

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

CHEIKH Wassila Randa

HAFINAT Mohamed Saber Ayoub

Sujet du mémoire

Le matériau terre et développement durable

Soutenu publiquement ledevant le jury composé de :

Mr, A.KRIM

Président

Mr, N.KERROUM

Rapporteur

Mlle, A. REBAHI

Examineur

Mme, B.DJEBLI

Examineur

PROMOTION : 2019/2020

R *emerciments*

*A*llah le bénéfique soit loué et qu'il nous guide sur la bonne voie

*A*insi nous remercions notre encadreur Monsieur **N.karoum**, pour tous ses conseils et ses orientations pour la réalisation de ce travail.

*A*ux membres du jury qui ont bien voulu lire et évaluer le présent Mémoire

*N*os remerciements aux enseignants du département de génie mécanique pour leurs aides et orientations durant ma formation en particulier.

*E*t à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

A nos chers parents, pour leurs dévouements, leurs amours, leur compréhension, leurs sacrifices, leur tendresse, leurs prières et leur patience a notre égard.

Nos chers frères et sœurs : Pour leurs soutien durant toute la période de nos études.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des figures

Figure I.1: Une maison traditionnelle en pisé en région Rhône-Alpes, n'ayant jamais été enduite.	6
Figure I.2: A gauche : des adobes au séchage sous le soleil. A droite : une maçonnerie en adobes.	7
Figure I.3: Une maison construite avec des BTC en Rhône-Alpes, France. La tour est en pisé.	8
Figure I.4: Mauvaises conditions d'habitation en Amérique latine, d'après Barbosa et al.	9
Figure I.5: Emission du gaz de CO ₂ (à gauche) et des déchets des usines fabriquant des briques en terre cuite (à droite) en Amérique latine, d'après Barbosa et al.	10
Figure I.6: Régions d'utilisation du pisé en France, d'après.	11
Figure II.1: Taux de croissance annuel des villes dans le monde par région et par taille, 1990-2000.	16
Figure II.2: La croissance des bidonvilles (en milliards d'habitants)	18
Figure II.3: La population des bidonvilles (estimations 2001)	19
Figure II.4: Prolifération des bidonvilles en Afrique subsaharienne.	20
Figure II.5: pourcentage des populations des bidonvilles dans les zones urbaines)	21
Figure II.6: Etat des constructions dans les bidonvilles.	24
Figure II.7: Proportion de la population urbaine vivant dans des taudis, 1990 et 2010.	26
Figure IV.1: Tamisage se sol.	47
Figure IV.2: Intervalle de confiance de la courbe granulométrique.	49
Figure IV.3: Courbe granulométrique du sable de dune.	52
Figure IV.4 : Essai équivalent de sable.	53
Figure IV.5: présentation d'une chaux poudre.	53
Figure IV.6: Fibres de palmiers (palmier dattier de Ghardaïa).	55
Figure IV.7: Procédé d'extraction de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Norme T12 11).	55
Figure IV. 8: Fibres de verre.	56
Figure IV.9: Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTS.	57
Figure IV.10: Moule utilisé pour la fabrication des BTS.	57
Figure IV.11: Combinaison des mélanges des blocs.	58

Figure IV.12: Le poids sec pour chaque bloc	59
Figure IV.13: Mélange global sec	59
Figure IV.14: Malaxeur utilisée	60
Figure IV.15: Malaxeur utilisée	61
Figure IV.16: Optimisation de la teneur en eau	62
Figure IV.17: Mode des compactages	63
Figure IV.18: Appliqué contrainte de compactage (5MPa)	63
Figure IV.19: Conservation des blocs au laboratoire	64
Figure IV.20: Essai de compression	65
Figure IV.21: Essai de traction par flexion	67
Figure V.1: L'effet de teneur des fibres (palmier – verre) et cure humide sur la résistance à la compression de BTS pour différents compactages.	70
Figure V. 2: L'influence du teneur des fibres de palmier et des fibres de verre et la cure humide sur la densité sèche de BTS) à différents compactages	72
Figure V.3: Effet du teneur des fibres de palmier et des fibres de verre, type de liant (chaux) et cure humide sur la résistance à la traction de BTS pour différents compactages.	74

Liste des tableaux

Tableau II.1: La population des bidonvilles	19
Tableau II.2: Population urbaine Africaine vivant dans des taudis	21
Tableau II.3: Population et pourcentage des populations des bidonvilles	22
Tableau IV.1: Les masses volumiques du sol	48
Tableau IV.2: Caractéristique du sol	49
Tableau IV.3: La composition chimique du sol	50
Tableau IV.4: La composition minéralogique du sol	50
Tableau IV.5: Analyse chimique du sable de dune BTS.	51
Tableau IV.6: Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune	51
Tableau IV.7: Equivalent de sable du sable dunaire	52
Tableau IV.8: composition chimique de la chaux	54
Tableau IV.9: Composition des différents mélanges employés dans cette étude	59
Tableau IV.10: Codification des mélanges	60
Tableau IV.11: Optimisation de la teneur en eau.	62
Tableau IV.12: La contrainte de compactage des mélanges	63
Tableau V. 1: Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres et cure humide à différents compactages	69

Tableau V.2: Densité sèche de béton de terre stabilisé - BTS.....	71
Tableau V.3: Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres et cure humide à différents compactages.	73

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
الملخص	
Abstract	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	1

CHAPITRE I

Les constructions et diversité de matériau terre à travers le temps

I.1. Introduction.....	6
I.2. Matériau terre.....	6
I.2.1. Diversité de la construction en terre.....	6
I.2.1.1. Le pisé.....	6
I.2.1.2. Les adobes.....	7
I.2.1.3. Les blocs de terre comprimée (BTC).....	7
I.2.1.4. La terre-paille	7
I.2.1.5. Torchis	8
I.2.1.6 Bauge	8
I.2.2 Avantages du matériau terre	8
I.2.2.1 Avantage économique dans les régions pauvres.....	8
I.2.2.2 Avantage environnemental dans les pays industrialisés.....	9
I.2.2.3 Avantage socio-économique	10
Conclusion	11

CHAPITRE II

Matériau terre et Crise de logements dans le monde

II.1.Introduction.	13
II.2.Établissements urbains et les risques naturels et environnementaux.....	14
II.3.Urgence des secours et actions de développement durable.....	15
II.3.1.Urbanisation rapide.	16

II.4. Croissance des bidonvilles.....	17
II.4.1.Les tendances mondiales	18
II.4.2.Les taudis dans les zones urbaines de l'Afrique.....	20
II.5.Le défi des taudis.	22
II.5.1.Le nombre d'habitants des taudis.....	22
II.5.2. L'amélioration des taudis.	22
II.6. ONU-HABITAT: Objectifs de développement du Millénaire.	23
II.6.1.La volonté politique.	23
II.6.2. Atteindre les Objectifs.....	25
II.7.2.Amélioration des taudis et l'usage du matériaux terre	26
II.8. Quelle voie emprunter pour l'habitat de demain?.....	27
II.8.1. Politique générale du logement.....	28
II.8.2. Plan des politiques de logement (ONU-Habitat).	29
II.8.2.1. Un déficit chronique.....	30
II.8.2.2. Un logement adéquat pour tous.	30
II.8.3. Le financement de logements abordables.....	32
II.9.Conclusion.....	32

CHAPITRE III

Généralités sur la stabilisation des terres dans la construction

III.1. INTRODUCTION	37
III.2. HISTORIQUE DES BTS EN ALGERIE	37
III.3. LA STABILISATION	37
III.3.1. LES PRINCIPAUX STABILISANTS.....	38
III.3.1.1. LE CIMENT	38
III.3.1.2. LA CHAUX.....	40
III.3.1.3. MELANGE CIMENT-CHAUX	42
III.3.1.4. BITUME.....	42
III.3.1.5. LES RESINES	43
III.3.1.6. LE GYPSE.....	43
III.3.1.7. LES POUZZOLANES	43
III.3.1.8. LES FIBRES.....	44
III.3.1.9. AUTRES STABILISANTS.....	44
III.4. CONCLUSION	45

CHAPITRE IV

Caractérisation des Matériaux utilise

IV.1 Introduction	47
IV.2 Matériaux utilisés	47
IV.2.1 Sol.....	47
IV.2.1.1 Origine du sol.....	47
IV.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol.....	47
IV.2.2 Analyse chimique et minéralogique	49
IV.2.3 Sable de dune	50
IV.2.3.1 Analyse chimique	51
IV.2.3.2 Analyse granulométrique	51
IV.2.4 Equivalent de sable.....	52
IV.2.5 La chaux.....	53
IV.2.6 Fibres	54
IV.2.6.1 Fibres de palmier	54
IV.2.6.1.1 Collecte des fibres.....	55
IV.2.6.1.2 Composition chimique des fibres de palmier.....	55
IV.2.6.2 Fibres de verre	56
IV.2.6.2.1 Propriétés	56
IV.3 Confection des blocs.....	57
IV.3.1 Matériel spécifique	57
IV.3.2 Mélanges	57
IV.4 Codification des mélanges	60
IV.4.1 Préparation des mélanges.....	60
IV.5 Optimisation de la teneur en eau	61
IV.6 Compactage des mélanges	62
IV.7 La cure des blocs	64
IV.7.1 Conservation au laboratoire	64
IV.7.2 Propriétés mécaniques	65
IV.8 Essais de compression sèche et humide	65
IV.9 Essai de flexion	66

IV.10 Résistance en compression à l'état humide.....	66
IV.11 Conclusion.....	67

Chapitre V

Présentation et Discussion des Résultats

Introduction :.....	69
V.2 .Résistance à la compression RC28 de BTS	69
V.2.1 L'effet de la cure humide sur la résistance à la compression à 28j de BTS.....	70
V.2.2 L'effet de la variation de la teneur des fibres (palmier - verre) sur la résistance à la compression à 28j de BTS	70
V.2.3 L'effet de compactage sur la résistance à la compression à 28j de BTS	71
V.3 Densité sèche de BTS	71
V.3.1 L'effet de la cure humide sur la densité sèche de BTS.....	72
V.3.2 L'effet de la variation de la teneur des fibres sur la densité sèche de BTS.....	72
V.3.3 L'effet de compactage sur la densité sèche de BTS	73
V.4 Résistance à la traction de BTS à 28 jours.....	73
V.4.1 L'effet de la cure humide sur la résistance à la traction à 28j de BTS.....	74
V.4.2 .L'effet de la cure humide sur la résistance à la traction à 28j de BTS.....	74
V.4.3.L'effet de la variation de la teneur de fibre de palmier et de fibre de verre et type de liant sur la résistance à la traction de BTS.....	74
V.4.4 L'effet de compactage sur la résistance à la traction à 28j de BTS	75
V.5 Les BTS à base de chaux	75
V.6 Conclusion.....	76
Conclusion général	78

الملخص:

من أجل التقليل من تكاليف البناء والطاقة المستهلكة في التدفئة والتكييف، تم استخدام ألياف النخيل وألياف الزجاج لتثبيت كتل التربة المضغوطة.

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو دراسة تأثير استخدام الألياف، وبشكل خاص ألياف نخلة التمر مقارنة بألياف الزجاج على الخصائص الميكانيكية والسلوك الميكانيكي لكتل التربة المضغوطة.

في هذا الإطار قمنا باستخدام نسبة من الجير (12%) وستة نسب من الألياف (05% ، 01% ، 0,15% ، 0,20% ، 0,25% و 0,03%) من وزن المزيج الجاف وهذا بالنسبة لوزن الخليط الجاف بإستعمال ضغط الرص (5MPa).

وتشير النتائج بأن مقاومة الضغط تزداد بزيادة نسبة الألياف إلى غاية نسبة 0,20 بالنسبة لألياف النخيل وبالنسبة 0,15 بالنسبة لألياف الزجاج كحد أقصى ثم تبدأ في التناقص بزيادة نسبة الألياف .

في المقابل فان وجود الألياف له تأثير ايجابي على السلوك الميكانيكي للمادة المركبة، وذلك

بزيادة ليونتها بالمقارنة مع السلوك المتميز بالقابلية للانكسار بالنسبة للمادة الخالية من الألياف .

بينت هذه الدراسة كذلك أن زيادة إجهاد الرص له تأثير ايجابي على مختلف الخصائص المدروسة .

الكلمات المفاتيح: كتل التربة المضغوطة، الياف نخلة التمر، الياف الزجاج، المقاومة، السلوك .

Abstract

To reduce construction costs and energy consumed in the heating and air conditioning, the use of palm fiber and fiberglass to install earth blocks tablets.

For this work, the main purpose is to study the effect of the use of the fiber, particularly fiber of date palm from the glass fiber on the mechanical properties and behavior of mechanical blocks of compressed soil. In this context, we used the ratio of lime (12%) and six levels of fiber (0.1% 0.05%, 0.15%, 0.20%, 0.25% and 03.0%) the dry mixture and the weight of the average weight of the dry mixture through a pressure control (5 MPa).

The results indicate that the compressive strength increases with the proportion of fibers very 0.20 ratio for the palm fiber and 0.15 for the glass fibers, a maximum and then begins to decrease to increase the reports of the fiber.

In contrast, the presence of fibers has a positive effect on the mechanical behavior of the composite material, and increasing the flexibility with respect to a remarkable sensitivity behavior of refraction of a non-fibrous material. This study also showed that increased stress monitoring has a positive effect on the different characteristics studied.

Keywords: compressed earth blocks, palm fibers Date, glass fibers, resistance, behavior

Résumé

Afin de réduire les coûts de construction et de l'énergie consommée dans le chauffage et la climatisation, l'utilisation de la fibre de palme et de fibre de verre pour installer des blocs de terre comprimés.

Pour ce travail, le but principal est d'étudier l'effet de l'utilisation de la fibre, en particulier la fibre du palmier dattier par rapport à la fibre de verre sur les propriétés mécaniques et le comportement des blocs mécaniques du sol comprimé. Dans ce contexte, nous avons utilisé le rapport de la chaux (12%) et six niveaux de fibres (% 0,05% 0,1, 0,15%, 0,20%, 0,25% et 03,0%) du mélange sec et le poids de cette moyenne pour le poids du mélange sec au moyen d'un contrôle de la pression (5 MPa).

Les résultats indiquent que la résistance à la compression augmente avec la proportion de fibres au ratio très 0,20 pour la fibre de palme et de 0,15 pour les fibres de verre, un maximum, puis commence à diminuer pour augmenter les rapports de la fibre.

En revanche, la présence de fibres a un effet positif sur le comportement mécanique du matériau composite, et en augmentant la souplesse par rapport à un comportement remarquable sensibilité de réfraction d'un matériau non fibreux. Cette étude a également montré que l'augmentation de la surveillance du stress a un effet positif sur les différentes caractéristiques étudiées.

Mots Clés: Blocs de terre comprimée, Fibres de palmier Date, fibres de verre, résistance, comportement

I Introduction générale

Introduction

”Il n’y a de nouveau que ce qui a vieilli” (Chaucer, XIV^eme siècle).

Les matériaux non-industriels utilisés en génie civil sont des matériaux fabriqués et mis en place par des artisans lors de cycle de production court. Il s’agit en général de matériaux locaux, terre, pierre, fibres végétales avec liant etc. trouvés sur site ou proche du site de construction. Leur étude et utilisation est devenue prometteuse dans les pays très industrialisés pour trois raisons.

La première est le voeu d’accéder à un développement durable. Or ces matériaux impliquent une mise en avant des savoir-faire de l’homme en évitant son remplacement par des machines. Le volet social est donc favorable. Le volet environnement l’est aussi du fait de leur faible consommation d’énergie grise et de transport (Morel et al. [105]), de leur innocuité, leur grande durabilité (Bui et al. [30]), leur capacité de ré-utilisation, leur abondance... Enfin l’aspect économique, dans les pays très industrialisés, reste le point le plus défavorable mais en évolution favorable du fait de l’augmentation conséquente et pérenne de la population mondiale et du prix des énergies fossiles (Bruce 22). Dans les pays en développement, ce dernier point fait que le volet économique est aussi un point fort pour ces matériaux qui sont moins chers que les produits industriels.

Le secteur du bâtiment joue un rôle important dans le développement durable. Le choix des matériaux utilisés pour la construction de l’enveloppe a des incidences sur l’épuisement des ressources naturelles, la consommation d’énergie et les émissions polluantes, les déchets de chantier et de démolition. Ainsi, la fabrication et la mise en oeuvre des matériaux (ou produits de construction) sont étroitement liées aux questions d’épuisement des ressources naturelles, de consommations d’énergie (pour l’extraction des matières premières, leur transport, leur transformation, le transport des produits finis et leur mise en oeuvre in-situ) et enfin aux émissions polluantes qui en résultent. La vie en oeuvre du matériau a des répercussions sur les consommations énergétiques du bâtiment (chauffage, climatisation), le confort (hydrique, thermique, acoustique), la santé (émission de COV - Composés organiques volatils, ... [36]) ainsi que sur l’efficacité du travail (dans le cas des bâtiments de bureau [78]) des occupants. Enfin, la déconstruction et/ou la démolition du bâtiment sont à rapprocher des consommations d’énergie et des émissions polluantes (liées à la déconstruction ou à la démolition) ainsi que des déchets qui en sont issus.

Le deuxième point tient au fait que les structures en matériaux non-industriels sont encore extrêmement nombreuses sur toute la planète et même dans les pays très industrialisés, malgré des destructions en masse. On comptait en France environ 2,4 millions de logement en terre crue en 1987 (Michel et Poudru [100]). Leur maintenance, souvent plus d'un siècle après leur construction, pose des problèmes financiers et techniques car mis en place par empirisme sans donnée scientifique.

La troisième raison est la volonté de renforcer la lutte contre les risques naturels comme les inondations, les séismes et de faire face aux changements de l'environnement d'origines anthropiques qui a priori n'ont pas pu être pris en compte par l'empirisme tel que la modification du climat. Cela nécessite d'évaluer la pertinence de ces matériaux et structures avec des conditions de sûreté modernes c'est à dire avec un outil scientifique adapté et fiable.

Les matériaux "modernes" composant les structures du génie civil sont optimisés grâce au process industriel souvent standardisé pour répondre à une fonction précise pour une durée limitée, on superpose alors des matériaux différents pour obtenir un système constructif complexe efficace répondant à une demande physique et culturelle. On cherche le plus souvent la très haute performance du composant sans se préoccuper des autres aspects. La faiblesse de ces systèmes est leur comportement à long terme non maîtrisé, voire quelquefois dangereux (par exemple le cas de l'amiante).

Les matériaux non-industriels dans la construction sont le fruit d'une optimisation empirique plus que millénaire. Les matériaux issus de matières premières renouvelables (comme les matériaux végétaux) sont une réponse au problème d'épuisement des ressources naturelles, les matériaux recyclables (comme la terre) apportent, en plus, une réponse au problème de déchets en fin de vie du bâtiment. Ces matériaux locaux et les structures qui en découlent possèdent une grande variabilité à chaque construction de par les variabilités géologiques des sites et de par le fait qu'ils ne sont pas produits par un process industriel et standardisé. Le sol du site est le matériau mis en oeuvre pour répondre à tous les besoins du moment (Dincyurek et al. [45]), par exemple dans le cas d'un mur en bâtiment : non nocif à la santé, la durabilité, le confort hygrothermique, la stabilité mécanique...

L'optimisation du matériau n'est pas recherchée pour sa performance dans un seul domaine, par exemple la résistance à la compression, mais par un compromis entre de nombreux critères. Par exemple, dans le cas du pisé ou des pierres, l'épaisseur du mur est au minimum de 50 cm pour offrir un comportement hygrothermique correct.

Introduction général

Avec de telles épaisseurs, les coefficients de sécurité en compression peuvent aller jusqu'à 10. La complexité va venir de la variabilité du matériau et non pas de la difficulté à obtenir une performance. D'un point de vue scientifique, il n'est pas alors souhaitable d'utiliser des lois rhéologiques très élaborées et très coûteuses d'utilisation mais plutôt des méthodes de mesures des performances donnant des résultats fiables et utilisables en pratique même si peu précis.

En conséquence, il s'agit modestement de quantifier le comportement de ces matériaux pour ensuite quantifier le comportement des structures qu'ils composent avec une approche scientifique qui met l'accent sur la mise au point de méthodes d'essais pouvant caractériser ces matériaux.

Problématique

Le mode de vie occidental est de plus en plus remis en question. Certains cherchent un modèle de rechange pour corriger les erreurs déjà commises et pour éviter que les pays du Sud les commettent eux-mêmes. Les nouvelles technologies ne servent souvent qu'elles-mêmes ou l'économie. Le modèle capitaliste a montré ses énormes lacunes, et nombreux sont ceux qui, déçus, aspirent à autre chose.

Objectif de la recherche

L'objectif principal de notre recherche est de protéger les habitations en adobe de se dégrader, par la valorisation de la résistance mécanique des adobes, et à travers une étude comparative, théorique et pratique, de la durabilité des habitations en adobe, anciennes et contemporaines.

Hypothèses :

Pour répondre à notre problématique, nous avons construit les hypothèses suivantes :

- Les dégradations des constructions en adobe sont dues au manque d'entretien, et connaissances sur les performances du matériau terre, et ses caractéristiques surtout celles qui concernent la résistance mécanique.
- La durabilité des constructions en adobe pendant des siècles justifie pleinement l'emploi de ce matériau pour assurer la sensation de sécurité aux habitants.

Chapitre -I-

Les constructions et diversité
de matériau terre à travers le temps

I.1. Introduction

La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. 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. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques (Houben, 1996).

I.2. Matériau terre

Tout d'abord, nous allons aborder rapidement la diversité de la construction en terre et pourquoi le pisé est choisi pour cette mémoire .

I.2.1. Diversité de la construction en terre

Il existe une grande variété des types de construction en terre (Houben et al).

Les types les plus couramment utilisés sont présentés ci après

I.2.1.1. Le pisé

La terre est compactée dans les coffrages (traditionnellement en bois, mais actuellement ils peuvent être en métal), couche après couche, par une dame (manuelle ou pneumatique).

La Figure I.1 présente un exemple d'une maison traditionnelle en pisé.



Figure I.1: Une maison traditionnelle en pisé en région Rhône-Alpes, n'ayant jamais été enduite.

I.2.1.2. Les adobes

L'adobe est le nom le plus communément utilisé des briques séchées au soleil. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre argileuse humide. A l'origine, ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et encore aujourd'hui), elles sont fabriquées manuellement à l'aide de moules à formes prismatiques variées en bois ou en métal. Actuellement, des machines sont également employées.

La Figure 2.2 présente un exemple de fabrication et utilisation d'adobes.



Figure 2: A gauche : des adobes au séchage sous le soleil. A droite : une maçonnerie en adobes.

I.2.1.3. Les blocs de terre comprimée (BTC)

Pendant longtemps, on a fabriqué des blocs de terre à l'aide de moules dans les quels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes.

Les produits obtenus sont extrêmement variés. La Figure 2.3 présente un exemple d'une maison construite avec des BTC.

I.2.1.4. La terre-paille

Pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est diluée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille.

I.2.1.5. Torchis

Une structure en colombages et claies de bois est hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres, constitue les parois de la bâtisse.



Figure I.3: Une maison construite avec des BTC en Rhône-Alpes, France. La tour est en pisé.

I.2.1.6 Bauge

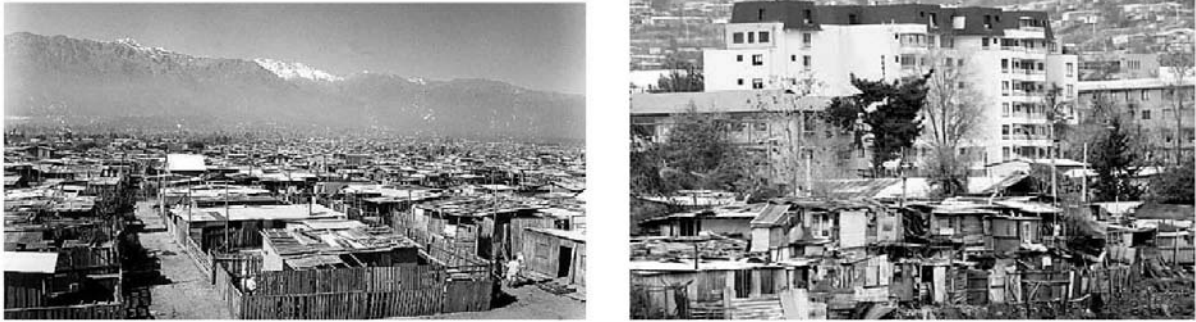
Ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques.

Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.

I.2.2 Avantages du matériau terre**I.2.2.1 Avantage économique dans les régions pauvres**

Étant un matériau local et naturel, le matériau terre est moins cher que les matériaux

conventionnels, notamment dans les pays en développement où l'emploi manuel n'est pas coûteux. La fiabilité de la construction en terre a été démontrée non seulement dans les pays pauvres où la plupart des peuples n'avaient pas assez de moyens pour construire des maisons "modernes" (MacLeod [93]) mais elle a aussi une énorme potentialité dans les régions pauvres des pays riches (Barbosa et al. [15]) où la situation de logements des pauvres est encore très mauvaise (Figure 2.4).



FigureI. 4: Mauvaises conditions d'habitation en Amérique latine, d'après Barbosa et al

I.2.2.2 Avantage environnemental dans les pays industrialisés

Dans les pays industrialisés, bien que l'avantage économique du matériau terre soit aussi un point fort, il n'est pas un point favorable à rechercher. Pourtant, c'est l'avantage environnemental qui met le matériau terre dans la position d'un matériau "du futur" dans ces pays. Le premier avantage environnemental réside dans la très faible énergie grise consommée et la très faible pollution pendant la fabrication par rapport aux matériaux conventionnels. Pour un matériau conventionnel, avant d'être mis en œuvre sur chantier, il doit passer par les phases suivantes : l'extraction du matériau premier ; le transport à l'usine ; la transformation en usine ; le transport de l'usine au point de vente, du point de vente au chantier ; la mise en œuvre sur chantier. A l'inverse, avec un matériau local et fabriqué manuellement (essentiellement) comme la terre, premièrement, les transports du matériau premier du chantier d'extraction à l'usine et des produits fabriqués de l'usine au chantier sont supprimés ou bien limités. Deuxièmement, la fabrication principalement manuelle du matériau terre diminue la consommation d'énergie et la pollution par rapport aux matériaux conventionnels fabriqués en usine (Figure 2.5 à gauche).

Le deuxième avantage environnemental réside dans la phase de démolition des bâtiments.

Avec un recyclage aisée, le matériau terre traditionnel (non-stabilisé) ne pose pas de problème de déchets comme dans le cas des matériaux conventionnels (Figure 2.5 à droite comme exemple).

Pendant la phase d'habitation, l'avantage environnemental du matériau terre est encore difficile à conclure. Ce problème sera présenté dans la section 3.4.

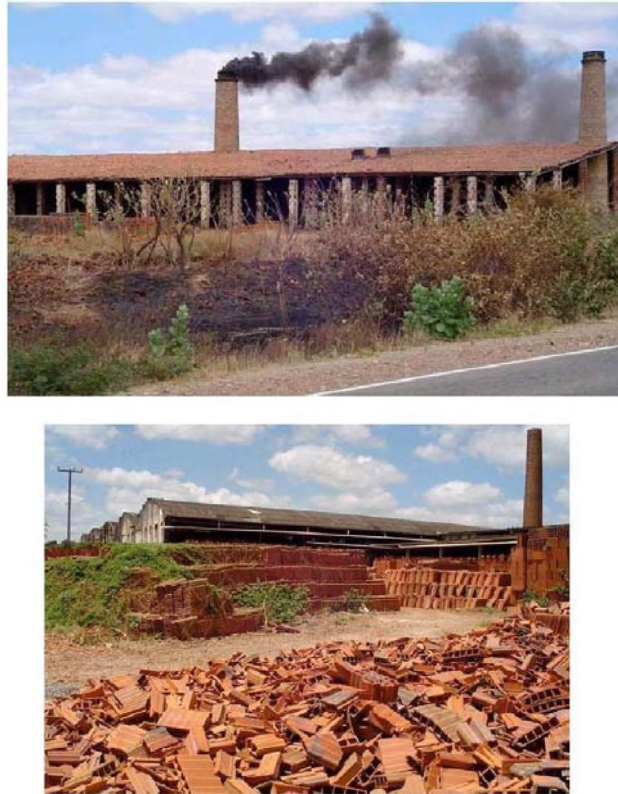


Figure I5: Emission du gaz de CO₂ (à gauche) et des déchets des usines fabriquant des briques en terre cuite (à droite) en Amérique latine, d'après Barbosa et al.

I.2.2.3 Avantage socio-économique

En utilisant principalement le travail manuel, la construction en terre a aussi l'avantage socio-économique de créer des emplois localement.

2.3 Pourquoi le pisé est l'objectif de cette thèse ?

Suite à deux thèses déjà réalisées au Laboratoire Géo matériaux de l'ENTPE, dont une sur des blocs de terre comprimée (BTC) (P'kla) et une sur mortier de terre

(Alves de Azeredo [8]) qui a une rhéologie a priori proche de celle des adobes, la présente thèse continue la recherche de l'ENTPE sur le matériau terre par l'étude sur le pisé. A part des avantages communs d'un matériau terre abordés dans la section précédente, le pisé est choisi comme l'objet de recherche de cette thèse pour les raisons suivantes. Premièrement, avec une richesse des patrimoines en pisé de la région Rhône-Alpes et de la France (Figure 2.6), la conservation de ceux-ci nécessite des connaissances scientifiques sur ce matériau.

Deuxièmement, grâce à sa grande épaisseur, un mur en pisé nous offre une grande inertie thermique et la régulation de l'humidité intérieure de la maison. Par conséquent, avec

une bonne conception, des maisons en pisé peuvent avoir une bonne performance thermique, donc énergétique, dans la phase d'habitation. Ce point est très important car, complété par des faibles consommations d'énergie évidemment pendant la phase de construction et de démolition présentés dans la section précédente, il est un point fort du matériau pisé dans le développement durable. Le détail des performances énergétiques de ce matériau sera présenté dans les chapitres suivants.

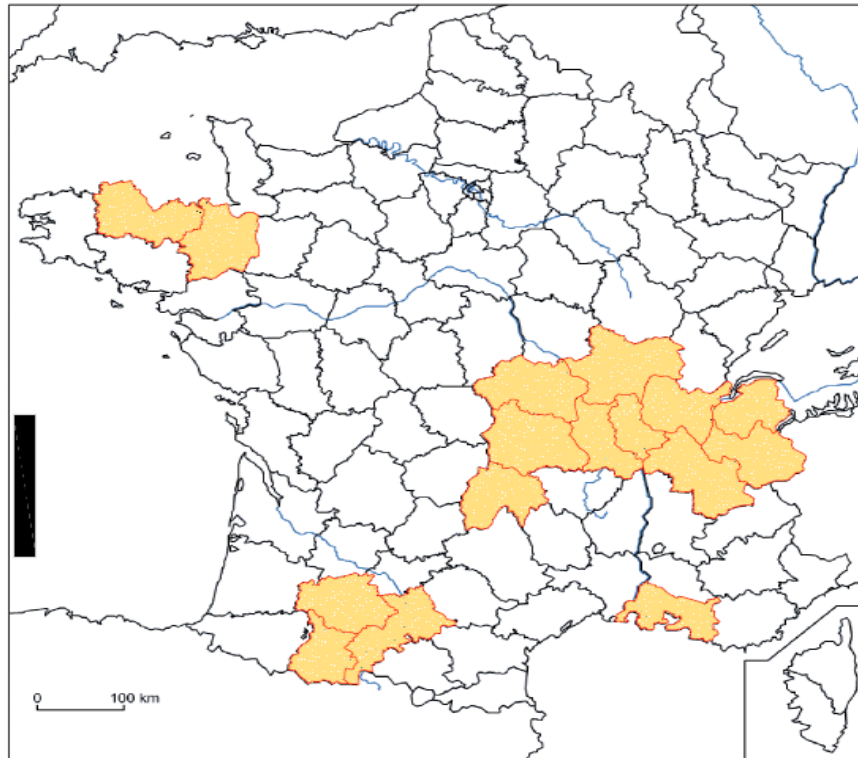


Figure I.6: Régions d'utilisation de prise en France

Conclusion

Les progrès faits parallèlement sur la construction en terre vont permettre aux habitants de renouer avec une tradition constructive tout en gagnant en qualité de vie.

Chapitre -II-

Matériau terre et Crise
de logements dans le monde

II.1.Introduction.

Au cours de la dernière décennie, partout dans le monde, plus de 200 millions de personnes par an ont été victimes de catastrophes naturelles – soit sept fois plus que les victimes de conflits. Les risques naturels deviennent des catastrophes lorsqu'ils ont une incidence sur la population et les biens qui subissent leurs conséquences dévastatrices. Ces risques sont particulièrement marqués dans les villes, bourgs et villages du monde. Des facteurs comme l'utilisation inadaptée des terrains, la conception déficiente et la mauvaise construction des bâtiments et infrastructures et un environnement de plus en plus dégradé font peser des menaces sur les établissements humains. Bien que ces menaces existent aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement, elles ont souvent une incidence plus grande et plus répétée dans les pays en développement, où la capacité institutionnelle est plus faible, se traduisant par une vulnérabilité chronique de grands pans des populations les plus démunies.

Nombre des défis les plus pressants que le monde doit relever – pauvreté, catastrophes naturelles, renchérissement des denrées et de l'énergie – ont des liens importants avec l'urbanisation rapide.

L'urbanisation provoque des changements irréversibles dans la façon dont nous utilisons le sol, l'eau et l'énergie. Si elle est bien planifiée, elle peut offrir des options aux populations et les aider à s'épanouir. Mal organisée, elle compromet la sécurité, ruine l'environnement et accentue la marginalisation de ceux qui, déjà, souffrent et sont exclus de la société.

Dans les objectifs du Millénaire pour le développement, il est prévu d'améliorer sensiblement les conditions de vie d'au moins 100 millions d'habitants des taudis d'ici à 2020.

En 2005, un peu plus du tiers de la population urbaine des régions en développement vivait dans des taudis. En Afrique subsaharienne, cette proportion dépassait 60 %, ce qui signifie que d'importants investissements devront être consacrés, et notamment l'accès à un logement durable. Cependant, même dans cette région, et dans d'autres où le dénuement n'atteint pas une telle ampleur, des initiatives simples, à faible coût, contribueraient beaucoup à la solution de ce problème.

Le monde connaît un accroissement urbain sans précédent. Entre 1995 et 2005, la population urbaine des pays en développement a augmenté en moyenne de 1,2 million de personnes par semaine, soit environ 165 000 personnes par jour.

On estime qu'au milieu du XXI^e siècle, la population urbaine de ces pays aura plus que doublé, passant de 2,5 milliards en 2009 à près de 5,2 milliards en 2050.

L'aménagement du territoire des villes et des régions devra passer par des méthodes et des techniques nouvelles, qui permettront de réagir au développement urbain, à l'expansion et aux impératifs de la gestion de la croissance, mais aussi au déclin démographique. Il conviendra alors d'associer une planification intelligente de la croissance à une planification intelligente de la contraction les deux associées à un usage intelligent de matériaux locaux de constructions si l'on veut favoriser un développement urbain et régional plus durable et équilibré.

Le développement urbain durable, la fourniture de logements peuvent devenir des réalités. Au moment où nous entrons dans le millénaire urbain, une transformation formidable est requise au niveau de l'exercice des responsabilités dans les pays du Sud pour que ces derniers puissent faire face à l'enjeu que représentent la fourniture d'un logement convenable pour tous et le développement urbain durable.

Il est impératif pour tout le monde de s'engager dans un «penser global, agir local». Appréhender le bâtiment avec une préoccupation développement durable remet en question, en plus de la distribution spatiale et l'ensemble des usages, les performances énergétiques des matériaux utilisés.

La question du logement mérite des approches architecturales créatives, pour aboutir à des projets permettant de répondre aux besoins actuels de logements diversifiés, à coût et charges maîtrisés, avec de réelles qualités d'usage et d'appropriation et intégrant des exigences de qualité environnementale durable.

II.2.Établissements urbains et les risques naturels et environnementaux.

En plus de l'urbanisation rapide (partie qu'on va voir dans 1. Urbanisation rapide) et du manque à réaliser en matière de constructions en général et en logements en particulier s'ajoute les catastrophes naturelles et environnementales qui tellement fragiles face aux risques naturels et environnementaux qui les menacent, les établissements urbains et les pauvres, partout mais plus particulièrement dans les zones urbaines, sont les plus en danger, l'absence d'infrastructures, l'absence de sécurité d'occupation, l'usage inapproprié des sols et des environnements de plus en plus dégradés laissent une grande partie des groupes humains les plus démunis dans un état de vulnérabilité chronique.

Selon le Bureau de la prévention des crises et du relèvement du PNUD , quelque 75 % de la population mondiale vit dans des zones qui ont été affectées une fois au moins entre

1980 et 2000 par un tremblement de terre, un cyclone tropical, des inondations ou la sécheresse.

Les calculs effectués par la Fédération internationale de la Croix-Rouge et par le Croissant-Rouge montrent que de 1994 à 1998, la moyenne des catastrophes répertoriées s'établit à 428 par an. De 1999 à 2003, ce chiffre a grimpé des deux tiers pour atteindre une moyenne de 707 catastrophes naturelles par an. La hausse la plus forte a concerné les pays en développement, qui ont subi une augmentation de 142 %.

Les changements climatiques apparaissent pratiquement en même temps et au même rythme que les villes s'agrandissent, il va falloir trouver des idées nouvelles et agir sans délai.

Un programme vert permettrait de garantir un environnement urbain propice à une vie décente.

II.3.Urgence des secours et actions de développement durable.

Le caractère généralisé des impacts des catastrophes exacerbe les défis inhérents à la gestion des crises et aux processus de restauration : comment compenser les contradictions radicales et récurrentes entre l'urgence des secours à apporter et les actions de développement durable ? Et comment apporter à toutes les parties prenantes des stratégies concrètes permettant d'alléger les crises, et s'en remettre?

Le concept de restauration durable n'entraîne pas un passage brutal des secours au développement, mais représente plutôt une démarche intégrée dans laquelle les personnes concernées traitent les besoins vitaux tout en soutenant aussi un développement durable à plus longue échéance.

Comprendre la vulnérabilité urbaine est le premier pas vers l'élaboration de stratégies d'allègement qui amélioreront, de fait, la faculté de reprise et diminueront la vulnérabilité des populations urbaines dans le long terme.

Le programme des Nations Unies pour les établissements humains, aide les citoyens pauvres en transformant les villes pour en faire des lieux plus sûrs, plus sains et plus verts offrant davantage d'opportunités et où chacun peut vivre dans la dignité.

Elle collabore avec des organisations à tous les niveaux, dans toutes les sphères gouvernementales, la société civile et le secteur privé en vue de construire, gérer, planifier et financer le développement urbain durable par le biais de construction d'unités d'habitation à base de ressources locales.

Son ambition des villes sans taudis, des lieux vivables pour tous, qui ne polluent pas l'environnement et n'épuisent pas les ressources naturelles.

Elle est à l'avant-garde de la lutte contre la pauvreté urbaine et contre le fléau des changements climatiques dus à une mauvaise planification urbaine qui menace de compromettre les conditions de vie et les moyens de subsistance de cités et de communautés entières.

II.3.1. Urbanisation rapide.

La figure 40 montre le taux de croissance annuel des villes à travers le monde, et le tableau 8 donne le taux de croissance urbaine et des taudis par région.

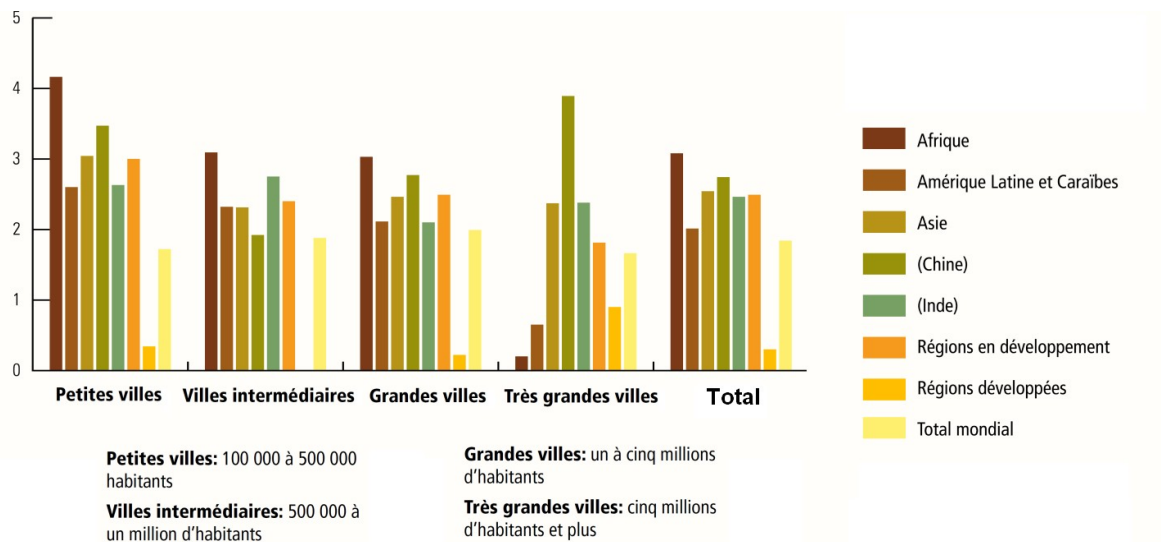


Figure II.7: Taux de croissance annuel des villes dans le monde par région et par taille, 1990-2000

Au niveau mondial, 30 % de tous les citadins vivaient dans des taudis en 2005, proportion qui n'a guère changé depuis 1990. Cependant, au cours des 15 dernières années, le problème s'est considérablement amplifié : 283 millions d'habitants de taudis de plus ont rejoint les rangs de la population urbaine mondiale.

Comment gérer cette situation? Tel est incontestablement le plus grand problème qui se pose à l'humanité au XXI^e siècle.

Les gouvernements sont toujours plus nombreux à le reconnaître et l'Organisation des Nations Unies doit plus que jamais s'efforcer de trouver une solution d'urbanisation durable.

Il s'agit essentiellement de trouver les moyens de fournir à tous un logement adéquat et abordable – pierre angulaire des relations d'ONU-Habitat avec les gouvernements, les municipalités, ses partenaires de la société civile et le monde de la finance, tant public que privé. Et, en définitive, c'est un problème à résoudre avec ceux qui ont le plus besoin de logements et d'autres services permettant d'avoir un niveau de vie acceptable.

Avec 1 milliard de personnes qui vivent dans des bidonvilles et des milliers qui viennent s'y ajouter chaque jour dans bien des endroits surpeuplés et pauvres d'un échiquier géopolitique déjà porteur de risques considérables.

Il est choquant par exemple que 62 % des habitants des villes et des cités de l'Afrique sub-saharienne vivent aujourd'hui dans des bidonvilles et que les habitants des taudis représentent 43% de la population urbaine de l'Asie centrale et de l'Asie du Sud.

C'est là que le Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat) doit intervenir pour faire en sorte que la situation s'améliore. Lorsque l'organisation a été créée, en 1978, deux ans après la première conférence sur l'habitat à Vancouver (Canada), l'urbanisation et ses conséquences figuraient à peine sur l'écran radar d'une Organisation des Nations Unies créée tout juste trois décennies auparavant alors que les deux tiers de l'humanité vivaient encore en zone rurale.

Pour faire face à l'urbanisation et à la crise mondiale du logement, en 2001 l'Assemblée générale des Nations Unies, lors d'une session extraordinaire consacrée à l'examen du Programme pour l'habitat, a décidé par sa résolution A/56/206 de donner à ONU-Habitat le statut d'un Programme des Nations Unies à part entière dirigé par un Conseil d'administration composé d'Etats membres et chargé d'aider les décideurs et les communautés locales à s'attaquer au problème du logement et à trouver des solutions viables et durables.

La Déclaration du Millénaire des Nations Unies, qui reconnaît les conditions de vie désastreuses des citadins pauvres dans le monde, se rattache aussi directement au mandat d'ONU-Habitat. Elle rappelle l'engagement pris par les Etats membres d'améliorer les conditions de vie d'au moins 100 millions d'habitants de taudis d'ici l'année 2020 (cible 11, objectif 7 des Objectifs du Millénaire pour le développement). Pour aussi élevé que ce chiffre de 100 millions puisse paraître, il ne représente cependant que 10 % de la population mondiale qui vit actuellement dans des bidonvilles et qui, si elle n'est pas contrôlée, se multipliera par trois pour atteindre les 3 milliards d'ici à 2050.

II.4. Croissance des bidonvilles.

Il est certain que les pays en développement s'urbanisent. Le problème est que, dans de nombreux cas, cette évolution a lieu dans un contexte de pauvreté. L'urbanisation est quasiment devenue synonyme de croissance des bidonvilles, particulièrement en Afrique subsaharienne et en Asie de l'ouest et du sud-est, y compris dans les villes petites et moyennes, où les taux de croissance urbaine et de croissance des bidonvilles sont presque

identiques. La nécessité d'explorer des approches innovantes pour créer des villes durables est devenue incontournable.

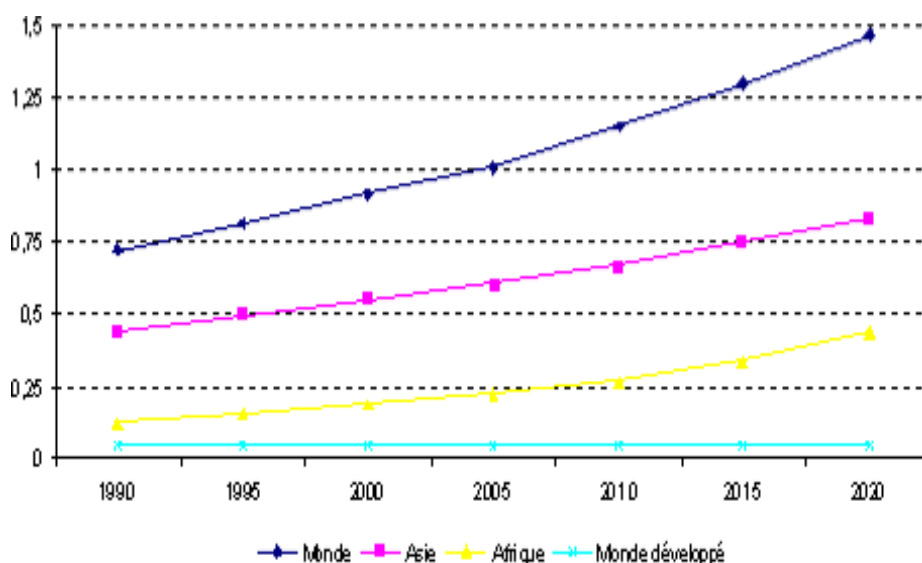


Figure II.8: La croissance des bidonvilles (en milliards d'habitants)

II.4.1. Les tendances mondiales

En 2001 et avec un total de 187 millions d'habitants de taudis, l'Afrique avait la plus forte proportion (60,9 %) de population urbaine vivant dans des bidonvilles. L'Afrique subsaharienne connaîtra la plus forte concentration d'habitants de taudis dans le monde (à la fois en termes absolus et relatifs) au cours de la prochaine décennie environ.

L'Asie-Pacifique vient ensuite. Bien que, à long terme, la tendance générale dans la région soit favorable, 42,1 % de la population urbaine vit dans des taudis. Cette tendance à la baisse contraste avec l'augmentation du nombre (554 millions) de colons informels (à l'exclusion de la Chine).

L'Amérique latine et les Caraïbes viennent en troisième place avec 31,9 % de leur population vivant dans des taudis, soit 128 millions de personnes. La région réussit à combiner urbanisation effrénée et diminution des bidonvilles.

Les tendances de l'urbanisation en Chine et en Inde progressent à pas de géant vers l'éradication des taudis par l'usage des matériaux locaux, le matériau terre notamment

Dans les pays en développement, près de deux milliards de personnes vivent déjà en milieu urbain. D'après les prévisions, ce chiffre devrait doubler au cours des trente prochaines années. La population urbaine représentera alors la moitié de la population mondiale. De plus, la majorité de ces nouveaux urbains feront partie des plus pauvres - résultat d'un phénomène d' "urbanisation de la pauvreté".

On estime qu'un tiers de la population urbaine des pays en développement vit dans les bidonvilles.

Tableau II.1: La population des bidonvilles

Sources: ONU-HABITAT, Observatoire Mondial Urbain 2003. Estimations 2001

Principales Régions	Population totale (en millions)		Population urbaine totale (en millions)		Population urbaine en % d la Population totale		Population urbaine des bidonvilles (%)	Population urbaine des bidonvilles (en millions)
	1990	2001	1990	2001	1990	2001	2001	2001
Monde	5,255	6,134	2,286	2,923	43,5	47,7	31,6	924
Pays Développés	1,148	1,194	846	902	37,7	75,5	6,0	54
Pays en Développement	4,106	4,940	1,439	2,022	35,0	40,9	43,0	870
Pays les Moins Avancés	515	685	107	179	20,8	26,2	78,2	140

Le taux de croissance mondial annuel des taudis est de l'ordre de 2,22 %, un taux considérablement élevé.

La croissance plus rapide dans les zones urbaines des pays en développement suggère que les problèmes associés aux bidonvilles vont s'aggraver dans ces quartiers déjà précaires. D'après les estimatifs de l'ONU-HABITAT 2001, plus de 70% de la population urbaine des Pays les Moins Avancés et des pays d'Afrique Sub-saharienne vit dans les bidonvilles, figure II.3.

Ce chiffre est amené à augmenter si l'on n'intervient pas de manière conséquente par des projets d'amélioration de l'habitat.

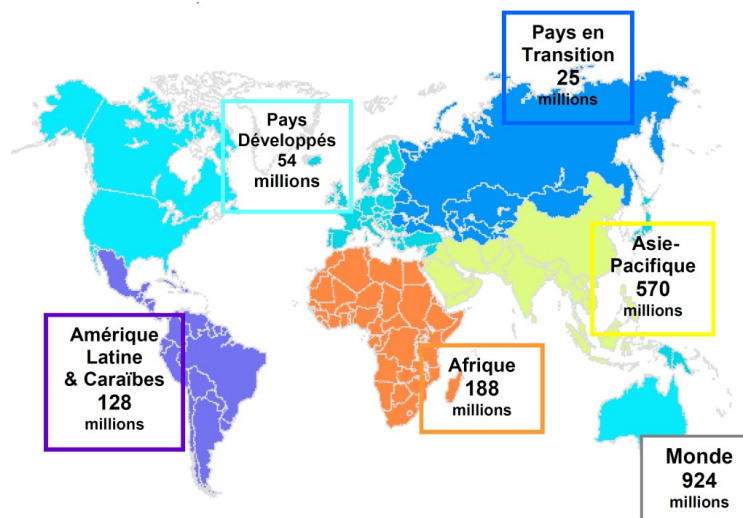


Figure II.9: La population des bidonvilles (estimations 2001)

Source : ONU-HABITAT

II.4.2. Les taudis dans les zones urbaines de l'Afrique.

En 2001, environ 61 % de tous les citoyens africains vivaient dans des taudis, dont 54 % en Afrique subsaharienne et 7 % en Afrique du Nord. En Afrique du Nord, dans trois pays, un tiers environ de la population urbaine totale vivait dans des taudis : Egypte (39,9 %), Libye (35,2 %) et Maroc (32,7 %). Le nombre de taudis en Afrique subsaharienne est encore plus frappant, 71,9 % de la population urbaine vivant actuellement dans des implantations informelles .

On estime que 71 % de la population vit dans la pauvreté et que deux personnes sur cinq vivent dans un extrême dénuement.

L'accroissement des taudis au pays d'Afrique est en perpétuelle hausse, figure 45, avec une timide éradication pour quelques pays.

La répartition de la population urbaine Africaine vivant dans des taudis est donnée dans le tableau II.2.

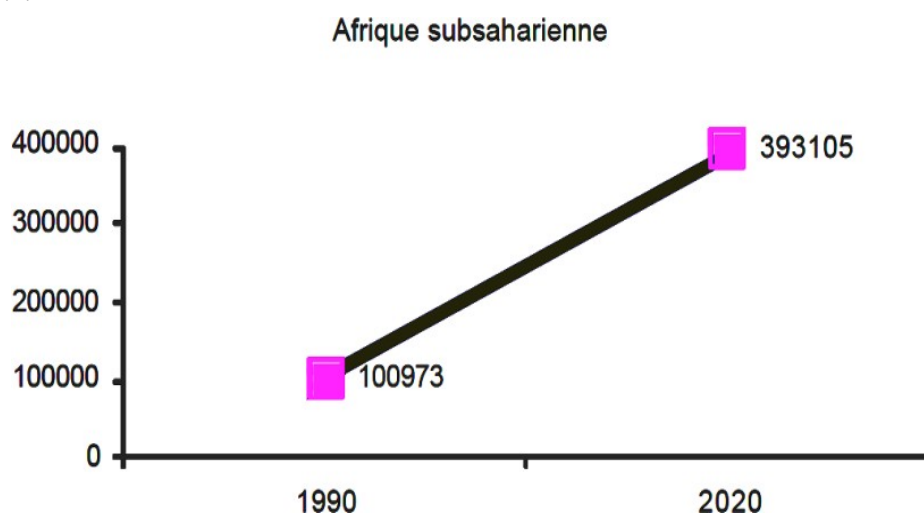


Figure II.10: Prolifération des bidonvilles en Afrique subsaharienne

Source: ONU-HABITAT 2005, Perspectives mondiales de l'urbanisation 2001

Réduits à leurs propres forces, les citoyens pauvres produisent des logements dont les caractéristiques communes sont la mauvaise qualité, l'exiguïté et un sous-équipement souvent dramatique. L'image d'une "bidonvilisation" de la planète est sans doute excessive mais des barriadas de Lima aux kampungs indonésiens, des barrios de ranchos de Caracas aux townships sud-africains reviennent, lancinantes, les images de constructions précaires édifiées dans un environnement insalubre et soumises à de véritables "systèmes de carences" dans le domaine des infrastructures et des équipements.

La carte de la **Figure II.5**, donne l'incidence des taudis dans les pays africains.

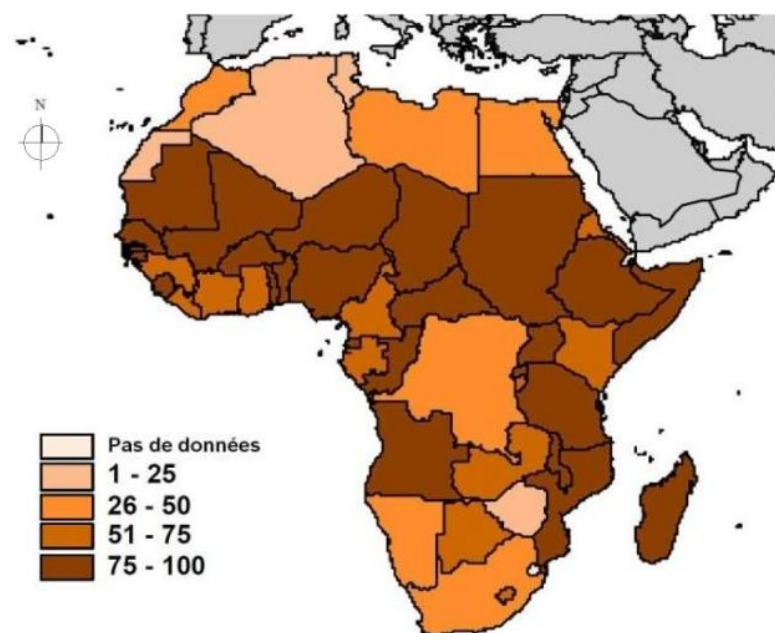


Figure 11: pourcentage des populations des bidonvilles dans les zones urbaines)

Source: UN-HABITAT2005, The face of urban poverty in the new millennium

Tableau II.2: Population urbaine Africaine vivant dans des taudis

Source: UN-HABITAT 2001

Région		Afrique du Nord	Afrique subsaharienne	Afrique
Population totale (en millions)	1990	118	501	619
	2001	146	667	813
Population urbaine totale (en millions)	1990	58	140	198
	2001	76	231	307
Pourcentage représenté par la population urbaine (en millions)	1990	48,7	27,9	31,9
	2001	52,0	34,6	37,7
Pourcentage de la population urbaine vivant dans des taudis	1990	28,0	71,9	60,9
	2001			
Effectifs de la Population urbaine vivant dans des taudis (en millions)	1990	21	166	187
	2001			

Pendant de nombreuses années, les gouvernements et les autorités locales ont considéré les taudis comme des habitats provisoires, qui disparaîtraient avec le développement des villes et l'amélioration des revenus des habitants des ces taudis. Cette hypothèse s'est vérifiée dans certains bidonvilles du monde qui ont réussi à croître, se renforcer ou s'améliorer.

Toutefois, ces «bidonvilles de l'espoir» ne constituent pas un élément notable des paysages urbains. Des «bidonvilles du désespoir» sont bien plus présents dans la géographie de la plupart des villes des pays en développement.

L'ONU-HABITAT estime que 30 % de la croissance urbaine dans le monde sont actuellement issus de mécanismes informels, et dans certaines villes, les quartiers informels s'étendent plus vite que les zones officielles de la ville.

II.5. Le défi des taudis.

II.5.1. Le nombre d'habitants des taudis.

Le nombre d'habitants des taudis dans le monde était près d'un milliard (plus d'une personne sur six) en 2003, tableau 12, et les tendances indiquent qu'une personne sur trois vivra dans un bidonville d'ici à 2031. Dans les régions en développement, les habitants des taudis représentent 43 % de la population, alors qu'ils ne représentent que 6 % de la population dans les régions plus développées. Bien que la proportion d'habitants des taudis soit plus élevée dans les villes africaines, où 61 % des citoyens vivaient dans un bidonville en 2001, principalement dans les pays subsahariens, environ 60 % des habitants des taudis dans le monde vivent en Asie.

Tableau II.3: Population et pourcentage des populations des bidonvilles

Zone et région principales	Population totale (millions)	Pourcentage population urbaine	Pourcentage population bidonvilles	Population taudis (milliers)
Monde	6.134	47.7	31.6	923.986
Régions développées	1.194	75.5	6.0	54.068
Europe	726	73.6	6.2	33.062
Autres	467	78.6	5.7	21.006
Régions en développement	4.940	40.9	43.0	869.918
Afrique du Nord	146	52.0	28.2	21.355
Afrique subsaharienne	667	34.6	71.9	166.208
Amérique latine et Caraïbes	527	75.8	31.9	127.567
Asie orientale	1.364	39.1	36.4	193.824
Asie centrale du Sud	1.507	30.0	58.0	262.354
Asie du Sud-Est	530	38.3	28.0	56.781
Asie occidentale	192	64.9	33.1	41.331
Océanie	8	26.7	24.1	499
Pays les moins avancés (PMA)	685	26.2	78.2	140.114
Pays enclavés en développement	275	30.4	56.5	47.303
Petits Etats insulaires en développement	52	57.9	24.4	7.321

II.5.2. L'amélioration des taudis.

Les habitants des taudis sont exposés à diverses formes d'insécurité, au niveau notamment de la pauvreté, de l'emploi, de la santé, de l'alimentation, et des risques personnels et environnementaux, et il est donc essentiel que les efforts fournis en vue d'améliorer leurs conditions de vie par un «toit» d'abord, prennent en compte les questions relatives à la sécurité.

L'amélioration des taudis par la réalisation ou la substitution de ce qui existe par un logement décent, étant un élément clé pour atteindre la cible 11 de l'Objectif 7 des Objectifs du Millénaire pour le développement de L'ONU HABITAT d'ici à 2020

II.6. ONU-HABITAT: Objectifs de développement du Millénaire.

Cet Objectif du Millénaire pour le Développement (OMD 7) entend assurer un environnement durable, et à cet égard, une cible cruciale en milieu urbain consiste à réussir, d'ici 2020, à améliorer sensiblement les conditions de vie d'au moins 100 millions d'habitants de taudis.

Les habitants de taudis représentent une proportion croissante de la population urbaine mondiale partout dans le monde, et la situation est pire dans les pays du sud, sans logement convenable ni services de base.

La communauté internationale a déjà pris du retard par rapport aux Objectifs de développement du Millénaire visant à réduire la pauvreté dans les villes des pays en développement. L'engagement pris au titre des Objectifs de développement du Millénaire d'améliorer les conditions de vie de 100 millions d'habitants de taudis d'ici à 2020 est compromis. Si rien n'est fait pour contrôler la tendance actuelle, le nombre de personnes vivant dans des taudis passera d'un milliard aujourd'hui à environ un milliard et demi d'ici à 2020.

II.6.1. La volonté politique.

L'existence de taudis en Afrique, comme ailleurs dans le monde en développement, est imputable avant tout à la pauvreté. L'urbanisation s'effectue à un rythme rapide mais elle ne s'accompagne pas d'un rythme équivalent de développement économique. Il s'ensuit que les millions d'habitants des zones rurales attirés vers les zones urbaines par des possibilités d'emplois réelles ou imaginaires finissent par vivre dans des taudis, dans lesquels ils se construisent leur propre logement à peu de frais, en utilisant des matériaux de construction rudimentaires. Compte tenu de leur niveau de pauvreté, c'est le seul type d'abri qu'ils peuvent se permettre. La figure II.6 montre l'état des constructions dans les bidonvilles.

En résumé, les politiques de développement économique de nombreux pays africains ont tout simplement échoué lamentablement face à la croissance démographique nationale globale et à l'urbanisation accélérée (supérieure à 4 à 5 % par an dans certains pays), ce qui a eu pour résultat un phénomène de «sururbanisation». Selon des études récentes, dans cette situation, les plus pauvres des zones urbaines deviennent donc encore plus pauvres, le revenu par habitant diminuant, et le fossé entre les riches et les pauvres se creuse de plus en plus.



Figure 12: Etat des constructions dans les bidonvilles

Source: ONU-HABITAT

L'absence de politiques urbaines et du logement efficaces est une autre raison majeure de l'existence et du développement continu des taudis dans les villes africaines.

Dans les villes africaines, les taudis se développent en raison d'une combinaison de migrations rapides des zones rurales vers les zones urbaines, ce qui accroît la pauvreté urbaine et les inégalités, la marginalisation des quartiers pauvres, l'impossibilité pour les citoyens pauvres d'avoir accès à des terrains abordables pour se loger, l'insuffisance des investissements dans de nouveaux logements en faveur des groupes à faible revenu et le mauvais entretien des habitations existantes. Dans de nombreux pays africains, ceci reflète l'échec général de leurs politiques et stratégies de logement en faveur des groupes à faible revenu, qu'elles soient orientées vers la protection sociale ou fondées sur le marché.

En novembre 2000, les chefs d'Etat et de gouvernement se sont penchés sur ce problème redoutable du manque de logements convenables et d'infrastructures de base et ils ont spécifiquement pris la décision, dans la Déclaration du Millénaire, d'améliorer sensiblement, d'ici à 2020, les conditions de vie d'au moins 100 millions d'habitants de taudis. Tout en demandant au système des Nations Unies d'appuyer la mise en œuvre de cette déclaration, le Projet du Millénaire assigne aux gouvernements nationaux la responsabilité première d'atteindre cet objectif.

Il s'agit en premier lieu d'adopter des politiques et des techniques permettant au secteur de la construction d'atteindre les objectifs de développement des établissements humains tout en évitant les effets secondaires nuisibles pour l'homme et la biosphère et d'échanger des données sur cet aspect, et, en second lieu, d'améliorer la capacité de création d'emplois dans ce secteur. A cette fin, les gouvernements doivent collaborer étroitement avec le secteur privé.

Tous les pays devraient, selon le cas et conformément à leurs plans, objectifs et priorités :

- Créer des industries de matériaux de construction locaux qui utilisent, autant que possible, les ressources naturelles localement disponibles, et renforcer celles qui existent déjà;
- Formuler des programmes de promotion des matériaux locaux auprès du secteur de la construction en élargissant l'appui technique et les plans d'incitation permettant de renforcer les capacités et la rentabilité des petits entrepreneurs et des représentants du secteur non structuré qui utilisent ces matériaux et des techniques de construction traditionnelles;
- Adopter des normes et autres mesures de réglementation qui favorisent la mise en œuvre de plans et techniques à haut rendement énergétique et l'utilisation durable des ressources naturelles et ce de façon économique et écologiquement rationnelle;
- Définir des politiques appropriées d'utilisation des terres et adopter des normes de planification visant tout particulièrement la protection des zones écologiquement vulnérables contre toute perturbation physique imputable à des activités de construction;
- Promouvoir l'utilisation de techniques de construction et d'entretien à fort coefficient de main-d'œuvre, qui créent des emplois dans le secteur de la construction pour la main-d'œuvre sous-employée que l'on rencontre dans la plupart des grandes villes tout en encourageant la formation professionnelle dans le secteur de construction;
- Mettre au point des politiques et principes de promotion du bâtiment dans le secteur informel et le logement indépendant, en adoptant des mesures propres à rendre plus abordable le coût des matériaux de construction pour les pauvres des villes et des campagnes, notamment des plans de crédit et d'achat en vrac concernant des matériaux de construction à vendre aux petits constructeurs et aux collectivités.

II.6.2. Atteindre les Objectifs.

Cette énorme augmentation des populations urbaines du monde et de celles des taudis constitue une crise d'une ampleur sans précédent. Toutes ces personnes devront avoir un logement. La plupart des économies urbaines des pays en développement suffisent à peine à répondre à une fraction minimale de ces besoins, de sorte que le secteur informel fournit la plus grande partie des logements, habituellement dans des établissements informels ou dans des taudis. La capacité des villes à répondre aux besoins de leurs populations en augmentation rapide sera limitée encore par le fait que tous ces changements se produisent dans un contexte de pauvreté croissante.

II.7. Amélioration des taudis et l'usage du matériau terre.

parmi les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD 7) initié par les nations unis c'est de réussir, d'ici 2020, à progresser dans l'amélioration des conditions de vie dans des logements décents.

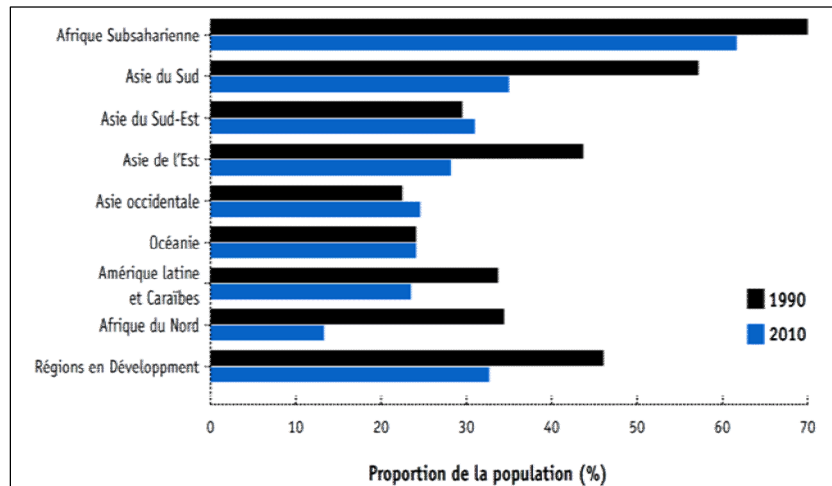


Figure II.13: Proportion de la population urbaine vivant dans des taudis, 1990 et 2010

Source : ONU-HABITAT. State of the world's cities 2010/2011

ONU-Habitat estime que cette cible a déjà été dépassée au moins 2,2 fois : entre 2000 et 2010, 227 millions de personnes n'habiteront plus dans un taudis. La proportion de personnes vivant dans un taudis a reculé dans toutes les régions du monde, tombant de 39 % en 2000 à 33 %, selon les estimations, en 2010. Parce que plus de 200 millions de citoyens supplémentaires ont désormais accès, entre autre à un logement durable et moins surpeuplé. La figure II.7 montre la proportion de la population urbaine vivant dans des taudis, 1990 et 2010

La mobilisation des nations unis dans l'habitat s'inscrit dans une démarche de prise en compte de l'environnement de manière globale : construire ou rénover avec des matériaux issus de ressources renouvelables et locales, le matériau terre notamment, dont les modes de production sont peu coûteux en énergie. Ce matériau permet aussi de réduire l'impact écologique des activités humaines en relocalisant les savoir-faire et les emplois.

Dans certaines régions où il existe une mémoire du risque sismique ou cyclonique intégrée dans l'inconscient collectif et donc dans les pratiques de construction, des réponses ont pu être apportées par les constructions en terre.

Par exemple, sur la côte pacifique d'Amérique latine, les civilisations précolombiennes ont élaboré des réponses parasismiques en brique de terre ou en pisé. Autre exemple, à Bam, dans le sud de l'Iran, un terrible séisme a frappé la ville en décembre 2003, certaines constructions traditionnelles en terre bien construites ont remarquablement bien résisté par rapport à celles en béton. On peut considérablement améliorer les constructions en terre face à de tels risques.

Cette persistance, autant que ce renouveau, trouvent leur justification dans les avantages incontestables que présente la construction en terre.

Fondamentalement, il s'agit d'un produit naturel, disponible à pied d'œuvre, directement utilisable et qui, par conséquent ne supporte pas de frais d'achat, de transformation et de manutention. Sa mise en œuvre ne faisant appel qu'à des techniques élémentaires favorise la pratique de l'autoconstruction et de l'entraide collective et, par conséquent, une réduction très sensible des coûts.

II.8. Quelle voie emprunter pour l'habitat de demain?

Il faut se rendre à l'évidence : même si l'on fait le calcul optimiste que toutes les surfaces potentiellement productives de la Terre peuvent être utilisées pour les besoins de l'Homme, il faudrait l'équivalent de trois planètes Terre pour que tous les humains puissent vivre durablement selon les standards de vie occidentaux. A l'heure de Kyoto naît la crainte de voir tous les pays du Tiers-monde se développer selon le modèle de croissance industrielle inauguré par le Nord.

Le mode de vie occidental est de plus en plus remis en question. Certains cherchent un modèle de rechange pour corriger les erreurs déjà commises et pour éviter que les pays du Sud les commettent eux-mêmes. Les nouvelles technologies ne servent souvent qu'elles-mêmes ou l'économie. Le modèle capitaliste a montré ses énormes lacunes, et nombreux sont ceux qui, déçus, aspirent à autre chose.

En 1996 d'après le Centre des Nations Unies pour les Etablissements Humains (ONU/Habitat), 500 millions de personnes vivaient sans abri ou dans un logement extrêmement précaire. La situation ne faisait que s'empirer : la production de logements ne pouvait faire face à l'explosion de la population urbaine, appelée à doubler en 30 ans (2,4 milliards en 1995, 5 milliards en 2025). Le Centre relevait encore que «les manquements face à un logement correct, résultat de l'urbanisation massive, sont nocifs et menaçants et sont responsables de 10 millions de morts chaque année dans le monde.»

Le rapport 2005 de ce même centre signale que 1 milliard de personnes vivent dans des bidonvilles, à majorité dans les pays du sud, et qu'en l'absence de mesures beaucoup plus draconiennes que celles promises aujourd'hui, ce chiffre passera à 3 milliards en 2050.

Un fait interpellant dans ces pays, est l'occidentalisation du mode de vie. Non seulement la population est en train de s'urbaniser massivement, mais ces villes sont calquées sur le modèle occidental à tous points de vue. Ces pays ne cessent d'imiter les pays du Nord, parfois par obligation, parfois à cause du rêve que cela représente pour eux.

La production de logements peut avoir une base, un terrain déblayé pour répondre à ce déficit, on cite surtout :

- Le déploiement des chantiers à bas prix et absorbant beaucoup de main d'œuvre,
- Diversification des possibilités d'utilisation maximales des ressources locales,
- Modernisation des techniques.

Entre l'habitat rural traditionnel utilisé depuis des siècles et l'habitat urbain gaspilleur de matériaux importés et coûteux, il s'est agi d'inventer un nouvel habitat durable, à confort satisfaisant, qui puisse être réalisé à partir de ressources locales et pour un coût minimal.

II.8.1. Politique générale du logement.

Les priorités en matière d'habitat social de ces dernières années reposent sur deux éléments déterminants :

a- trouver une solution urgente à la crise actuelle de logement et à l'urbanisation galopante (déficit presque dans tous les pays du monde), pour les 3 milliards d'êtres humains qui vont vivre dans des taudis ou bidonvilles en 2050, 4000 logements devraient être réalisés toutes les heures...

b- faire face aux pratiques et productions occidentales qui se révèlent de plus en plus chères à l'achat, au transport et à l'usage. En effet, non seulement les matériaux représentent une part importante des coûts de construction mais de plus, leurs pratiques sont conçues pour réduire au minimum la main d'œuvre alors que celle-ci existe en abondance dans les pays en voie de développement.

Des ressources financières considérables seraient nécessaires pour surmonter le manque de logements abordables et l'insuffisance des infrastructures de base. Bien que l'on ne connaisse pas exactement les besoins mondiaux en matière de logements abordables, le nombre d'habitants des bidonvilles dans le monde, estimé à l'heure actuelle, à un milliard (soit 250 millions en Afrique), indique clairement que la demande de logements de qualité à faible coût n'est pas satisfaite.

Les Nations Unies estiment que dans les 15 années à venir le montant, des ressources nécessaires à la prévention et à l'amélioration des taudis, atteindra 20 milliards de dollars par an (soit un total de 300 milliards), ce qui dépasse largement le niveau actuel des investissements dans la prévention et l'amélioration des taudis.

L'approche adoptée par ONU-Habitat s'inspire de la reconnaissance du fait que l'accès à toute une gamme d'options abordables au logement est l'une des conditions préalables à la prévention des taudis. Ainsi, par exemple, pour qu'un secteur immobilier fonctionne bien, il faut toute une série d'intrants, notamment terres, infrastructures et services, moyens financiers, approvisionnement en matériaux de construction et main-d'œuvre qualifiée, afin de permettre aux particuliers et aux divers groupes sociaux d'avoir accès à des options de logement correspondant à leurs besoins et à leurs possibilités.

II.8.2. Plan des politiques de logement (ONU-Habitat).

La fourniture de parcelles de terres et de logements aux pauvres est l'un des éléments clés du nouveau Plan stratégique d'ONU Habitat pour la période 2008-2013, l'objectif étant d'aider les pouvoirs publics, les villes et les communautés à mettre en place des politiques de logement, de gestion des sols et d'administration foncière qui soient favorables aux pauvres.

L'organisation s'efforce également de concevoir des méthodes pratiques et rationnelles d'aménagement du territoire urbain, des régimes novateurs d'occupation des zones résidentielles, des systèmes abordables de gestion des sols et des cadres juridiques, en mettant plus particulièrement l'accent sur les droits et l'autonomisation des pauvres.

Pour atteindre l'objectif du programme pour l'habitat, qui est d'assurer un logement convenable pour tous, l'organisation dispose de deux sections, la première celle de réseau mondial d'outils fonciers (GLTN) qui a pour objectif de contribuer à la réduction de la pauvreté en établissant un partenariat mondial de la terre. Il compte parmi ses membres des organisations internationales de la société civile, des institutions financières internationales, des instituts internationaux de recherche et de formation, des bailleurs de fonds et des organismes professionnels, et la seconde chargée des politiques du logement qui aide à définir des politiques en matière de logement, des stratégies appropriées dans ce domaine et les moyens d'assurer la fourniture de logements abordables.

Elle favorise également le logement coopératif dans le cadre de la stratégie de mise au point de solutions de logement abordables pour les ménages démunis et elle encourage l'utilisation de matériaux de construction efficaces sur le plan énergétique.

II.8.2.1. Un déficit chronique.

Partout dans le monde, la question du logement se pose aujourd'hui de manière aiguë. Le dernier de l'ONU- HABITAT révèle que le mal-logement touche en fait 3,4 millions de personnes dont plus d'un million privées de logement personnel et plus d'un million hébergées chez un tiers.

La difficulté d'accéder à un logement ne concerne donc pas uniquement les sans domicile fixe mais aussi les classes modestes et une partie des classes moyennes.

La Banque Mondiale dont on connaît le rôle prépondérant depuis des décennies dans le domaine urbain n'a réussi à loger qu'un nombre réduit de personnes dans l'ensemble des Pays en Développement. Les logements produits n'ont en vérité couvert qu'une infime partie des besoins. C'est dire que la capacité de réponse des grands opérateurs bi et multilatéraux n'est absolument pas à la hauteur des besoins (les initiatives d'origine publique en Afrique sub-saharienne n'ont jamais produit plus de 15% du parc au cours des dernières décennies et, en Asie, entre 40% et 95% des ménages suivant les pays se logent tant bien que mal, et souvent très mal, par leurs propres moyens.

II.8.2.2. Un logement adéquat pour tous.

L'accès à un logement sûr et sain est essentiel au bien-être physique, psychologique, social et économique de chacun et devrait être un élément fondamental de l'action entreprise aux niveaux national et international. Le droit à un logement adéquat en tant que droit fondamental de la personne humaine est consacré par la Déclaration universelle des droits de l'homme ainsi que par le Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels.

Un milliard d'individus ne disposent pas d'un logement sûr et sain et que, faute de mesures appropriées ce nombre ne cessera d'augmenter au fil des années dans des proportions dramatiques.

L'objectif (Action 21, Chapitre 7) est de donner un logement adéquat à des populations en augmentation rapide et aux pauvres des zones urbaines et rurales qui en sont actuellement dépourvus, par le biais d'une politique d'encouragement à la construction et à la rénovation des logements qui soit écologiquement rationnelle.

Il s'agit en premier lieu d'adopter des politiques et des techniques permettant au secteur de la construction d'atteindre les objectifs de développement des établissements humains tout en évitant les effets secondaires nuisibles pour l'homme et la biosphère et d'échanger des données sur cet aspect, et, en second lieu, d'améliorer la capacité de création d'emplois dans ce secteur

En tant que première étape vers la réalisation de l'objectif consistant à fournir "un logement adéquat pour tous", tous les pays devraient prendre immédiatement des mesures visant à fournir un logement à ceux parmi leurs pauvres qui sont sans abri, et de leur côté, la communauté internationale et les institutions financières devraient entreprendre des initiatives visant à appuyer les efforts des pays en développement en vue de fournir un logement aux pauvres;

Tous les pays devraient, selon que de besoin, aider les pauvres des zones urbaines et rurales, les chômeurs et ceux qui ne disposent pas de revenus à se procurer un logement en adoptant des codes et règlements ou en adaptant ceux qui existent déjà, en les aidant à obtenir des terres, des moyens de financement et des matériaux de construction peu coûteux et en s'employant activement à régulariser et à améliorer les établissements spontanés et les taudis urbains en tant que mesure opportune et susceptible d'apporter une solution pragmatique au problème posé par la pénurie de logements urbains;

Il est à rappeler que dans la "ville des pauvres", les densités par pièce dépassent fréquemment 4 personnes en Afrique. A Bombay, près de 80% des personnes disposent d'une seule pièce et la moyenne d'occupation par pièce dépasse 5 personnes ! Tout indique que la situation s'est dégradée au cours des dernières décennies; ainsi, en Chine, on est passé de 4,5 m² disponibles par habitant en 1952 à 3,6 m² en 1978 et la politique de "décohabitation" des générations se fixe aujourd'hui comme objectif une surface habitable minimale de 6 m² par personne.

Le mal-logement correspond à une crise de l'offre, insuffisante et mal adaptée aux besoins et ressources financières de très nombreux ménages dans différents pays du monde.

Si l'habitat est reconnu comme un facteur d'insertion sociale (il permet aux citoyens de s'inscrire dans un tissu de relations avec leur voisinage, d'avoir accès à la sécurité sociale et aux services publics, de frapper à la porte du monde du travail...), encore trop nombreux sont ceux qui ne disposent pas d'un «chez-soi» comme abri contre les intempéries, fonction première de l'habitat !

La construction en terre, artisanale ou semi-industrielle (bloc de terre comprimée stabilisé, par exemple) génère du travail, crée des emplois, participe à la monétarisation des populations, conditions du développement. Tout en étant une alternative crédible au plan des investissements financiers requis pour la construction de l'habitat et des équipements des communautés, le matériau terre peut garantir l'accès à la dignité d'un logement décent à des populations qui vivent le plus souvent dans des conditions précaires et misérables (abris en matériaux de récupération d'une opulence qui les ignore). En corollaire, cette «alternative terre» peut aussi contribuer à la réduction de la dépendance énergétique et monétaire des pays du Sud vis-à-vis de ceux du Nord, composante majeure de leur dette écrasante et paralysante.

II.8.3. Le financement de logements abordables.

Les problèmes liés au prix des logements dans les pays les moins développés sont considérables. L'offre dans le secteur du crédit immobilier est limitée par de nombreux facteurs, notamment le faible revenu d'une large partie de la population, qui couvre à peine ses besoins de subsistance, l'absence d'institutions financières officielles en mesure d'attirer l'épargne des ménages et l'instabilité macroéconomique. La récente crise financière a eu un effet négatif sur les systèmes de financement du logement et a notamment découragé les prêts hypothécaires commerciaux.

II.9. Conclusion.

Les difficultés d'accès à un logement décent, le coût exorbitant des matériaux de construction ainsi que l'absence des filières de production foncière et immobilière ont motivé l'usage des matériaux locaux et particulièrement la terre crue, en vue de contribuer à la résorption des problèmes d'habitat auxquels font face la plupart des populations qu'il est possible, à travers l'autoconstruction (procédé utilisé pour produire soi-même un logement), d'améliorer l'habitat qu'il s'agit ici, non seulement de construire des maisons en terre, mais surtout de développer un style d'habitat répondant à la fonctionnalité des logements et susceptible de renforcer les dimensions sociales et culturelles tout en respectant l'environnement.

Enfin, des pistes de recherches subséquentes sont envisagées. Elles nécessitent d'être approfondies en vue d'autres améliorations des logements de terre crue, Il s'agit de :

- L'érosion due aux agents climatiques sur les murs en terre, l'eau de pluie essentiellement,
- L'étude des logements de terre crue en hauteur (r+ n),

- Le développement des activités économiques liées aux constructions en terre,
- La stabilisation organique des sols à l'aide des produits locaux, etc.

ONU-Habitat a approuvé un plan stratégique comprenant une composante stratégique qui répond à une vision ambitieuse et repose sur une feuille de route pour l'urbanisation durable. Cette vision est celle d'un monde dans lequel toutes personnes vivant dans des zones urbaines pourront avoir accès à un logement convenable. C'est aussi la vision d'un monde dans lequel l'humanité pourra poursuivre sa quête économique sans compromettre la capacité des générations futures à faire de même. Dans un monde en voie d'urbanisation rapide, une telle vision et la feuille de route qui l'accompagne sont indispensables pour réaliser le Programme pour l'habitat et atteindre les Objectifs du Millénaire pour le développement.

Le Plan préconise des partenariats plus forts et, au cours des prochaines années, ONU-Habitat ralliera la bonne volonté, le savoir-faire et les ressources de toutes les sphères gouvernementales et de la société civile pour se concentrer sur les facteurs clés de l'urbanisation durable et du développement urbain inclusif, qui sont : des parcelles de terre et un logement pour tous; la participation à la planification et à la gouvernance; des infrastructures et des services écologiquement rationnels; et un financement novateur du logement et des villes. Une campagne mondiale sur l'urbanisation durable servira de catalyseur dans tous ces domaines.

Le matériau terre peut contribuer à améliorer les conditions d'habitat dans le tiers monde en limitant les coûts et les inconvénients d'une propension à un modernisme souvent discutable. Sur un terrain plus pratique,. Enfin, la construction en terre permet de combiner l'utilisation d'une abondante main d'œuvre banale avec l'emploi de personnel semi-qualifié dans le cadre d'un système intégré de formation-production qui pourrait être très attractif pour les jeunes. D'un autre côté, la promotion de la construction en terre ouvre la possibilité d'étendre les programmes de travaux à haute intensité de main d'œuvre à certaines zones urbaines ou suburbaines dans lesquelles le sous-emploi et les problèmes d'habitat se présentent souvent d'une façon plus grave.

Les recherches et les réalisations qui s'accomplissent dans certains pays industrialisés sont de nature à promouvoir une évolution et à aider à mettre au point les formules qui s'adaptent aux caractéristiques et aux besoins des pays pauvres. Cette évolution se situe principalement au niveau de l'amélioration des techniques et de la maîtrise des procédés de mise en œuvre, mais elle concerne, en même temps, la recherche de concepts architecturaux compatibles avec le matériau terre.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que la construction en terre ne se limite pas à l'habitat humain. Un créneau très important demeure ouvert dans le domaine des bâtiments à usage agricole et des édifices d'utilité publique.

Tant au Nord qu'au Sud, il y a urgence à promouvoir une autre architecture pour l'habitat. Cette architecture doit être respectueuse de son site et de l'environnement en général, ainsi que du mode de vie de ses habitants. Elle doit servir la cause d'un habitat digne pour tous.

Ceci implique de s'inscrire dans une démarche de développement endogène, participatif, intégré et durable.

L'architecture moderniste telle quelle est pratiquée et encouragée par le modèle capitaliste ne répond à aucun de ces critères. D'autre part, le décalage entre les architectures traditionnelles vernaculaires et notre époque contribue à leur abandon progressif. Elles peuvent servir de base à une nouvelle vision de l'habitat, mais elles doivent s'adapter là où le contexte a évolué rapidement.

Nombreux sont les acquis de la science moderne dont l'architecture traditionnelle peut bénéficier.

Une réflexion rationnelle devra être menée sur les acquis de la science qui peuvent être utiles. Finalement, il faudra adapter ces acquis au contexte local si l'on désire qu'ils influencent positivement la tradition constructive.

Pour être adoptés, ils doivent être adaptés.

Dans le domaine de la terre crue, certaines de ces études ont déjà été réalisées, et parfois avec succès.

Imaginer des améliorations modestes de l'habitat, sans doute moins ambitieuses et spectaculaires que les innovations modernistes mais réellement utiles, mettre au point des techniques facilement maîtrisables par un autoconstructeur, représentent, semble-t-il, certains des enjeux fondamentaux de l'architecture de demain.

Les écomatériaux font de plus en plus parler d'eux. Mais il est encore complexe de se les approprier et de les utiliser sans information adéquate ou ressources financières suffisantes. Pour les organismes d'habitat social engagés sur des chantiers publics respectueux de l'environnement et des habitants, les écomatériaux constituent un outil stratégique et incontournable.

Parce qu'ils sont susceptibles d'apporter des réponses à la crise climatique tout en s'inscrivant dans un développement local durable, il est important de soutenir leur émergence.

C'est là que les organismes d'habitat social peuvent faire la différence : en développant une offre de logements sains et confortables pour les habitants via l'utilisation des écomatériaux, la terre crue notamment, et en participant à la baisse des charges de flux des foyers. Les organismes d'habitat social peuvent ainsi s'inscrire dans un développement local durable de la structuration des filières courtes d'écomatériaux et d'accessibilité au plus grand nombre à un habitat écologique.

***Chapitre* -III-**

Généralités sur la stabilisation
des terres dans la construction

III.1. INTRODUCTION

La construction en terre existe dans tous les continents du monde,. Les patrimoines les plus emblématiques ont résisté aux conditions climatiques les plus sévères (fig.1). La technique des Blocs de terre stabilisée est très répandue dans de nombreux pays et est plutôt réussie en raison du faible coût de leur production, de la simplicité de leur mise en œuvre et du confort intérieur qu'ils procurent au niveau des habitations.

III.2. HISTORIQUE DES BTS EN ALGERIE

En Algérie, on compte de nombreux édifices en terre qui ont été construits aussi bien par la population que par les autorités. A une époque récente qui démarre des années 70, une impulsion a été donnée à la construction en terre par l'Etat, dans le cadre d'une politique de construction de logements économiques, entre autres dans le projet des Villages Agricoles Socialistes. Cette relance a été accompagnée de programmes de recherche scientifique qui ont été principalement menés par le LNTPB (Laboratoire National de Travaux Publics et du Bâtiment) et les CPRA (Chantiers Populaires de la Révolution Agraire). On peut citer à titre d'exemple : logements Tipaza (1970), villages agricoles Sidi Bel Abbès et M'sila (1973 – 1976), prototype Tamanrasset (1982)...

En 1984, le travail de recherche a été encouragé par les autorités au niveau des universités et des centres de recherche, dans le but d'encourager l'usage de matériaux de construction locaux à faible coût dans les régions rurales et sahariennes (gypse, chaux, sable de dune et sol stabilisé).

En 1993, le CNERIB a élaboré un guide sur la construction en BTS ainsi que des recommandations sur les dispositions constructives. Un prototype a été réalisé au sein du CNERIB en 2007 qu'on a dénommé « maison à efficacité énergétique » (fig.2). Ce prototype est entre autres doté de panneaux solaires.

III.3. LA STABILISATION

La stabilisation se réfère à toute procédure physique, chimique, mécanique ou autre méthode de modification d'un sol en vue d'améliorer ses propriétés de résistance et de durabilité. Il existe une panoplie de produits stabilisants dont l'usage dépend du type de terre, de la façon dont elle sera mise en œuvre et de la tradition locale.

Les plus importants sont le ciment Portland, la chaux, les fibres, le bitume, les résines et d'autres produits d'origines animale (sang), végétale (huiles) ou synthétique (sels). La stabilisation peut se référer aussi à la modification de la granulométrie du sol.

III.3.1. LES PRINCIPAUX STABILISANTS

III.3.1.1. LE CIMENT

Le ciment Portland est un matériau fin résultant du broyage du clinker et du gypse. Il se compose d'un mélange de silicates de calcium, d'aluminates et d'aluminoferrites. L'avantage du ciment Portland est attribué à ses propriétés hydrauliques, à savoir, sa capacité à prendre et

à durcir à l'eau, ainsi qu'à sa haute résistance à court terme. Les déchets solides provenant d'autres industries, tels que le fer et l'acier, le ferrosilicium et le charbon brûlé, sont ajoutés au ciment Portland comme adjuvants inorganiques. Ce sont des matériaux hydrauliques latents, possédant des propriétés pouzzolaniques et contribuant à la résistance des produits finaux. Le Laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les cendres volantes sont des exemples typiques de ces déchets.

a. Mécanisme de stabilisation

Lorsque l'eau est ajoutée au ciment, la réaction commence à partir de la surface des grains puis progresse vers l'intérieur. Cela se traduit par la formation de gels et d'ettringite. Les C3S et C2S forment les gels, tandis que le C3A forme l'ettringite. Une cohésion se développe alors dû au contact entre les gels formés sur les grains rapprochés et dû à l'enclenchement des cristaux d'ettringite signifiant le début de la période de prise. Cela se produit après 45 à 60 minutes d'ajout d'eau. Les mélanges sol-ciment devraient donc être compactés avant le début de la prise.

L'eau continue à se diffuser dans le gel, causant une pression qui provoque la rupture de ce dernier. Le gel rompu s'écaille du grain en formant des fibrilles et tubules dans le cas du C3A. Cela expose localement la surface du grain à une hydratation supplémentaire. Le processus se répète alors. Et comme chaque grain fait pousser une multitude de ces fibres et que celles-ci continuent à germer et à se multiplier, elles commencent à s'enclencher de manière plus rigide qu'avant. Cela signifie la fin de la période de prise. La fin de prise se produit approximativement

12 heures après que l'eau ait été ajoutée. La pâte est cependant, encore fragile et par conséquent présente une faible résistance. Le durcissement continu se fera par la multiplication supplémentaire, l'augmentation et l'enclenchement des fibres de gel, ettringite et cristaux de portlandite. Les réactions chimiques (1 à 5) résument l'hydratation du ciment Portland ordinaire:

b. Efficacité et dosage

La particularité du ciment Portland ordinaire en comparaison avec d'autres liants est basée sur sa capacité à atteindre des résistances élevées en une courte période de temps (environ 28 jours) [3]. Le produit stabilisé au ciment gagne de la résistance aux états sec et humide ainsi qu'à l'absorption, au gonflement et au retrait sec [13]. Les Mélanges sol-ciment doivent être compactés immédiatement après malaxage afin d'assurer que la structure du nouveau gel créé conserve sa liaison et sa résistance.

Il est suggéré que la teneur en ciment utilisée pour la détermination de la résistance soit basée sur une quantité de ciment efficace donnée par :

$$\text{Quantité de Ciment efficace \%} = \text{teneur en Ciment \%} - 3 \times \text{teneur en argile \%} \cdot 2$$

Par exemple pour un sol à teneur en argile de 50% stabilisé à 5% de ciment, correspondrait une quantité de ciment efficace de : $5 - 3 \times 0.5 = 3.5\%$

Le ciment peut généralement être utilisé avec n'importe quel type de sol, mais avec des argiles (sol cohérent), son utilisation peut s'avérer non économique car l'argile nécessiterait une quantité de ciment plus importante que celle habituellement exigée : dans les sols cohérents, de nombreuses particules sont plus fines que les grains de ciment et ne peuvent par conséquent être toutes enveloppées par ce dernier" [14]. Il convient de rappeler que la stabilisation au ciment est fortement affectée par la présence de matière organique dans le sol, ce qui ralentit ou inhibe l'action cimentaire en empêchant la libération des ions calcium. La teneur en eau des mélanges sol-ciment, doit être dans la gamme de 0,95 à 1,10 fois la teneur en eau maximale de compactage.

c. Propriétés et influence des produits d'hydratation

Il est largement rapporté dans la littérature sur le béton que la fraction volumique des hydrates de ciment, les pores de gel et les pores capillaires déterminent les propriétés du béton.

Compte tenu des similitudes entre le béton et les BTS, la même influence est susceptible de s'appliquer dans le cas de ces derniers. En effet, la fraction volumique des solides, les pores de gel et les pores capillaires sont à leur tour déterminés par deux facteurs : le rapport eau/ciment (E/C) et le degré d'hydratation (A). C'est le rapport E/C qui contrôle la porosité de la pâte de ciment durcie. La production de BTS à haute résistance et à faible perméabilité peut être réalisée en diminuant le rapport eau sur ciment et en assurant un haut degré d'hydratation. Un faible rapport E/C peut être accompli en dosant des proportions adéquates de sol, de ciment et d'eau. D'autre part, un haut degré d'hydratation de la pâte de ciment peut être accompli en assurant une bonne cure [3].

III.3.1.2. La chaux

La chaux est essentiellement constituée d'oxyde de calcium (CaO) ou d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) en association naturelle avec l'oxyde de magnésium (MgO). L'oxyde de calcium est disponible dans la nature sous forme de calcaire à grande proportion de carbonate de calcium (CaCO₃) en combinaison avec du carbonate de magnésium (MgCO₃), d'oxyde de fer (FeO), d'alumine (Al₂O₃) et de silice (SiO₂). Après processus de calcination à une température de 900°C, le carbonate de calcium (CaCO₃) présent dans le calcaire, libère du dioxyde de carbone (CO₂) pour produire de l'oxyde de calcium (CaO) qui est de la chaux pure. Lorsque l'oxyde de calcium est mélangé, ou " éteint " avec de l'eau, l'hydroxyde de calcium est obtenu. Il a plusieurs appellations à savoir : chaux hydratée, chaux de constructeurs, chaux éteinte... celle-ci est un composé inorganique à la formule chimique Ca(OH)₂ [20]. La chaux, comme stabilisant, est fabriquée sous plusieurs formes qui incluent la chaux éteinte (Ca(OH)₂), la chaux dolomitique (CaO·MgO), la chaux éteinte dolomitique (Ca(OH)₂·Mg(OH)₂) et la chaux vive (CaO) [18].

A. Mécanisme de stabilisation

En Mélangeant de la chaux avec un sol humide, diverses réactions chimiques se produisent provoquant l'agglutination des particules de sol et la modification de leurs caractéristiques. Les réactions les plus importantes au cours du processus de stabilisation à la chaux sont les suivantes :

- Echange cationique et floculation
- Action cimentaire (ou réaction pouzzolanique)
- Carbonatation.

1. Echange cationique et floculation

Ces réactions résultent du remplacement du sodium univalent (Na^+) et de l'hydrogène (H^+) de la terre avec des ions divalent, ions calcium (Ca^{2+}) de la chaux. L'échange cationique amène les cations (Ca^{2+}) à s'adsorber à la surface des particules et à la diminution de leur électronégativité favorisant ainsi la floculation. L'action des ions calcium commence immédiatement après l'addition de la chaux au sol. Une diminution de la plasticité du sol se produit, celui-ci devient ensuite fragile et se brise facilement. La réaction a lieu habituellement dans les 96 heures.

2. Carbonatation

La carbonatation est la réaction de la chaux avec le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Elle consiste en la modification chimique des minéraux argileux en raison de la réaction des ions de carbone atmosphériques avec des ions calcium pour former du carbonate de calcium CaCO_3 . C'est la réaction inverse qui se produit lors de la production de la chaux à partir du calcaire, et doit être évitée étant donné que les carbonates de calcium et de magnésium formés empêchent les résistances de se développer. La carbonatation se produit aussi lorsque le sol ne contient pas une quantité suffisante d'argile pouzzolanique, ou parce qu'une quantité excessive de chaux a été ajoutée. Le CaCO_3 est une matière plastique. Il augmente la plasticité du sol et se lie à la chaux de sorte qu'elle ne peut plus réagir avec les matières pouzzolaniques. Par conséquent, l'ajout d'une quantité excessive de chaux dans le sol ne produit pas des résultats bénéfiques.

b. Efficacité et dosages

Le point de fixation de la chaux représente la quantité de chaux ajoutée pour atteindre une valeur de pH de 12,4. La teneur en chaux optimale pour des besoins de la stabilisation dépend de l'application du sol stabilisé. Elle peut viser la diminution de la plasticité et l'amélioration de l'ouvrabilité, ou produire des changements permanents qui modifient la résistance du mélange. La quantité de chaux utilisée pour la stabilisation des sols est dans la gamme de 3 à 10%.

Le processus de stabilisation à la chaux est adapté aux sols à fraction fine très plastique et très expansive. Le matériau se cimente, se renforce et devient plus granuleux et peut être alors considéré comme un matériau à particules de taille plus grande et à angle de frottement plus grand. Cependant, la résistance d'une terre stabilisée à la chaux est le plus souvent entre la moitié et le tiers de celle d'une terre stabilisée au ciment dans les mêmes proportions.

c. Propriétés de la chaux

L'identification des propriétés physiques et chimiques de la chaux est essentielle pour son usage dans la stabilisation des sols. Une des propriétés principales à considérer est la dimension de ses particules, puisqu'elle affecte plusieurs propriétés du mélange sol-chaux, telles que la vitesse d'hydratation, la densité et aussi l'homogénéité. La dimension de la particule de chaux est conditionnée par la dimension de particule de la pierre de calcaire, par le processus de calcination et par les opérations de mouture supplémentaires. La connaissance de la finesse de la chaux peut être utile pour l'évaluation du degré d'homogénéisation et de réaction entre la chaux, le sol et l'eau. Les plus grandes surfaces de contact engendrent les mélanges les plus équilibrés. La structure poreuse des particules de chaux fait que sa surface externe soit en contact avec l'eau. A travers les phénomènes d'absorption et d'adsorption, une partie de sa surface intérieure est aussi entourée d'eau. La forte réactivité de la chaux implique une grande vitesse de l'action de celle-ci sur le sol. Cette propriété autorise à anticiper la durée des réactions et si elles sont exothermiques, l'augmentation de la température.

III.3.1.3. Mélange ciment-chaux

Dans les cas où la terre contient trop d'argile pour une stabilisation au ciment, et que la chaux ne permet pas d'obtenir les résultats désirés (résistance à la compression ou insensibilité à l'eau), la chaux peut être ajoutée au ciment pour améliorer le processus de stabilisation car avec la quantité de chaux additionnelle, le rapport chaux/argile va augmenter dû à l'existence de chaux dans le ciment ce qui se traduit par une diminution immédiate de la plasticité 22.

III.3.1.4. Bitume

Les cut-backs ou les émulsions bitumineuses se présentent sous forme de globules microscopiques en suspension dans un solvant ou dans l'eau. Le stabilisant est mélangés à la terre puis, lorsque le solvant ou l'eau s'évapore, les globules de bitume s'étirent en films solides très fins qui adhèrent aux particules de terre et les enrobent. Le bitume améliore la résistance de la terre à l'eau (moins d'absorption des argiles) et peut apporter une cohésion aux sols naturellement peu cohésifs, en jouant le rôle de liant. Mais, suivant le dosage, il peut faire perdre une partie de la résistance en raison de l'effet lubrifiant qu'il produit entre les particules. L'odeur du bitume est également indésirable. Un malaxage mécanique serait le mieux approprié pour les mélanges à base de bitume.

III.3.1.5. Les résines

Les résines sont constituées de molécules à longue chaîne, résultant de la liaison (polymérisation) de certains agents chimiques (monomères et polymères). On peut les employer de deux façons différentes :

- ✓ Les monomères sont ajoutés à la terre en même temps qu'un catalyseur : les réactions entre la terre et les monomères ainsi que la polymérisation sont immédiates ; c'est le cas des résines abiétiques par exemple.
- ✓ Les polymères sont formés au préalable par voie synthétique ou naturelle puis ajoutés à la terre à l'état solide, en solution ou en émulsion. Les résines agissent différemment, soit comme flocculant, comme dispersant, ou comme liant. Néanmoins la plupart des produits jouent le rôle d'imperméabilisant et ceux plus sophistiqués peuvent améliorer la cohésion

Les résines peuvent être utilisées en mélange avec le ciment, mais leur prix de revient serait beaucoup plus cher que celui relatif au traitement avec du ciment.

III.3.1.6. Le gypse

L'avantage dans l'utilisation du gypse par rapport au ciment Portland et la chaux réside dans sa basse température de calcination (approximativement 1/7^{ème} de celle nécessaire pour le ciment et 1/5^{ème} de celle nécessaire pour la chaux). La stabilisation avec du gypse n'est pas aussi courante que celle avec du ciment et la chaux, car les produits stabilisés au gypse s'érodent beaucoup plus rapidement. Toutefois, ce matériau est disponible en abondance et à faible coût dans de nombreux pays. Les limons argileux seraient plus appropriés que les sables pour une stabilisation au gypse. Les produits stabilisés gagnent en résistance de manière très rapide et accusent moins de retrait au séchage.

III.3.1.7. Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des fines de silice et d'alumine, qui lorsque mélangées avec de la chaux hydratée produisent des matériaux cimentaires convenables pour la stabilisation et les besoins de la construction. Les pouzzolanes se trouvent dans leur état naturel comme cendres volcaniques. Elles peuvent aussi être extraites de briques d'argile cuites délicatement recyclées.

La réglementation ASTM 618-7 sur le ciment définit la pouzzolane comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsque finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de

calcium (Ca(OH)_2) à température et à pression ordinaires pour former un liant. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques, les fumées de silices, les cendres de balles de riz et les argiles calcinées.

III.3.1.8. Les fibres

Les fibres sont utilisées pour renforcer la maçonnerie en terre, empêcher les fissures de dessiccation de se produire et fournir une certaine résistance à la traction, par analogie au rôle que jouent les tiges d'acier dans le béton armé. Lors du séchage, les briques se contractent et se déforment, l'utilisation de fibres améliore les propriétés élastiques pour un comportement plus souple. Les fibres améliorent également la résistance contre l'action de l'eau. Elles sont généralement orientées dans les deux directions longitudinales et transversales, ce qui prévient les déformations de se produire, préservant ainsi la forme de la brique. L'expansion transversale due à l'effet Poisson est aussi empêchée.

Les principaux types de fibres recensés dans la littérature sont : la paille (utilisée dans les adobes), les poils de cheval (renforcement de mortier de maçonnerie et de plâtre (ACI 544.1R, 1996), les fibres de noix de coco & fibres de palmier, la sciure de bois, les fibres d'algues, les fibres de polypropylène, et les fibres de jute.

III.3.1.9. Autres stabilisants

– Laitier

Le laitier est couramment utilisé en combinaison avec la chaux dans diverses applications d'ingénierie pour de nombreux avantages à savoir, une meilleure durabilité, une bonne maniabilité et un faible coût. L'inconvénient dans l'utilisation du laitier par rapport aux stabilisants classiques est le développement considérablement lent des résistances de ce dernier lorsqu'il est utilisé seul dans des conditions de durcissement standards (20°C).

– Silicates de sodium

L'amélioration des propriétés de durabilité à l'eau a été évoquée en étudiant l'effet de l'imprégnation de briques de terre dans du silicate de sodium soluble avec une émulsion de silicone organique à base d'eau.

– **Cendres de bagasse de canne à sucre**

Les cendres de bagasse de canne à sucre ont été utilisées comme matériau de stabilisation pour l'amélioration des propriétés des composants fabriqués à base de terre crue. En raison de leur petite taille, ces cendres ont tendance à occuper les vides, permettant une meilleure densité et des propriétés mécaniques améliorées.

– **Cendres de charbon**

L'utilisation de cendres de charbon permet de produire des mélanges aux bonnes performances en compression et en flexion pour des briques de terre stabilisée, mais au-delà d'un certain dosage, leur utilisation s'avère moins efficace.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu sur les connaissances existantes en matière de stabilisation des terres dans la construction. La perception de l'efficacité des différents types de stabilisants, de leurs limitations et de leur disponibilité nous sera d'une grande utilité dans l'orientation de notre inspiration pour le choix de stabilisants dans la présente étude. L'objectif étant d'obtenir un matériau à bonne résistance portante et à bonne durabilité vis-à-vis de l'érosion. Le chapitre suivant traite la durabilité des BTS et les différents mécanismes possibles d'altération des blocs.

***Chapitre* -IV-**

Caractérisation des Matériaux utilise

IV.1 Introduction

Les blocs de terre sont utilisés pour la construction de bâtiments depuis des temps immémoriaux, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de la planète. 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.

Sur ce chapitre, outre la caractérisation des matériaux, on présentera aussi l'ensemble des formulations à étudier, ainsi que les procédures des essais.

IV.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont: l'argile, le sable de dune, la chaux vive, les fibres de palmier dattier et verre.

IV.2.1 Sol

IV.2.1.1 Origine du sol

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

IV.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol

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 2 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression.



Figure IV.1: tamisage se sol

- **Composition granulaire**

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais :

l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon les normes NF P 94-056 et NF P 94-057 successivement. Les résultats des essais sont présentés sur la **Figure IV.1**

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 comprimée XP P 13-901. Cette norme recommande pour un sol destiné à la fabrication du BTS, 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 2.2).

a. Les masses volumiques :

Le tableau IV.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau IV.1: Les masses volumiques du sol

Masse volumique humide (kg/m^3)	Masse volumique sec (kg/m^3)
2221	1965

b. Limites d'Atterberg :

Limites Atterberg, l'expression de la cohérence du sol (Consistance du sol) qui connaît l'ampleur de la résistance du sol à des contraintes mécaniques, à différents niveaux d'humidité. Et la cohésion du sol, ce qui reflète la cohésion des grains cristallisés avec l'autre cohérence, et d'autres objets d'adhérence Adhérence. Et il est exprimé dans jusqu'à Atterberg

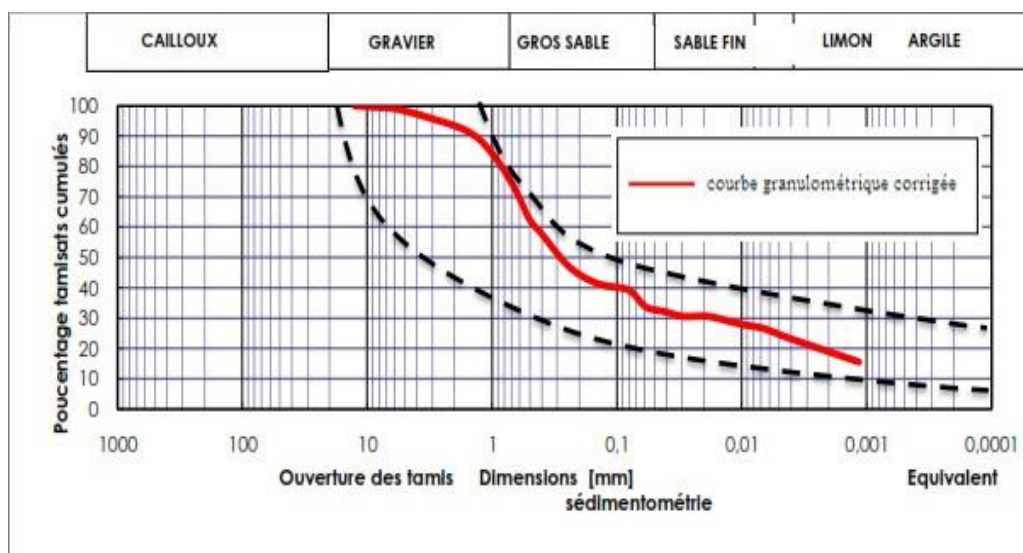
Les essais définis par Casagrande s'effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4 \text{ mm}$) selon la procédure de la norme NF P 94 -050. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

Les résultats obtenus pour notre sol, montrent que les limites de plasticité sont presque dans les limites les mieux adaptés pour les blocs de terre comprimée (la norme XP P 13-901) (figure 2.2).

La norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ($\% 2\mu\text{m} > 5 \%$).

Tableau IV.2: Caractéristique du sol

Matériaux	Granulométriet					Limites d'Atterberg			Compactibilité		Densité
	%<2,5 mm	%<2 mm	%<0,08 mm	%<0,015 Mm	%<0,00 2 Mm	Wl%	Wp%	Ip%	d g/cm ³	Wopm %	KN/ m3
Carrière de Loumbila	95%	93%	38%	30%	19%	33	18,6	14,4	1,83	14,9	27,4



Argile sableux

Figure IV.2: Intervalle de confiance de la courbe granulométrique.

IV.2.2 Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en éléments nocifs tels que les sulfates. Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). On associe sa présence à des dégradations de construction en terre. Le fort gonflement lié à l'hydratation de l'anhydrite et la solubilité de différents composés sont alors mis en cause. Dans le cas des blocs de terre comprimée et stabilisée, les sulfates peuvent également attaquer le ciment durci à l'intérieur du matériau particulièrement lorsque celui-ci est mis en contact avec de l'eau. Dans ce cas, une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3 % de sulfates doit être faite (Doat, 1979). L'analyse minéralogique, elle aussi, est indispensable pour différencier les sols argileux.

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire CETIM à Boumerdès (Algérie).

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur ce sol, a révélé la composition chimique qui figure sur le tableau 2.3:

Tableau IV.3: La composition chimique du sol

Composition chimique (%)								
Constituent	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Perte au feu								
%	43,38	14,66	2,55	4,02	11,36	11,55	1,51	1,12

L'analyse par diffraction de rayons X a permis de déterminer la composition minéralogique présentée sur le tableau 2.4.

Tableau IV.4: La composition minéralogique du sol

Minéraux	Quartz	Gypse	Calcite	Muscovite	feldspath k	Kaolinite	Minéraux ferrugineux + fond RX
Teneurs (%)	19	29,5	26,33	-	1,22	16,5	1

A travers l'analyse chimique du sol, on voit bien que le sol contient un taux important de trioxyde de soufre (anhydride sulfurique) SO₃ (11,55 %) dépassant 3%, qui est la limite justifiant une étude spécifique d'après Doat et al. (Doat, 1979).

L'analyse minéralogique a révélé la présence d'un taux élevé de gypse (29,5 %) ce qui explique le taux élevé de trioxyde de soufre contenu dans le sol. Le sol contient aussi des taux considérables en quartz et en calcite, alors que la teneur en Kaolinite est peu importante.

IV.2.3 Sable de dune

Nous trouvons ce type de sol dans le sud du Sahara algérien qui est riche en lui

IV.2.3.1 Analyse chimique

A la fin de l'analyse des métaux des dunes de sable, et des analyses chimiques tirées par le détective ont été LNHC Paljlvh (Laboratoire national pour le logement et le développement) et qui a donné les résultats indiqués dans le tableau 2.5. Signaler est résultats significatifs dans une grande proportion de silice, ce qui est supérieur à 95% et, par conséquent, les dunes Les able Djelfa est du sable de silice.

Tableau IV.5: Analyse chimique du sable de dune

Symboles Unité Sable de dune	
Résidu insoluble SiO_2 +Silice	%95,87
Sulfates SO_3	%0,91
Chlorures Cl	%0,36
Carbonate de Calcium CaCO_3	% 2,5
Matières organiques MO	%-----

IV.2.3.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...). Par métonymie, c'est aussi le nom donné au résultat de cette analyse. Cette répartition est traduite par une courbe granulométrique présentée sur la **Figure IV.3** Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés sur le **Tableau IV.6**

Tableau 6: Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	Cu	Cc
2%	0%	1,7	1,1

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D_{60}/D_{10}$ Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

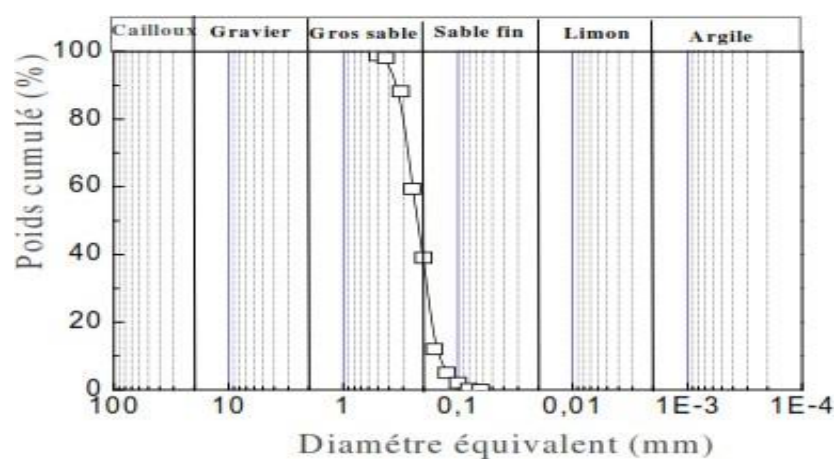


Figure IV.3: Courbe granulométrique du sable de dune

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées) basée sur les coefficients d'uniformité et de courbure, le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisés par les lettres SM (sable mal gradué), sa courbe est uniforme et très peu étalée.

IV.2.4 Equivalent de sable

Cet essai effectué selon la norme (NF P 18-598) est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau 2.7 le sable de dune de Djelfa est un sable propre.

Tableau IV.7: Equivalent de sable du sable dunaire

	Equivalent de sable	
Paramètres	ES _v	ES _p
Sable	86	74

ES_v: (équivalent de sable visuel).

ES_p: (équivalent de sable au piston).



Figure IV.4 : Essai équivalent de sable

IV.2.5 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 produite par l'unité de chaux de Ghardaïa(Algérie). La composition chimique de la chaux, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le **Tableau IV.8**.



Figure 5: présentation d'une chaux poudre



Figure IV.6: Fibres de palmiers (palmier dattier de Ghardaïa)

IV.2.6.1.1 Collecte des fibres

Notre étude s'intéresse uniquement aux fibres extraites des folioles des ulves de palmier dattier, les rachis ne sont donc pas concernés. Les folioles étudiées ont été collectées à partir de palmiers dattiers de la région de Marrakech de même source et plus précisément ceux se trouvant au sein de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. Pour contrôler la reproductibilité de la récolte des folioles, celle-ci s'est faite chaque année en automne-hiver

IV.2.6.1.2 Composition chimique des fibres de palmier

La composition chimique des fibres de palmier dattier a été étudiée en appliquant la norme française T 12 011 (cf. Chapitre II). On s'intéresse dans cette partie, à extraire les trois principaux constituants des fibres : cellulose, lignine et hémicellulose, pour déterminer leurs pourcentages. Le procédé d'extraction adopté est résumé sur la figure

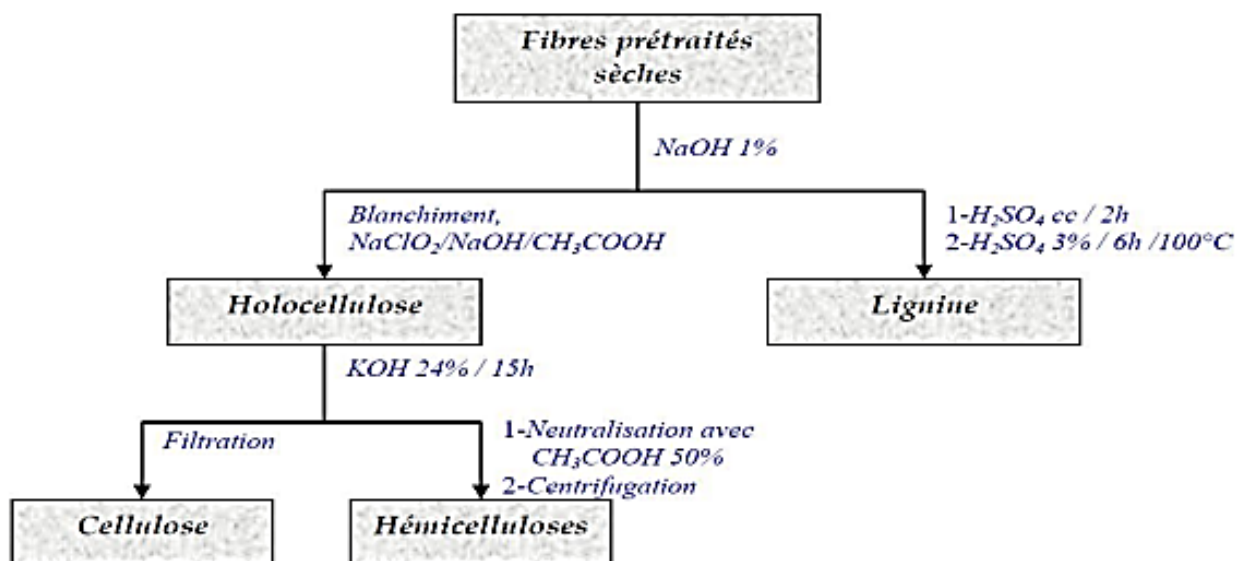


Figure IV.7: Procédé d'extraction de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Norme T12 011)

IV.2.6.2 Fibres de verre

La fibre de verre est un filament de verre. Par extension, les matériaux composites renforcés de cette fibre sont aussi appelés fibre de verre. Les fibres de verre, constituent avec les verres creux, les verres plats et les verres cellulaires, les principales familles de verre.

IV.2.6.2.1 Propriétés

La fibre de verre est intéressante à plus d'un titre. Ainsi elle permet des réductions de poids en améliorant les performances, pour un prix compétitif : on peut en faire une fabrication en séries. Elle permet par exemple un allègement des structures d'environ 30 % par rapport à l'acier.

Parmi les autres propriétés, citons l'inertie chimique, la résistance aux chocs, l'isolation, ... Les principales utilisations de la fibre sont, par ordre d'importance:

- les bâtiments et les infrastructures (29 %) ;
- les transports (25 %) ;
- l'électricité et l'électronique (16 %) ;
- les sports et loisirs (14 %) ;
- les équipements industriels (11 %).



Figure IV. 8: Fibres de verre

IV.3 Confection des blocs

IV.3.1 Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule selon le modèle de Guettala et al. (Guettala, 2006). Il est en acier trempé, et il est composé de 5 éléments formant après montage un volume de $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$. Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange.

Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la figure 2.8.

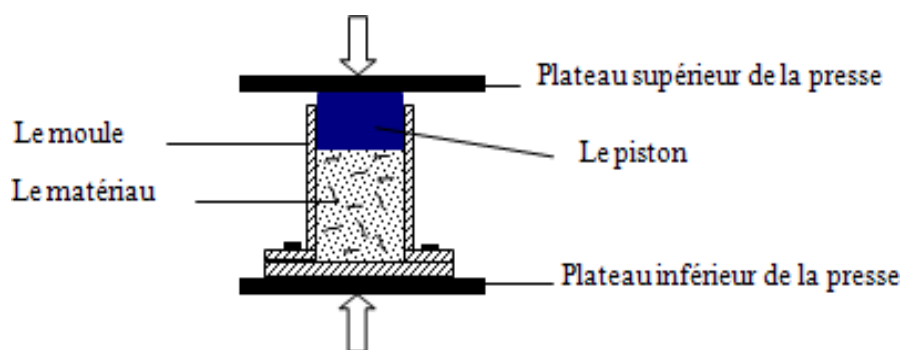


Figure IV.9: Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTS



Figure 10: Moule utilisé pour la fabrication des BTS

IV.3.2 Mélanges

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 2. Kg.

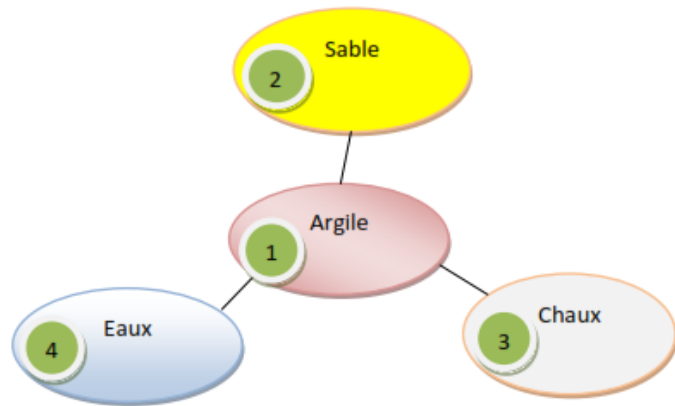
Le pourcentage des éléments : Argile : 70%

Sable : 30% Chaux : 12 %

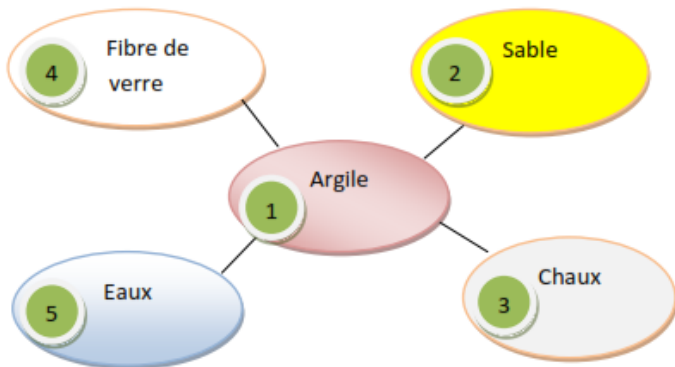
Eaux : 15 %

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la figure 2.10 et le Tableau IV.9.

1^{er} cas : mélange sans fibres



2^{ème} cas : avec fibre de verre



3^{ème} cas : avec fibre de palmé

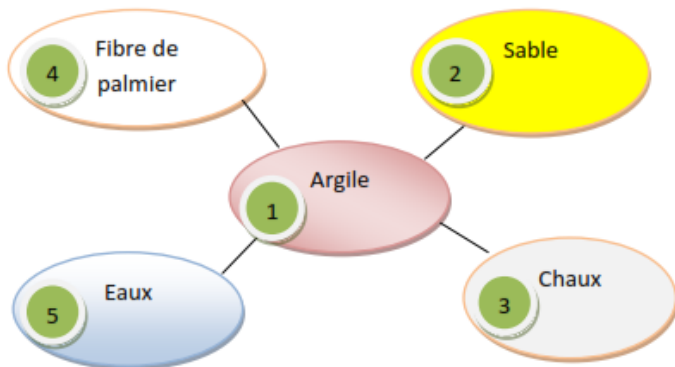


Fig. 2.10 : Combinaison des mélanges des blocs

Figure IV.11: Combinaison des mélanges des blocs

Tableau 9: Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Numéro du mélange	Argile(%)	Sable de dune(%)	Fibres (%)		Chaux%
			Fibres de verre	Fibres de palmier	
	par rapport au mélange sec (argile-Sable de dune)				
0	70	30	0	0	12
1			0.05	0.05	
2			0.1	0.1	
3			0.15	0.15	
4			0.2	0.2	
5			0.25	0.25	
6			0.30	0.30	



Figure 12: Le poids sec pour chaque bloc



Figure IV.13: Mélange global sec

IV.4 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, à titre d'exemple, BTSSF désigne un bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le **Tableau IV.10**.

Tableau IV.10: Codification des mélanges.

Code	Désignation
BTCSF	Bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres
BTCAP	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmiers
BTCAV	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de verre

IV.4.1 Préparation des mélanges

Les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Les matériaux (Argile+ sable + liant (chaux)) sont d'abord mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant trois minutes

Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes. Finalement on procède à l'ajout des fibres en faisant le malaxage manuellement. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage



Figure 14: Malaxeur utilisée



Figure IV.15: Malaxeur utilisée

IV.5 Optimisation de la teneur en eau

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, surtout lorsqu'ils sont fins, une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % (Guettala, 1997).

Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition.

Les blocs sont fabriqués à l'aide d'une presse hydraulique à force imposée selon la procédure du Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000).

Voici les étapes de la procédure :

- Prendre une quantité de matériau humide avec un taux de liant donné (chaux) à une teneur en eau de environ $W = 6$ à 9 % ;
- Fabriquer trois blocs à l'aide de la presse ;
- Mesurer la masse à l'état humide (m_h en g) et les dimensions de chaque bloc (longueur L , largeur l et épaisseur h en cm);
- Calculer la masse volumique sèche de chaque bloc : $MVS = 100 \times m_h / L.l.h.(100+W)$;
- Préparer des quantités de matériaux de teneurs en eau d'environ 1 à 2 % de plus que la précédente et répéter les opérations, jusqu'à obtenir des blocs trop humide (visuellement) au démoulage ;
- Tracer le diagramme des masses volumiques sèches en fonction de la teneur en eau ;
- En observant le diagramme, on détermine la teneur en eau optimale (TEO) correspondant à la masse volumique sèche maximale (MVSmax).

La **Figure IV.16** montre l'optimisation obtenue pour les mélanges (12 % de chaux) pris comme références (voir **Tableau IV.11**). Pour le reste des mélanges, on a procédé à un réajustement de la teneur en eau selon le cas étudié. Les résultats obtenus sont présentés sur le **Tableau IV.11**.

Tableau IV.11: Optimisation de la teneur en eau.

mélange n°	liant (%)	Mvsmax	TEO
	Chaux	(g/cm ³)	(%)
1	12	1.93	15

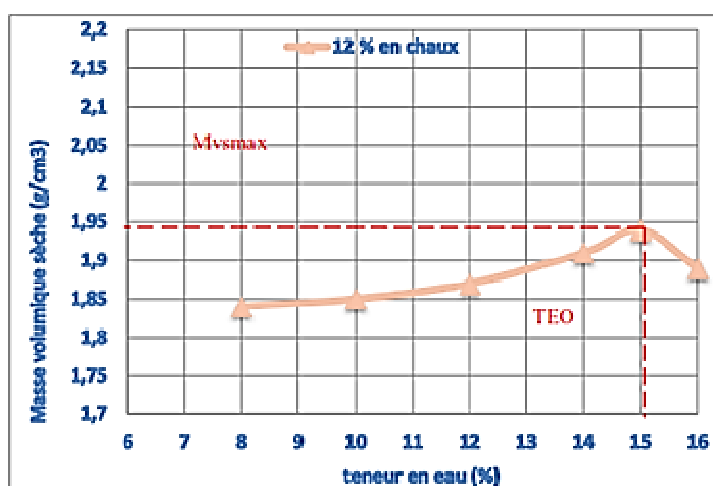


Figure IV.16: Optimisation de la teneur en eau

IV.6 Compactage des mélanges

Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble - moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué une contrainte de compactage (5 MPa), tout en respectant le programme présenté dans le tableau 2.16. Le démoulage se fait immédiatement après le compactage.

Tableau IV.12: La contrainte de compactage des mélanges

Le mélange	La contrainte de compactage (MPa)	Chaux(%)
argile+sable de dunne+chaux sans fibres	5	12
argile+sable de dunne+chaux+ fibres de verre et /ou palmier	5	12



Figure 17: Mode des compactages

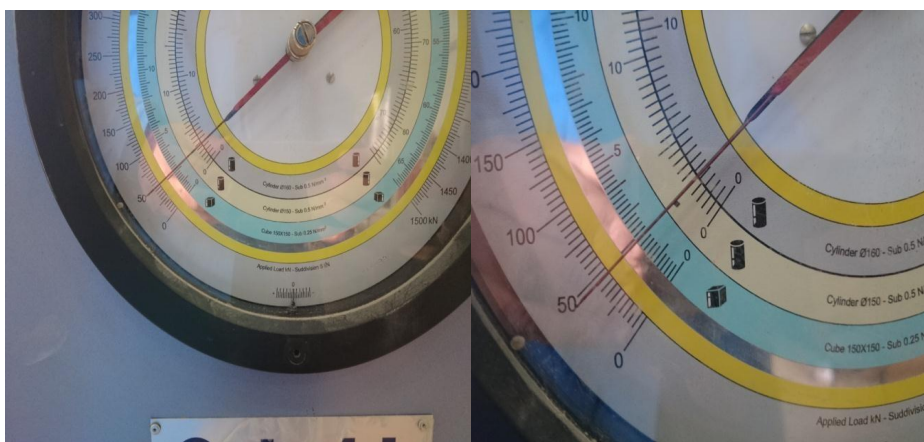


Figure 18: Appliqué contrainte de compactage (5MPa)

IV.7 La cure des blocs

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 laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures avant d'être soumis aux différents modes de cure.

Pour étudier l'influence du mode de cure, les BTS sont curés au laboratoire

IV.7.1 Conservation au laboratoire

Tous les blocs étudiés, sauf ceux qui sont cités dans les deux autres modes, sont conservés au laboratoire à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours.



Figure 19: Conservation des blocs au laboratoire

IV.7.2 Propriétés mécaniques

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression des BTS à l'état sec et à l'état humide par le biais de l'essai de compression simple, et la résistance à la traction sèche en réalisant l'essai de traction par fendage. Pour chaque essai, trois blocs ont été testés.

IV.8 Essais de compression sèche et humide

- **But**

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des briques. Les briques sont écrasées à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la construction.

- **Principe**

Il s'agit de soumettre un échantillon de bloc à une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de déterminer la résistance nominale en compression sèche et humide des blocs de terre compressée.

- **Mode opératoire**

Poser l'échantillon de BTS entre les plateaux de la presse. Appliquer la charge d'une manière continue et ce, avec une vitesse de 0,05mm/s régulière jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Relever la charge maximale supportée par l'échantillon au cours de l'essai.

- **Expression des resultants**

La résistance à la compression des blocs est donnée par la formule:

Avec:

- R_c : résistance à la compression en MPa
- F : charge maximale supportée par les deux briques en kilo newtons (KN)
- S : surface moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm²)

La résistance en compression des blocs est la moyenne arithmétique des résistances d'au moins trois essais réalisés sur des échantillons d'un même lot.



Figure IV.20: Essai de compression

IV.9 Essai de flexion

- **But**

L'essai de traction détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

- **Principe de l'essai**

Le BTS test est posé (sur une de ces grandes faces) sur deux appuis espacés d'une distance L et perpendiculairement à la longueur du bloc. Dans l'axe au-dessus du bloc, parallèle au petit côté, on pose un autre appui surmonté d'un plateau sur lequel sera exercée une force croissante jusqu'à la rupture du bloc testé. On obtient une valeur de rupture en flexion.

Multiplié par cinq, cette valeur indique la résistance en compression minimale. L'équipement d'essai (le portique universel) est illustré à la fig. 2.20.

- **Expression des resultants**

La résistance à la traction des blocs est donnée par la formule:

$$\delta f = \frac{M_{\max}}{I} y_{\max}$$

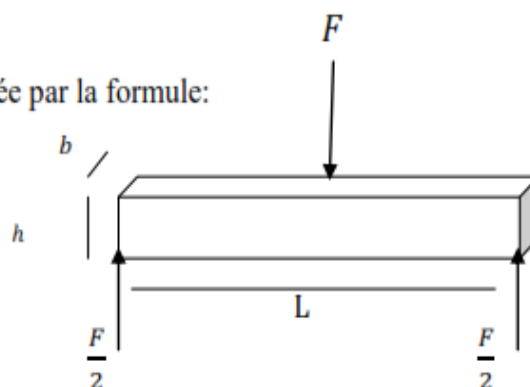
$$; M_{\max} = \frac{F}{2} \times 5 \text{ cm} ; I = \frac{bh^3}{12} ; y_{\max} = \frac{h}{2} ;$$

$$L = 20 \text{ cm}$$

$$h = 5 \text{ cm}$$

$$b = 10 \text{ cm}$$

$$\text{A.N : } \delta f = \frac{F}{15} \quad (\text{N})$$



Avec :

F : charge à la rupture de la brique en traction en KN

L : distance séparant les deux appuis en mm

b : épaisseur de la brique en mm+

h : hauteur en mm

Rf : résistance à la traction en MPa



Figure 21: Essai de traction par flexion

IV.10 Résistance en compression à l'état humide

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

IV.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques de différentes matières premières et développées dans cette étude, qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée fibrés

Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable de dune, la chaux et les fibres. Les fibres utilisées dans cette étude sont d'origine végétale (fibres palmier dattier et fibre de verre). 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 BTS 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 du BTS fibré.

Chapitre -v-

Présentation et discussion des résultats

V.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux, qui a comme but, l'étude de l'effet de taux et de type des fibres (Verre, palmier dattier) et le compactage sur:

- La masse volumique apparente du BTS ;
- Le comportement mécanique du BTS ;

Il faut signaler que l'étude de l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques du BTS à base de chaux a été réalisée, en vue de faire un bon choix du mode et temps de cure pour le reste de l'étude.

Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre et le sable de dune, une teneur en chaux vive (12 %), un type de fibres (les fibres de palmier et les fibres de verre), six teneurs en fibres (0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25 et 0.30 %) du poids du mélange sec (2Kg) et une contrainte de compactage de 2.5 et 5MPa sont utilisées dans cette étude.

V.2 .Résistance à la compression R_{C28} de BTS

La résistance à la compression exprimée par la capacité de BTS, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Les résultats de l'essai de compression sont représentés dans la **Figure V.1** et dans le **Tableau V.1** par leurs moyennes.

Tableau V. 1: Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres et cure humide à différents compactages.

Résistance à la compression de béton de terre stabilisé (Mpa)								
Fibre	Palmier				Verre			
Compactage	2,5 Mpa		5 Mpa		2,5 Mpa		5 Mpa	
Taux de Fibres(%)	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j
0%	0,763	0,915	2,81	3,54	0,763	0,915	2,81	3,54
0,05%	1,121	1,21	2,98	3,691	1,41	1,667	3,61	3,82
0,10%	1,27	1,33	3,15	3,84	1,64	1,98	4,09	4,49
0,15%	1,38	1,75	3,81	4,122	1,8	2,32	4,55	5,06
0,20%	1,66	2,13	4,12	4,7	1,701	2,21	4,3	4,81
0,25%	1,41	1,96	4,01	4,66	1,52	2,01	4,15	4,703
0,30%	1,31	1,82	3,87	4,08	1,41	1,94	3,99	4,52

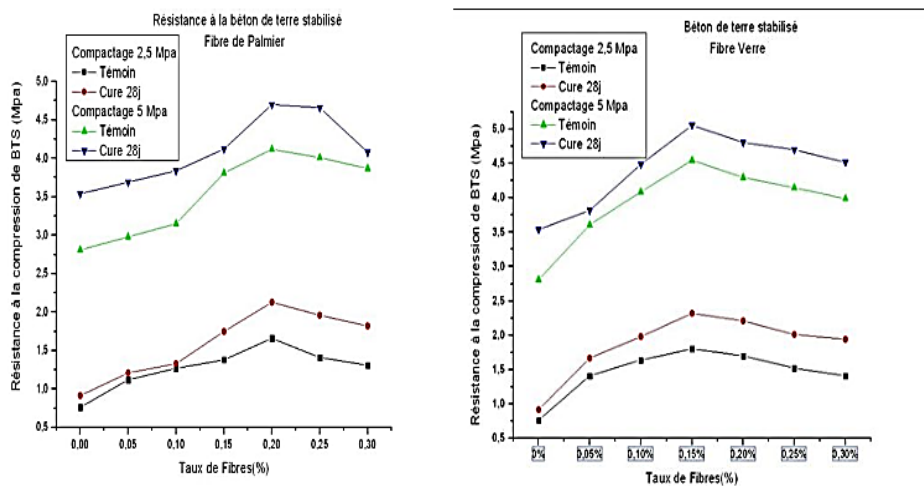


Figure V.14: L'effet de teneur des fibres (palmier – verre) et cure humide sur la résistance à la compression de BTS pour différents compactages.

V.2.1 L'effet de la cure humide sur la résistance à la compression à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la **Figure V.1** mettent en évidence l'effet bénéfique de la cure. La cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires.

Par exemples Pour le BTS sans fibres et avec un compactage de **2.5MPa**, on observe clairement l'influence de la cure sur l'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, une augmentation de **19.92%** pour une cure de 28 jours par rapport au BTS (chaux) témoin sans fibres avec un compactage de **2.5MPa** (conservés à l'air). Ceci signifie que le BTS témoin avec un compactage de **2.5MPa** est plus poreux

Le BTS sans fibres avec un compactage de **5MPa**, on observe clairement l'influence de la cure sur l'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, une augmentation d'ordre **25.98%** pour une cure de 28 jours par rapport au BTS témoin sans fibres avec un compactage de **5MPa** (conservés à l'air). Ceci signifie que le BTS témoin avec un compactage de **5MPa** est plus poreux.

V.2.2 L'effet de la variation de la teneur des fibres (palmier - verre) sur la résistance à la compression à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la **Figure V.1** montrent que la résistance à la compression à 28 jours à différents compactages est augmenté en fonction de l'augmentation de la teneur des fibres de verre jusqu'à 0.15 % et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 0.30% La Croissance est d'autant importante en allant du teneur des fibres de palmier de 0 à 0.20% et la décroissance est d'autant importante en allant du teneur de 0.2 à 0.3%.

A titre d'exemple L'augmentation des fibres de palmier de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air avec un compactage de **5MPa** est provoqué une augmentation de la résistance à la compression d'environ **5.7%**.

L'augmentation des fibres de verre de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air avec un compactage de **5MPa** engendré une augmentation d'ordre de **13.29**.

Une diminution de la résistance à la compression de BTS conservés à l'air avec un compactage de **5MPa** d'ordre :

- **3.61%** pour une augmentation des fibres de palmier de 0.25 à 0.30%.
- **4.01%** pour une augmentation des fibres de verre de 0.25 à 0.30%.

V.2.3 L'effet de compactage sur la résistance à la compression à 28j de BTS

D'après les résultats mentionnés sur le Tableau V.1 et Figure V.1, on constate que l'augmentation du compactage augmente la résistance à la compression quel que soit le type de fibre. Par exemple pour le BTS pour les différents types des fibres de taux de 0.3% (conservés à l'air) avec un compactage de **5MPa**, on observe nettement l'effet bénéfique du compactage sur l'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, une augmentation presque deux fois la résistance de compression de BTS à compactage de **2.5 MPa**. Ceci signifie que le compactage a un effet physique sur l'amélioration de la compacité engendrant une augmentation des propriétés physico-mécaniques de BTS.

V.3 Densité sèche de BTS

La densité est le rapport de la masse volumique du BTS par rapport à la masse volumique de l'eau. Elle joue un rôle très important dans les propriétés thermo-physique, ainsi sur la maniabilité de son utilisation dans les divers chantiers de construction. Les résultats de l'essai sont représentés par leurs moyennes dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.2: Densité sèche de béton de terre stabilisé - BTS.

<i>Densité sèche de béton de terre stabilisé</i>								
Fibre	Palmier				Verre			
Compactage	2,5 Mpa		5 Mpa		2,5 Mpa		5 Mpa	
Taux de Fibres(%)	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j
0%	1,9	1,96	1,96	2,12	1,9	1,96	1,96	2,12
0,05%	1,6	1,72	1,67	1,88	1,74	1,88	1,79	2,08
0,10%	1,45	1,55	1,52	1,69	1,66	1,79	1,71	1,96
0,15%	1,36	1,41	1,41	1,6	1,53	1,56	1,61	1,93
0,20%	1,25	1,31	1,34	1,52	1,39	1,47	1,52	1,67
0,25%	1,17	1,22	1,27	1,44	1,3	1,37	1,43	1,49
0,30%	1,09	1,11	1,14	1,31	1,21	1,31	1,4	1,44

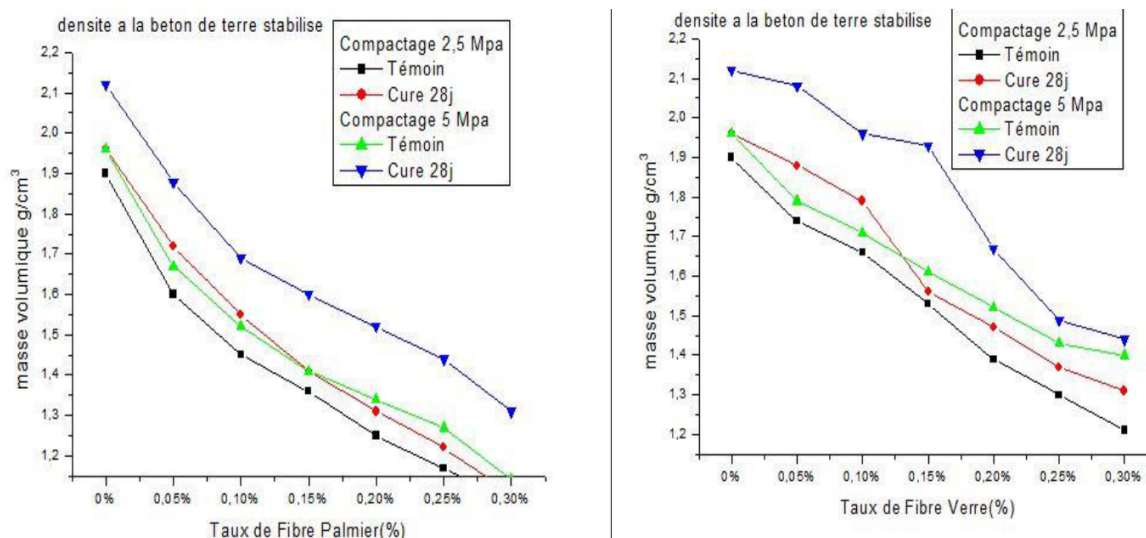


Figure V. 2: L'influence du teneur des fibres de palmier et des fibres de verre et la cure humide sur la densité sèche de BTS) à différents compactages.

V.3.1 L'effet de la cure humide sur la densité sèche de BTS

D'après les résultats représentés sur la Figure V.2, on remarque que la cure humide favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires. Ceci signifie que la durée de cure humide conduit à une diminution de la densité des plus gros capillaires due à l'hydratation croissante de la chaux

Par exemples pour le BTS avec fibres de palmier 0.25% et avec un compactage de 2.5 MPa, on observe nettement l'effet bénéfique de la cure sur l'augmentation de la densité, une augmentation de 4.1% pour une cure de 28 jours par rapport au BTS à fibres de palmier 0.25% avec un compactage de 2.5 MPa, (conservés à l'air).

Et pour le BTS avec fibres de verre 0.25% et avec un compactage de 2.5 MPa, on observe nettement l'effet bénéfique de la cure sur l'augmentation de la densité, une augmentation de 0.82 % pour une cure de 28 jours par rapport au BTS à fibres de verre 0.25% avec un compactage de 2.5 MPa, (conservés à l'air).

V.3.2 L'effet de la variation de la teneur des fibres sur la densité sèche de BTS

D'après Les résultats représentés sur la Figure V.2, on constate que la densité sèche de BTS pour les deux types de fibres pour différents compactages est une deux fonctions: (Croissante et décroissance) de teneur en fibres de palmier et de fibre de verre. La Croissance est d'autant importante en allant du teneur de 0 à 0.2% pour le palmier et de 0 à 0.15% pour le verre, la décroissance d'autant importante en allant du teneur de 0.2 à 0.3% pour le palmier et de 0.15 à 0.3% pour le verre

Par exemple l'augmentation des fibres de palmier de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air à avec un compactage de 5MPa est engendré une augmentation d'ordre de 2.6%.

Et l'augmentation des fibres de verre de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air à avec un compactage de 5MPa est engendré une augmentation d'ordre de 2.6%. Ceci signifie que la densité de BTS à base des fibres de verre est plus grande que celle du BTS à base des fibres de palmier.

V.3.3 L'effet de compactage sur la densité sèche de BTS

D'après les résultats mentionnés sur le Tableau V.2 et Figure V.2, on constate que l'augmentation du compactage augmente la densité quel que soit le type de fibre.

A titre d'exemple pour le BTS à base des fibres de palmier 0.1% (conservés à l'air) avec un compactage de **5MPa**, on observe clairement l'augmentation de la densité sèche, une augmentation d'ordre 4.83 % par rapport au BTS à base des fibres 0.1% avec un compactage de 2.5MPa (conservés à l'air). Ceci signifie que le compactage a un effet physique sur l'amélioration de la densité engendrant une augmentation des propriétés physico-mécaniques de BTS.

V.4 Résistance à la traction de BTS à 28 jours

La résistance à la traction exprimée par la capacité de BTS, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la traction. Les résultats de l'essai de traction sont représentés par leurs moyennes dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.3: Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres et cure humide à différents compactages.

<i>Résistance à la traction de béton de terre stabilisé (Mpa)</i>								
Fibre	Palmier				Verre			
Compactage	2,5 Mpa		5 Mpa		2,5 Mpa		5 Mpa	
Taux de Fibres(%)	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j	Témoin	Cure 28j
0%	0,036	0,07	0,08	0,1	0,036	0,07	0,08	0,1
0,05%	0,041	0,079	0,084	0,11	0,07	0,119	0,11	0,134
0,10%	0,053	0,084	0,089	0,119	0,105	0,131	0,13	0,158
0,15%	0,073	0,09	0,091	0,127	0,126	0,14	0,15	0,17
0,20%	0,085	0,096	0,095	0,13	0,11	0,12	0,139	0,16
0,25%	0,061	0,076	0,08	0,124	0,09	0,103	0,131	0,157
0,30%	0,058	0,06	0,0691	0,117	0,048	0,08	0,124	0,142

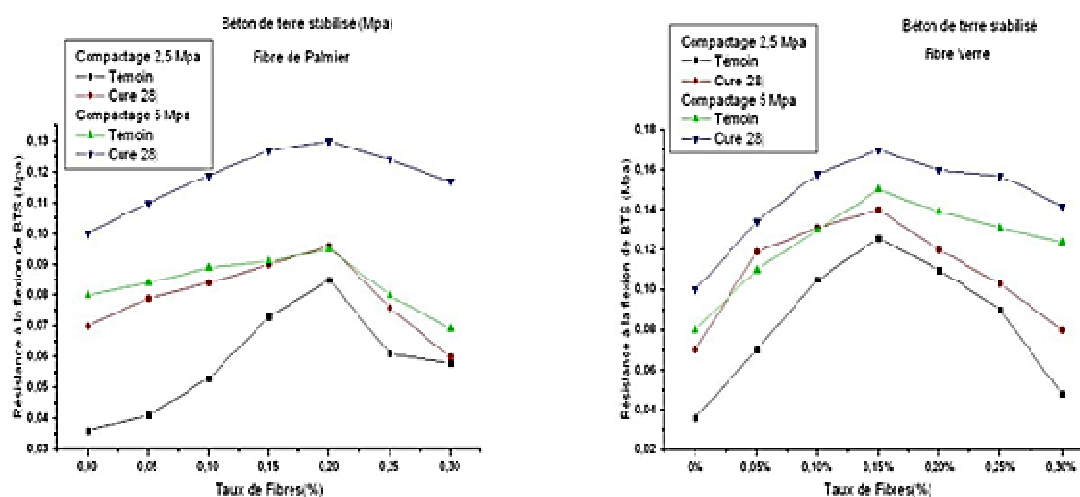


Figure V.3: Effet du teneur des fibres de palmier et des fibres de verre, type de liant (chaux) et cure humide sur la résistance à la traction de BTS pour différents compactages.

V.4.1 L'effet de la cure humide sur la résistance à la traction à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la Figure V.1 mettent en évidence l'effet bénéfique de la cure. La cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires.

A titre d'exemples pour le BTS sans fibres avec un compactage de 2.5 MPa, on observe nettement l'effet bénéfique de la cure sur l'augmentation de la résistance à la traction, une augmentation de **94.44%** pour une cure de 28 jours par rapport au BTS témoin sans fibres avec un compactage de **2.5MPa**, (conservés à l'air).

V.4.2 L'effet de la cure humide sur la résistance à la traction à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la Figure V.3 mettent en évidence l'effet bénéfique de la cure. La cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires.

Par exemples pour le BTS sans fibres et avec un compactage de **5MPa**, on observe nettement l'effet bénéfique de la cure sur l'augmentation de la résistance à la traction, une augmentation de **25%** pour une cure de 28 jours par rapport au BTS sans fibres avec un compactage de 5 MPa, (conservés à l'air).

V.4.3 L'effet de la variation de la teneur de fibre de palmier et de fibre de verre et type de liant sur la résistance à la traction de BTS

Les résultats représentés sur la Figure V.3 montrent que la résistance à la traction à 28 jours pour les deux types de fibres pour différents compactages est une fonction croissante jusqu'à 0.20% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante pour le palmier, et une fonction croissante jusqu'à 0.15% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante pour le verre

A titre d'exemple l'augmentation des fibres de palmier de 0.15 à 0.20% pour des BTS conservés à l'air avec un compactage de 2.5MPa se passer une augmentation d'ordre de 16.43%. Par contre l'augmentation des fibres de 0.20 à 0.25% pour des BTS conservés à l'air avec un compactage de 2.5MPa se passer une diminution d'ordre de 28.23%.

De plus, on remarque que la résistance à la traction à 28 jours du BTS avec fibres de verre plus grande que le BTS avec fibres de palmier. Par exemple l'augmentation de la résistance à la traction pour un BTS de cure 28j, fibre de verre 0.20% avec un compactage de 5Mpa est de l'ordre 23.07% par rapport au BTS de cure 28j, fibre de palmier 0.20% avec un compactage de 5Mpa. Les recherches ont montré que les blocs de terre stabilisée à la chaux conservés à une température ambiante de 20 à 30°C, exigent une durée de cure très importante dépassant un mois pour assurer un développement satisfaisant de la résistance (Venkatarama,2002)[30].

V.4.4 L'effet de compactage sur la résistance à la traction à 28j de BTS

D'après les résultats mentionnés sur le **Tableau V.3 et Figure V.3**, on constate que l'augmentation du compactage augmente la résistance à la traction quel que soit le type de fibre.

Par exemple pour le BTS avec fibre de palmier 0.3% (conservés à l'air) et avec un compactage de 5MPa, on observe nettement l'effet bénéfique du compactage sur l'augmentation de la résistance à la traction à 28 jours, une augmentation de 11.76 % par rapport au BTS fibres de palmier 0.3% (conservés à l'air) avec un compactage de 2.5MPa.

Et pour le BTS avec fibre de verre 0.3% (conservés à l'air) et avec un compactage de 5MPa, on observe nettement l'effet bénéfique du compactage sur l'augmentation de la résistance à la traction à 28 jours, une augmentation de 158.33 % par rapport au BTS fibres de verre 0.3% (conservés à l'air) avec un compactage de 2.5MPa. Ceci signifie que le compactage a un effet physique sur l'amélioration de la compacité engendrant une augmentation des propriétés physico-mécaniques de BTS.

V.5 Les BTS à base de chaux

Pour étudier l'influence de la teneur en fibres sur les propriétés mécaniques du BTS à base de chaux, nous avons fait varier la teneur en fibres de 0.05 % jusqu'à 0.3 % du poids du mélange sec, la teneur de 0.2% de fibre de palmier dans le chargement statique donne une moyenne résistance mais dans le chargement dynamique donnant une grande résistance. L'ajout des fibres concentrées plus de 0.2% la résistance mécanique de BTS diminue.

Et la teneur de 0.15% de fibre de verre dans le chargement statique donne moyenne résistance mais dans le chargement dynamique donnant une grand résistance. L'ajout des fibres concentre plus de 0.15% la résistance mécanique de BTS diminue.

V.6 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la possibilité d'améliorer les propriétés physico-mécaniques, et inclure différents types d'intérêt de fibres (naturelles et synthétiques), mais la vue grandiose de la fibre, de (palmier et verre) spécifiquement. Pour tirer le meilleur parti de la stabilité BTS, et l'utilisation du programme d'installation chimique (chaux). Pour la stabilité, car il se caractérise par une pouzzollanique de réaction lente, une étude de temps et de mode de cure a été élaborée, en vue de réduire le temps de conservation des BTS à base de chaux en attendant qu'ils atteignent une résistance acceptable pour la construction des murs en terre.

Conclusion générale

Ce progrès scientifique étourdissant dans le monde de la construction qui a travaillé sur la production de bâtiments modernes avec les dernières innovations de la technologie de construction moderne des bâtiments précédents sciences équipée en utilisant les fibres de (verre et palmier) qui allie la beauté de la forme architecturale et son poids léger et la vitesse de construction en plus de la bonne isolation thermique avec la durabilité et la durée de vie des bâtiments conventionnels aurait aimé la profondeur plus sur ce sujet, mais il était impossible de l'obtenir dans les références, mais cela ne nous a pas empêché de vous tenir informé de ce nouveau type de béton composé de chaux, d'argile, et de sable à vous de poursuivre les recherches que vous avez la curiosité.

Grâce aux résultats de cette étude pilote, nous avons identifié les principales conclusions suivantes :

- Une réduction de la masse volumique apparente du BTS avec l'augmentation de la teneur en fibres a été observée. Mais malgré cette observation, on doit mentionner que cette réduction est très faible comparativement à celle du BTS sans fibres;
- L'ajout de fibres de palmier a augmenté de 0,05% à 0,20% une légère amélioration à sec enregistré blocs pression résistance à la RCS, stabilisée avec 12% de chaux et presser la contrainte de 2,5 MPa. Mais pour le reste des cas étudiés de 0,20% à 0,3%, a donné lieu à l'ajout de fibres d'abaisser la résistance à la compression. .
- En comparant la la résistance à la compression de BTS, on constate une réduction générale de la résistance à la compression à base des fibres de palmier par rapport au BTS a base des fibre de verre.
- L'augmentation de la contrainte de compactage a conduit à une augmentation significative de la de la (RCS, et de la RCH) et une légère augmentation la de RTS .
- L'incorporation des fibres de verre d'une part a un grande effet positif sur le comportement post-contrainte de rupture du BTS, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule; et d'autre part L'incorporation des fibres de palmier effet Moins.

R é f é r e n c e s B i b l i o g r a p h i q u e s

1. ADALBERTH, K. Energy demand during the life cycle of a building. In *CIB Symposium Energy Mass and Flow in the life Cycle of building* (Vienna, 1996).
2. ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of single-unit dwellings : examples. *Building and Environment* 32 (1997), 321–329.
3. ADALBERTH, K. Energy use in four multi-family houses during their life cycle. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 1 (2000).
4. ADALBERTH, K., ALMGREN, A., AND PETERSEN, E. H. Life cycle assessment of four multi-family buildings. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 2 (2001).
5. ADEME. Les déchets en chiffres. Tech. rep., L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 2006.
6. AFNOR. *Règles PS-MI 89 : construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés - dispositions constructives*. Document Technique Unifié (DTU). AFNOR DTU P 06-008, 1990.
7. ALLINSON, D., AND HALL, M. Investigating the optimisation of stabilised rammed earth materials for passive air conditioning in buildings. In *International Symposium on Earthen Structures* (Bangalore, India, 2007), B. V. Venkatarama Reddy and M. Mani, Eds., Interline Publishing, pp. 109–112.
8. ALVES DE AZEREDO, G. *Mise au point de procédures d'essais mécaniques sur mortiers de terre : application à l'étude de leur rhéologie*. PhD thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005.
9. ARCHITYPE. In *Rammed Earth 2005* (University of Bath, Grande Bretagne, 2005).
10. ASEG. Thermal resistance and thermal mass, 2000.
11. ASTM. *ASTM C 165 - Standard Test Method for Measuring Compressive Properties of Thermal Insulations*. ASTM Standards, Vol 04.06. ASTM, West Conshohocken, United States, 2000.
12. AZEREDO, G., MOREL, J. C., AND LAMARQUE, C. H. Applicability of rheometers to characterizing earth mortar behavior. part 1 : experimental device and validation. *Materials and Structures* doi : 10.1617/s11527-007-9343-9 (2008).
13. BAGGS, D. Thermal mass and its role in building comfort and energy efficient.
14. BAKEER, T., AND JAGER, W. Collapse analysis of reinforced and unreinforced adobe masonry structures under earthquake actions - case study : Bam citadel. In *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture X* (2007), WIT Press, pp. 577–586.
15. Mémoire de fin d'études présenté par (Layeb Abdelouhab et Halbaoui Ahmed) DJELFA 2016-2017
16. Caractérisation photomécanique d'un bloc de terre stabilisé avec champ à base des filtres