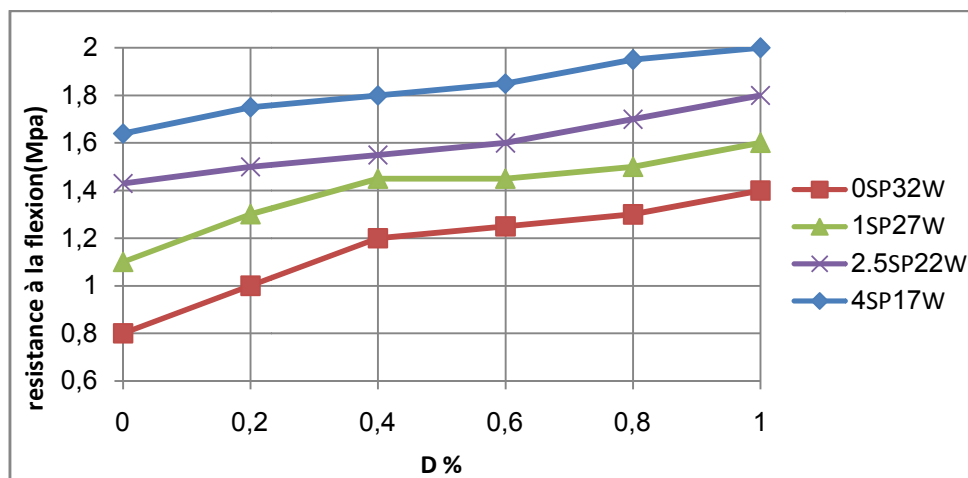


Fig.4.9: L'effet de la teneur en déchets de palmiers dattiers sur à la résistance à la flexion d'une brique en terre avec superplastifiant

4.4. Les propriétés physiques de L'adobe

4.4.1. La masse volumique apparente

❖ L'effet du dosage en superplastifiant sur la masse volumique

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque du matériau qui dépend de plusieurs paramètres : la composition, le malaxage, la cure et autres.

La figure (4.10) montre une diminution de la masse volumique en augmentant la teneur en déchets. On observe aussi que cette masse volumique augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant, ce qui va se répercuter sur la résistance mécanique, comme on l'a déjà montré précédemment

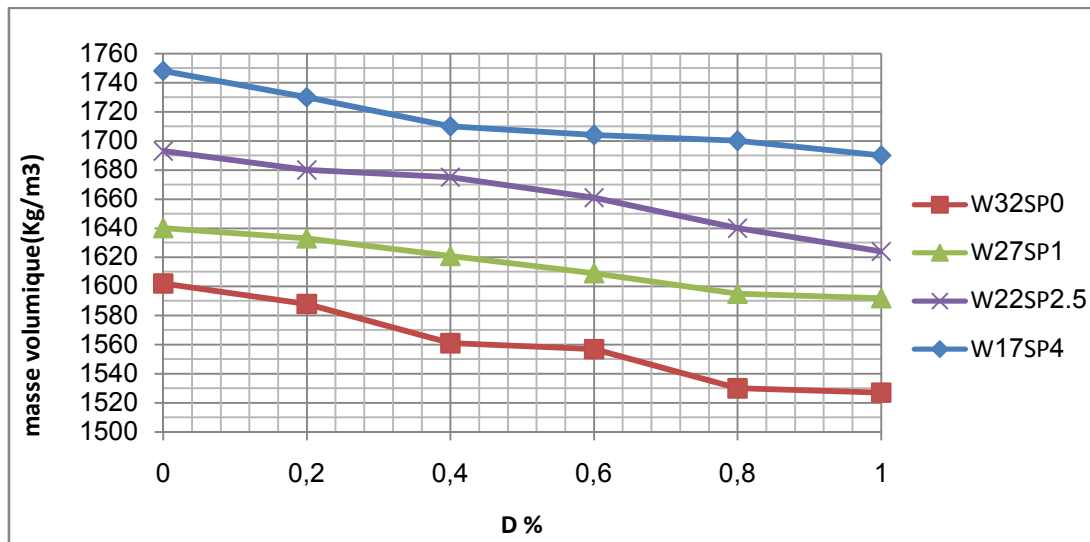


Fig.4.10: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur la masse volumique apparente d'une brique en terre crue

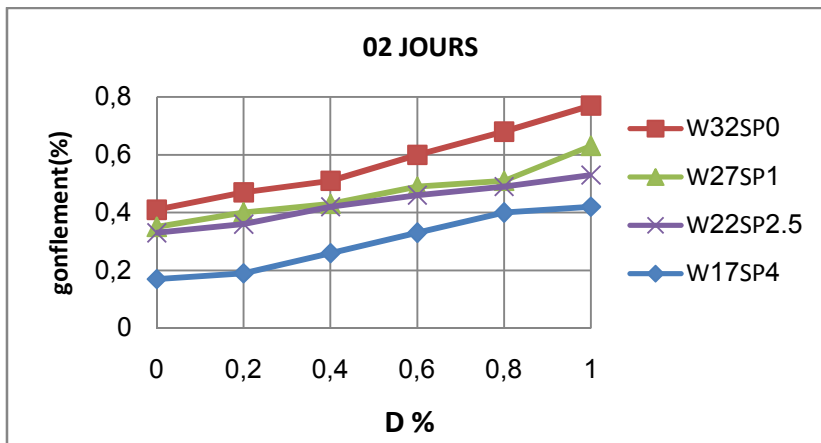
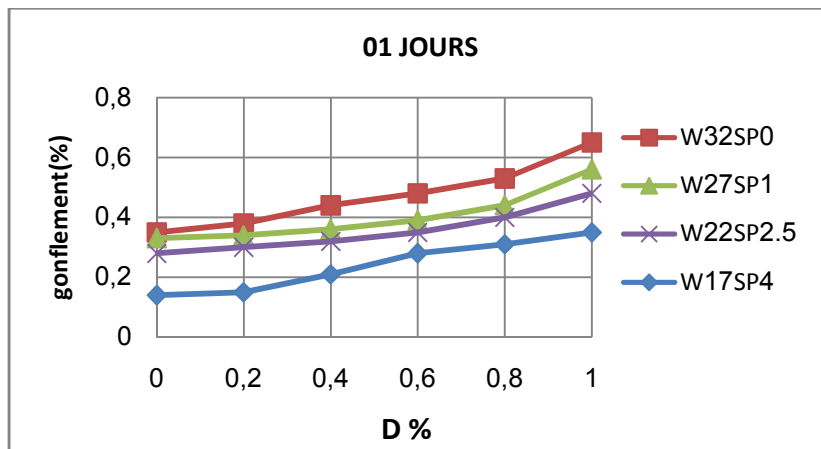
4.4.2. Gonflement

4.4.2.1. L'effet du superplastifiant sur la gonflement des briques de terre dans le temps

Les courbes représentées sur la figure (4.11) illustrent la variation du gonflement des briques dans le temps. A travers cette figure, on voit que le gonflement des blocs augmente dans de temps. Le gonflement de l'ensemble des briques soumises à l'essai est compris entre 0,15% et 0,83%. Le gonflement des briques augmente d'une journée à une autre. Les valeurs du gonflement des briques sont 0,35%, 0,57% , 0,61%, et 0.64% pour une 1, 2, 3 4 jours successivement.

On enregistre aussi que le gonflement des briques avec superplastifiant est moins important que celui des briques sans superplastifiant. Les valeurs du gonflement des briques sont 0.35% ,0.33%, 0.28%, et 0.14%. Pour une teneur en superplastifiant respectivement de : 0%, 1%, 2.5%, 4% successivement. Ce qui veut dire que la présence du superplastifiant dans le mélange a réduit 2,5 fois le gonflement de la brique comparativement à une brique sans superplstaifiant.

Le même effet a été enregistré sur des briques avec différentes teneurs de déchets de palmiers dattiers.



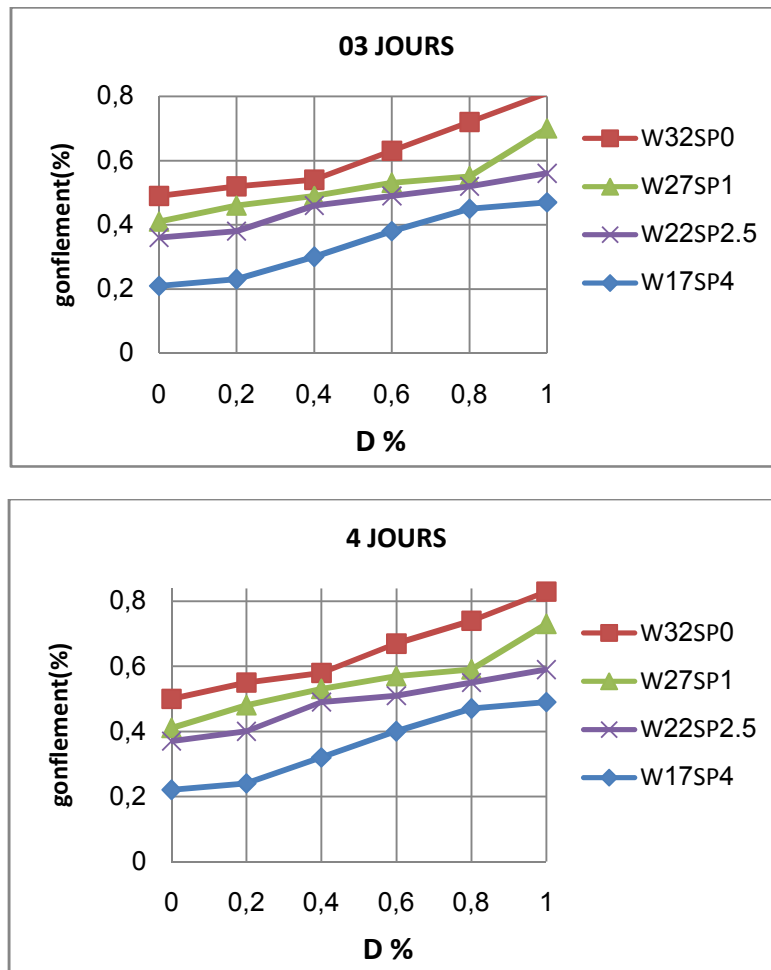


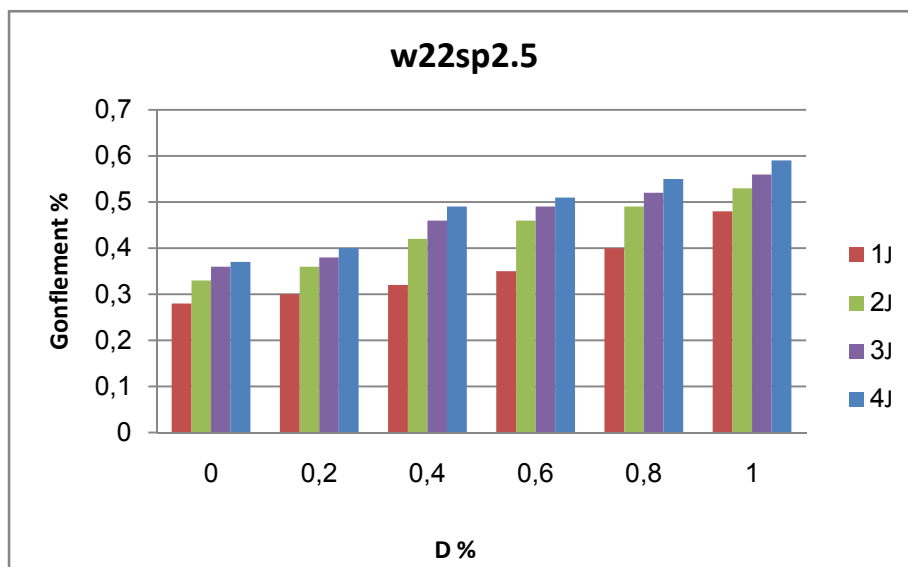
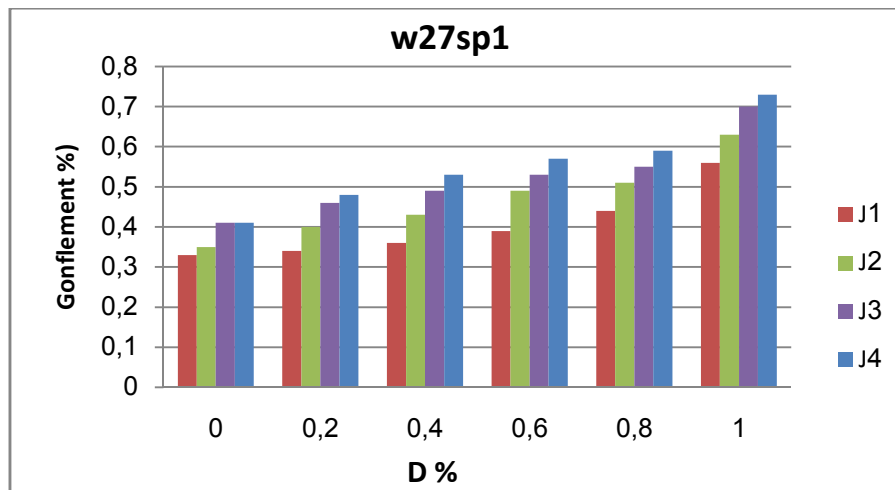
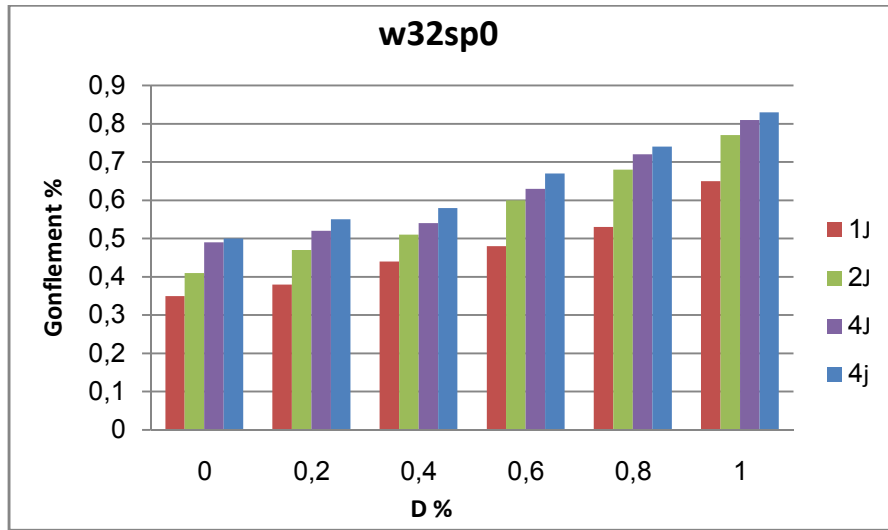
Fig.4.11: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur le gonflement dans le temps d'une brique en terre crue

4.4.2.2. L'effet du superplastifiant sur la gonflement des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers

Les courbes représentées sur la figure (4.12) illustrent la variation du gonflement par immersion des blocs en fonction de la teneur en fibres. A travers cette figure, on voit que le gonflement des blocs augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Le gonflement de l'ensemble des blocs soumis à l'essai est compris entre 0,15 % à 0,83%.

Le gonflement des blocs augmente avec la Teneur élevée en fibres. Les valeurs du gonflement des blocs sont de 0,35%, 0,38% et 0,44%,0,48% ,0,53% ,0,65% pour une teneur en déchet respectivement de : 0%, 0.2%,0.4 % ,0.6 % ,0.8% et 1%.Au contraire, le gonflement des blocs diminue avec l'augmentation de la teneur en

superplastifiant. Les valeurs du gonflement des blocs sont 0.34% ,0.3%, 0.15%, pour une teneur en superplastifiant respectivement de :1%, 2.5%, 4%.



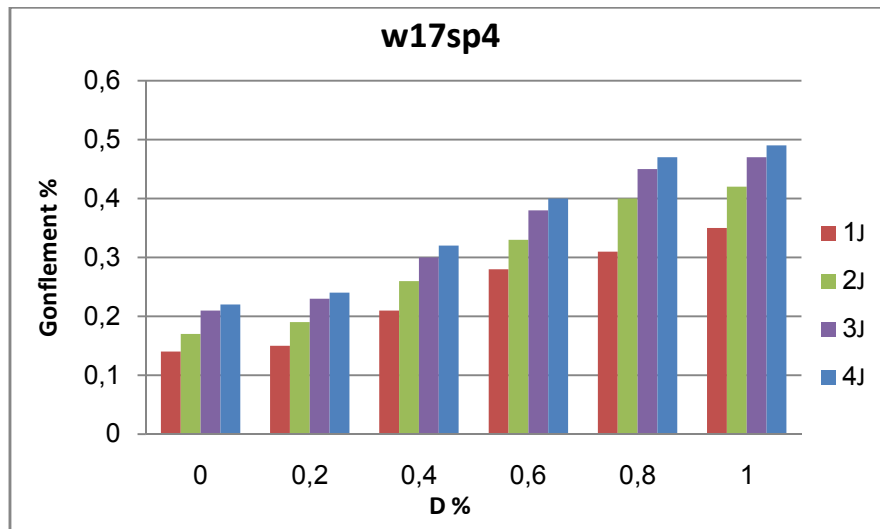


Fig.4.12: L'effet du superplastifiant sur la gonflement des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers

4.4.3 .Absorption totale d'eau

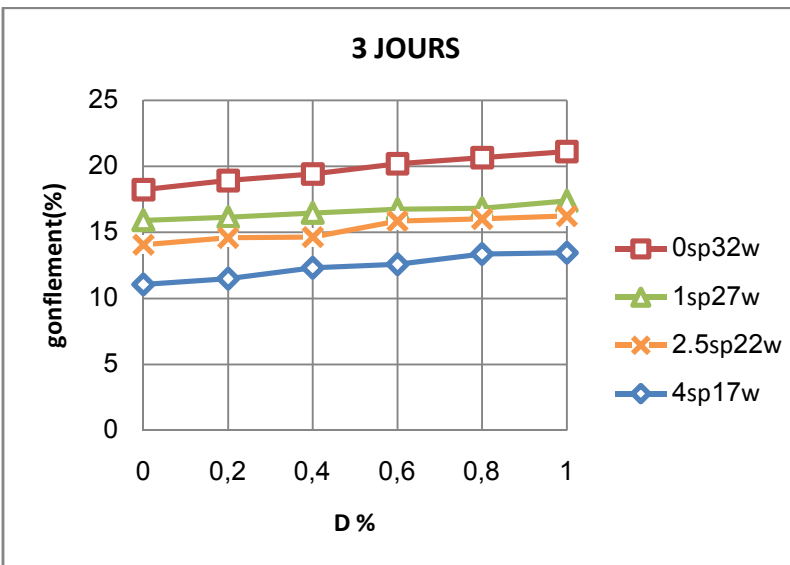
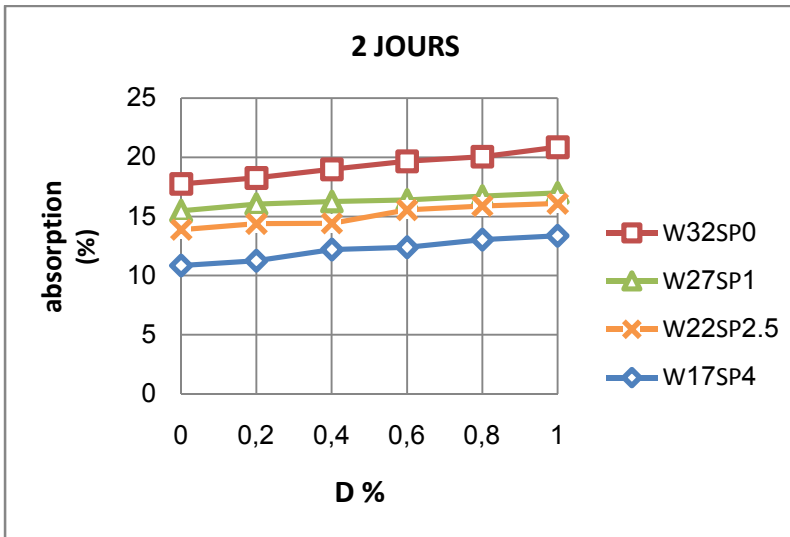
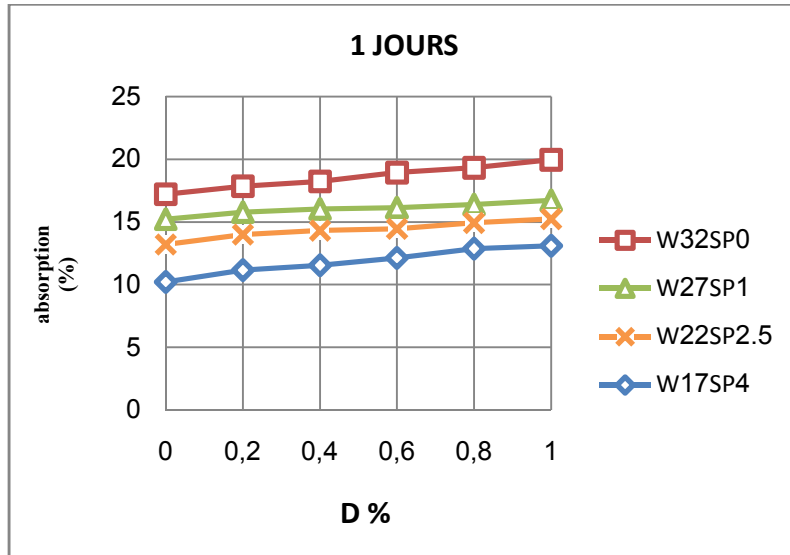
4.4.3.1. L'effet du superplastifiant sur l'absorption totale d'eau dans le temps

La connaissance de la valeur de l'absorption totale d'eau (ATE) d'une brique est importante, car elle peut être utilisée pour avoir une idée sur la porosité d'un bloc. En général, moins est l'absorption d'eau d'une brique, meilleure est sa performance mécanique (Kerali, 2001).

Les résultats illustrés dans la figure (4.13) montrent qu'il existe une diminution de l'absorption totale d'eau après un jour d'immersion avec l'augmentation de la teneur en déchet. D'une manière générale, cette diminution est d'environ 13.27%. Alors que dans le cas de l'ajout le superplastifiant, la valeur d'absorption diminue de 8.42%.

Mais après 4 jours d'immersion à l'eau, pour le cas de mélange avec superplastifiant et sans déchets, on enregistre une réduction de l'absorption totale de l'ordre de 41% comparativement avec le mélange de référence.

Les valeurs obtenues de l'absorption totale de l'eau sont admissibles par rapport à celles des matériaux suivant : briques d'argile 0-30 % ; (Jackson, 1996). On a constaté aussi à travers les résultats obtenus qu'il y a une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en déchets de palmiers dattiers.



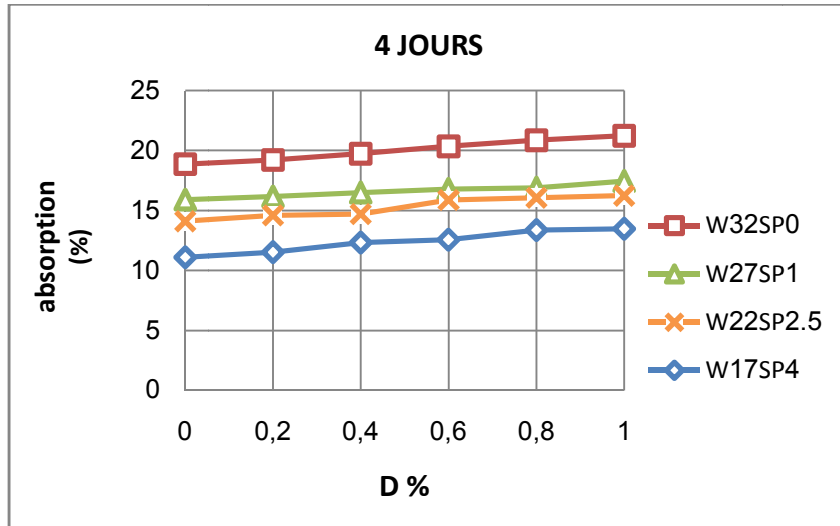
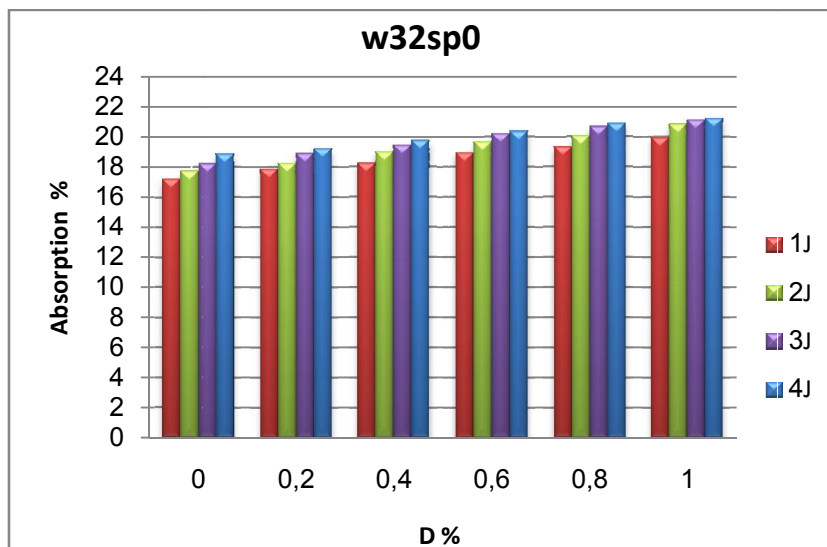


Fig.4.13: L'effet du dosage en superplastifiant et la teneur en déchets de palmiers dattiers sur l'absorption dans le temps d'une brique en terre crue

4.4.3.2. L'effet de superplastifiant a l'absorption en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers

On peut voir à travers les résultats présentés sur les figures 3.14 a-c, les blocs caractérisé par une absorption totale celle du durant toute la période

d'immersion dans l'eau, et pour toutes les teneurs en déchet étudiées. Les résultats montrent que l'ajout de fibres dans les mélanges augmente légèrement l'absorption totale d'eau, cela signifie qu'il y a plus d'infiltrations d'eau dans les échantillons. Ceci est attribué à la capacité d'absorption d'eau des fibres et l'effet néfaste de la présence des matières étrangères, telle que les fibres, sur la capacité de liaison du mélange (Weng, 2003).



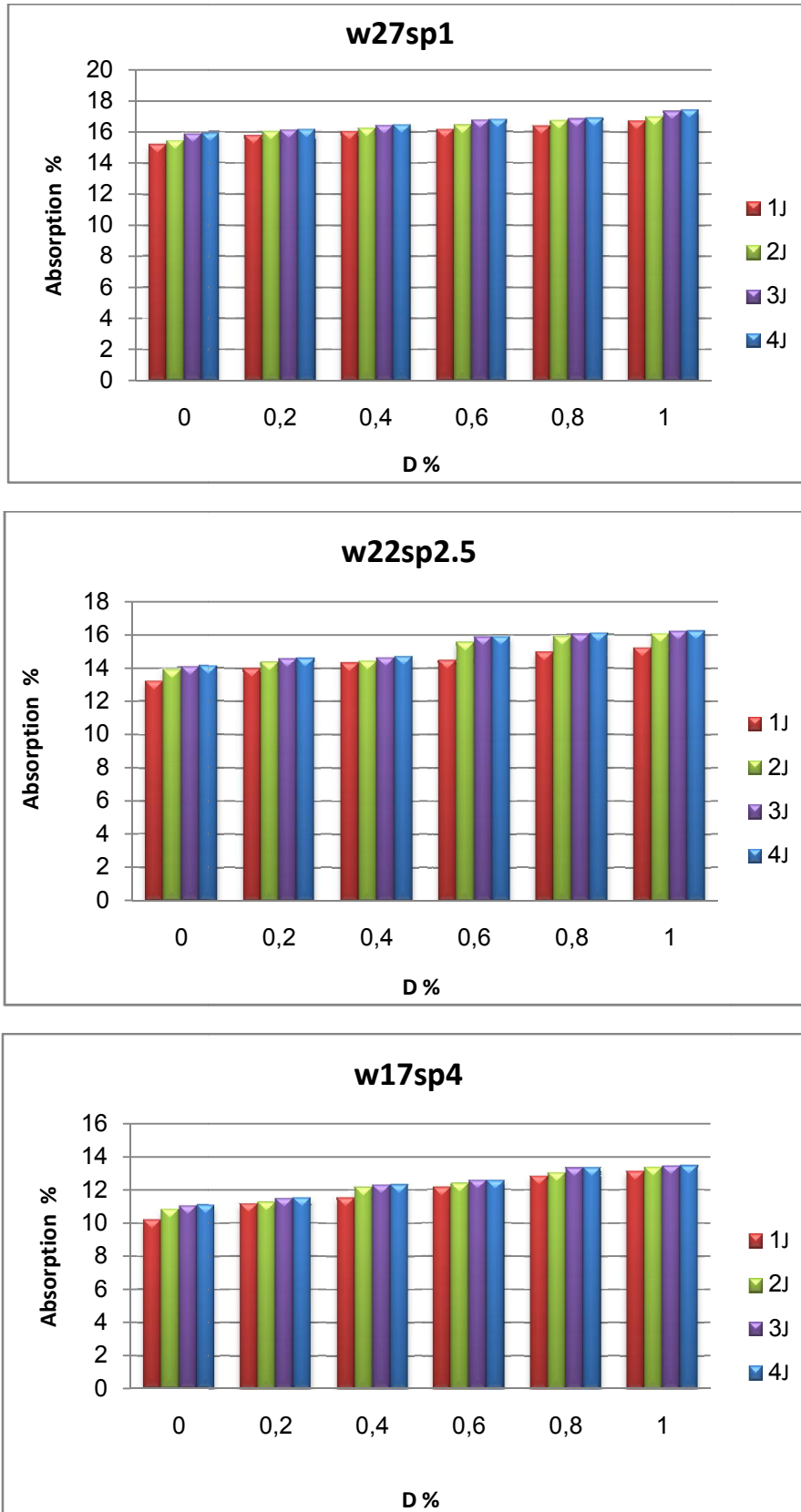


Fig.4.14: L'effet du superplastifiant sur l'absorption des briques de terre en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers

4.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés Mécaniques et physiques de l'adobe, à travers l'utilisation de la chaux, le sable concassé, les déchets de palmier dattiers et le superplastifiant.

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

- Le mélange de référence est à l'état plastique, préparé avec une teneur en eau $W=32\%$ et correspond à un étalement à la table à secousse de 116 mm ;
- L'augmentation du dosage en superplastifiant provoque une augmentation de l'étalement du mélange avec ou sans déchets de palmiers dattiers, ce conduit à une modification de l'état du mélange du plastique au fluide ;
 - Avec la réduction de la teneur en eau et l'ajout du superplastifiant, trois mélanges sont à l'état plastique (facile à mouler), il s'agit des mélanges:
 - Superplastifiant = 1% - teneur en eau =27% ;
 - Superplastifiant = 2.5% - teneur en eau =22% ;
 - Superplastifiant = 4% - teneur en eau =17% .
 - L'augmentation de la résistance d'une brique sans déchets avec adjuvant comparativement à celle sans adjuvant a présenté une augmentation très importante de la résistance à la compression, il s'agit de 151.7% (cas de $W=27\%$, état peu plastique) ;
 - La résistance à la compression R_c diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets ;
 - La résistance à la compression de la brique augmente avec l'augmentation de la masse volumique apparente ;
 - La masse volumique augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant ;
 - Une augmentation de la teneur en superplastifiant de 0 % ,1% ,2.5%, 4% a conduit à une augmentation importante de la résistance mécanique, 53% et 105% lac compression et à la flexion successivement et ce pour le cas du mélange sans déchets avec 4% de dosage en superplastifiant comparativement avec 0 % de SP (mélange de référence) ;

— Après 4 jours d'immersion à l'eau, la présence du superplastifiant dans le mélange a réduit 2,5 fois le gonflement de la brique comparativement à une brique sans superplstaifiant.

— Une réduction de l'absorption totale des briques avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant a été enregistrée. Après 4 jours d'immersion à l'eau, pour le cas de mélange avec 4% de superplastifiant et 17% de teneur en eau et sans déchets, on constate une réduction de l'absorption totale de l'ordre de 41% comparativement avec le mélange de référence.

Finalement on conclut que la présence du superplastifiant dans les mélanges de terre avec ou sans déchets de palmiers est très bénéfique pour l'amélioration des propriétés mécaniques et de leur insensibilité à l'eau.

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

Contrairement au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. En effet, il est notoire que les constructions en terre souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau. La stabilisation de la terre est utilisée pour pallier à ces problèmes, à travers différentes méthodes : physique, chimique et mécanique, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre à savoir : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimé, etc.

L'adobe est une technique très ancienne, qui utilise fréquemment la paille comme stabilisant. Pour sa préparation on utilise une quantité importante d'eau pour que le mélange soit plastique, en vue de faciliter sa mise dans les moules. Mais cette procédure engendre une fissuration importante et une augmentation de la porosité, ce qui se traduit par une baisse des performances mécaniques, ainsi qu'une faible insensibilité à l'eau.

Pour contourner ce problème dans les matériaux cimentaires, on procède à l'utilisation des fluidifiants, dans notre cas c'est le superplastifiant. En s'adsorbant à la surface des particules de ciment ou en se positionnant entre elles, les superplastifiants augmentent les forces de répulsions électrostatiques entre elles, ce qui induit moins de contact entre ces particules et donc un meilleur écoulement du matériau frais. Les superplastifiants sont des réducteurs d'eau, ce qui permet d'améliorer les performances mécaniques.

Tandis que dans le cas de la terre il y a beaucoup à faire pour améliorer ses propriétés, que ce soit à l'état frais ou durci. Cette amélioration technologique peut se

faire car le ciment ou la chaux et les argiles ont beaucoup d'analogie en terme d'interactions colloïdales et de forces d'adhésion, même si les forces de cohésion entre les particules sont beaucoup plus faibles pour les particules d'argile.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet du superplastifiant, entant qu'adjuvant fluidifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi sur la sensibilité à l'eau des briques de terre crue à base de chaux et de déchets de palmiers dattiers, en vue de fabriquer une brique de terre qui est à la fois facile à mouler, résistante et moins sensible à l'action de l'eau, tout en prenant en considération le critère économique, ce qui lui permet de trouver sa place sur le marché national des matériaux de construction.

Pour atteindre notre but, l'étude est scindée en quatre chapitres :

Le premier et le deuxième chapitres sont réservés à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art approfondi sur l'utilisation de la brique de terre, et les moyens de stabilisation, en se focalisant sur son renforcement par les fibres végétales, tout en donnant plus d'importance au déchets de palmiers dattiers.

Le chapitre 1 décrit aussi les résultats sur les mécanismes de la stabilisation, sol-chaux, Il a été également discuté en chapitre 1 les résultats obtenus par d'autres chercheurs concernant la caractérisation et le choix du sol pour la production du l'adobe. La littérature a montré que le choix du sol exige la connaissance de trois propriétés fondamentales de la terre, qui sont : la texture ou granularité, la plasticité, et la cohésion. Pour le bloc de terre stabilisée, un certain nombre de recherches recommande que pour la chaux, l'efficacité est en faveur de la chaux aérienne avec des dosages de 6 à 12 % mais une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre.

Le deuxième chapitre a été consacré à la possibilité d'améliorer les performances mécaniques d'un béton de terre en introduisant dans le mélange un adjuvant fluidifiant et en réduisant le rapport eau/sol de manière à assurer que le mélange reste à l'état plastique ou fluide, ce qui permet un coulage facile dans les moules.

En ce basant sur cette conclusion, on s'intéressé dans la partie expérimentale à la fabrication de brique de terre crue avec des fibres végétales avec l'utilisation d'un superplastifiant.

Le troisième et le quatrième chapitre constituent la partie expérimentale.

Le troisième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux: Il s'agit: sol local, sable concassé pour la correction granulométrique, chaux vive, les déchets de palmiers dattiers et le superplastifiant. Une fois la problématique définie, le bilan des connaissances obtenu et les matières premières caractérisées, nous avons procédé à l'élaboration des différentes formulations et la confection des briques selon des normes bien définies. Finalement les essais réalisés durant cette étude sont présentés.

Le quatrième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre on a étudié l'effet de la présence du superplastifiant sur les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques de la brique de terre crue, à savoir, la maniabilité, la masse volumique apparente, l'absorption totale à l'eau, le gonflement, la résistance à la compression sèche, la résistance à la flexion sèche.

Les résultats obtenus ont révélé que:

— Le mélange de référence est à l'état plastique, préparé avec une teneur en eau $W=32\%$ et correspond à un étalement à la table à secousse de 116 mm ;

— L'augmentation du dosage en superplastifiant provoque une augmentation de l'étalement du mélange avec ou sans déchets de palmiers dattiers, ce conduit à une modification de l'état du mélange du plastique au fluide ;

— Avec la réduction de la teneur en eau et l'ajout du superplastifiant, trois mélanges sont à l'état plastique (facile à mouler), il s'agit des mélanges:

- Superplastifiant = 1% - teneur en eau =27% ;
- Superplastifiant = 2.5% - teneur en eau =22% ;
- Superplastifiant = 4% - teneur en eau =17% .

— L'augmentation de la résistance d'une brique sans déchets avec adjuvant comparativement à celle sans adjuvant a présenté une augmentation très importante de la résistance à la compression, il s'agit de 151.7% (cas de $W=27\%$, état peu plastique) ;

— La résistance à la compression R_c diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets ;

— La résistance à la compression de la brique augmente avec l'augmentation de la masse volumique apparente ;

— La masse volumique augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant ;

— Une augmentation de la teneur en superplastifiant de 0 % ,1% ,2.5%, 4% a conduit à une augmentation importante de la résistance mécanique, 53% et 105% lac compression et à la flexion sucessivement et ce pour le cas du mélange sans déchets avec 4% de dosage en superplastifiant comparativement avec 0 % de SP (mélange de référence) ;

— Après 4 jours d'immersion à l'eau, la présence du superplastifiant dans le mélange a réduit 2,5 fois le gonflement de la brique comparativement à une brique sans superplstaifiant.

— Une réduction de l'absorption totale des briques avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant a été enregistrée. Après 4 jours d'immersion à l'eau, pour le cas de mélange avec 4% de superplastifiant et 17% de teneur en eau et sans déchets, on constate une réduction de l'absorption totale de l'ordre de 41% comparativement avec le mélange de référence.

Enfinement on conclut que la présence du superplastifiant dans les mélanges de terre avec ou sans déchets de palmiers est très bénéfique pour l'amélioration des propriétés mécaniques et de leur insensibilité à l'eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akpokodje EG. «The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, (1985).

Anger. R. and L. Fontaine, « Bâtir en terre: du grain de sable à l'architecture,» in Bâtir en terre», du grain de sable à l'architecture, Belin editions. p. 223. (2009).

Bell FG. «Lime stabilization of clay minerals and soils». Engineering Geology 42, 223-237, (1996).

Broms BB. «Stabilization of Soil with Lime Columns». Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, Ed. Hsai-Yang Fang Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 833-855, (1991).

Bui Q B, Morel J C, Hans S, Do A-P. «First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings», Eng. struct., p. 3690-3695,(2011) .

Bui Q B, Morel J C. «Assessing the anisotropy of rammed earth», Construction and Building Materials, 23, pp. 3005-3011, (2009).

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).

Chauquette M. «La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec». Thèse de Ph.D. Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Qué. 188 p, (1988).

CORPUS. « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, pages (1-7), (2006).

CRATerre,GATE. «Bloc de terre comprimée. Eléments de base. , Eschborn, Allemagne», 28p,(1991)

DJOUHRI M. « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, (2007).

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. « Construire en terre». Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, (1979).

du bloc de terre comprimée avec fibres» Thèse de Doctorat Université Mohmaed khider – Biskra, (2016).

Galán-Marín C, Rivera-Gómez C, Petric J. «Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre». Construction and Building Materials 24 , 1462–1468, (2010)

Ghomari Fouad. Science des matériaux de construction» .(2011*2012).disponible sur : <http://fsi.univ-tlemcen.dz/cours/granulats.pdf>

Ghoumari F. « Matériau en Terre Crue Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau». Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, (1989).

Gnanli L, Claudiane Q L; Coralie B, Guillaume H, Development of a Self-Compacted Clay based Concrete, rheological, mechanical and environmental investigations», World Sustainable Building Conference (WSB14), Barcelona, Spain, October 28-30,(2014).

GORISSE F. ; « Essais et contrôle des bétons », Edition Eyrolles, vol.2, Paris ; (1978).

Guillaud H, Houben H. «Traité de construction en terre» (2ème édition). Marseille, (1995).

Hanaa Fares. Propriétés mécanique et physico-chimiques des bétons autoplaçants, » thèse de doctorat en génie civil, université de Gergy-pontoise .(2009)

Holtz RD. «Introduction à la géotechnique». Edition de l'école Polytechniques de Montréal, Canada, 808 p, (1991).

Houben H, Guillaud H. «Earth construction—a comprehensive guide». London: Intermediate Technology; (1994).

Houben H, Guillaud H. «Traité de construction en terre. CRATerre», Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, (2006).

Houben H, Guillaud H. «Traité de construction en terre». CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, , 355 p,(2006).

<http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.42-48.pdf>

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00936958/document>

IFEN. «L'environnement en France». La découverte, n18, 605p , (2002).

Jarrige JF. « Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen form Mehrgrah, Pakistan». pp. 21-28 in South Asian Archaeology, ed. B. Alichin, CambridgeUniversity Press,(1989).

Kerali AG. Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis,

Kézdi A. «Stabilized Earth Roads», Developments in geotechnical engineering 19. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY. 327 p, (1979).

Lambe TW. «The Structure of Inorganic Soil, Proceeding». ASCE, Vol. 79, Separate No. 315.49p, 1953.

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).

liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement.(1999).

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).

MAKRI M. « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010. **Pierre D.** «Les adobes» (2015).

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).

Montmorillonite». Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace,(2001).

Moore, R.K. «Lime Stabilization». Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. State of the art report 5. 59 p, (1987).

Morel,J. C., A. Pkla, P. Walker, «Compressive strength testing of compressed earth

N. Kang and H. Hwang, «Study on high strengthening of an earth wall using earth and high performance lime In: Heyzoo Hwang HG, and David Gandreau» presented at the 2011 international conference on earth architecture in Asia. Mokpo, Republic of Korea. (2011).

Parra M. L. -Saldivar and W. Batty, «Thermal behaviour of adobe constructions»

Pellenq ,R. J.-M., N. Lequeux, and H. van Damme, «Engineering the bonding physico-mécanique des bétons de sable». Mémoire de Master Académique, Conception et calcul de structure. Biskra: Université Mohamed Kheider Biskra, (2015).

Reinholdt M. «Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de Phyllosilicates de type

RICHARD P., « Adobe, » mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre (2010).

Rigassi V. « Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production», CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne,104 p, (1995).

SBIAI A. «Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier; effet de l'oxydation au tempo». thèse de doctorat, INSA de Lyon, (2001).

scheme in C–S–H»,The ionic-covalent framework,» Cem. Concr. Res., vol. 38, no. 2, pp. 159–174 (2008)

Schneider. , M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio, «Sustainable cement , production—present and future, » Cem. Concr. Res., vol. 41, no. 7, pp. 642–650

Shukla A. , G. N. Tiwari, and M. S. Sodha, « Embodied energy analysis of adobe house, » Renew. Energy, vol. 34, no. 3, pp. 755–761. (2009)

Symons WG. «Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group», University of South Australia, The Levels, South Australia, (1999).

TAALLAH B. «Etude du comportement physico-mécanique

Thomas Point. Influence des hydroxypylguars sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais» 27 juin (2014). Disponible sur :

United Nations. « Earth Construction Technology». United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, (1992).

W. Gagui. L'effet d'ajout des fibres palmiers dattiers» (Saaf et Lif) sur les propriétés

Walker P. « Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks». Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, (1995).

Webb DJT. «Stabilised soil and the built environment». Renewable Energy, Vol. 5, No. 5-8, 1066-1080, (1994).

Weng CH, Lin DF, Chiang PC. Utilization of sludge as brick materials. Adv Environ Res;7(3):679–85, (2003).

(2011)

Development Technology Unit, Warwick University,(2001).

blocks», Constr. Build. Mater., vol. 21, p. 303,. (2007) .

544.1-96, (1996)

AFNOR NF P 94-100. Sols : reconnaissance et essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux

Cimbéton. les adjuvants. Disponible». Chapitre 3 : les constituants des mortiers et Le ciment et ses applications bétons : sur :

Winterkorn HF. «Soil stabilization», Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, (1975).

les grands voisins, Un local poubelle de 500 briques en terre crue lesgrandsvoisins.org/(2018).

ACI 544. State-of-the-art report on fibre reinforced concrete. Reported by ACI Committee

-NF P18-934-2 Adjuvant pour béton», mortier et coulis ; adjuvant pour béton définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement P 18-342(.2002).

Build». Environ., vol. 41, no. 12, pp. 1892–1904. (2006)

NF EN1008 (juil.2003).Eau de gâchage pour béton-spécifications d'échantillonnage, d'essais et l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement p18-211).

MICHEL C.G et all . « sols et environnement». DUNOD. ISBN:2100055208 Paris 263 p(2005)