

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 : matériaux et structures

Présenté par

Mlle MOSTEFAI Ouahiba

Sujet du mémoire :

L'architecture de terre

Soutenu le 5 novembre 2020 à 14 heures devant le jury composé de :

M. B. DJEBLI	Président
M. N. KERROUM	Encadreur
M. A. KRIM	Examineur
M. A. RABAHI	Rapporteur

PROMOTION : 2020/2021

« L'homme, aveuglé par l'éclat d'un horizon incertain, s'éloigna de la terre et s'égara pour ne plus retrouver le chemin de la sérénité. »

MOSTEFAI Ouahiba, 15 septembre 2020.

Remerciements.

Je remercie vivement mon frère Fayçal pour ses encouragements, son accompagnement et son omniprésence ;

Un geste amical à tous les membres du Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest- LTPO - de Tiaret qui m'ont apporté aide et assistance ne serait que légitime ;

J'encenserais volontiers d'éloges le personnel de l'université Ibn Khaldoun et particulièrement les chargés de la bibliothèque ;

Une immense reconnaissance et un remerciement spécial à un ami et proche de la famille pour son attention, son aide, sa disponibilité, son assistance et ses conseils.

*D*édicace,

Je dédie cette modeste œuvre à ce grand homme qui m'a inculqué l'art d'être utile dans la vie en plus du sens aigu de l'honneur et de la dignité. Feu mon père, aux compétences avérées et reconnues, qui a laissé après lui une œuvre formidable entre ouvrages d'art, routes et bâtis en tous genres tout en protégeant et restaurant le patrimoine, et aussi en diffusant, sans modération aucune science, savoir et connaissances autour de lui tout en offrant ses services sans rien attendre en retour ;

A ma mère qui fut, est et restera toujours et sans conteste mon guide et un exemple de sacrifice ;

A mes sœurs et mes frères qui sont ma fierté et ma force qui me permet d'aller toujours de l'avant ;

A un très grand ami de la famille toujours à l'écoute dans son humilité et sa disponibilité sans faille.



MOSTEFAI Ouahiba

Résumé

Rien de moins simple en matière de construction que l'architecture de terre crue. Simple de par ses techniques et économique de par sa disponibilité, elle offre l'opportunité d'un bâti peu onéreux n'ayant aucun impact sur l'environnement, peu gourmande ou pas du tout quant à la consommation énergétique mais encore faut-il savoir entretenir et préserver le bâti, qu'il soit ancien ou neuf, et encore plus la restauration du vieux ancien qui, faut-il le souligner, ce qui est parfois une tâche gigantesque.

Pour plus d'efficacité, de grands moyens humains, matériels et financiers ont toujours été mobilisés pour une meilleure prise en charge du matériau terre crue, en vue d'une amélioration adéquate d'un bâti neuf ou d'une restauration patrimoniale fiable, et aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité excellentes.

Mots-clés : Architecture, matériaux locaux, construction de terre, pathologies du pisé, réhabilitation, adobe, bauge, torchis, btc, pisé, restauration, analyse, essais, terre crue, préservation, enduits.

Abstract:

Nothing could be simpler when it comes to construction than the raw earth architecture. Simple by its techniques and economical by its availability, it offers the opportunity of an inexpensive building having no impact on the environment, consuming little or not at all in terms of energy consumption but it is still necessary to know how to maintain and to preserve old or modern buildings and even more the restoration of old buildings which, it should be noted, is sometimes gigantic.

From there, and for more efficiency, a large workforce, material and financial resources have always been mobilized for a better management of the earthen material with a view to an adequate improvement of a new building or a reliable heritage restoration and excellent physical, mechanical and durability properties.

Keywords: Architecture, local materials, rammed, earthen constructions, pathologies, rehabilitation, adobe, cob, mud, restoration, analysis, tests, raw earth, preservation, plaster.

الملخص

لا شيء أبسط عندما يتعلّق الأمر بالبناء بالتربة. بسيطة من حيث تقنياتها واقتصادية من حيث توفرها، فهي توفر فرصة لمبنى رخيص ليس له تأثير على البيئة، ويستهلك القليل أو لا يستهلك على الإطلاق من حيث الطاقة ولكن لا يزال من الضروري معرفة كيفية صيانته و المحافظة على المباني القديمة والحديثة وكذلك ترميم المباني القديمة التي مع الملاحظة أنّها ضخمة في بعض الأحيان.

من هناك ولمزيد من الكفاءة تمّ دائماً تعبئة موارد بشرية ومادّية ومالية كبيرة من أجل عناية أفضل لمادة التراب بهدف تحسين مناسب للمبنى الجديد أو ترميم ما هو تراث ذو خصائص فيزيائية وميكانيكية ومتانة ممتازة.

الكلمات الرئيسية : العمارة - الطوب التحاليل-المواد المحلّية - البناءات الترابية - الأمراض- ترميم- إعادة التأهيل -الفن المعماري-التغليف - تحليل - اختبارات - التراب الخام - حفاظ.

Liste des abréviations

CRATerre :	Centre d'Application et Recherche- Terre.
BTC :	Brique de Terre Comprimée.
LTPO :	Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest- de Tiaret
COB :	Uniform Building Code.
BTCS :	Bloc de Terre Comprimée et Stabilisée.
UNESCO :	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.
AVN :	Association la Voûte Nubienne.
EPAU :	Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.
CAPTerre :	Centre Algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre.
CNERIB :	Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

Liste des figures

Figure 1. Mise en œuvre de la terre. Etats solide, plastique, liquide et sec, Source : Construire en terre, CRAterre	25
Figure 2. Le torchis.	26
Figure 3. La bauge.....	27
Figure 4. Les douze principaux modes de construction en terre. CRAterre.	29
Figure 5. Exemple de comportement thermique de l'adobe.	32
Figure. 6. Production des BTC. Etapes et outillages. Source Rigassi et CRAterre-EAO, 1995, pages 46-47.	38
Figure 7. Emissions mondiales de CO2 provenant de carbone fossile (charbon, gaz, pétrole et fabrication du ciment). 1990 / 2017 source JRC Commission Européenne, rapport 2018.....	43
Figure 8. Répartition massique (gauche) et carbone (droite) d'un béton classique constitué de ciment CEMI. Source données : ATILH & UNPG. Source graphique : ARTELIA Bâtiments Durables.....	46
Figure 9. Emission de gaz à effet de serres des différentes industries et zoom sur l'industrie de la construction. Manicore & Bribián et al. – Graphiques : ARTELIA Bâtiments Durables ...	46
Figure 10. Eléments de chevalement et d'étaisements. Source : icomos.org	69
Figure 11. Schématisation des hauteurs pour la détermination de l'équivalent de sable.....	96
Figure 12. Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion	100
Figure 13. Dispositif de rupture en compression	100
Figure 14. LTPO Tiaret. Courbe granulométrique du pisé de la muraille de Sour, Mostaganem	109
Figure 15. LTPO de Tiaret. Essai Proctor modifié. Norme NFP94-093	110
Figure 16. LTPO de Tiaret. Proctor Normal. Norme NFP94-093	111
Figure 17. Procès verbal d'essais, LTPO de Tiaret. Résultats des tests des échantillons de terre prélevés à Tiaret et Bouardia.....	115
Figure 18. LTPO de Tiaret. Essai limite de liquidité	118
Figure 19. LTPO de Tiaret. Limite de liquidité	119
Figure 20. Diagramme de plasticité des sols selon Casagrande (1948)	120

Figure 21. La courbe granulométrique de l'échantillon (01 récent, âge 02 ans). Granulat discontinu.	126
Figure 22. La courbe granulométrique de l'échantillon (05 ancien, âge 50 ans). Granulat discontinu.	127
Figure 23. La courbe granulométrique du sable de mélange.	127
Figure 24. Courbe Proctor pour l'échantillon (01 récent, âge 02 ans).	128
Figure 25. Courbe Proctor pour l'échantillon (05 ancien, âge 50 ans).	129
Figure 26. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers étudiés	134
Figure 27. Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés	135
Figure 28. Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.	137
Figure 29. Evolution de la perte en masse par le Na_2SO_4 des mortiers étudiés	138
Figure 30. Evolution de la perte en masse par le MgCl_2 des mortiers étudiés	139

Liste des tableaux

Tableau 1. Hydraulicité de la chaux.....	68
Tableau 2. Coefficient d'uniformité.....	78
Tableau 3. Caractéristiques des échantillons prélevés.....	83
Tableau 4. Dimensions et poids des échantillons prélevés	84
Tableau 5. Composition des adobes.....	85
Tableau 6. Dimensions et poids des adobes confectionnés.....	87
Tableau 7. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n°0,1 récent), âge 2 ans.....	88
Tableau 8. Analyse granulométrique par sédimentométrie échantillon récent, âge 2 ans.....	88
Tableau 9. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n° 05 ancien), âge 50 ans.....	89
Tableau 10. Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon ancien, âge 50 ans, normes NF P94-056 (03-96) et NF P94-057 (05-92).....	89
Tableau 11. Analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g, norme NF P 18-560 septembre 1990.....	90
Tableau 12. Valeurs des densités sèches et teneurs en eau pour l'essai de compactage (Proctor normal). Norme : NF P 94 -093 septembre 1997.....	91
Tableau 13. Limites d'Atterberg, limite de liquidité. Norme: NF P94-051 Mars 1993.....	92
Tableau 14. Limite de plasticité. Norme : NF P94-051 Mars 1993.....	93
Tableau 15. Composition des mélanges à réaliser.....	98
Tableau 16. Dosage des mélanges à réaliser.....	98
Tableau 17. Terre en technique de pisé.....	108
Tableau 18. Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057. Echantillon de Tiaret.....	112
Tableau 19. Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057. Echantillon n°2 de Bouardia.....	113
Tableau 20. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF	

P94-057. Echantillon n° 1, prélèvement à Tiaret.....	114
Tableau 21. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF P94-057. Echantillon n° 2, prélèvement à Bouardia (sol marron).....	114
Tableau 22. Coefficient d'uniformité.....	116
Tableau 23. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03. Résultats de la limite de liquidité. Echantillon n° 1, prélèvement à Tiaret	117
Tableau 24. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03. Résultats de la limite de plasticité. Echantillon n° 1, prélèvement à Tiaret	117
Tableau 25. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03. Résultats de la limite de liquidité.....	118
Tableau 26. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03. Résultats de la limite de plasticité.....	118
Tableau 27. Les résultats de la limite de plasticité.....	119
Tableau 28. Limites de liquidité et de plasticité.....	119
Tableau 29. Résultats essai à la compression. Dimensions et poids des échantillons prélevés.....	122
Tableau 30. Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes récents (âge 02 ans) prélevés de Timimoun	123
Tableau 31. Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes récents (âge 50 ans) prélevés de Timimoun 1000g. Norme NF P 18-560 septembre 1990.....	123
Tableau 32. Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes confectionnés.....	123
Tableau 33. Résultats d'Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon n° 01 récent, âge 2 ans	124
Tableau 34. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon n° 01 récent, âge 2 ans.....	124
Tableau 35. Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon n° 05 ancien, âge 50 ans.....	125
Tableau 36. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon n° 05 ancien, âge 50 ans : normes NF P94-056 (03-96) et NF P94-057 (05-92)	125
Tableau 37. Résultats analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g. Norme NF P 18-560 septembre 1990.....	126
Tableau 38. Résultats de l'essai Proctor normal Norme : NF P 94 -093.....	128

Tableau 39. La limite de liquidité Norme : NF P94-051 Mars 1993.....	129
Tableau 40. La limite de plasticité Norme : NF P94-051 Mars 1993.....	130
Tableau 41. Indices de liquidité et de plasticité.....	130
Tableau 42. Valeurs de la limite de liquidité w_l , la limite de plasticité w_p et l'indice de plasticité I_p	131
Tableau 43. Résultats d'équivalent de sable NF P18-598 Octobre 1991.....	131
Tableau 44. Résultats des essais de traction par flexion.....	134
Tableau 45. Résultats des essais de compression.....	135
Tableau 46. Masse volumique apparente des mortiers étudiés.....	136
Tableau 47. Résultats des essais de résistance au sulfate de sodium à 5%	137
Tableau 48. Résultats des essais de résistance au chlorure de magnésium à 5%.....	138
Tableau 49. Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité des mortiers.....	140
Tableau 50. Résultats des variations pondérales des mortiers.....	141

Liste des photographies et images

Image 1. Algérie. Laghouat. Mariage féérique d'éléments de la nature au pays du palmier et de la terre crue avant que n'apparut le béton dévastateur.	09
Image 2. En orange, les régions de répartition des constructions en terre crue. Les points indiquent les principaux sites architecturaux inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco. Source : CRAterre.....	10
Image 3. Maroc, Bouchenine sur les hauteurs de l'Anti-Atlas marocain. Route, habitation, toiture en terre crue. Crédit Photo : Auteure.....	12
Image 4. Aviation française durant la guerre de libération nationale algérienne opérant à partir de pistes en terre crue. Crédit photos : site para.forumactif.net	12
Image 5. Maroc. Aqueduc alimentant en eau les environs de la ville de Taroudant à partir de l'Anti-Atlas. Crédit photo : Auteure.....	13
Image 6. Irak. L'arche de Ctésiphon est située aujourd'hui à Salman, au sud de Bagdad. Crédit photo : antikforever.com	13
Image 7. En haut : Projet du village Gournia en Egypte construit en briques de boue avec des toits en voûte et en coupole. En bas : Voûtes nubiennes au Burkina Faso, dans le cadre du développement durable. Crédit photos : whc.unesco.org et wordpress.	14
Image 8. Maroc, Marrakech. Coupole en adobe et terre crue. Crédit photo : terrajanna.com.....	15
Image 9. Tadjikistan. Le site de Sarazm. Crédit photo : Tajikta.tj	17
Image 10. Mali. Mosquée de Djéné. Source : wikipédia	18
Image 11. La Grande Muraille de Chine, province de Gansu. Terre crue et gravier armés de roseaux. Source : Wikipédia.	19
Image 12. Ville de Shibam. Immeubles en briques de terre crue de plusieurs étages, séparés par de dédales de ruelles étroites. Crédit photo : Wikipédia	19
Image 13. Maroc, Anti-Atlas. Constructions en adobe et terre crue non loin de Taroudant. Crédit photo : Auteure.....	20
Image 14. Pérou. Huaca del Sol. Pyramide de cinq niveaux rappelant les ziggourats de Mésopotamie. Source : Wikipédia	21
Image 15. Espagne, Grenade. L'Alhambra, un joyau architectural témoignant du passage de la grande civilisation arabo-musulmane. Source : Wikipédia.....	21
Image 16. Australie. Habitat pour les bergers dans le Pilbara. Architecte : Luigi Rosselli. Crédit photo : CraTerre	22
Image 17. Terre et couleurs. Collection et crédit photos : Auteure.....	23

Image 18. L'adobe dans tous ses états. Had Chekala, Bouardia, wilaya de Relizane. Crédit photo : Auteure.....	29
Image 19. Relizane, Had Chekala, Bouardia. Exemples de moule d'adobe et adobe fabriqués par nos soins. Crédit photo : Auteure.....	31
Image 20. Mostaganem, Sour. La muraille almohade datant de plus de 700 ans. Crédit photo : Auteure.....	32
Image 21. Tlemcen, Mansourah. Remparts en pisé et minaret en pierre datant du XIV ^e siècle. Crédit photo : Auteure	33
Image 22. Remparts en pisé sur 7 km autour de la ville. Crédit photo : Auteure	35
Image 23. Bloc de terre compressée – BTC. Crédit photo : Auteure.	37
Image 24. Irak. De gauche vers la droite et de haut vers le bas : en dessin, en ruines, détails d'un mur de briques et à l'état actuel après restauration. Source : wikipédia.....	45
Image 25. Restes de bâtis en briques et béton sur les hauteurs du barrage de Lahlaf, wilaya de Relizane. Crédit photos : Auteure.	45
Image 26. En haut à gauche : Chan Chan au Pérou. (D. Gandreau) En haut à droite : Ksar d'Aït ben Haddou au Maroc (S. Moriset) En bas à gauche : Mur d'enceinte d'Itchan Kalaen Ouzbékistan. (T. Joffroy) En bas à droite : Muraille de Chine.	51
Image 27. Irak. Ziggourat d'Ur. En dessin, en ruine et après restauration.	52
Image 28. Tamis d'analyse granulométrique.	53
Image 29. Maroc, Taroudant. Des remparts entourent la ville sur 7 km. Source : Auteure	53
Image 30. Mali. La grande mosquée de Djenné. Source : Unesco.	54
Image 31. La grande muraille de Chine. Source : wikipédia.....	55
Image 32. Pérou. Vestiges de la cité de Chan Chan. Source : wikipédia.	56
Image 33. Iran. La citadelle de Bam. Source : Unesco.....	56
Image 34. Sour, Mostaganem. La muraille almohade. Un pisé qui dure depuis 700 ans. Source : Auteure.....	60
Image 35. Carte satellitaire de Sour Mostaganem. Source : Google Earth.....	61
Image 36. Détail de la muraille de Sour. Eroulement du soubassement, 24 janvier 2020. Crédit photo : Auteure.	63
Image 37. Sour, Mostaganem. Prédation d'un monument historique âgé de plus de 700 ans. Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.	63
Image 38. Sour, Mostaganem. La muraille almohade. Fissures, effondrement, éroulement, anfractuosités et éboulement. Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.	66
Image 39. Sour, Mostaganem. Carte satellitaire montrant la proximité de la muraille du littoral méditerranéen, source d'humidité. Source : Google Earth.....	66
Image 40. Différents types de fissuromètres. Source : internet	67
Image 41. Mostaganem, Sour. Fissures sur la muraille constituant un danger imminent.	

Janvier 2020. Crédit photos : Auteure	70
Image 42. Mostaganem, Sour. Fissures sur la muraille constituant un danger imminent.	
Janvier 2020. Crédit photos : Auteure	70
Image 43. Tiaret. Carte du prélèvement d'un échantillon de terre route d'Alger. Latitude :	
35,381006, longitude : 1,337613, altitude : 1291 m. Source : Google heart	73
Image 44. Carte prélèvement d'un échantillon de terre à Bouardia, commune Had Chekala,	
wilaya de Relizane. Latitude : 35,646113, longitude : 1,164520, altitude : 536 m. Source :	
Google heart.	73
Image 45. Tamis d'analyse granulométrique.	75
Image 46. Essai de sédimentométrie. Source : Researchgate.net	77
Image 47. Localisation du ksar Massine, Timimoun. Source: Google Earth.	82
Image 48. Localisation du El hadj Guelmane, Timimoun. Source: Google earth. Prélèvement d'un	
échantillon comporte 03 adobes à Adrar centre.....	82
Image 49. Echantillons d'adobe ancien, âge 50 ans environ, Timimoun. Source : Lamouri Hafsa.	83
Image 50. Echantillon d'adobe d'Adrar, âge 50 ans environ. Source : Lamouri Hafsa.	83
Image 51. Essai de compression pour une brique d'adobe. Source : Lamouri Hafsa.	85
Image 52. Moules cylindriques et cubiques utilisés pour le coulage des échantillons de notre	
composition d'argile prélevée de Timimoun. Source : Lamouri Hafsa.	86
Image 53. Moules cylindriques utilisés pour le coulage des échantillons de notre	
composition d'argile prélevée d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.	86
Image 54. Série de tamis pour la réalisation de l'essai de l'analyse granulométrique.	
Laboratoire de génie civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.	87
Image 55. Appareil de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité. Laboratoire de génie	
civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa).....	92
Image 56. Echantillons préparés pour la détermination des limites d'Atterberg. Laboratoire de génie	
civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.....	94
Image 57. Essai de compression, brique d'adobe. (Source : Lamouri Hafsa.	95
Image 58. Agitatrice électrique pour l'agitation des éprouvettes de l'essai ES. Laboratoire de génie	
civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.	95
Image 59. Spécimens pour les mortiers tests. Photo Edouard Kadjile	133
Image 60. Dispositif d'essai de la résistance à la traction par flexion.	133
Image 61. Dispositif d'essai de la résistance à la compression, Crédit photo Edouard Kadjile.	136

TABLE DES MATIERES

Remerciement	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Liste des abréviations	VII
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XI
Liste des photographies et images	XIV
Introduction générale.....	02
Sommaire	04
Problématique.....	05
Objectifs	08

CHAPITRE I

Diversités des constructions en terre à travers le temps

1. Construction en terre	10
1.1. Rappel historique.....	10
1.2. Ouvrages en terre	12
1.3. Universalité	15
2. Le matériau terre	22
2.1. Origine.....	23
2.2. Constitution du sol	23
2.3. Propriétés.....	24
3. Les techniques de construction en terre	25
3.1. Torchis (terre garnissante).....	26
3.2. Bauge (terre empilée ou cob)	27
3.3. Adobe (terre moulée).....	27
3.4. Le pisé	31
3.4.1. Compactage du pisé	34
3.4.2. Mise en œuvre de coffrages du pisé moderne	34
3.4.3. Matériaux constitutifs.....	35

3.4.4. Pathologie du vieillissement.....	35
3.5. Les briques de terre comprimée- BTC	36

CHAPITRE II

Le matériau terre et développement durable

1. Le développement durable, une nécessité	41
2. Avantages de la terre crue	41
2.1. La terre crue, une solution durable	41
2.2. La terre crue, un matériau disponible	42
2.3. La terre crue contre l'effet de serre	42
2.4. La terre crue, un matériau recyclable	43
2.5. Un matériau d'avenir	44
3. Béton et effet de serre	45
4. Evolution du concept de développement durable.....	47

CHAPITRE III

Restauration et réhabilitation des architectures de terre à travers le monde

1. Irak. La ziggourat d'Ur.....	51
2. Irak. La ziggourat d'Aqar Quf.....	52
3. Maroc : Les remparts de Taroudant	53
4. Mali : La Mosquée de Djenné	54
5. La Grande Muraille de Chine.....	54
6. Pérou : Site de Chan Chan.....	55
7. Iran : La citadelle de Bam	56

CHAPITRE IV

Présentation du programme expérimental

1. Etude et proposition de solutions pour la restauration de la muraille de Sour avec une analyse du matériau terre qui le constitue	58
1.1. Description	60
1.2. Identification des composants du pisé	61
1.2.1. Essai granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057.....	61
1.2.2. Essai VBS au bleu de méthylène.....	62

1.2.3. Teneur en carbone Caco NA 2789	62
1.2.4. Essai Proctor Normal Ou Modifié NFP 94-093	62
1.3. Pathologie du pisé	62
1.3.1. Facteurs internes.....	64
1.3.2. Facteurs externes	64
1.3.2.1. Pré-diagnostic.....	65
1.3.2.2. Diagnostic.....	66
1.3.2.2.1. Vérification de l'évolution des fissures.....	67
1.3.2.2.2. Causes des fissurations :	67
1.4. Propositions des recommandations de traitement	68
1.4.1. Les fissures	68
1.4.2. Réparation de la baie ouverte	68
1.4.3. Intervention sur la fondation	70
1.4.4. Enduit sur le mur	71
2-Expérimentation sur des échantillons prélevés en deux différents endroits	72
2.1. Sélection d'une terre crue locale	72
2.2. Analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057	74
2.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF P94-057	76
2.4. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03	78
2.5. Essai VBS au bleu de méthylène.....	79
2.5.1. Principe et objectif	79
2.5.2. Valeur au bleu VBS.....	80
2.6. Détermination de la teneur en carbone CaCO NA 278	81
3. Essais complémentaires.....	81
3.1. Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions à Timimoun	81
3.1.1 Sites des prélèvements	81
3.1.2. Caractéristiques des échantillons	82
3.1.2.1. Méthodes des essais d'identification.....	84
3.1.2.2. Principe de l'essai.....	84
3.1.2.3. La confection des briques.....	85
3.1.2.4. La composition des mélanges	85
3.1.2.5. Dimensions des moules utilisés	85
3.1.2.6. Dimensions et poids des adobes confectionnés	87
3.1.3 Analyse granulométrique par voie humide et sèche	87

3.1.3.1 Essai Proctor normal	90
3.1.3.1.1. But de l'essai	90
3.1.3.1.2. Principe de l'essai.....	90
3.1.3.2 Limites d'Atterberg	93
a. Indice de plasticité Ip	94
b. Indice de consistance Ic.....	94
c. Indice de liquidité Il	94
3.1.3.3 Equivalent de sable	94
3.1.3.3.1. But de l'essai	94
3.1.3.3.2. Principe de l'essai.....	94
3.2. Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité.....	97
3.2.1. Le choix des matériaux	97
3.2.2. Composition des mélanges à réaliser	97
3.2.3. Confection des éprouvettes	98
3.2.4. Durabilité et enduits	99
3.2.5. Performances mécaniques	99
3.2.5.1. Résistance à la traction par flexion.....	99
3.2. 5.2. Résistance à la compression	100
3.2.5.3. Résistance aux agressions chimiques	100
3.2. 5.4. Stabilité volumétrique	101

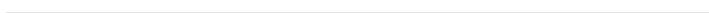
CHAPITRE V

Interprétation et exploitation des résultats

1. Muraille de Sour, Mostaganem. Essais et analyses des prélèvements	108
1.1. Résultats de l'essai granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057.....	108
1.2. Résultats d'essai VBS au bleu de méthylène	109
1.3. Résultats de teneur en carbone Caco NA 2789	110
1.4. Teneur en sulfates SO_4^{-2} NA -16002-5042.....	110
1.5. Résultats d'essai Proctor normal ou modifié NFP 94-093	110
2. Expérimentation sur des échantillons choisis en différents endroits.....	111
2.1. Résultats d'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057	112
2.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF P94-057	114
2.3. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03	117
2.4. Résultats de l'essai VBS au bleu de méthylène	120
2.5. Résultats de la teneur en carbone $CaCO_3$ NA 278	121

3. Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun.....	122
Résultats d'essais à la compression.....	123
3.1. Résultat d'analyse granulométrique par voie humide et sèche	124
3.2. Analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g.....	126
3.3. Résultats de l'essai Proctor normal Norme : NF P 94 -093	129
3.4.. Résultats des limites d'Atterberg	129
3.4.1. Limite de liquidité	129
3.4.2.. Limites de plasticité	130
3.5. Résultats d'équivalent de sable NF P18-598 Octobre 1991	131
4. Enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité.....	132
4.1. Performances mécaniques	133
4.1.1. Résistance à la traction par flexion	133
4.1.2. Résistance à la compression.....	134
4.1.3. Résistance aux agressions chimiques	137
4.2. Stabilité volumétrique	140
Conclusion générale	145
Bibliographie.....	147

Introduction générale



L'instinct de survie prédominant, l'être humain s'est érigé depuis la nuit des temps le droit de dompter la nature.

D'exploiter de ce qu'il a à sa portée, il sauta du de branchages et autres peaux au bâti en s'apercevant que sol mouillé sous ses pieds est malléable. La terre ! La terre crue qui fut, est et sera jusqu'à la fins des temps un matériau dont l'homme ne pourra s'en passer. Un matériau qui reviendra en force quand l'être humain sera convaincu qu'on ne badine pas les richesses naturelles qui s'amenuisent et la pollution de l'environnement.

En contemplant les vestiges de la muraille de Sour non loin de Mostaganem, durant notre séjour dans le cadre de la préparation de ce thème, l'on s'est aperçu de la perte de témoins vivants et imposants d'une histoire multimillénaire de ce grand et beau pays qu'est l'Algérie.

Des remparts érigés par les Almohades au XIIIème siècle (VIIème sicle hégirien) pour la défense de la ville, il n'en subsiste qu'une centaine de mètres. Des témoins qui se meurent.

A ce sujet, nous avons publié un article dans les colonnes d'un quotidien national. Réhabilitation, restauration et préservation sont devenus nos maîtres-mots et de là l'aventure nous a menés jusqu'aux fins fonds d'une Algérie profonde où la terre crue subsiste encore comme matériau et où nous avons pu répondre aux exigences de notre thème « **L'architecture de terre** ».

Différents prélèvements ont été passés au peigne fin par nos soins ainsi que par des experts, des gens au savoir-faire ancestral et un laboratoire spécialisé en plus d'une recherche bien documentée et dont les résultats sont là probants en vue d'être efficace concrètement dans un proche avenir quant à la restauration de la muraille de Sour et certainement d'autres vestiges patrimoniaux.

A travers cette étude, il a été constaté l'immensité de certaines œuvres humaines colossales en terre crue tombées en ruines ou simplement abîmées et qui renaissent encore plus imposantes que jamais. Ziggourats, Muraille de Chine, la mosquée de Djenné au Mali ou la muraille de Mansourah à Tlemcen... laissent penser que l'on peut toujours raviver les mémoires en usant de volonté, de savoir-faire et de respect à ceux qui nous ont précédés car comme disait Victor Hugo : « L'architecture est le grand livre de l'humanité, l'expression principale de l'homme à ses divers états de développement, soit comme force, soit comme intelligence. »

Sans nul doute, avec les techniques et moyens modernes, et l'avancée en matière de recherche concernant le matériau terre, arrivera-t-on à le banaliser pour un développement durable épargnant aux générations futures un péril certain.

Sur les sept sites algériens classés patrimoines de l'humanité, un seul se retrouve intéressant en matière d'architecture de terre. La vallée du M'zab. Là subsiste les mêmes techniques de construction qui traversent les âges avec les mêmes matériaux. Mais qu'attend-on pour promouvoir les méthodes et procédés séculaires ?

De bâtir en terre crue l'on se retrouve avec l'usure du temps, des caprices de la nature et la prédation humaine à rebâtir quand besoin est et aussi pour l'histoire, à restaurer et préserver. Les techniques et moyens modernes, l'évolution en matière de recherches en urbanisme, génie civil, architecture et tout ce qui est science et savoir ont fait que tout est trié, quantifié, amélioré quant au matériau terre crue, et élaboré selon des méthodes et procédés qui font durer l'œuvre dans le temps. Et c'est ainsi que l'on recourt de par le monde à l'étude de l'élément-clé qui prend forme et s'érige. Et là seront cernées les exigences de notre thème.

Notre travail, pour plus de commodités a été axé sur **l'expérimentation et ses résultats** qui débute par un rappel sur la restauration en général et le développement durable dans les trois premiers chapitres et sur **les interprétations des résultats** en dernier ressort tout en tenant compte de ces récoltes dans le but de concrétiser la sauvegarde de la muraille de Sour, un patrimoine historique inestimable. Il a été aussi et surtout question de recherche en matière de qualité des matériaux entrant dans la restauration et la préservation, soit « **les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du matériau terre dans la réhabilitation et la restauration du bâti ancien construit en terre** » en nous basant sur une riche documentation en plus du terrain.

A notre humble avis et comme nous l'avons déjà publié, « dans le domaine de l'architecture de terre, deux tendances croisent les fers, la recherche de nouveaux produits pouvant répondre aux exigences du développement durable en vue d'être industrialisés et commercialisés, et le domaine artisanal qui défend la terre comme un moyen de construction ancestral. »¹

Enfin verra-t-on un jour un intérêt particulier au patrimoine en terre crue quand on sait que des centaines de ksour sont désertés dans le sud algérien au profit du coûteux béton ?

¹ Mostefai Ouahiba, « Muraille de Sour à Mostaganem : Retour à la construction de terre, quotidien national algérien Réflexion du 8 février 2020.

Sommaire :

Si dans certaines contrées, l'on est proche de la nature dans son mode de vie, dans d'autres l'éloignement est criard.

Ainsi, la crise mondiale de l'habitat et le gaspillage des ressources des générations à venir nous interpellent et sur ce, l'homme s'est éveillé et voudrait développer l'architecture de terre en améliorant les techniques de construction et développer la recherche en matière de terre crue pour protéger l'environnement en établissant également des normes et des règles.

Cette étude, un thème général, contribue à revaloriser la restauration et la préservation du bâti en terre crue dans le cadre de recherches sur la construction en terre tout en essayant d'améliorer les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du matériau terre dans la réhabilitation et la restauration du bâti ancien construit en terre mais aussi dans le moderne où le gaspillage est moindre et parfois même nul.

Problématique :

Le vécu quotidien de l'algérien en ville comme dans les campagnes, au nord comme au sud et à l'est comme l'ouest, est gorgé de chantiers à ne pas en finir. Du témoignage de gens parvenus de pays développés, l'Algérie même est un grand chantier. Et il en est ainsi pour tout pays en quête de reconstruction après son indépendance et les exemples ne manquent pas.

L'algérien bâtit, érige, creuse, rénove, restaure à tout bout de champ. Dans le règlementaire avec un grand savoir-faire comme dans l'improvisé et le circonstanciel.

Le béton a conquis les plaines et ravage les terres agricoles. « Conséquence : l'Algérie aurait perdu un peu plus de 150 000 hectares de terre détournés de leur vocation agricole depuis son Indépendance », Rachid Benaïssa, alors ministre de l'Agriculture en 2014.

Si le mot « riad » a conquis presque toutes les langues du monde c'est qu'il y a matière à réfléchir. L'originalité de cette infrastructure reste la terre crue comme matériau. Et il en est de même pour les ksour. Deux modes d'habitat qui répondent au rapprochement homme-terre.

Deux appâts qui ne cesseront jamais d'attirer les touristes en quête d'exotisme aussi. Economie, écologie, respect de l'environnement, égard envers la nature sont les crédos de la construction en terre. Les traditions n'excluent aucunement la modernité quant à l'emploi du matériau terre.

Les différentes crises engendrées pendant des décennies en matière de matériaux de construction n'ont pas réveillé assez les consciences pour un retour aux sources. Ciment, briques cuites, parpaings, bois, gravats, rond à béton et même le sable dans un pays au vaste désert d'ergs se retrouvent en pénurie.

A combien revient la tonne de ciment, élément inutile chez bien des communautés ? Et le rond à béton ? La facture de gaz et d'électricité en plus du coût des usines plus polluantes que jamais et sources de CO₂ responsable de l'effet de serre de la planète. On estime dans le monde à un milliard de tonnes la quantité de ce gaz rejeté annuellement à travers notre globe et responsable à 75% du réchauffement climatique.

L'ambiguïté dans un pays ensoleillé presque à longueur d'année où la terre est à portée de la main et l'approvisionnement en eau si peu coûteux réside en ce manque de réflexion, d'initiative, de détermination et de volonté encourageant un retour à la source terre.

En Algérie, le retour à la construction en terre pour préserver l'identité architecturale est entamé timidement. L'objectif recherché par le Centre algérien du patrimoine culturel bâti en terre (CAP-Terre), à titre d'exemple, reste la tentative de s'imposer sur le terrain. « Lors d'une rencontre en marge de la manifestation '' Portes ouvertes sur le patrimoine bâti en

terre'' organisée à la maison de la culture de Skikda, M. Abdelkader Naga Benmohamed a plaidé pour la "réappropriation" de ce mode de construction aux avantages multiples dont une économie certaine de coûts, un aspect esthétique réel et un caractère ami de la santé de l'homme car ne recourant qu'à des matériaux entièrement naturels. » « De son côté, Alaa-Eddine Belouahem, architecte au CAP-Terre, a noté que le centre œuvre en faveur de la sensibilisation à la préservation des constructions en terre et à montrer qu'il est possible de réaliser entièrement en terre des constructions modernes disposant de toutes les commodités nouvelles tout en étant compatibles avec l'environnement et économes en énergie car offrant une très faible déperdition thermique. »¹.

Qui, quand et comment ? Trois questionnements d'une importance capitale s'imposent.

Favoriser l'architecture et l'accompagner de textes juridiques adéquats doublés de la formation professionnelle, tout en l'imposant dans les instituts et universités comme matière d'enseignement et de recherche, ne sera que salutaire et bénéfique pour une population qui subit le chômage, la crise de logement, la pauvreté et maints fléaux sociaux.

Construire intelligent, moins cher, commode et écologique en terre est à la portée de tout être doué de raison.

Selon, le célèbre CRATerre qui tient une chaire au niveau de l'Unesco, basé en France, à l'heure actuelle de normalisation, seuls les pays industrialisés ont mis au point des essais sur les performances minimales de l'adobe et le bloc de terre comprimée stabilisée.

Ainsi nous devons œuvrer à la vulgarisation du matériau terre dans un cadre légal aux critères définis des produits manufacturés et des bâtis afin de pallier au vide juridique et scientifique en architecture, source d'insécurité en matière de construction.

La promotion de l'architecture de terre tarde à s'imposer, et des femmes et des hommes de bonne volonté cherchent, expérimentent et encouragent tant qu'ils peuvent pour faire avancer des moyens et procédés adaptés même aux crises économiques et financières et l'éveil n'a pas encore eu lieu. D'ailleurs l'outil législatif est-il spécifique et conséquent ?

En plus bref, nous posons notre problématique comme suit :

- 1- Favoriser l'architecture de terre et l'accompagner de textes juridiques adéquats ;
- 2- Généraliser l'apprentissage du bâti en terre crue à travers formation professionnelle ;
- 3- Démystifier le matériau terre crue qui n'est pas celui du pauvre et que jadis des palais impériaux en ce noble matériau ne manquaient pas d'être des convoitises ;
- 4- Généraliser le matériau terre avec des critères définis des produits manufacturés ;

¹ APS, 13 mai 2019

Introduction générale :

- 5- Pallier les vides juridiques et scientifique en architecture en général, source d'insécurité en matière de construction ;
- 6- Promouvoir l'architecture de terre qui tarde à s'imposer ;
- 7- Réapprendre ou reconvertir à la terre crue l'architecte et l'ingénieur, formés à concevoir des chefs-d'œuvre à la pierre, la brique et le béton ;
- 8- Inculquer à l'individu le respect et la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable en se tournant vers le matériau terre ;
- 9- Ouvrir le champ aux chercheurs de tous bords en vue d'atteindre une architecture de terre viable en laquelle l'individu placera toute sa confiance ;
- 10- L'architecture de terre n'étant pas une spécialité dans nos centres, instituts et universités, penser à aller vers elle là où elle est culture, savoir-faire, us, coutumes et traditions.

Enfin mémoire vivante incrustée dans une histoire multimillénaire, l'architecture en terre crue multiséculaire à travers toute l'Algérie, devrait s'inscrire dans le patrimoine architectural comme une prévalence et favoriser la recherche concernant les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du matériau terre dans la réhabilitation ainsi que la restauration du bâti ancien construit en terre.

Objectifs :

Des voix se sont élevées, s'élèvent et s'élèveront encore pour maintes raisons vu l'état des lieux du patrimoine culturel en général et architectural en particulier dans un pays à l'histoire multimillénaire. L'objectif de cette étude n'est autre que ce qui été abordé brièvement au début dans l'introduction et la problématique. « Où en sommes-nous avec notre patrimoine, nos traditions et notre savoir-faire multiséculaire en matière d'architecture de terre ? »

Alors que nous foulons le sol sous notre si brillant soleil sur d'immenses nappes d'eau, un matériau gratuit à mouiller, mouler et laisser sécher au soleil nous échappe. La vie étant quête de bien-être avec un moindre coût économique et financier, il serait souhaitable et urgent de revenir aux traditions tout en développant la recherche en matière d'utilisation du matériau terre.

Nous avons jugé utile de procéder à l'étude de terres locales au niveau de laboratoires qualifiés à des fins architecturales. L'étude, en notre présence et sous notre direction, a été bénéfique.

Afin d'être rentable et atteindre notre objectif qui est la vulgarisation de l'architecture de terre ainsi que la réhabilitation et la restauration du bâti ancien construit en terre crue, nous avons organisé notre tâche autour de trois axes tendant vers les objectifs suivants :

1. Vérification des échantillons de terre prélevés quant à leur aptitude à répondre aux exigences techniques et les stabiliser pour améliorer leurs caractéristiques pour les mettre à la disposition des bâtisseurs ambitionnant de construire en terre avec une normalisation et un savoir-faire dignes pour les satisfaire ;
2. Recherche sur le terrain en vue d'exploration et d'investigations précises concernant le matériau terre, des entretiens, des visites de sites et de chantiers, un relevé de traditions englobant le savoir-faire, l'outillage et les techniques ;
3. Etude sur le terrain en plusieurs phases d'un cas concret de la technique en pisé, soit la Muraille almohade de Sour dans la wilaya de Mostaganem avec tout ce qui s'en suit comme prélèvements, étude de la pathologie du pisé, proposition des solutions pour les différents endommagements dont les fissures apparentes à des fins précises qui ne sont autres que la connaissance de l'architecture en pisé et avoir un aperçu sur le matériau le constituant en vue de la restauration de l'ouvrage patrimonial.



Chapitre –I–

Diversité des constructions en terre à travers le temps

Tout au long de son histoire, souvent mouvementée, l'être humain s'est adapté aux difficiles conditions naturelles que lui imposent la nature de par ses différents paysages et ses caprices climatiques, géologiques... Le besoin et la survie ont fait qu'il apprenne à respecter la nature et faire bon usage des ressources qu'elle lui offre. La terre crue en est ce grand bienfait.

Mélange de sable, d'argile, de silts, de graviers et éventuellement d'autres matières en moindre quantités généralement organiques ainsi que des oxydes et des sels, la terre crue est un élément naturel composite complet qui se targue d'être le matériau naturel par excellence utilisé en construction.

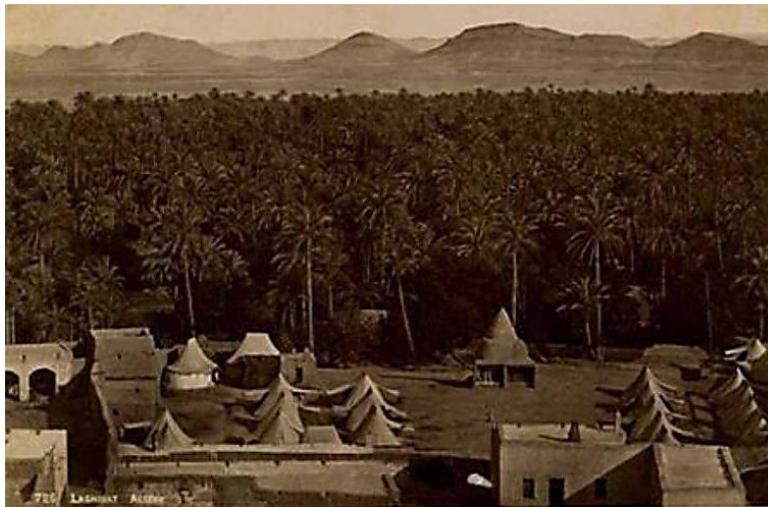


Image 1. Algérie. Laghouat. Mariage féérique d'éléments de la nature au pays du palmier et de la terre crue avant que n'apparut le béton dévastateur.

La qualité exceptionnelle d'isolation phonique du matériau terre en ce monde du double-vitrage est incontestable, ajoutons l'atténuation du bruit et de la résonance, mais aussi une grande perméabilité aux champs électromagnétiques. L'inertie thermique de la terre crue utilisée fait que quelles que soient les conditions climatiques, l'être humain a su en trouver la technique adaptée pour s'ériger un abri confortable en même temps que d'autres bâtis dont des entrepôts d'emménagement, d'entreposage ou de remisage, des abris d'animaux, des ateliers, des retenues d'eau et des barrages, des fortifications, des remparts et murailles...



Image. 2 : En orange, les régions de répartition des constructions en terre crue. Les points indiquent les principaux sites architecturaux inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco. Source : CRAterre

Ghardaïa en Algérie et ses habitations entremêlées, les maisons ruches de Harran en Turquie, le village Pueblo de Taos au Nouveau Mexique ou les huttes du Sahel nous paraissent pittoresques et même exotiques. Et pourtant, il fut un temps où elles faisaient partie du paysage sans attirer l'attention.

1. Les constructions en terre :

1.1 Rappel historique

Comme chasser un gibier qui se pointe aux alentours ou pêcher au bord de la rivière la plus proche, cueillir les fruits de l'arbre qui l'abrite ou ramasser des escargots, l'homme primitif s'est penché vers le sol et s'est aperçu qu'un matériau magique est à sa portée. La terre crue !

Après les feuillages, les peaux d'animaux et les cavernes, l'être humain fixe son choix définitivement sur le bâti après avoir découvert que la terre qu'il foule, mélangée à de l'eau, devient malléable et peut servir à la confection d'un matériau de construction ou comme alliage dans bon nombre d'autres procédés du bâti dont le torchis, la brique, l'adobe, le pisé ou encore la bauge tout simplement, la terre crue empilée, mélangée à de la paille, du foin, de la laine ou autre.

L'Égypte, la Mésopotamie, la Perse, l'Assyrie, l'Empire Inca qui s'étendait sur le Pérou, la Bolivie, l'Équateur et une partie de la Colombie, de l'Argentine et du Chili, et d'autres nations encore connurent de grandes civilisations et ces civilisations ne peuvent se dissocier du bâti en terre.

Dans son approche contemporaine sur la construction en terre « Histoire de la construction en terre »¹, Christophe Delbecq nous avance la chronologie suivante :

- 11 000 ans: premières traces de la construction en terre en Amérique du sud ;
- 10 000 ans: en Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main ;
- 8 500 ans: apparition de la brique de terre en Turquie ;
- 8 000 ans: apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale – recouvrement de clayonnage ;
- 5 000 ans: apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.

A ce titre, hormis les ziggourats d'Irak, un chef-d'œuvre trône encore non loin de l'actuel Bagdad. Le Taq-e Kisra ou arc de Ctésiphon, considéré comme le symbole de l'Empire Perse durant la dynastie sassanide (les Sassanides- dynastie perse ayant régné sur le monde iranien de 224 jusqu'à la Conquête arabo-musulmane, en 651). Avec ses 37 mètres de haut, 27 mètres de large et 50 mètres de long, il atteste du savoir-faire de l'époque. Construit en 540, il défie encore le temps avec près de 1500 ans d'existence.

Entre Ctésiphon, les ksour du sud algérien et le Mali, la différence est minime quant aux moyens, les techniques et les matériaux utilisés. La grande mosquée de Djenné, considérée comme le plus grand édifice du monde construit en adobe, témoigne comme Timimoun, Témacine près de Touggourt ou Ghardaïa en Algérie.

Les premiers avantages du recours au matériau « terre » restent sans conteste sa proximité et sa disponibilité donc un coût peu élevé. Une pelle, une pioche, de la terre, de l'eau suffisent pour ériger des chefs-d'œuvre. En faisant appel à des banches, des moules pour adobes... la tâche devient moins rude.

Si la construction de terre crue se perpétue encore c'est que certains connaisseurs y ont trouvé commodité, confort, économie en tous genres, un bienfait et sûrement beaucoup d'intérêts pour devenir une préférence chez certains.

De ce fait, nous constatons que tout près de nous, les ancestrales murailles de Mansourah et Sour, respectivement dans les environs de Mostaganem et Tlemcen, ainsi que les constructions plus récentes de Timimoun, l'oasis rouge, et autres endroits sont des témoins indéfectibles de la perpétuité des procédés d'un bâti qui n'a rien perdu de sa beauté, son efficacité et sa splendeur.

¹ Approche contemporaine de la construction en terre, Histoire de la construction en terre – C. Delbecq – 21 octobre 2011

1.2 Les ouvrages en terre :

La terre n'intervient pas seulement dans la construction des bâtiments individuels et collectifs. Dans l'artisanat comme dans l'agroalimentaire, ruchers et entrepôts, fours et étagères, remparts et miradors... voient encore le jour, nécessité et intelligence obligent. Murs, escaliers, cheminées et claustres en terre crue rajoutent confort, beauté et utilité à la vie de l'être.



Image 3. Maroc, Bouchenine sur les hauteurs de l'Anti-Atlas marocain.
Route, habitation, toiture en terre crue. Crédit Photo : Auteure

Toitures en tous genres dont plates et inclinées, à simple ou double-versant, ainsi que voûtes, coupoles et planchers témoignent de la grande diversité de l'emploi du matériau terre.



Image 4. Aviation française durant la guerre de libération nationale algérienne opérant à partir de pistes en terre crue. Crédit photos : site para.forumactif.net

Ponts et aqueducs. A Cherchell comme dans d'autres contrées du Maghreb, dès l'entrée nord-est de la ville nous accueille un majestueux aqueduc qui desservait les habitants de l'ancienne Césarée en eau. Même vestiges au Maroc.



Image 5. Maroc. Aqueduc alimentant en eau les environs de la ville de Taroudant à partir de l'Anti-Atlas. Crédit photo : Auteure.

Routes, parkings et garages sont parsemés çà et là dans les pays où la conquête du terrain est encore un sujet d'actualité et les USA, l'Australie, le Brésil en sont de bons exemples.

Enfin il serait utile d'aborder deux « façons de faire » dans l'art majestueux de l'architecture et l'ingénierie du civil, la voûte et la coupole que nous évitons de traiter en tant que techniques étant données les divergences quant à les qualifier de techniques..

Les coupoles et voûtes :

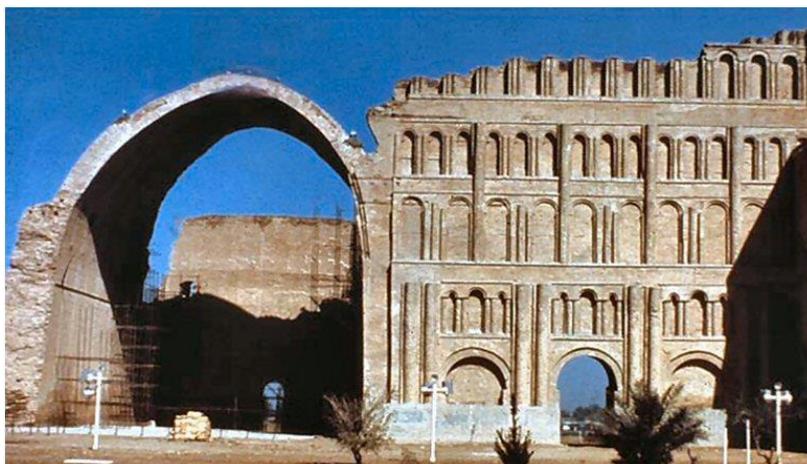


Image. 6. Irak. L'arche de Ctésiphon est située aujourd'hui à Salman, au sud de Bagdad. Crédit photo : antikforever.com

Les coupoles sont inspirées de techniques d'origine persane et égyptienne. Leur construction, selon des techniques ancestrales, ne nécessite aucun coffrage et seulement avec de la terre, de l'eau et du savoir-faire. La plus grande voûte connue se trouve à Ctésiphon en Irak, sa portée est de 27 m et sa hauteur de 38 autres.

La courbe géométrique idéale est alors celle de la chaînette, qui est l'arc que prend naturellement une chaîne soutenue par ses extrémités. Le rapport hauteur/portée qui détermine le volume de la voûte ne doit pas être trop faible pour ne pas soumettre le sol de la fondation à des poussées horizontales.

La méthode la plus simple pour élever une voûte est d'utiliser un cintre démontable qui supportera la maçonnerie pendant la construction. Ce cintre est déplacé au fur et à mesure que la voûte avance.

La construction de voûtes sans coffrage telles que les voûtes nubiennes est un procédé architectural antique, venu du Haut-Nil, et un succès singulier. L'architecte Hassan Fathy a appliqué cette technique à son projet du village Gourni en Egypte, construit en briques de boue avec des toits en voûtes et en coupoles.

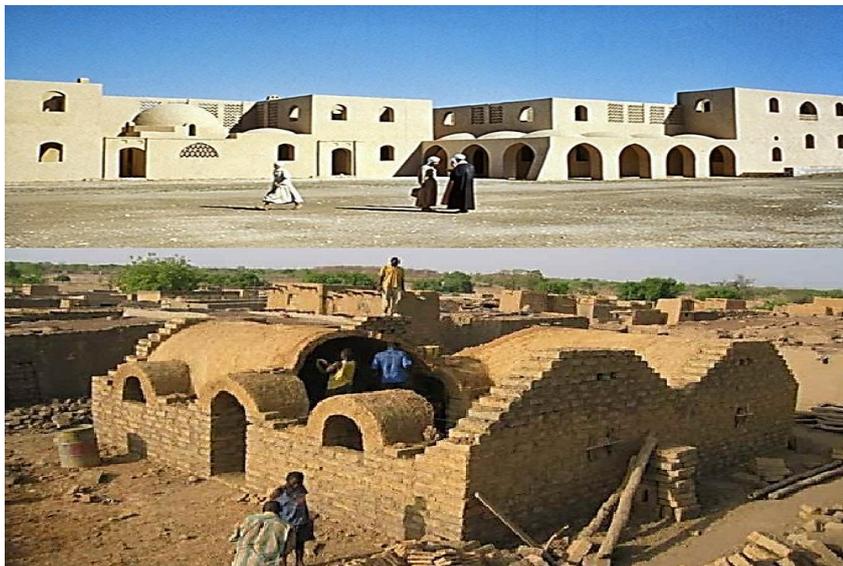


Image 7. En haut : Projet du village Gourni en Egypte construit en briques de boue avec des toits en voûte et en coupole. En bas : Voûtes nubiennes au Burkina Faso, dans le cadre du développement durable. Crédit photos : whc.unesco.org et wordpress

Dans le cadre du développement durable, 200 villages du Burkina Faso sont déjà dotés de plusieurs centaines de toits en terre. L'association la Voûte Nubienne (AVN), implantée

depuis aujourd'hui 23 ans au Burkina Faso, a remis au goût du jour. Avec le programme « *Pour des toits de terre au Sahel* », l'association contribue à l'amélioration de la qualité de vie des populations d'Afrique subsaharienne.

Une coupole est une voûte dont la forme se rapproche plus au moins de la demi-sphère, de profil semi-circulaire, elliptique (forme variable selon le volume généré par la révolution d'un arc autour d'un axe) ou polygonal, parfois exhaussée par un tambour. La calotte est la partie supérieure de la coupole. La toiture de cette voûte est appelé dôme.

Alors que les sections horizontales des voûtes sont toutes rectangulaires, celles des coupoles sont circulaires. Elles s'adaptent sur des espaces ronds.

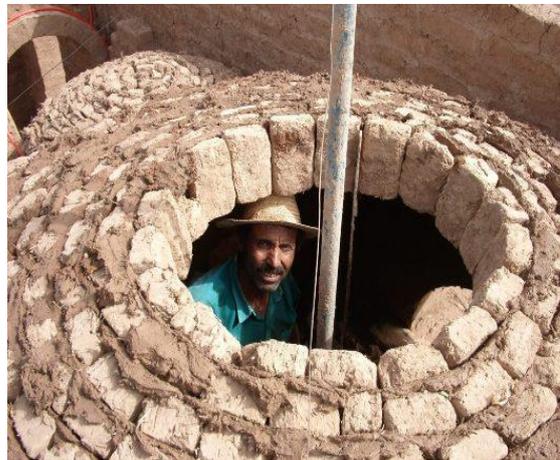


Image 8. Maroc, Marrakech.. Coupole en adobe et terre crue. Crédit photo : terrajanna.com

1.3 Universalité :

Le « développement anarchique » de l'humanité, les guerres, les catastrophes naturelles, les crises économiques et financières et autres aléas ont façonné un être qui oublie sa nature et s'égaré dans les méandres d'un faux bien-être.

S'il y a bien un patrimoine commun à l'humanité qui témoigne la symbiose sur notre planète, ce serait sûrement le patrimoine architectural de terre crue qui a conquis toute la planète avant même la roue.

Témoins de différentes civilisations et cultures dont certaines disparues à jamais, des joyaux architecturaux en terre se dressent encore çà et là narguant le temps et les bouleversements qu'il traverse en calamités, désastres et tragédies causeurs de ravages.

La flambée des coûts des matériaux de construction, les poussées démographiques, les crises économiques devraient nous donner à réfléchir sur un passé « terre crue » qui traverse le temps et le marque encore laissant une empreinte indélébile sur la planète.

Avec la participation de l'Unesco, il a été réalisé en 2004 un documentaire sur la terre crue par le français François Le Baryon intitulé « Les révolutions de la terre » et c'est dire l'intérêt de la communauté internationale au bienfait « terre crue ».

« Le documentaire s'intéresse à l'usage de la terre crue comme matériau de construction pendant des millénaires. Il a été tourné en Egypte, en Syrie, au Pérou, en Birmanie, au Mali et sur l'île de Mayotte. Il cherche à montrer comment, en ce début de XXI^e siècle, la terre crue devient le matériau d'avenir de la construction pour les pays pauvres comme pour les pays riches. En effet, près de deux milliards de personnes vivent dans un habitat en terre crue. Elle a servi à construire les premières villes connues, et permet toutes les formes architecturales désirées. Elle est séchée uniquement par le soleil qui la rend aussi dure que du béton. Quasiment gratuite, elle est puisée sur le lieu même de la construction, et ne nécessite ni cuisson ni transport. Totalement naturelle, elle est parfaitement respectueuse de l'environnement et retient très bien la fraîcheur en été et la chaleur en hiver. La terre crue reste le matériau le plus disponible, le plus accessible et le plus économique. La disponibilité de ce matériau de construction et la simplicité de son emploi correspondent parfaitement aux nécessités des pays les plus démunis (on estime à 1,1 milliard le nombre de mal logés dans le monde). ».¹

A travers le monde, l'on retrouve encore des bâtis en terre crue allant de la plus modeste demeure au luxueux palais. Et sur tous les continents. Certains sont classés au patrimoine mondial de l'humanité.

Parmi la multitude de sites où la terre crue fut ou est encore reine, nous avons trouvé utile d'en citer quelques uns dans le cadre de l'universalité du noble matériau.

Nous ne pouvons citer toutes les réalisations en terre à travers les cinq continents. Nous nous contenterons de quelques sites pour marquer l'universalité à partir d'une liste non exhaustive et sans aucun critère de célébrité ou de tendance.

Tadjikistan : Le site de Sarazm se situe au Tadjikistan, à l'ouest de la ville de Pendjikent, proche de la frontière avec l'Ouzbékistan et de la ville de Samarkand, s'étend sur une surface de 50 hectares dans la vallée du Zeravchan, à 910 mètres d'altitude. Datant de la période située entre les IV^e et III^e millénaires avant J.-C., les vestiges d'architecture

¹ Unesco, whc.unesco, en français, activité 813.

comprennent des logements, des ateliers, des espaces de stockage et des édifices monumentaux. À l'exception de quelques soubassements en galets, ils sont entièrement construits en terre, selon deux techniques principales : la brique de terre crue (terre moulée dans un cadre et séchée au soleil) et la bauge (terre façonnée à la main). Ces techniques se retrouvent dans l'architecture traditionnelle de la région de Pendjikent et sont encore largement utilisées au Tadjikistan où, bien que plus de 90 % du territoire soit montagneux, la construction en terre prédomine.

Le 5500^{ème} anniversaire de la ville de Sarazm a été célébré le samedi 12 septembre 2020.

Le 21 septembre 2001, par un décret du gouvernement du Tadjikistan, l'ancienne ville de Sarazm devient « réserve historique et archéologique. »

Le 31 juillet 2010, sur proposition du Tadjikistan, Sarazm a été inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco.



Image 9. Tadjikistan. Le site de Sarazm. Crédit photo : Tajikta.tj

Mali : Tombouctou, Mali. Mille ans d'existence. Un bien culturel en terre inestimable. Mosquées et mausolées. Une occupation de la ville en 2012 se solda par la destruction des



Image 10. Mali. Mosquée de Djenné. Source : wikipédia

monuments historiques, biens de l'humanité et par un effacement de la mémoire du passé historique de Tombouctou.

La particularité du rapport au temps dans cette région du monde implique une transmission des savoirs spécifiques dont l'architecture de terre se révèle être le médium, le support, le « *palimpseste* » (Corboz, 2001). Au total douze mausolées sur seize et deux mosquées sur les trois qui composent le bien culturel Tombouctou sont à ce jour endommagés ou totalement détruits. Mais la terre crue résiste et renaitra de ses ruines.

Toujours au Mali, la grande mosquée de Djenné datant de 1907, reste l'un des plus grands édifices en terre crue au monde.

Chine : En Chine, la grande Muraille comporte des tronçons longs de plusieurs kilomètres construits en terre crue là où la pierre faisait défaut.

Terre crue et gravier armé de roseaux furent remplacés sous la dynastie Ming (1368-1644) par des briques de terre cuite maçonnées à la chaux mêlée de bouillie de riz.

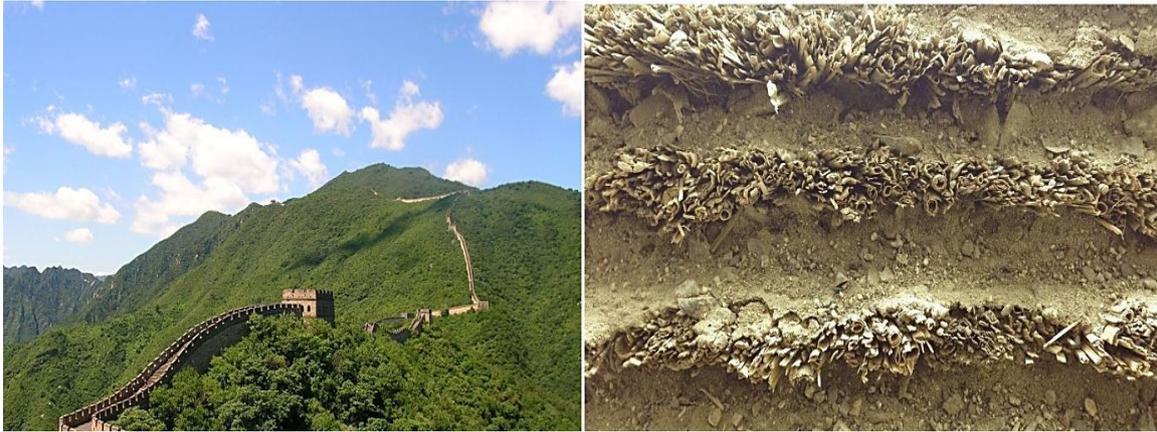


Image 11. La Grande Muraille de Chine, province de Gansu.

Terre crue et gravier armés de roseaux. Source : wikipédia.

Yémen : Le Yémen se distingue dans le tourisme mondial avec la ville de Shibām, « première cité verticale » dans le monde avec 30 mètres de haut pour certains édifices. Et là, l'adobe est roi depuis le XVIème siècle.



Image 12 : Ville de Shibām. Immeubles en briques de terre crue de plusieurs étages, séparés par de dédales de ruelles étroites. Source : Wikipédia

Maroc : A Rabat, capitale du Maroc, comme dans les autres villes impériales de Marrakech, Fès et Meknès, les médinas s'agitent derrière des remparts défiant encore le temps. De prodigieuses forteresses en terre, pisé et adobes, sont classées au patrimoine de l'humanité.

Et le Maroc continue son aventure avec la terre crue que l'on remarque à longueur d'année sur les restaurations de son patrimoine en muraille, remparts, aqueducs et autres vestiges témoins de faste.



Image 13 : Maroc, Anti-Atlas. Constructions en adobe et terre crue non loin de Taroudant. Crédit photo : Auteure.

Pérou. Chan Chan, au Pérou est considérée comme la ville d'adobe la plus grande d'Amérique. Sa citadelle (1200-1480) appartenant à la culture chimu tient toujours debout. Les chefs habitaient des palais d'adobe.

La Huaca del Sol, une pyramide comptant cinq niveaux rappelle bien les ziggourats de Mésopotamie avec une base rectangulaire de 228 mètres sur 136 autres et comportant trois étages. La hauteur est de 41 mètres. Selon les estimations, pas moins de 143 millions de briques d'adobe furent nécessaires pour sa construction et elle est considérée comme le plus grand édifice connu sur le continent américain construit en adobe.



Image 14. Pérou. Huaca del Sol. Pyramide de cinq niveaux rappelant les ziggourats de Mésopotamie. Source : wikipédia

Espagne. En Europe, en Espagne plus précisément, l'Alhambra se distingue par ses remparts édifiés en pisé au XIII^e siècle. Mais pas seulement. Un joyau architectural témoignant du passage de la grande civilisation arabo-musulmane. « L'Alhambra est un must à Grenade, avançait un anonyme. »



Image 15. Espagne, Grenade. L'Alhambra, un joyau architectural témoignant du passage de la grande civilisation arabo-musulmane. Source : wikipédia

Australie. En Océanie, l’Australie, nouvellement conquise, n’a connu ses premiers bâtis en terre qu’avec l’arrivée des colons. Aujourd’hui, elle s’y met à la terre crue et après maintes expériences dans un premier temps elle a adopté le pisé et l’adobe. « L’Australie est aujourd’hui le pays qui construit le plus au monde en utilisant ces techniques. Dans certaines régions, 20 % du parc immobilier sont en pisé. » ¹



Image 16. Australie. Habitat pour bergers, le Pilbara.

Architecte : Luigi Rosselli. Crédit photo : CraTerre

2. Le matériau terre :

« La terre représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques. La terre est à la fois le support et le produit du vivant. L’altération de la roche mère peut être d’ordre mécanique et/ou chimique sous l’action des phénomènes climatiques et des organismes vivants. » ²

Aujourd’hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement à cause de ses qualités constructives indéniables, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. La terre contribue ainsi pleinement à une réelle démarche de développement durable (AsTerre, 2014).

Avantages constructifs :

- Elle présente une masse volumique élevée, ce qui lui confère de précieuses qualités d’inertie thermique pour le stockage de la chaleur et la régulation des changements de températures entre jour et nuit ;
- C’est un bon régulateur de l’humidité ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d’eau ;
- Elle possède de bonnes qualités phoniques (absorption) ;

¹ Terre crue, wikipédia.

² Approche contemporaine de la construction en terre, Histoire de la construction en terre – C. Delbecque – 21 octobre 2011

- La terre résiste fort bien dans le temps si elle est protégée de la pluie ;
- Elle résiste bien au feu.



Image 17. Terre et couleurs. Collection et crédit photos : Auteure.

2.1 Origine :

Jour après jour et durant des millions d'années, le sol a mué suivant le pouvoir de la capricieuse nature sur les roches-mères. Dégradation mécanique de la roche-mère, transformations minéralogiques associées à des circulations d'eaux dans le réseau perméable, induisant la dissolution des minéraux solubles, l'oxydation des minéraux riches en fer, vents, pluies, gel-dégel et soleil en plus de bouleversements tels les secousses telluriques, inondations, érosions diverses sont les principales armes de la métamorphose de cette couche minérale superficielle de la croûte terrestre.

Tout simplement, l'altération de la roche-mère nous a gratifiés généreusement d'un sol qui, à son tour nous dote de terre crue, l'élément le plus usité comme matériau de construction.

Le processus de pédogénèse consiste en un morcèlement des roches-mères en corpuscules de différentes tailles que l'on nomme sédiments s'agglutinant et formant le sol, finissent par se transformer en roche, phénomène appelé diagénèse ou diagenèse après altérations dues au voyage et au vent.

2.2 Constitution du sol :

Les matériaux granulaires constituant le sol sont toujours poreux et se résumant aux graviers, silts, sables et argiles, contiennent des « vides » entre les grains. Ces « vides » sont généralement comblés par la présence de fluides et dans le cas de la terre, c'est de l'eau et de l'air qui se trouvent entre les grains. Ce sont ces trois éléments – grains, air et eau- qui nous permettent de bâtir et ériger des merveilles.

« Ces maisons de terre seront un jour abandonnées par leurs habitants. La terre retournera alors à son état initial et les grains feront à nouveau partie du cycle géologique. » (Romain Anger et Laetitia Fontaine)¹.

Enfin retenons que la terre est composée de matériaux de granulométrie différente en proportion plus ou moins variables :

- Les argiles: Particules inférieures à 2 micromètres servant de liant entre les éléments plus grossiers ;
- Les limons: Particules comprises entre 2 et 50 micromètres ;
- Les sables: Particules comprises entre 0,5 et 2 mm ;
- Les graviers: Particules comprises entre 2 et 10 mm.

Et l'homme, être doué d'intelligence, saura combiner les particules et en faire un chef-d'œuvre architectural utile et nécessaire.

2.3. Propriétés :

La terre crue a l'avantage d'être moins polluante, moins coûteuse en énergie et à portée de la main. Elle est moins endurante à l'eau certes et à l'humidité en général, mais bien utilisée, entretenue et préservée, elle tient le coup et prouve en est ces remparts autour des villes et villages des temps révolus. Les phénomènes de régulation de la température et de l'humidité sont reconnus. Murs, planchers ou toits, pisés, adobes ou briques de terre comprimées, la terre crue gagne du terrain.

¹ Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Romain Anger et Laetitia Fontaine, Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie.

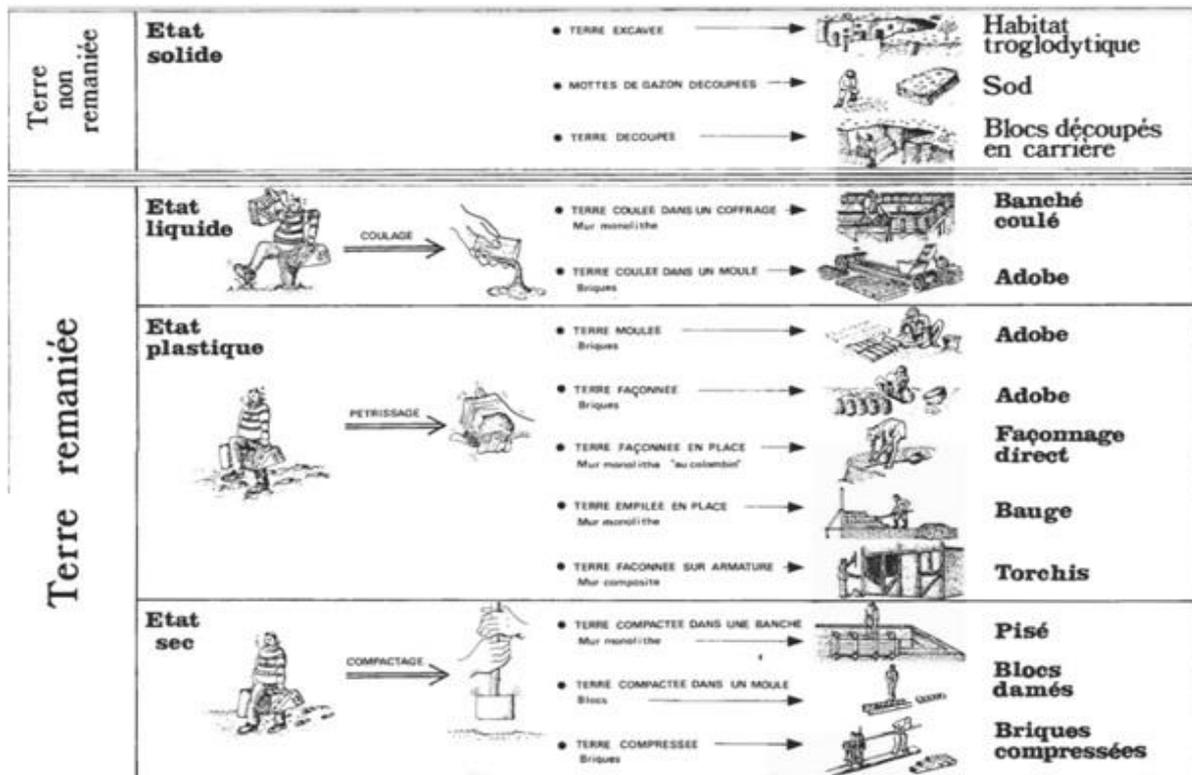


Figure 1. Mise en œuvre de la terre. Etats solide, plastique, liquide et sec, Source : Construire en terre, CRAterre.

3. Techniques de construction en terre :

Depuis l'âge de fer, l'être humain n'a pu se passer de la terre crue. Pétrissable, malléable, façonnable en mille figures, elle dure dans le temps et revient en force avec l'éveil de la conscience humaine qui tend vers un développement durable sur une planète commune saine.

Selon Hugo Houben et Hubert Guillaud¹ : douze méthodes différentes de construction avec la terre ont été inventoriées et qui sont : terre creusée, recouvrante, remplissante ; découpée, comprimée, façonnée ; empilée, moulée, extrudée ; coulée, garnissante, terre-paille. Leur répartition géographique est tributaire entre autres des caractéristiques locales du sol. Le pisé s'est imposé dans les régions où la terre est graveleuse, l'adobe là où la proportion d'argile dans la terre est abondante et la bauge là où la terre prend une consistance plastique.

Les cinq constituants du matériau terre (pour rappel : les cailloux, les graviers, les sables, les silts et les argiles) sont donc indispensables pour l'obtention d'un matériau de

¹ « Traité de construction de terre » d'Hugo Houben et Hubert Guillaud, édition Parenthèses.

construction de qualité.¹ À ces cinq composants minéraux viennent également s'ajouter des composants organiques (des animaux et végétaux vivants ou morts ainsi que des humus, c'est-à-dire des matières organiques végétale et animale en décomposition), des gaz (ceux présents dans l'atmosphère et ceux issus de la décomposition des matières organiques) et des liquides (eau riche en matières organiques et minérales dissoutes). On peut donc dire que la terre est un béton d'argile. En effet, le terme générique de « béton » désigne « un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant »²

3.1 Torchis (terre garnissante)

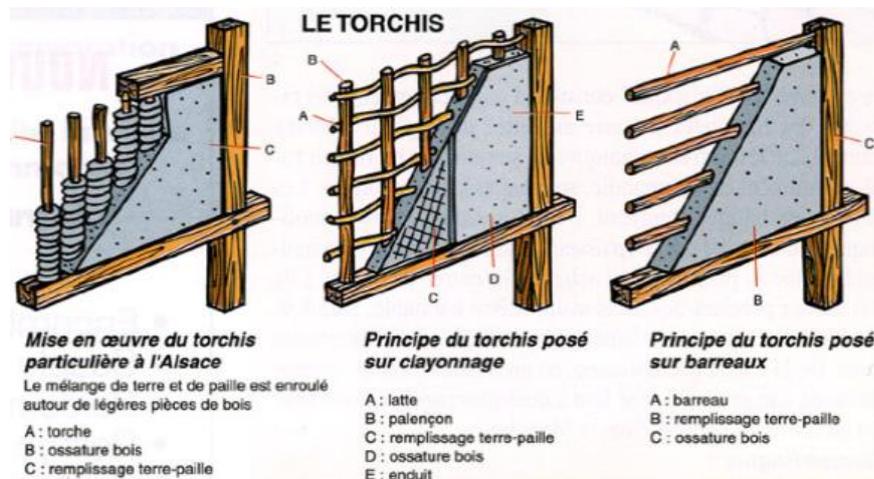


Figure 2. Le torchis. Source CRAterre

Caractéristiques :

- Sol argilo-limoneux.

Le torchis est un béton naturel. Traditionnellement, c'est une composition de terre argileuse, d'eau et de paille. A la place de la paille l'on peut trouver d'autres fibres naturelles.

Et c'est ainsi que le torchis vient se lier par enrobage aux clayonnages ou par pression aux lattis des pans de bois (murs extérieurs ou cloisons) des maisons à colombages (maisons à étages en pans de bois et torchis), fermes, granges, écuries, étables, poulaillers, pigeonniers, etc. construits selon le même principe. Le taux d'argile dans la terre doit être de 20 à 30 % au moins et la terre doit être boueuse lorsqu'on l'utilise.

¹Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Romain Anger et Laetitia Fontaine, Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie.

²Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Romain Anger et Laetitia Fontaine, Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. p. 10.

3.2 Bauge (terre empilée ou cob) :

Caractéristiques :

- Densité : 1,7 T/m³ ;
- Sol argileux à argilo-sableux.

La bauge est un système de construction monolithique en terre crue empilée. La terre est dans un état plastique, généralement mélangée à des fibres végétales. Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage, alors que le matériau n'est pas trop dur. Cette technique est nommée cob en anglais.

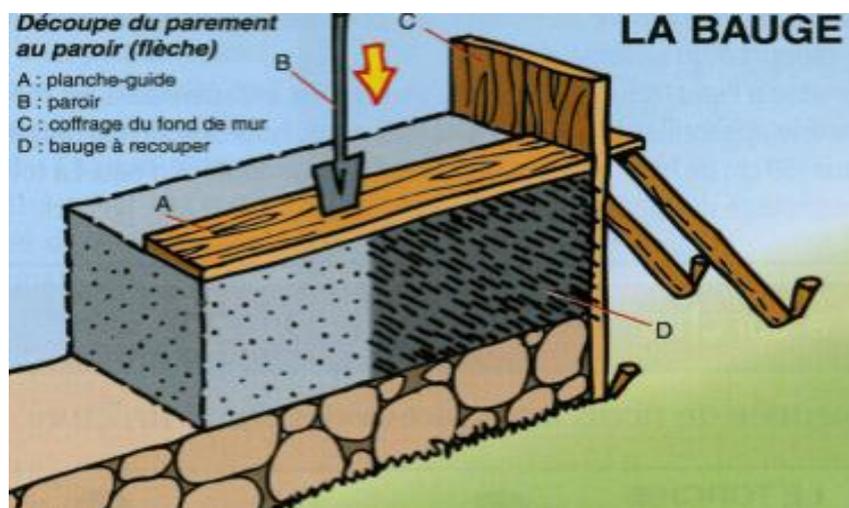


Figure 3. La bauge. Source CRATerre

La bauge coffrée est donc une technique alternative à la bauge traditionnelle puisque les surfaces verticales ne sont pas obtenues par découpe mais par coffrage. La masse volumique de la bauge est comprise entre 1400 et 1700kg/m³ et sa résistance varie de 0,6 à 1,3 N/mm².

3.3 Adobe (terre moulée) :

Tout comme nous, contemporains d'immenses de constructions aussi luxueuses les unes que les autres et aussi chères, nos ancêtres cherchaient d'abord la sécurité et ensuite le confort. Et c'est ainsi que naquit l'idée de trouver la facilité de construire vite et sans efforts.

En parcourant les campagnes algériennes au nord, les Hauts Plateaux et le Sud, l'on s'aperçoit qu'un mode d'architecture de terre a régné quelque temps. Une architecture à base de terre crue façonnée. L'adobe qui s'est essoufflé mais respire encore. La terre crue est toujours là à Béchar, Tiout, Timimoun et autres contrées. Des ksour entiers, des zaouïas, des palais, de luxueuses bâtisses témoignent encore du génie algérien et de la terre bienfaitrice.

Des bâtiments, des maisons en particulier, ont été construits à partir de matériaux disponibles localement. Une méthode de construction couramment utilisée par de nombreuses communautés consistait à utiliser un treillis de bois tissé et de roseaux que l'on recouvrait d'argile ou de mottes de terre. L'adobe, la brique faite de paille et d'argile non cuite était utilisé dans de nombreuses régions du monde. Cependant, l'utilisation de la brique d'adobe a commencé à décliner à la fin du 19ème siècle, lorsqu'a commencé l'offre abondante de produits manufacturés comme matériaux de construction. Un regain d'intérêt pour la construction en terre a commencé pendant les crises pétrolières des années 1970, car peu d'énergie était utilisée pour fabriquer des matériaux et parce que dans les climats où ils avaient été utilisés traditionnellement, ils ont fourni un bon confort thermique avec de faibles consommations énergétiques. « Selon les Nations Unies, environ 30% de la population mondiale vit toujours dans des maisons construites de terre non cuite. »

De par le monde l'on recense des merveilles en terre crue et nous citerons la mosquée de Djenné au Mali, considérée comme le plus grand édifice du monde en adobe, Chan Chan au Pérou qui rassemble 12 palais, le village de Pueblo de Taos au Nouveau Mexique (USA), et d'autres sites encore.

Pour argumenter notre présent travail et vivre sur le terrain cette partie concernant l'adobe, nous avons vécu quelques temps à Bouardia dans la commune de Had Chekala, wilaya de Relizane, où l'adobe égaye encore la région.

Du façonnage à la main, la terre crue s'est retrouvée manufacturée dans un moule et, selon nombre d'historiens, ce moulage a vu le jour dès le néolithique, soit il y a plus de 10000 ans. Il faudrait souligner que cette période a connu, en particulier au Proche-Orient, de grandes évolutions techniques et sociales basées sur l'agriculture et l'élevage dans une société sédentarisée qui commence à s'intéresser à l'architecture après que la poterie et l'outillage prirent de l'importance.

Après la découverte des vestiges d'un village en Turquie par une équipe d'archéologues de l'université de Stanford, un témoignage fort en matière d'innovation architecturale vient enrichir la connaissance et mettre fin aux suppositions. L'adobe venait d'être confirmé frère aîné du pisé. « Ainsi, la construction de maisons en terre est l'une des toutes premières innovations de la néolithisation. Les habitants de Çatal Höyük construisaient leurs maisons en adobe, c'est-à-dire en briques de terre crue mêlée de paille et séchées au soleil. Pour édifier les murs, ils empilaient ces briques en rangs décalés, puis les scellaient entre elles à l'aide d'un mortier de boue dont le ton plus clair que celui des briques est encore

visible aujourd'hui sur les murs de Çatal Höyük. Il est fascinant de constater que les villageois locaux construisent toujours des maisons en employant les mêmes techniques ! »¹



Image 18. L'adobe dans tous ses états. Bouardia, commune de Had Chekala, wilaya de Relizane. Crédit photo : Auteure

Qu'est-ce un adobe ?

Après avoir consulté plusieurs ouvrages et différents dictionnaires dont ceux d'architecture et de construction dans plusieurs langues qui définissent l'adobe comme une brique rudimentaire séchée au soleil et l'on ne donne pas sa place à cette grande invention, j'ai opté pour la définition qui suit : « l'adobe est une brique de terre crue abreuvée d'eau, alliée à une fibre, moulée, non compactée et séchée à l'air libre. » Le taux d'argile dans la terre doit être de 20 à 30 %. Elle se travaille à l'état plastique et nous avons confectionné quelques adobes pour notre étude.

L'adobe est une brique de terre crue, naturelle, recyclable, peu chère, écologique et ne nécessite aucune énergie ou grands moyens de mise en œuvre. Il peut être confectionné manuellement, moulé à la main ou mécaniquement. Selon les normes, la moyenne est de 600 briques/jour par ouvrier.

Il faudrait préciser que les terres utilisées varient selon les régions et que la fibre peut être de la paille de blé, du chanvre, du foin, du chaume, de la laine, des gerbes de lavandes broyées, des balles de riz, des copeaux de bois ou autre comme le préconiserait la nécessité, les traditions et les moyens pécuniaires. En général c'est la paille qui est largement employée

¹ François Savatier, Les « gratte-ciel » de Çatal Höyük, le 09 avril 2014 sur www.pourlascience.fr

et son rôle est de réduire la fissuration. L'ajout de sable et de paille étant possible, il faudrait préciser que : « les grains de sable en contact créent un squelette rigide qui s'oppose au retrait en masse de l'argile. Les brins de paille font de même en créant une armature » ¹

Le composant dominant définit le type de terre auquel on a affaire : terre graveleuse, terre sableuse, terre silteuse, terre argileuse. La terre est faite de grains de tailles et de formes différentes. En dehors de l'argile, la terre est composée, du plus gros au plus petit, de cailloux, graviers, sables et silts. La seule différence entre eux est une différence d'échelle, mais pas de forme. Seule l'argile a une forme différente. ²

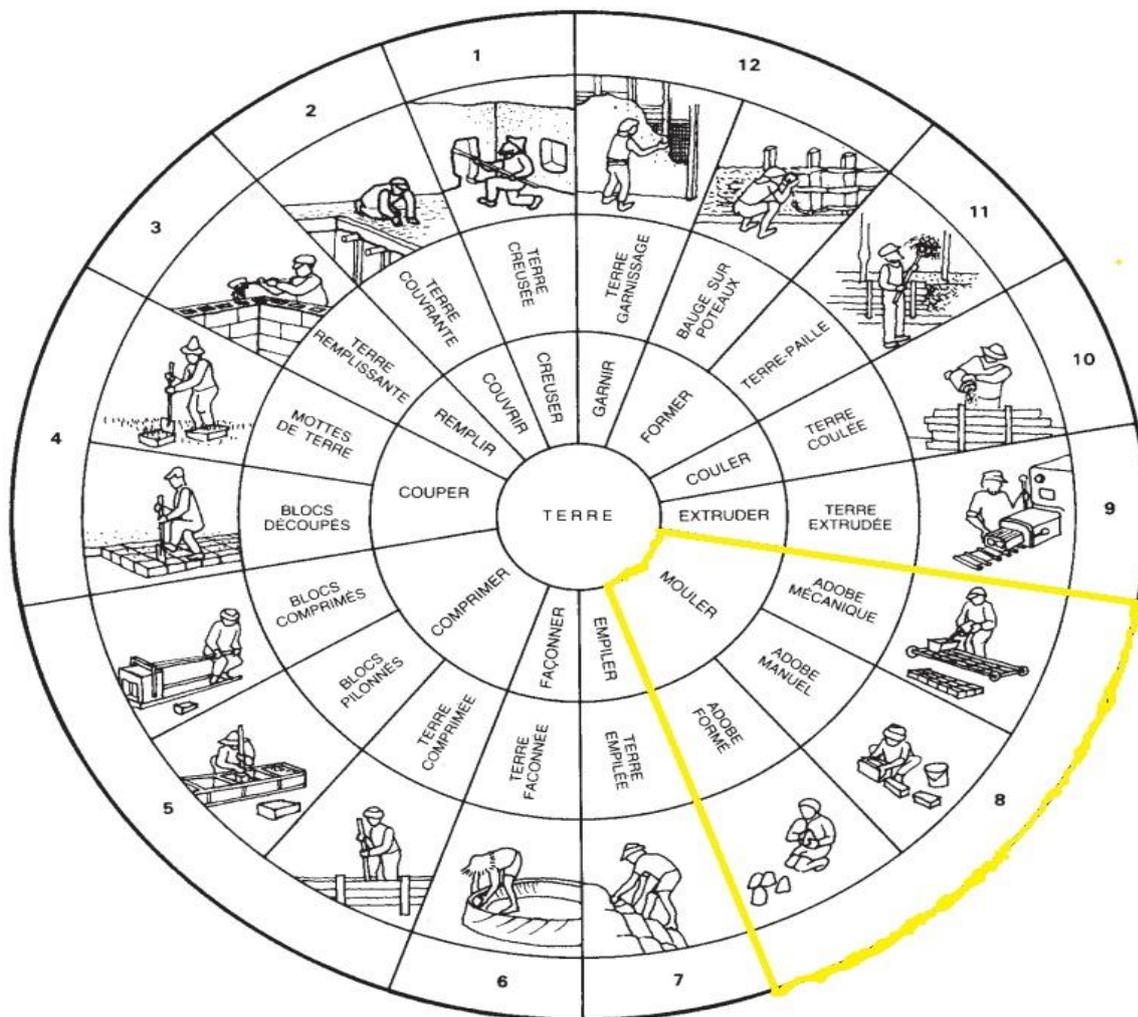


Figure 4. Les douze principaux modes de construction en terre. CRATerre.

¹ Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Romain Anger et Laetitia Fontaine, Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. p. 162.

² Les adobes, production et mise en œuvre, Pierre Delot, page 11



Image 19. Bouardia, commune Had Chekala, wilaya de Relizane. Exemples de moule d'adobe et adobe fabriqués sous nos soins. Crédit photo : Auteure.

La richesse de l'Algérien en matière de construction en terre crue est légendaire. Le gourbi traditionnel national est sans conteste le meilleur exemple. Il n'a plus droit de cité mais il existe encore à travers nos campagnes. Quant à l'adobe, il sert encore aujourd'hui pour bâtir des granges, des poulaillers et basses-cours, des murs extérieurs, des clôtures...

L'adobe est utilisé comme brique aussi bien dans l'habitat traditionnel qu'industriel. Ainsi en certaines contrées d'Algérie, l'on construit encore son logement individuel avec l'apport conséquent de la communauté alors qu'en Europe l'on érige des fermes, des sites industriels comme l'on contribue à la construction de grands édifices de par le monde comme au Sahel.

La vie moderne étant basée sur l'économie et la finance pour assurer le bien-être de l'individu appelé à préserver son milieu naturel, il y va de soi que la consommation d'énergie devient une priorité et c'est ainsi que le retour vers l'adobe cette brique de terre crue devient une priorité. La recherche devra être intensifiée en matière de conductivité thermique qui est un paramètre non négligeable rappelant que la chaleur retenue par un mur externe en adobe est importante. En plus il faudrait rajouter le rôle de l'eau contenue dans l'adobe sous l'effet de la cristallisation des sels contenus dans les argiles. Il est capital de bien comprendre le comportement thermique de matériaux.

Enfin il reste beaucoup à faire pour maîtriser l'emploi de l'adobe qui devrait défier le temps, les séismes, les conditions climatiques et l'emploi excessif des énergies non renouvelables.

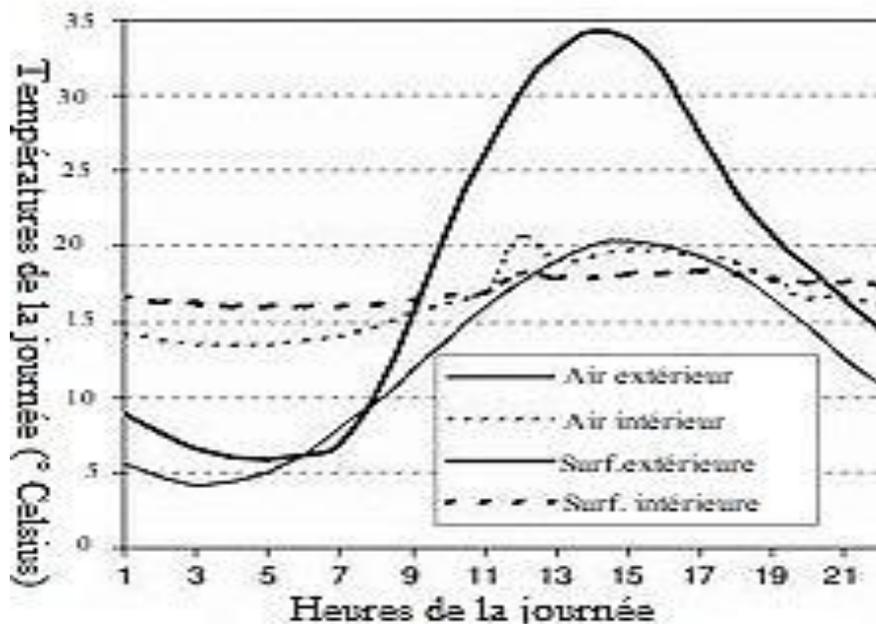


Figure 5. Exemple de comportement thermique de l'adobe. Source : CRAterre

3.4 Le pisé :

Le pisé est une technique de construction avec de la terre crue mélangée à de l'eau et sans aucun stabilisateur. Cette technique consiste en un compactage de la terre entre deux planches appelées banches.



Image 20. Mostaganem, Sour. La muraille almohade datant de plus de 700 ans.

Crédit photo : Auteure

Toutefois le pisé n'est pas seulement une technique de l'habitat. Tours, remparts, aqueducs, murailles, clôtures, écoles et autres habitations parsèment le globe et pour certains bâtis l'on marie en plus la modernité à cette technique ancestrale.

Caractéristiques :

- Densité : 1,7 à 1,9 T/m³ ;
- Sol à texture sableuse ou sablo-graveleuse. Un sol limoneux ou argilo-sableux convient aussi. Le taux d'argile dans la terre doit être de 10 à 15 %.

Nous avons relevé dans un fascicule intitulé « Les 8 Conseils d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de Midi-Pyrénées que le pisé est une « Couche de terre sèche obtenue soit par compactage dans un coffrage soit par damage dans un fouloir. Apparue au III^e siècle avant J.-C, dans la région de Carthage, la technique se diffuse à l'époque romaine en Afrique du Nord et en Espagne. Elle est adoptée par les Arabes lors de leur colonisation de ces territoires à partir du VIII^e siècle. Elle devient courante au Moyen-âge dans la moitié sud de la France. » C'est une technique ancestrale de construction en terre coffrée. La terre argileuse et granuleuse est compactée à la main par couches successives dans un coffrage en bois sous forme de blocs constitués les uns après les autres, la construction avançant au fur et à mesure de l'élaboration de ces blocs.



Image 21. Tlemcen, Mansourah. Remparts en pisé et minaret en pierre datant du XIV^e siècle. Crédit photo : Auteure.

Le pisé étant une technique de maçonnerie de mur en terre crue monolithique coffrée, composée de couches superposées de terre compactée, l'épaisseur du mur serait d'un minimum de 60 à 70 cm pour qu'il ne s'écroule pas mais peut aller jusqu'à 2,20 m

Le mur obtenu peut être un mur porteur, un simple muret de clôture ou un rempart de défense.

Les pisés sont dits traditionnels lorsqu'ils ont pour liant unique de l'argile. Ils sont aussi appelés pisés non-stabilisés. Avec l'industrialisation, des pisés modernes sont apparus avec d'autres liants tels le ciment, la chaux hydraulique, la chaux aérienne... Ces derniers sont appelés « pisés stabilisés ». La stabilisation permet la durabilité de l'œuvre contre des attaques d'eau et le renforcement des performances mécaniques dont la résistance à la compression.

Les édifices en pisé peuvent avoir plusieurs niveaux.

Depuis les années 1980, le pisé redevient un mode de construction dans le monde. Ces pisés "modernes" ne reproduisent pas à l'identique les procédés de construction anciens

3.4.1 Compactage du pisé :

La dame manuelle en bois dans le cas du pisé traditionnel est remplacée par une dame pneumatique plus puissante qui permet d'augmenter la rapidité de la fabrication et la densité du pisé moderne. La dame en général est en métal sous forme circulaire mais elle peut être modifiée par l'ajout d'une plaque de bois carrée suivant les besoins de l'artisan.

3.4.2 Mise en œuvre de coffrages du pisé moderne :

Les coffrages actuels sont plus larges que les coffrages traditionnels pour la rapidité de la fabrication sur chantier. Ils sont aussi plus rigides pour supporter le damage plus fort de la dame pneumatique. Actuellement ils sont en général en métal.

Lors de la construction d'un pisé, on réalise un soubassement en maçonnerie de gros moellons ou de galets et de chaux. Ce dispositif d'une hauteur variant entre 50 et 80 cm, permet de renforcer la base des murs contre les rejaillissements d'eau et les remontées capillaires.



Image 22. Maroc, Taroudant. Remparts en pisé sur 7 km autour de la ville.

Crédit photo : Auteure.

3.4.3 Matériaux constructifs :

La terre utilisée est extraite sur place pendant l'été ou l'automne lorsque son taux d'humidité est naturellement bon. Il s'agit d'une terre sableuse, à peine argileuse contenant des cailloux et des graviers. La couche de terre végétale, impropre à la construction n'est pas utilisée. Les murs sont épais de 50 à 60 cm, parfois renforcés par des chaînes d'angles en pierre de taille ou en briques cuites. Les constructions ne dépassent généralement pas un étage. Les enduits étaient réservés aux maisons d'habitation. Lorsque le pisé est bien sec, les façades sont couvertes d'un enduit au mortier de sable et de chaux. Les murs exposés aux intempéries sont parfois protégés par un long pan de toiture qui descend au plus près du sol, ou bien construits avec des matériaux plus résistants.

Moyens : les banches, qui mesurent en général 2 m de long sur 50 à 60 cm de haut sont constituées de planches clouées formant deux parois verticales, le pisoir en bois utilisé pour compacter la terre, les traverses appelées « clés » permettent de maintenir le coffrage en place, le fil à plomb et les pelles. Performances : très bonne inertie thermique, régule l'humidité présente dans l'atmosphère, sa densité atténue la réverbération des sons.

3.4.4 Pathologie du vieillissement :

Quand le matériau est bien protégé, il vieillit bien. Toutefois sur les façades exposées aux intempéries la disparition de l'enduit entraîne une érosion naturelle sur une faible épaisseur de terre. Lorsque les reprises de banchées ne sont pas alternées cela donne des alignements de joints verticaux sur plusieurs hauteurs de banchées qui occasionnent des faiblesses particulièrement dans les angles des bâtiments. Sous l'effort d'une poutre de

plancher ou d'une ferme, le mur peut être ponctuellement écrasé, ce qui nécessite la mise en place d'une semelle de répartition en bois pour répartir les charges.

3.5. Les briques de terre comprimée - BTC :

L'évolution des techniques de construction à travers l'histoire reste le fait que le génie humain s'adapte et évolue. De la caverne au ciment et au béton armé bien des étapes ont été parcourues avant de se jeter de nouveau sur le plus vieux des matériaux. La terre crue. Ainsi le retour à la terre mélangée à une infime quantité d'eau puis comprimée à l'aide d'une machine rudimentaire ou sophistiquée (presse) se vit salutare en matière d'économie de temps et d'argent.

Appelé aussi brique de terre compressée, le BTC - bloc de terre comprimée, ce matériau timide n'est autre qu'une évolution de l'adobe.

La fuite vers le béton armé et le ciment est à l'origine de l'abandon d'une technique millénaire, la terre crue à l'origine de l'habitat le plus répandu dans le monde. Son retour est discret malgré le coup de pouce de l'Unesco avec la création d'une chaire « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable », en octobre 1998 à l'École d'Architecture de Grenoble en France à l'initiative de la Division de l'Enseignement Supérieur de cette institution mondiale. A vocation internationale, cette chaire est appelée à accélérer la diffusion, au sein de la communauté internationale, des savoirs scientifiques et techniques sur l'architecture de terre dans deux domaines : l'environnement et patrimoine mondial, et environnement, établissements humains-habitat.

Lors de la 4e édition du Festival culturel international de promotion des architectures de Terre, ArchiTerre, qui s'est déroulée du 19 au 26 avril 2015 à l'Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger (Epau), M. Hamid Benouali, chercheur au Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB), a dressé un bref historique du BTC, affirmant que « les premières constructions en bloc de terre comprimée (BTC) ont commencé au début des années 1980 à Bou Saâda, Chéraga, Tamanrasset, Souidania et Reggan. Les enjeux économiques et la préservation de l'énergie imposent une réhabilitation des matériaux locaux. » ¹

¹ El Watan, 21 mai 2015.



Image 23. Bloc de terre compressée – BTC. Crédit photo : Auteure.

Ceci étant comment le bloc de terre compressée est-il né ? Qu'en est-il de son utilisation ? Ses performances ? Ses qualités ? Ses défauts ?

Un bloc de terre compressée ne demande pas beaucoup d'énergie et se limite tout au plus à sept opérations :

- Extraction et acheminement de la terre si besoin;
- Séchage, broyage, tamisage ;
- Humidification à l'eau ;
- Pressage, démoulage ;
- Cure si le BTC contient un stabilisant hydraulique ;
- Séchage ;
- Stockage.

Les dimensions les plus courantes sont 29,5 x 14 x 9 cm et 20 x 20 x 9 cm (L x l x h) et les types les plus courants sont les blocs pleins, les blocs évidés, les blocs alvéolaires et les blocs à emboîtement.¹

➤ **Avantages :**

Les BTC ont bien des avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue. Ils permettent une grande liberté dans la conception architecturale. Par rapport au pisé, à titre d'exemple, il évite l'attente d'un long séchage. Si l'adobe prend du temps pour sécher et demande une grande aire de stockage, le BTC permet la superposition des briques sur une surface moindre dès la fabrication et un séchage moins long. La régularité des pièces de BTC permet un travail bien achevé contrairement à l'adobe. La stabilisation n'est pas

¹ Rigassi, 1995.

obligatoire pour tout le bloc car on peut ne stabiliser que la surface extérieure des briques. Les BTC supportent une compression supérieure à celle de l'adobe donc plus résistants.

Quant aux BTC face aux blocs à base de sable et ciment, les premiers « offrent une plus grande capacité d'opposition à l'infiltration directe ou par capillarité de l'eau de pluie ou de ruissellement »¹ alors que comparés aux briques cuites, « les BTC ne demandent aucune énergie pour la cuisson. »²

➤ **Constitution :**

Un fuseau limite pour la courbe granulométrique de la terre a été défini pour les BTC. Ainsi, une terre contenant entre 0 et 40% de graviers, 25 et 80% de sables, 10 et 25% de silts et entre 8 et 30% d'argiles aura plus de chance de convenir à la fabrication des BTC, même si des terres ne répondant pas à ces critères peuvent tout de même donner de bons résultats. Les terres convenant particulièrement bien à la réalisation de BTC sont les argiles graveleuses, les argiles sableuses et les argiles limoneuses. Ces 3 types de terre nécessitent une stabilisation, de préférence à la chaux, ainsi qu'une addition de sable. Les sols de sables très fins, de sables fins limoneux, de sables fins argileux et de limons argileux conviennent également s'ils sont stabilisés au ciment.

TRANSPORT	PREPARATION	TRANSPORT	MELANGE	TRANSPORT	PRESSAGE	TRANSPORT	CURE
<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BANDE TRANSPORTEUSE investissement 4000 \$ rendement 40-60 m³/h</p>  <p>type 5</p> <p>EXCAVATEUR A GODETS investissement 8000 \$ rendement 20-50 m³/h</p>  <p>types 5-6</p>	<p>PREPARATION MANUELLE investissement 300 \$ rendement 3-5 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BROYEUR DESAIGNEUR investissement 4000 \$ rendement 25-40 m³/h</p>  <p>types 3-5</p> <p>CRIVIL investissement 6000-10000 \$ rendement 30-40 m³/h</p>  <p>types 3-6</p> <p>CHARGEUR BROUYEUR investissement 8000-10000 \$ rendement 30 m³/h</p>  <p>type 5</p>	<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BANDE TRANSPORTEUSE investissement 4000 \$ rendement 40-60 m³/h</p>  <p>type 5</p> <p>DOSEUR-BANDE investissement 13000 \$ rendement 30-40 m³/h</p>  <p>types 5-6</p> <p>DOSEUR-BANDE PLATS FONDS investissement 8000 \$ rendement 30-50 m³/h</p>  <p>type 6</p>	<p>MELANGE MANUEL investissement 30 \$ rendement 1,5 m³/h</p>  <p>type 1</p> <p>MALAXEUR PLANETAIRE investissement 6000-8000 \$ rendement 10-50 m³/h</p>  <p>types 2-6</p> <p>MALAXEUR LINEAIRE investissement 8000 \$ rendement 15-50 m³/h</p>  <p>type 6</p>	<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>TRAME DOSEUSE investissement 1000 \$ rendement 10-40 m³/h</p>  <p>types 5-6</p>	<p>PRESSE MANUELLE investissement 200-500 \$ rendement 3-4 m³/h 300-600 blocs</p>  <p>types 1-3</p> <p>PRESSE MANUELLE investissement 1500-2000 \$ rendement 5-8 m³/h 700-1500 blocs</p>  <p>types 2-3</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 12000 \$ rendement 11-15 m³/h 1500-2000 blocs</p>  <p>type 4</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 16000 \$ rendement 15-18 m³/h 1500-2000 blocs</p>  <p>type 5</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 20000 \$ rendement 40 m³/h 5000-8000 blocs</p>  <p>type 6</p>	<p>BROUETTE A PLATEAU investissement 50 \$ rendement 6 m³/h 800-1000 blocs</p>  <p>types 1-4</p> <p>BROUETTES A PLATEAU investissement 100 \$ rendement 7 m³/h 1000-2000 blocs</p>  <p>types 1-4</p> <p>TRAMPAPLETTE investissement 700 \$ rendement 40 m³/h 5000-8000 blocs</p>  <p>types 4-6</p> <p>CHARIOT ELEVEUR investissement 17000 \$ rendement 45 m³/h 5000-8000 blocs</p>  <p>type 6</p>	<p>POLYANE investissement 150 \$ rendement 300-6000</p>  <p>type 1</p> <p>POLYANE investissement 250 \$ rendement 1000-15000</p>  <p>types 2-4</p> <p>POLYANE investissement 600 \$ rendement 1500-2500</p>  <p>type 5</p> <p>BACHE investissement 1500 \$ rendement 5000-8000</p>  <p>type 6</p>

Figure 6. Production des BTC. Etapes et outillages. Source Rigassi et CRATerre-EAO, 1995, pages 46-47.

¹ Guillaud, Joffroy, Odul & CRATerre-EAG, 1995 : p. 58
² Doat et al. 1979 ; Cañas, Cid-Falceto & Mazarrón, 2012

Conclusion :

La technique des blocs de terre comprimée présente de nombreux avantages et les études au niveau des laboratoires à travers le monde, et le CNERIB algérien -Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, situé à Souidania, Alger, attestent que c'est une technique de construction d'avenir et rien qu'à rencontrer de temps à autre quelques constructions éparses ça et là à travers l'Algérie donne de l'espoir.

La terre crue est une source de grandes opportunités pour le bâti dans ce monde qui souffre une crise aigüe en matière de logement et autres infrastructures si utiles pour le développement et le bien-être de tout un chacun.

A Bouardia, dans la commune de Had Chekala, wilaya de Relizane, l'on s'abrite sous un toit et derrière des murs en terre crue, et l'on se réveille de bonne heure pour trimer dans d'immenses hangars du même matériau après avoir libéré ses ovins et caprins d'une bergerie tout en adobe. Le pays de l'adobe ! C'est dire que l'on a tous les atouts pour aller simplement et humblement vers des bienfaits à moindre frais sans trop d'efforts.



Chapitre –II–

Le matériau terre et développement durable

L'homme devrait prendre en considération la préservation de ses ressources et richesses avec sagesse, philosophie, clairvoyance, perspicacité, soin et prudence. Plus que cela, ces mots d'ordre sont préconisés en Islam comme chez les Amérindiens qui tissent des relations très étroites « entre l'homme et la nature, et le besoin de protéger la terre et l'environnement. »

L'être humain doué de raison prévoit par essence. A titre individuel ou collectif, il tend à protéger et préserver ce qui lui est utile et nécessaire. Depuis l'avènement de la Révolution Industrielle au XIXème siècle, victime d'un développement anarchique à prédation à outrance, agressant les bienfaits que lui offre la nature. En dehors des multiples guerres dévastatrices à travers les siècles, des mers et des lacs ont été asséchés, des montagnes aplaties, des forêts réduites en broussailles, des glaciers fondus, des trésors du patrimoine architectural de l'humanité anéantis, des prairies désertifiées, une flore amaigrie et une faune en certaines contrées exterminée. Et le tout couronné par un nouveau type d'humain clamant haut et fort « après moi, le déluge ».

Afin de faire prendre conscience à l'humanité des préjudices causés à la planète jusqu'à presque épuiser ses ressources et s'engouffrer jusqu'à l'extinction définitive des espèces, la vigilance est exigée.

Dès le début du XIXème siècle, face à l'industrialisation naissante, John Muir, William Hornaday et Theodore Roosevelt (USA), Lina Hahnle, Ernst Rudorff et Hugo Conwentz (Allemagne), Nathaniel Ch. Rothschild (Grande Bretagne), Carl Schroter et Paul Sarasin (Suisse), Karl Starback (Suède), Jean Massart (Belgique), et d'autres encore se distinguèrent en précurseurs de la protection de la nature et des associations de défense dans chaque pays virent le jour. Puis vinrent en parallèle des mouvements pour la protection du patrimoine architectural et culturel.

« Les Congrès internationaux botaniques, forestiers, ornithologiques font leur apparition. Convention internationale sur la protection des oiseaux, Paris, 1902.

« Conférences internationales de Londres en 1900 sur la faune africaine et Paris en 1909.

1962-1969: l'âge d'or de la société de consommation occidentale (construction immobilière, tourisme et loisirs avec leurs conséquences à la montagne et sur le littoral). Développement des transports avec priorité croissante de la route sur le chemin de fer. Décolonisation de l'Afrique. Parallèlement, éveil partiel et timide des élites aux réalités de l'écologie. Le "printemps silencieux" de Rachel Carson amorce le débat sur les pesticides et la pollution en général. Essor de l'écologie en tant que science appliquée à l'aménagement et à la gestion des territoires. La "conservation" devient un mouvement utilitaire centré sur la gestion rationnelle

des ressources naturelles. Première Conférence mondiale sur les parcs nationaux à Seattle en 1962.]...[Contestations dans la jeunesse occidentale ("mai 1968"), Conférence scientifique sur la Biosphère à Paris en septembre 1968.»¹ Mais la Palme d'Or de la grande poussée vers le développement revient à la norvégienne Gro Harlem Brundtland qui accepta en 1983 une des premières missions internationales confiées à une femme : présider au nom de l'ONU une Commission mondiale sur l'environnement et le développement. En 1987, elle présente un rapport intitulé « Notre Avenir Commun » qui définit officiellement le concept de « développement durable ». Et depuis ce rapport sert de référence. »

1. Le développement durable, une nécessité :

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Cette citation de Mme Gro Harlem Brundtland, Premier Ministre norvégien (1987) a été retenue comme définition de ce que nous tentons de développer dans ce chapitre. Et en 1992, le Sommet de la Terre à Rio, tenu sous l'égide de l'ONU, officialise la notion de développement durable et celle des trois piliers (économie/écologie/social) : un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable.

Et par développement, on entend une mutation positive dépendant du mode de gestion et de gouvernance. Les générations futures ont besoin de leur part de bien-être qui dépend de la génération des gouvernants et leur mode de gouvernance qui devrait être plus près des cris de la planète.

2. Avantages de la terre crue :

2.1 La terre crue, une solution durable :

En différents endroits en Algérie comme un peu partout dans le monde, des bâtis, vestiges historiques, se sont vus vandalisés pour récupérer des matériaux pour servir à ériger un nouveau bâti. Les cas les plus frappants sont les domiciles mitoyens des ruines romaines.

Un cas concret, il fut un temps où le prélèvement de la terre dans les remparts almohades de Mansourah, non loin de Tlemcen, était chose courante. Cette façon de faire nous éclaire sur la durabilité du matériau qui se transforme mais ne se perd jamais.

Au génie du génie civil de chercher à améliorer le matériau terre pour le voir adopté par les architectes et autres bâtisseurs.

¹ Roland de Miller, Revue Aménagement et Nature n°128, page 52, 1998.

2.2 La terre crue, un matériau disponible

Peu coûteux ou carrément offert par dame nature, ce bienfait qu'est la terre, outre son universalité, se trouve disponible à long terme. Aux fins fonds des déserts comme aux sommets des montagnes, la terre abrite et protège dès qu'elle trouve preneur.

2.3 La terre crue contre l'effet de serre

Ecologique par excellence, la terre dans tous ses états reste le matériau brut naturel et n'admet, en général, que des apports n'ayant aucune conséquence sur l'environnement. Fibres, argile, sable, chaux...

De là, nous nous posons la question sur la corruption de l'air en le polluant jusqu'au sommet de notre atmosphère, de l'altération de la santé de l'individu, la nuisance sur la faune et la flore...

En 2017, le taux de concentration des trois gaz à effet de serre les plus dangereux relâchés dans l'atmosphère - dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote - a atteint un niveau jamais égalé. Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie se sont stabilisées en 2019 avec des émissions mondiales de dioxyde de carbone du secteur énergétique de 33 gigatonnes en 2019, un niveau similaire à celui de l'année 2018, selon des données de l'Agence internationale de l'énergie – AIE.

« Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie se sont stabilisées en 2019 à environ 33 gigatonnes (Gt), après deux années d'augmentation. Cela résulte principalement d'une forte baisse des émissions de CO₂ du secteur de l'électricité dans les économies avancées, grâce au rôle croissant des sources renouvelables (éolien et solaire en particulier), au passage du charbon au gaz naturel et à une production d'énergie nucléaire plus élevée. »¹

¹ Source AIE, 11 février 2020.

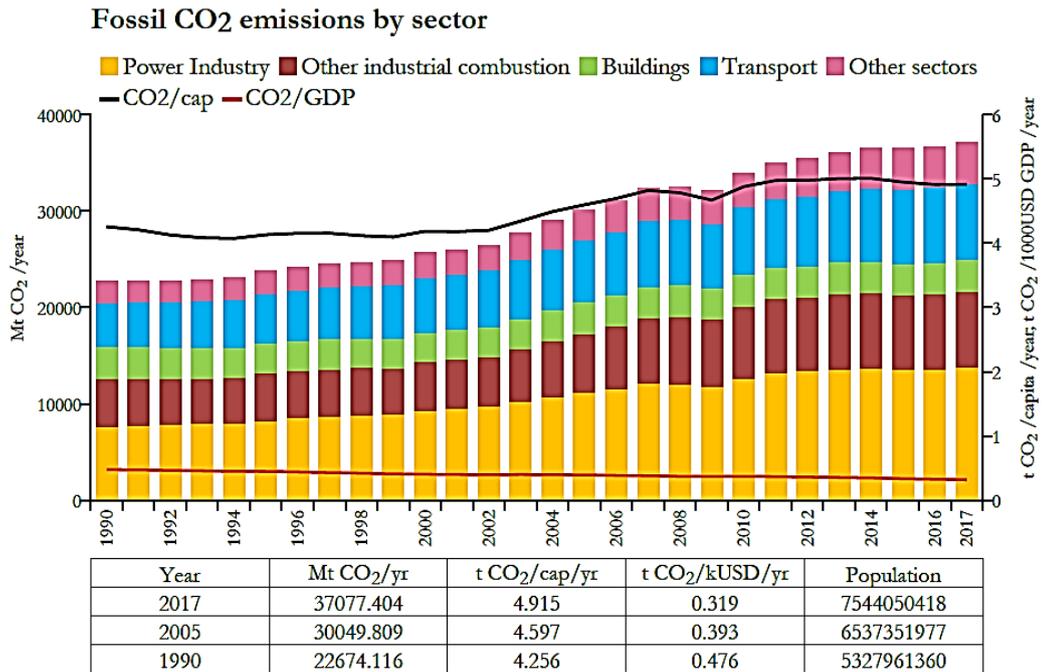


Figure 7. Emissions mondiales de CO₂ provenant de carbone fossile (charbon, gaz, pétrole et fabrication du ciment). 1990 / 2017 source JRC Commission Européenne, rapport 2018.

2.4 La terre crue, un matériau recyclable :

Les ksour du sud algérien, tout comme les ziggourats et les chefs-d’œuvre en terre crue au Mali témoignent de la régénération du matériau terre.

Nous avons pris pour exemple de recyclabilité du matériau terre, la ziggourat d’Ur de Chaldée, patrie d’origine du prophète Abraham, selon la tradition, en Irak, actuellement Tell al-Muqayyar. L’espace construit couvrirait alors environ dix à quinze hectares. Un exemple frappant vue l’immensité de la tâche de construction il y a 3000 ans et sa restauration qui n’est pas une tâche aisée.

Les matériaux prélevés sur les ruines firent revivre la cité antique.

La ziggourat d’Ur est la mieux conservée parmi d’autres. En briques crues, avec une base de 62,50 × 43 mètres, elle est revêtue à l’extérieur de briques cuites plus résistantes. Un système de gouttières draine les eaux sans doute pour l’assécher ou compenser les variations du volume des briques suivant celles de la chaleur et de l’humidité ou bien évacuer les eaux. « Concernant la charge de travail impliquée par la construction d’un tel édifice, M. Sauvage a estimé que le premier étage seul était constitué d’environ 7 millions de briques, représentant 95 000 journées de travail pour le maçonnerie des briques, et 50 000 journées pour les autres tâches (notamment l’extraction de l’argile, le moulage et le transport des briques), soit

respectivement 95 et 50 jours si 1 000 ouvriers étaient mobilisés, même s'il est probable qu'ils ne pouvaient être disponibles toute l'année. ».¹

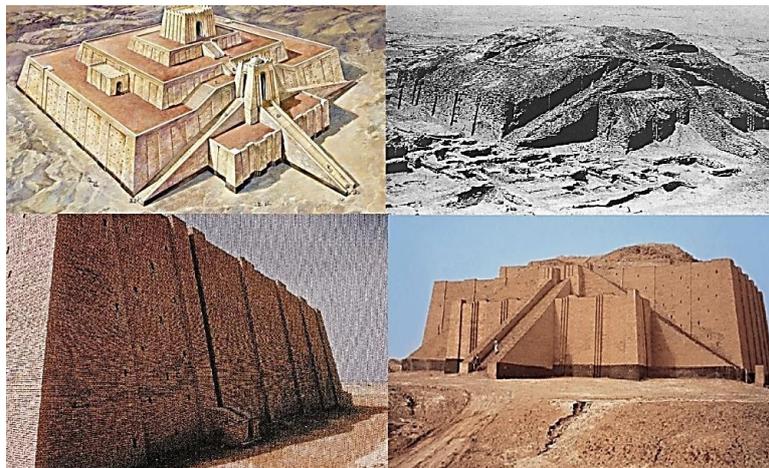


Image 24. Irak. De gauche vers la droite et de haut vers le bas : en dessin, en ruines, détails d'un mur de briques et à l'état actuel après restauration. Source : wikipédia.

La ziggourat d'Ur, bâtie vers 2100 avant l'ère chrétienne par le roi Ur-Nammu, a été restaurée dans les années 1980 par l'état irakien qui, sous Saddam Hussein, tendait à faire revivre la grandeur de la Mésopotamie d'Hammourabi et Babylone de Nabuchodonosor. Jusqu'à l'éternité, Babylone et ses œuvres en terre crue renaîtront comme des phénix de leurs cendres. Telle est la loi de la terre crue. La terre éternelle dans son état original.

2.5 Un matériau d'avenir

L'humanité en contradiction avec elle-même, tout comme certaines de ses institutions internationales, ne s'élève pas contre le mal de ces deux derniers siècles. Le béton !

Pour guérir, il faut soigner le mal. La plaine de la Mitidja, Tiaret-le grenier à blé, l'est d'Oran, la plaine d'Annaba... ne sont que quelques exemples parmi tant d'autres où le béton armé a défiguré le paysage et porté gravement atteinte à la nature.

En Algérie, le retour aux architectures et construction de terre peine à relever la tête, barbote dans le timide tourisme du sud algérien, n'arrive pas à conquérir du terrain et encore moins à convaincre. Preuve en est l'avancée fatale du béton. Le Centre algérien du patrimoine culturel bâti en terre -CAP-Terre- installé à Timimoun dans la wilaya d'Adrar en est le parfait exemple.

¹ Martin Sauvage, « La construction des ziggurats sous la troisième dynastie d'Ur », dans *Iraq* 60, 1998, p. 45-63.

Les Etats-Unis d'Amérique, membres influents sur tous les traités qui concernent l'environnement et pollution ne sont pas en reste en matière de recherche et d'enseignement quant à l'architecture de terre crue.

3. Béton et effet de serre :

L'on ne peut prétendre être développé sans un secteur du bâtiment bien fort.

Jouant un très grand rôle, il dépend des matériaux et moyens mis en œuvre pour la réalisation. Ainsi il est cause d'épuisement des ressources à l'échelle planétaire, grand dévoreur d'énergie, champion des émissions des gaz à effet de serre, polluant de l'environnement aussi bien par les déchets de chantiers que par les déchets de démolition y compris des mers et des océans.

L'extraction des matières premières, leur transport, leur transformation et la fabrication de produits et matériaux nécessaires au secteur du bâtiment nuit énormément à la vie sur terre. Et en conséquence la pollution, l'épuisement des ressources et l'émission de gaz à effet de serre attaquent la coque d'ozone.

Le béton est, selon les statistiques, responsable de 6% de l'effet de serre.



Image 25. Restes de bâtis en briques et béton sur les hauteurs du barrage de Lahlaf, wilaya de Relizane. Crédit photos : Auteure.

L'impact carbone dû à la construction du bâtiment à l'échelle mondiale, est responsable d'environ 10% des émissions de gaz à effet de serre. A lui seul, le béton est responsable de près de 52% des émissions du secteur.

Le béton est constitué de ciment, de granulats, d'eau et parfois d'adjuvants. Leurs volumes ou masses respectifs ne sont en rien proportionnels à leur poids carbone, comme l'explique le graphique ci-dessous :

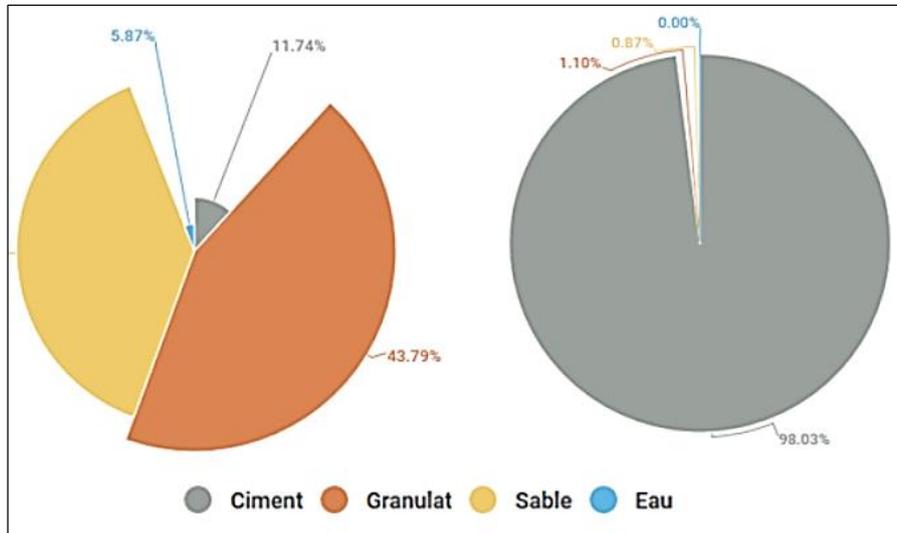


Figure 8. Répartition massique (gauche) et carbone (droite) d'un béton classique constitué de ciment CEMI. Source données : ATILH & UNPG. Source graphique : ARTELIA Bâtiments Durables

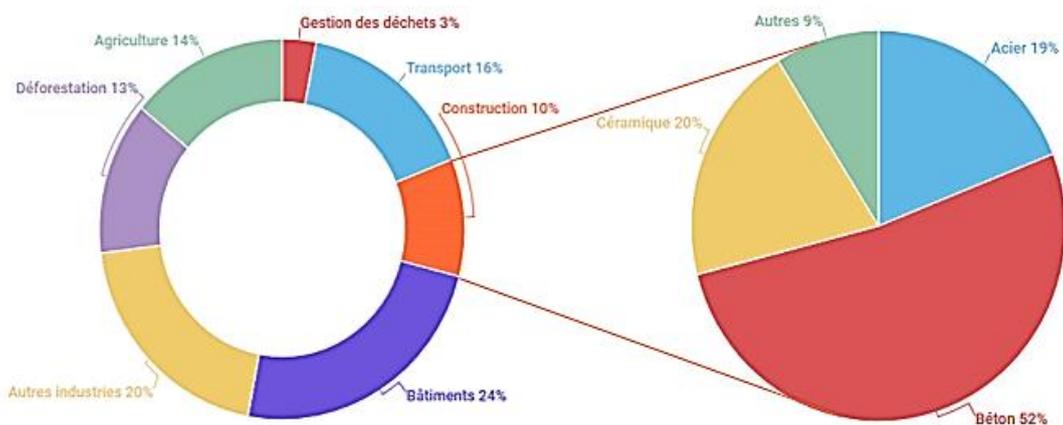


Figure 9. Emission de gaz à effet de serres des différentes industries (à gauche) et zoom sur l'industrie de la construction (à droite). Données : Manicore & Bribián et al. – Graphiques : ARTELIA Bâtiments Durables

4. Evolution du concept de développement durable :

La grande victoire en matière de lutte contre l'effet de serre reste le Protocole de Kyoto. Au cours du Sommet de la Terre, tenu en 1992 à Rio, la communauté internationale a pris conscience du danger que représente le changement climatique qui, soit dit tend vers un réchauffement de la planète. La croissance effrénée, responsable des émissions des gaz à effet de serre ne semblait pas ralentir. Mais il fut décidé de stabiliser le mal en 2000 pour faire revenir les émissions de gaz au niveau de 1990. Et c'est le Protocole de Kyoto, une grande victoire, qui s'imposa avec des moyens juridiques contraignants et il dure encore malgré les protestations et les fuites en avant de certains gouvernements.

Les gaz à effet de serre sont désormais réglementés quant à leur échappement dans l'atmosphère :

- Le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂) provenant essentiellement de la combustion des énergies fossiles et de la déforestation ;
- Le méthane (CH₄) qui a pour origine principale l'élevage des ruminants, la culture du riz, les décharges d'ordures ménagères, les exploitations pétrolières et gazières ;
- Les halocarbures (HFC et PFC) sont les gaz réfrigérants utilisés dans les systèmes de climatisation et la production de froid, les gaz propulseurs des aérosols ;
- Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) provient de l'utilisation des engrais azotés et de certains procédés chimiques ;
- L'hexafluorure de soufre (SF₆) utilisé par exemple dans les transformateurs électriques ;
- Une avancée importante est constatée avec les matériaux de construction vivants (LBM) ;
- La création en 1998 d'une chaire « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable » par l'Unesco. L'entité planétaire étant partout et fonctionnant grâce aux contributions et aux aides ne peut malheureusement intervenir là où le bâti de terre est le plus répandu et en particulier concernant la protection du patrimoine mondial alors que la vocation de la chaire est et reste celle « d'accélérer la diffusion, au sein de la communauté internationale, des savoirs scientifiques et techniques sur l'architecture de terre dans deux domaines :
- Environnement et patrimoine mondial ;
- Environnement, établissements humains-habitat.

Le génie civil n'est pas en reste au niveau des centres de recherche et la meilleure nouvelle découverte en la matière en ce début de l'année 2020 n'est autre que celle parvenue de l'université de Colorado – The University of Colorado Boulder- où il a été mis au point « un système d'éco-construction unique qui se régénère et absorbe du CO₂ : une brique "vivante" composée de bactéries.]...[Il a été développé un processus permettant de

fabriquer des briques "vivantes", composées de bactéries. « Bien que cette technologie soit à ses débuts, les matériaux de construction vivants pourraient être utilisés pour améliorer l'efficacité et la durabilité de la production de matériaux de construction", a fait savoir Chelsea Heveran, auteur principal de l'étude sur le site Internet de l'université. »¹

Enfin retenons que :

- Les chercheurs de CU Boulder développent de nouveaux types de matériaux de construction vivants qui incorporent des bactéries et peuvent absorber le dioxyde de carbone de l'air ;
- Les briques fabriquées à partir de ces matériaux sont robustes et montrent également des taux de survie parmi les bactéries beaucoup plus élevés que dans de nombreux autres matériaux similaires ;
- De tels matériaux pourraient, un jour, guérir leurs propres fissures, aspirer les toxines de l'air et même briller sur commande.

Conclusion :

Nous concluons par ce que nous avons publié dans un quotidien national : « Nous sommes l'humanité une et indivisible. Et si cela était pris en considération, on devrait faire passer la personne humaine comme capital avant l'intérêt de la finance et la pensée réduite à la survie d'une nation, d'un peuple ou d'une communauté. »² Donc partant de cette idée où le profit passe avant l'utile et le nécessaire, l'humanité va vers sa perte.

Le développement durable devrait tenir compte d'un grand souci qui ne serait plus ou moins que l'équité sociale et une pensée aux générations futures qui ne se limitent pas à une frange de quelques pays ou de communautés mais être le souci de chaque individu comme l'est la hantise d'une catastrophe nucléaire à titre d'exemple ou d'un cataclysme planétaire.

¹ <https://www.colorado.edu/today/2020/01/15/building-materials-come-alive>

² Ouahba Mostefai, « Les Hauts Plateaux, l'avenir de l'Algérie », Ouest Info, quotidien algérien d'information, .15.09.2020



Chapitre –III–

Restauration et réhabilitation
des architectures de terre à travers le monde

Les sept merveilles du monde ne sauraient être des merveilles si ce n'est le génie de l'architecte et de l'ingénieur. Mais aussi l'acceptation populaire des compétences et du talent en même que la reconnaissance des meilleurs. Autrement la Tour Eiffel ne serait qu'un amas de ferraille et les pyramides d'Egypte des tas de terres moins côtés que les dolmens.

Si certaines merveilles ont disparu elles le sont à jamais. L'outil moderne et les moyens humains existent mais la phénoménalité de l'œuvre décourage et à titre d'exemple les jardins suspendus de Babylone, le Colosse de Rhodes ou le phare d'Alexandrie. Mais bien des œuvres magistrales contemporaines ne trouvent pas preneurs pour être restaurées malgré les lamentations de peuples et de communautés tels en Allemagne le « Heidelberger Schloss » - le Château d'Heidelberger, les pyramides de Lajdar non loin de Tiaret ou la muraille de Sour en Algérie avec la Casbah d'Alger... alors que la millénaire ziggourat d'Ur se dresse de nouveau avec la cité antique de Pétra en Jordanie gravée dans la roche.

« Les villes anciennes et les monuments historiques représentent l'un des plus hauts degrés de notre civilisation. Et pourtant, tant de fois, cet héritage a été l'objet d'une véritable haine monumentale »¹

Restaurer et préserver un patrimoine étant comme soigner pour guérir et se prémunir, il y va de soi qu'il faudrait d'abord trier les patients et diagnostiquer le maux.

Suite à la recrudescence en matière de démolition due aux conflits en tous genres, il est né un nouveau concept, l'urbicide. Et ce depuis 1990. Tueur de d'agglomération.

Nul conflit ne saurait être autre que celui d'anéantir une culture et un patrimoine. Et c'est ainsi que les conflits détruisent parfois en direct des monuments et les meilleurs exemples récents sont la destruction d'un pan de Bagdad avec le pillage de son musée en 2003, le pont de Mostar en Bosnie-Herzégovine en 1993, les sites antiques de Ninive et Nimroud en Irak et les ruines de Palmyre en Syrie.

¹ CHASLIN François, 1997, Une haine monumentale, essais sur la destruction des villes en Ex-Yougoslavie, Paris, Descartes & Cie, p.107.



Image 26. En haut à gauche : Chan Chan au Pérou. (D. Gandreau) En haut à droite : Ksar d'Aït ben Haddou au Maroc (S. Moriset) En bas à gauche : Mur d'enceinte d'Itchan Kalaen Ouzbékistan. (T. Joffroy) En bas à droite : Muraille de Chine.

1. Irak. La ziggourat d'Ur :

Parmi les constructions monumentales érigées en Mésopotamie, l'actuel Irak, qui est le berceau des grandes civilisations assyrienne et babylonienne, les ziggourats font partie des principaux temples.

Le nom a pour origine le mot babylonien *sigguratu* - le sommet, désignant également y les sommets de montagne.

Les premières de ces tours sous la forme de terrasses à gradins sont apparues dans les vallées alluviales du Tigre et de l'Euphrate à la fin du 4^{ème} millénaire avant l'ère chrétienne.

Le dernier sursaut notable d'activité dans la construction de ziggourats mésopotamiennes est attesté dès le VI^e siècle avant J.-C. Tout au long de l'histoire ancienne, les ziggourats ont été rénovées et restaurées, faisant la fierté des empereurs et rois.

Comme son nom l'indique, la ziggourat était une colline artificielle, conçue comme une imitation de l'un de ces sanctuaires dont les Sumériens ont été privés de force lorsqu'ils ont quitté leur montagneux refuge ancestral pour les plaines de Mésopotamie. La ziggourat était une structure massive avec des murs en pente, très solide dotée de canaux de drainage et d'un petit temple au sommet. Donc c'est un édifice religieux fait de la superposition de plates-formes de dimensions décroissantes, dont la plus petite, au sommet, porte un sanctuaire.

Ses dimensions étaient énormes; la célèbre ziggourat babylonienne faisait plus de 90 m de haut, la longueur de chaque côté de la base carrée était également de plus de 90 m. La

base de la structure était érigée en argile ou en briques d'argile, renforcée en outre par des couches de roseau ou d'asphalte; à l'extérieur, il était entouré d'un épais mur de briques cuites.

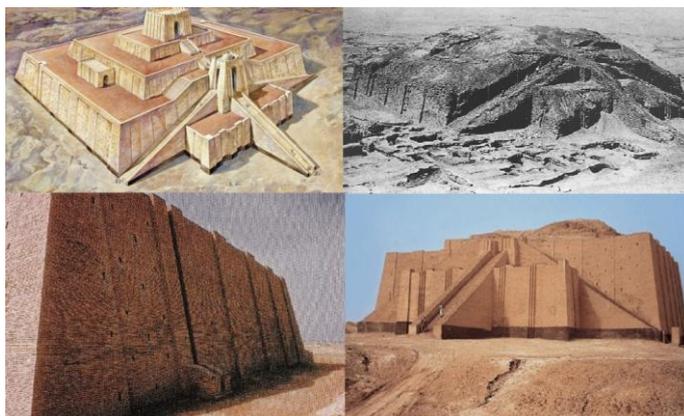


Image 27. Irak. Ziggourat d'Ur. En dessin, en ruine et après restauration.

Les ziggourats avaient une forme carrée ou rectangulaire et leur seule décoration était des niches hautes et étroites situées à intervalles réguliers. Rejetant la conception à une terrasse caractéristique des premières structures, les rois de la III^e dynastie d'Ur (vers 2250 avant JC) ont introduit une nouvelle tradition de construction de ziggourats à partir de plusieurs terrasses, placées les unes au dessus des autres et diminuant progressivement de taille. Elles étaient accessibles par des escaliers dont l'un était situé frontalement et le reste le long des murs latéraux. La structure dans son ensemble était destinée à symboliser l'Univers et les terrasses étaient peintes de différentes couleurs, désignant respectivement les enfers, le monde visible des êtres vivants et le monde céleste. Le temple du sommet, symbolisant le ciel, à Uruk, aujourd'hui Warka, à 270 m au sud de Bagdad et à une trentaine de km de l'Euphrate, était peint d'un blanc éclatant, et à Babylone et Ur, il était incrusté de briques bleues vitrées.

2. Irak. La ziggourat d'Aqar Quf :

L'ensemble du site religieux de Dur-Kurigalzu où se trouve la ziggourat d'Aqar Quf est exceptionnel de par les dimensions de celle-ci. Et c'est ce chef-d'œuvre architectural qui le domine.

« Sa base, quasiment carrée, mesurait 69 mètres sur 67,60, et devait s'élever jusqu'à 70 mètres de haut ; elles font encore 57 mètres de haut de nos jours, état de conservation remarquable pour une ziggurat. Elle comprenait un escalier principal, central, et deux escaliers latéraux, suivant la configuration courante pour les ziggurats du Sud de la Mésopotamie. Sa première terrasse, encore bien conservée au moment des fouilles et restaurée à l'issue de celles-ci, s'élève à 33 mètres de hauteur. Elle est construite en briques d'argiles, renforcées par différents dispositifs, notamment un ancrage de cordes de roseaux tressées courant sur toute sa

longueur. Le temple principal du site, mal conservé, comprenait au moins trois cours principales entourées de pièces. Sa partie centrale était le sanctuaire d'Enlil (é-u-gal, « Demeure du Grand Seigneur ») tandis que celle au nord-est était dédiée à son épouse Ninlil (é-gašan-an-ta-gal, « Demeure de la Dame élevée ») et le secteur sud-ouest à leur fils Ninurta (é-sag-dingir-re-e-ne, « Demeure principale des Dieux »). Cet ensemble, construit dans les formes traditionnelles de la Mésopotamie, est remarquable par l'ampleur de la conception. »¹



Image 28. Irak. Ziggurat d'Aqar Quf. Source : wikipédia.

3. Maroc. Les remparts de Taroudant :

Quoiqu'il ne soit plus fait appel aux moyens traditionnels pour la restauration du patrimoine en terre crue au Maroc, le plaisir des yeux est là pour faire remémorer l'individu



Image 29. Maroc, Taroudant. Des remparts entourent la ville sur 7 km. Source : Auteure.

¹ Dûr-Kurigalzu, wikipédia

que des architectes et artisans ont bien sué pour ériger de chef-d'œuvre. En matière de restauration du patrimoine, les mécènes ne chôment pas et il en est de même pour tout ce qui est majestueux au Maroc où la terre crue a encore son mot à dire et un avenir certain.

4. Mali : La Grande Mosquée de Djenné :

Une œuvre architecturale majeure disparut puis renaquit de ses ruines définitivement en 1907 après sa destruction à maintes reprises.

« La Grande mosquée de Djenné est le plus grand édifice du monde en adobe (ou terre crue – on dit aussi banco en Afrique) ; elle est considérée comme la réalisation majeure du style architectural soudano-sahélien, tout en reflétant des influences islamiques. La mosquée constitue le centre de la cité de Djenné, au Mali, dans la plaine alluviale du Bani, affluent du Niger. Un premier édifice fut construit en ce lieu au XIII^{ème} siècle.



Image 30. Mali. La grande mosquée de Djenné. Source : Unesco.

« Marquant le cœur de l'agglomération de Djenné, c'est aussi l'un des symboles les plus remarquables de l'Afrique subsaharienne. Avec la ville de Djenné elle-même, elle est inscrite depuis 1988 à la liste du patrimoine mondial de l'. »¹

5. Chine. La Grande Muraille :

S'étendant sur plus de 21000 km, cette merveille qui débuta avec l'amoncellement de pierres finit par devenir un véritable ouvrage de maçonnerie basé sur les matériaux locaux dont la terre crue. Sa construction a débuté en entre 1403 et 1435 dans le but

¹ La Grande Mosquée de Djenné, wikipédia.



Image 31. La grande muraille de Chine. Source : wikipédia.

de repousser les envahisseurs mandchous et mongols. Avec ses 7 mètres de large en moyenne dont 10 mètres par endroit, une hauteur de 15 au maximum et tout au plus 9 mètres par endroits, la muraille est une considérée comme une merveille du monde. La muraille a une largeur moyenne de 7 m avec un maximum de 10 m par endroits et la hauteur moyenne est de 9 m avec un maximum de 15 m.

Véritable attraction touristique, sa restauration n'a jamais et depuis l'année dernière, les autorités chinoises se sont engagées avec un nouveau plan de préservation.

6. Pérou. Chan Chan :

Inscrit comme patrimoine mondial, le site de Chan Chan au Pérou et aussi comme site en péril, il est constamment surveillé par l'Unesco qui ne lésine pas sur les moyens financiers pour restaurer et préserver cette merveille d'architecture de terre.

« Le royaume Chimu, avec Chan pour capitale, atteint son apogée au XVe siècle, peu de temps avant de tomber aux mains des Incas. L'aménagement de cette immense ville, la plus grande d'Amérique précolombienne, reflète une stratégie politique et sociale stricte, marquée par la division de la ville en neuf «citadelles» ou «palais» formant des unités autonomes. »¹ Unesco.

¹ Unesco



Image 32. Pérou. Vestiges de la cité de Chan Chan. Source : wikipédia.

7. Iran : La citadelle de Bam :

La citadelle de la ville de Bam faisait la fierté de l’Iran moderne. L’on ne peut que se lamenter sur la peine de celles et de ceux qui restaurèrent ce monument historique vieux de 2500 ans bâti en adobe et en bauge.

Rasée en 2003 par un tremblement de terre, la citadelle fut érigée de nouveau pour ne faire plus partie du patrimoine mondial en péril. Le site est désormais sauvé.



Image 33. Iran. La citadelle de Bam. Source : Unesco

Conclusion :

« L'architecture est le témoin incorruptible de l'histoire. » Octavio Paz, poète mexicain. Une citation qui mérite une réflexion approfondie.

Le respect est la base de toute relation. Humaine ou autre. Celle de l'homme avec son patrimoine en est une et avec son passé, les efforts et la sueur des autres en est le complément.

L'architecture de terre, première initiation de l'homme vers la conquête de la hauteur en bâti gagne du terrain et la restauration doublée de la préservation en fait une publicité. Une réclame du développement durable et de la lutte contre gaspillage.



Chapitre –IV–

Présentation du programme expérimental

Le savoir et la connaissance doublés des moyens modernes mis à la disposition de l'architecte, l'ingénieur et des techniciens toutes branches confondues ont permis un meilleur choix de matériaux, mélanges, alliages, techniques, etc. Les laboratoires bien équipés permettent d'éviter toute aventure tendant vers un résultat médiocre pouvant même attenter à des vies humaines.

Notre programme expérimental, comme il a été stipulé dans l'introduction, a été basé sur **l'expérimentation et ses résultats** et dirigé sur trois axes :

- La reconnaissance, l'étude sommaire puis le pré-diagnostic, le diagnostic et les techniques et moyens appropriés en vue du traitement de la muraille de Sour avec une analyse des composantes du pisé qui la constitue ;
- L'expérimentation de deux échantillons de terre choisis parmi une douzaine prélevés en différents endroits en vue de trouver le matériau approprié ;
- Des essais expérimentaux réalisés par d'autres universitaires concernant la terre crue, l'adobe et l'enduit, soient des essais complémentaires bénéfiques pour la connaissance théorique et la pratique.

1- Etude et proposition de solutions pour la restauration de la muraille de Sour avec une analyse du matériau terre qui la constitue :

Dans le cadre du thème abordé, nous avons décidé d'exposer un cas concret qui attire encore l'attention de par son âge, 700 ans, le savoir-faire ancestral de ceux qui l'ont conçu et sa durabilité dans le temps. Pour aboutir à nos fins, nous nous sommes déplacés sur les lieux en vue d'étude et de prélèvements de la terre crue constituant le matériau unique élevé en pisé sur un soubassement de pierres qui constituent également les voûtes des portes cochères et des embrasures. Il est capital de connaître les constituants de cette terre crue restée compacte et bien stable en certains endroits afin de traiter les endommagements, restaurer et préserver dans la mesure du possible.

Intéressée de près par tout ce qui est patrimoine, nous avons déjà traité le sujet le 4 février 2020 dans les colonnes du quotidien national *Réflexion* et nous nous y référons :

« Revenir sur l'histoire de la localité de Sour ne serait qu'un rappel de plus sur l'importance d'une série de scénarii avec des hauts et des bas jusqu'à en faire l'actuel agglomération connue pour sa muraille qui lui donne son nom. Une muraille déjà en ruine et qui tend à disparaître à jamais s'il n'y aura pas urgence d'une restauration.

« L'on relève d'une plume anonyme « qu'avec sa célèbre muraille, sa piscine naturelle, ses cascades, ses jardins exotiques, ses grottes merveilleuses et sa région verdoyante, Sour qui domine l'impressionnante vallée du Chélif est une ville touristique par

excellence. » Surement, l'on décrit la région d'il y a une quarantaine d'années ou plus selon les affirmations de quelques citoyens de la ville antique, Chylimath pour les Phéniciens et Kelmitou pour les conquérants arabes.

« Lieu de villégiature qui accueillait des touristes de contrées bien lointaines, Sour était connue surtout pour sa muraille. Seul vestige de la présence almohade dans la région de Mostaganem, intéressant à plus d'un titre quant au savoir-faire ancestral du pisé, cette technique qui dure encore dans le temps à travers le monde et dont la civilisation arabo-musulmane a été d'un grand apport quant à sa propension.

« Un bref passage pour une étude de la technique de construction nous a permis de constater la menace qui pèse sur ce patrimoine de l'humanité qui n'a jamais été classé en tant que tel et dont les alentours dégagent la négligence de ce trésor. Le rempart, servant jadis à défendre la contrée, est menacé dans sa stabilité mécanique en plus d'un risque potentiel de s'effondrer à tout moment. Un trou brèche béante d'une dizaine de mètres de longueur sur trois autres de hauteur laisse entrevoir la belle vallée du Chéelif. Surmonté du peu de terre qui reste sur la cime, balaféré par une fissure, le mur peut s'affaler sans crier gare suite à une averse ou une infime secousse tellurique.

« Le soubassement en pierres, victime d'une prédation, servant d'interface entre le sol et le pisé, permet aux remontées capillaires de s'évaporer et c'est ainsi que, si restauration, il y aura, il faudrait éviter un enduit étanche et c'est dire que les maîtres du chef-d'œuvre en maîtrisaient bien la technique de construction au XIIIème siècle. Tout enduit empêcherait l'évaporation de l'eau et conduirait à la fissuration du mur.

« Jadis protégé, entretenu, gardé et protégé, des rosiers et bancs égayaient le périmètre. Les activités de préservation peuvent facilement s'inscrire dans une logique de développement territorial et économique. Elles participent à l'attractivité en termes de fréquentation touristique. La conservation du mur et sa protection passe par la valorisation paysagère avec le classement de ce monument en tant que patrimoine historique.



Image 34. Sour, Mostaganem. La muraille almohade. Un pisé qui dure depuis 700 ans.

Source : Auteure.

« Pour préserver le mur de Sour, il faudrait tout simplement mettre en place un périmètre de protection, un entretien du paysage attractif avoisinant déjà existant et des aménagements aux abords du mur.

« Quant à la restauration proprement dite, elle offre l'occasion de redécouvrir les techniques de construction en pisé encore pratiquées en Algérie. Soubassement de pierres, trous, fissures et remontées capillaires devraient être traités avant de procéder à l'application d'un enduit tel celui dont les traces existent encore sur le mur, soit un mortier de terre ou bien carrément un coulis à base de chaux, matériau naturel, laissant respirer le mur, perméable à la vapeur d'eau, imperméable à l'eau, absorbant l'humidité intérieure et la rejetant vers l'extérieur. »¹

1.1 Description

Situation géographique :

- Latitude : N 36,0005793 ;
- Longitude : E 0,3403698 ;
- Altitude : 185m.

En coordonnées sexagésimales, Latitude nord 35° 59' 60" et longitude est 0° 20' 20".

Longueur de l'ouvrage : 112 mètres.

Largeur : 1,83 mètre en moyenne

Hauteur : 6,20.

¹ Mostefaï Ouahiba, « Risque d'effondrement de la Muraille de Sour », , quotidien national Réflexion du 4 février 2020.



Image. 35. Carte satellitaire de Sour Mostaganem. Source : Google Earth.

1.2 Identification des composants du pisé :

Un prélèvement conséquent de la terre crue éparpillée çà et là au pied de la partie effondrée et en ruine de ce site historique abandonné nous a permis une découverte étonnante en matière de pisé que seule des analyses et autres essais en laboratoire peuvent nous faire ressortir. En effet la muraille tient malgré l'absence presque totale du liant qu'est l'argile dans la terre crue dans une zone humide à peu près à longueur d'année étant donné qu'elle fait face à Oued Chélif coulant plus bas à quelques centaines de mètres et un air marin raffermissant le taux hygrométrique, la Méditerranée faisant presque face à moins d'une quinzaine de kilomètres.

1.2.1 Essai granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057 :

Il se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 μm et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μm . Le but est de déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 6.30 et 0.08 mm.

Après séchage, l'on procède au tamisage catégorisant les diamètres des composants selon les tamis allant des plus grosses mailles aux plus petites selon les dimensions suivantes : 6.300-5.000-4.000-3.150-2.500-2.000-1.600-1.250-1.000-0.800-0.630-0.500-0.400-0.315-0.250-0.200-0.160-0.125-0.100-0.080.

Après le tamisage et l'épuisement de la quantité de la terre, on passe à la pesée du tamisat de chaque tamis ainsi que la quantité qui se trouve au fond du récipient.

A la suite de cela, on procède à la pesée du refus qui se trouve dans chaque tamis et l'on trace notre courbe.

1.2.2. Essai VBS au bleu de méthylène :

L'essai au bleu de méthylène appelé aussi « à la tache » permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Appelé également « essai au bleu », il est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et en général d'un sol.

1.2.3. Teneur en carbone Caco NA 2789

– L'essai détermine le volume de dioxyde de carbone dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique (HCl) d'un volume de 10 ml pour une quantité de 0,50 g du matériau sec.

1.2.4. Essai Proctor normal ou modifié NFP 94-093 :

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

L'essai Proctor Normal (utilisé pour les sols non traités) et l'essai Proctor Modifié (utilisé pour les sols traités) sont identiques dans leur principe. Seule diffère l'énergie de compactage appliquée.

1.3. Pathologie du pisé :

Le pisé étant un « béton banché » de terre crue compactée, matériau poreux composé en général d'argile, silts, sables, graviers et petits cailloux en quantités variables a pour ennemi l'eau en général et l'érosion en particulier.



Image 36. Détail de la muraille de Sour. Soubassement effondré, 24 janvier 2020.

Crédit photo : Auteure.

La muraille de Sour, située dans la commune de même nom, à 25 km au nord-est du chef-lieu de la wilaya, Mostaganem, sur la RN 90, souffre en plus de la prédation humaine, des caprices de la nature en tous genres dont l'érosion, les pluies parfois diluviennes et l'humidité.

Le rempart, car c'en est un, s'appuie sur un soubassement en pierres qui s'est vu souffrir du côté nord d'un effondrement ou d'une prédation humaine, vue l'absence de restes de la pierraille. Des pans entiers du mur s'écroulent sans prévenir alors que ce vestige historique sert même de décharge et les détritits s'amoncellent grossissant le tas à vue d'œil. D'ailleurs, suite à notre passage, voisins, jeunes et moins jeunes se portés volontaires au nettoyage des environs de la muraille.

Un patrimoine historique de grande valeur à l'abandon et sans entretien que le temps et l'érosion font disparaître mérite bien une petite attention pour revenir au moins à la situation d'il y a une quarantaine d'années où il était une attraction touristique de premier ordre, d'ailleurs bien fleuri généreusement avec des rosacées parmi lesquels trônaient des bancs publics.

L'état actuel du rempart de Sour laisse croire qu'il n'est pas considéré à sa juste valeur historique, patrimoniale et abandonné en dégradation avancée.

Un bel héritage, unique en son genre, est à restaurer et préserver en urgence.



Image 37. Sour, Mostaganem. Prédation d'un monument historique âgé de plus de 700 ans.
Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.

Suite aux analyses effectuées sur le pisé, il a été constaté que la teneur en sulfates était élevée et cela augmente la sensibilité à l'humidité. Le pisé a particulièrement pour ennemi l'eau en général et en second l'érosion, comme il a été déjà dit. Il présente une faible résistance au cisaillement et à la traction, par contre il réagit mal à la compression.

L'édifice est victime de pathologies traditionnelles des bâtiments en terre crue et nous en distinguons deux genres de facteurs, causes de ce phénomène. Des facteurs internes et d'autres externes.

1.3.1. Facteurs internes :

Au niveau de la fondation, nous présumons :

- Vieillissement naturel des matériaux ;
- Instabilité des sols (affaissement ou gonflement), niveau de la nappe alimentée par les précipitations qui augmente les remontées capillaires entraînant avec elles les sulfates dissous qui attaquent le pisé.

1.3.2 Facteurs externes :

Il est évident qu'ils ont un effet désastreux sur le rempart et ils sont divers causant des effets néfastes parfois en un temps très court et nous en citons :

- Les déchets industriels en tous genres ;
- Les déchets chimiques ;

- Les creusages de fouille et il est rapporté que lors de la révolte de Chérif Derkacoui en 1802, après l'effondrement du mur « une femme trouva, au milieu des décombres, un qast (espèce de grande cruche) plein de ces pièces en or et en argent ; elles portent, dans le pays, le nom de moumen, moumenin; les Juifs les recherchent beaucoup. » ;¹
- L'effet du vent qui accentue l'érosion et les fissures ;
- L'effet de la pluie que nous avons cité plus haut et ses conséquences néfastes ;
- L'effet des secousses telluriques et il serait utile de rappeler que la zone de Sour comme tout le pourtour méditerranéen est située sur une plaque tectonique qui n'arrête pas de se mouvoir sans jamais se stabiliser et les dégâts causés lors de précédents séismes ne laissent pas indifférents surtout celui d'avril 2018 à Boumerdès.

1.3.2.1. Pré-diagnostic :

Plusieurs déplacements vers l'ouvrage historique nous ont conduits à établir un pré-diagnostic global dans les premiers temps. Vraisemblablement, le rempart de Sour a été érigé selon la technique ancestrale avec des banches et pisoirs. Les ouvertures laissant place aux clés y attestent et la couleur rouge de la terre donne une idée de la zone de prélèvement du matériau.

Une approche globale de l'ouvrage multi-centenaire nous a permis de constater visuellement que l'ouvrage à l'abandon présente des fissures et lézardes verticales que nous avons recensées en certains endroits du rempart traversant toute l'épaisseur du mur. Les premières sont au nombre de trois et les secondes au nombre de huit dépassant de loin les 2 mm et cela inquiète. Des éboulements de pierres des soubassements qui servaient à soutenir le pisé vers le bas et des anfractuosités causées par l'effet d'érosion longent sur plusieurs mètres la muraille et enfin des ouvertures béantes dont un en arc de cercle d'une dizaine de mètres de long et trois mètres de haut sur près de deux de large et qui n'augure rien de bon.

Ceci confirme un désintérêt flagrant d'un patrimoine unique en son genre dans la wilaya de Mostaganem, témoignant la présence des Almohades dans une région marquée par 1,5 million d'années d'histoire comme l'atteste les vestiges de Oued Rayah dans la commune de Sidi Ali (50 km à l'est de Mostaganem).

– ¹ De la domination turque dans l'ancienne régence d'Alger, M. Walsin Esterhazy, Capitaine d'Artillerie, Editions Librairie Charles Gosselin, Paris, 1840, page 72 ;



Image 38. Sour, Mostaganem. La muraille almohade. Fissures, effondrement, écroulement, anfractuosités et éboulement. Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.



Image. 39. Sour, Mostaganem. Carte satellitaire montrant la proximité de la muraille du littoral méditerranéen, source d'humidité. Source : Google Earth.

1.3.2.2 Diagnostic :

Comme nous l'avons indiqué au pré-diagnostic, la pathologie qui l'affecte et constitue un grand danger ne serait autre que ce lot de fissurations et comme nous le savons, elles affaiblissent la résistance mécanique de l'ouvrage. Des outils archaïques ou élaborés

permettent de suivre l'évolution des fissures. Leur activité, à savoir si elles sont vivantes (évolutives) ou bien stables est relevée grâce à des fissuromètres.

1.3.2.2.1. Vérification de l'évolution des fissures :

A cet effet, l'utilisation des fissuromètres est recommandée ou à défaut un suivi bien plus simple avec les moyens de bord tels que le témoin-plâtre qui consiste à placer du plâtre sur la fissure et la rupture du témoin traduit l'activité de la fissure. L'on peut aussi faire appel à un témoin à lame de verre qui traduit l'activité de la fissure au moment où il se brise.

L'évolution de la fissure est aussi suivie par des moyens plus sophistiqués les uns que les autres qui font appel à l'électronique, l'informatique et des moyens modernes de transmission des données.

Les jauges de Saugnac, disponibles en plusieurs modèles, permettent des relevés de l'évolution de la fissure dans le temps. D'autres plus évoluées encore vont jusqu'au suivi microscopique.



Image 40. Différents types de fissuromètres. Source : internet

1.3.2.2.2 Causes des fissurations :

- Mouvement d'ensemble : tassement, dégradation des fondations, effet de séisme ou de vent ;
- Dégradations localisées : vieillissement des matériaux de construction ;
- Humidité : eau de pluie, remontées capillaires, infiltration, eau provenant de fuites des ouvrages.

1.4 Proposition des recommandations de traitement :

S'agissant de patrimoine, d'histoire et de mémoire, l'état ne devrait pas lésiner sur les moyens humains, matériels et financiers, et pourrait mobiliser qui de droit, spécialistes nationaux tels le Centre Algérien du Patrimoine Culturel Bâti en Terre (Capterre) ou étrangers, et la programmation de la restauration en période printanière et estivale qui, selon toute vraisemblance ne dureront pas plus de six mois sur la centaine de mètres de la muraille.

1.4.1 Les fissures :

Dans un premier temps, il faudrait dégager les éléments friables puis mouiller à la brosse le pourtour de la fissure et son intérieur puis on applique un enduit à base de chaux pour colmater les fissures.

La chaux hydraulique se classe comme un matériau de choix pour la préparation des mortiers de pose et de liaison. Il faudrait souligner que la perméabilité à la vapeur d'eau et l'imperméabilité à l'eau sont reconnues à la chaux pour son rôle de régulateur d'humidité.

On peut classer les chaux, comme l'avait proposé Vicat grâce à un indice d'hydraulicité 'i' qui est donné par le rapport des éléments les plus acides aux éléments les plus basiques. Suivant les valeurs de i, les chaux sont plus ou moins hydrauliques.

$$\bullet \quad i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO MgO}}$$

Tableau 1. Hydraulicité de la chaux

Type de chaux	% d'argile	' i '	Durée de prise sous l'eau
Grasse	~ 0	0 à 0,1	6 mois
Faiblement hydraulique	5-8	0,10 à 0,16	15 à 30 jours
Hydraulique	8-15	0,16-0,30	10 à 15 jours
Moyennement hydraulique	15-20	0,30 à 0,40	1 à 4 jours 2
Eminemment hydraulique	20-30	0,40 à 0,50	Inférieure à 2 jours

1.4.2. Réparation de la baie ouverte

Pour soutenir la baie, on utilise les étalements et le remplissage de la baie se fera à base de pierres. Ou d'adobe Pour le rejointoiement on utilise un mortier de plâtre qui se gonflera une fois la prise effectuée.

- L'étalement :

Une opération est nécessaire dans le cas de la muraille de Sour et en particulier la partie où une brèche béante déjà citée risque de laisser s'écrouler ce qui reste du pisé en hauteur où des fissures apparaissent en largeur. Ajoutons à cela le risque d'élargissement latéral des fissures.

En quoi consiste l'étaielement ?

Etant donné qu'il y a urgence et le risque d'effondrement de ce qui reste de la muraille est imprévisible, il serait judicieux de procéder à un étaielement de l'ouvrage.

Il devrait être procédé à des étaielements par chevalement, en voûte et par contre-fiches.

D'abord l'anfractuosité en arc de cercle d'une longueur de 10 mètres, 3 mètres à son sommet et d'une largeur de près de deux mètres. Vues les fissures au sommet, verticales et horizontales, un étaielement par chevalement métallique ou en bois est nécessaire, le temps de procéder à la restauration.

Ce chevalement vertical ni compliqué ni onéreux laissera au moins l'édifice dans son état actuel.

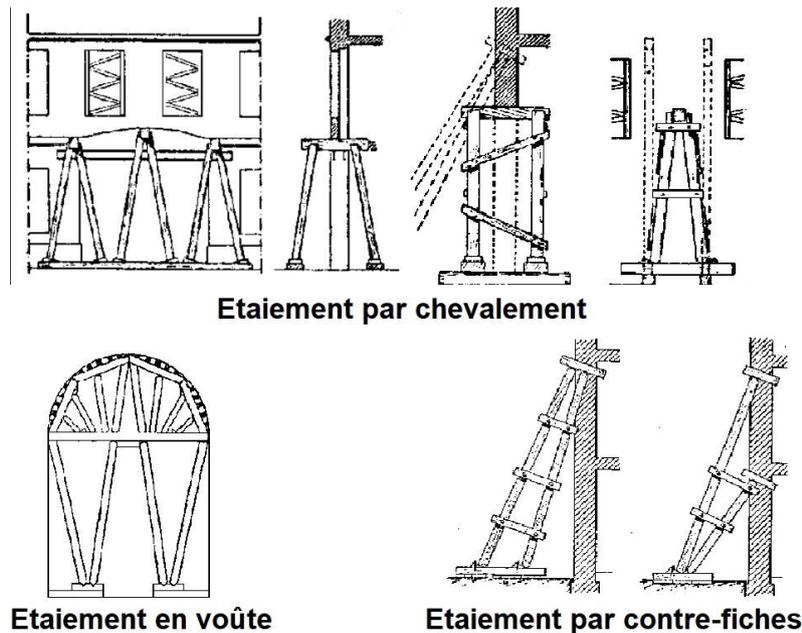


Figure 10. Eléments de chevalement et d'étaielements. Source : icomos.org

L'étaielement de la muraille souffrant de fissures par contre-fiches est indispensable et impératif afin d'éviter l'écroulement ou tout au moins l'élargissement des fissures. L'angle droit où parait le reste d'un semblant de tour à l'extrême-est de la muraille interpelle une intervention dans l'immédiat.



Image 41. Mostaganem, Sour. Fissures sur la muraille constituant un danger imminent.

Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.

Le bois est conseillé pour les étais en raison de son coût peu élevé, les longueurs des pièces allant jusqu'à 15 mètres mais sans tenir compte de l'esthétique quoique parfois contraignant à l'assemblage en raison de sa section circulaire et pas toujours rectilignes.



Image 42. Mostaganem, Sour. Fissures sur la muraille constituant un danger imminent.

Janvier 2020. Crédit photos : Auteure.

1.4.3. Intervention sur la fondation :

Pour repérer les désordres qui trouvent le plus souvent leur origine au niveau des fondations, nous devons tout d'abord connaître les caractéristiques géotechniques du terrain jusqu'à une profondeur suffisante.

L'on peut faire recours à des micropieux pour la reprise en largeur de la fondation ou une reprise en sous-œuvre si c'est superficiel et dans ce cas-là il faut l'intervention des spécialistes..

Ce type d'investigation indispensable doit être réalisé par des professionnels car la plus grande prudence doit être de mise afin de ne pas provoquer de désordres dans l'édifice.

1.4.4. Enduit sur le mur :

Eviter les revêtements étanches qui enferment l'humidité s'accumulant dans le mur sans pouvoir s'en échapper.

Il a été dit précédemment que le mur devrait être retenu en certains endroits par des contre-fiches afin d'éviter son écroulement et au centre par un échafaudage pour éviter l'écroulement de ce qui reste en hauteur sur l'immense orifice en arc. Qu'il y ait soutènement ou pas il sera procédé à la restauration telle que dictée par les règles générales tout en tenant compte de la spécificité de l'ouvrage.

Nous suggérons d'abord un nettoyage efficace des abords du monument, ce que nous avons conseillé aux riverains qui ont pris en compte nos conseils quant à la préservation de ce site patrimonial.

Dans un deuxième temps, si restauration il y aura, il faudra procéder comme suit :

- Egaliser la surface et retirer tout résidu dont des anneaux servant à étendre le linge des voisins ;
- Badigeonner la surface à l'eau pour ramollir les argiles de surface afin de créer un support stable ;
- Humidifier ensuite la surface avant toute opération ;
- Pour toute application en épaisseur jusqu'à 45 cm par couche, on utilise du béton d'argile ;
- Appliquer un béton d'argile sur les éventuelles couches supplémentaires lorsque le béton a déjà tiré et que l'on ressent ferme sous la pression du doigt. Dans le cas de rebouchages importants, associer des adobes (briques de terre crue) au béton d'argile.

Enduits de façade : Une fois le rebouchage terminé et sec, on procède à l'application du corps d'enduit sur toute la surface de la muraille. A cet effet, il serait préférable de choisir un enduit à la chaux qui sera plus résistant aux intempéries.

Dans un but préventif alors que nous avons alerté les concernés afin d'attirer leur attention sur un éventuel effondrement de la muraille, nous nous sommes rapprochés de la station météorologique de Mostaganem qui nous a gratifiés des totaux mensuels des

précipitations de l'année précédente et l'année en cours. Le risque d'effondrement sera entre l'hiver et le printemps, grande période pluvieuse.

A cet effet, nous préconisons une restauration multiforme en intervenant comme suit :

- Interdire tout dépôt des déchets quelle que soit leur nature, vu qu'ils sont les premiers responsables de l'apparition du sulfate découvert dans les analyses de notre échantillon prélevé sur la muraille ;
- Aménager les abords du mur étant donné que la préservation du pisé passe par sa revalorisation paysagère ;
- Entretenir le jardin avoisinant le mur ;
- Réhabiliter la muraille (réparation des dégâts affectant le mur) en effectuant un système de drainage qui évitera d'éventuelles évolutions de dégradations ce qui assurera sa durabilité ;
- Remettre en l'état le complexe avoisinant la muraille dont la piscine, la cafétéria, la fontaine centenaire et le jardin public.

Par conséquent la restauration de ce prestigieux patrimoine stimule la reconnaissance et la valorisation de la construction en terre.

2. Expérimentation de deux échantillons de terre prélevés de deux différents endroits :

2.1 Sélection d'une terre crue locale :

En vue d'approfondir nos connaissances et diversifier nos recherches, nous nous sommes rabattus sur deux échantillons parmi une douzaine aussi intéressants les uns que les autres.

Le premier a été prélevé à partir du projet de déblais situé au niveau de la commune de Tiaret à quelques dizaines de mètres au nord du siège de l'APC sis sur la RN14, à une profondeur au-delà de 50 cm (voir carte ci-dessous, image 43)



Image 43. Tiaret. Carte du prélèvement d'un échantillon de terre, RN14. Latitude : 35,381006, longitude : 1,337613, altitude : 1291 m. Source : Google Earth

Le second échantillon de terre crue a été prélevé chez les Bouardia, commune de Had Chekala, wilaya de Relizane, sur la RN 90, à proximité d'une cité tout en adobe où la population s'est mise au béton sans omettre de faire appel à l'ancestral adobe quant aux dépendances tels les écuries, entrepôts, poulaillers, abris divers. (voir carte ci-dessous, im. 44)



Image 44. Carte prélèvement d'un échantillon de terre à Bouardia, commune Had Chekala, wilaya de Relizane. Latitude : 35,646113, longitude : 1,164520, altitude : 536 m.

Source : Google Earth.

➤ Valeurs caractéristiques de la terre :

Il existe à l'heure actuelle une normalisation pour l'adobe et la brique en terre compressée. Leurs normes sont précises en matière de résistance minimale et durabilité du matériau. Cela rassure et permet une garantie.

Si les tests de laboratoire nous donnent une idée sur les caractéristiques du matériau terre crue, elles permettent également de faire des choix et prendre des décisions en matière d'architecture et de fabrication de matériaux. A ce titre, l'on se basera sur les critères recommandés par Doat et al. (1979) pour une construction à un seul niveau :

- a) Résistance à la compression : 2 kg/cm² ;
- b) La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec ;
- c) Résistance à la traction : 0 ;
- d) Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm² ;
- e) Module de Young : 7000 à 70 000 kg/cm² - Perméabilité : 1x10⁻⁶ cm/sec - Dilatation - Thermique : 0,012 mm/m par °C ;
- f) Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C ;
- g) Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg ;
- h) Déphasage horaire pour un mur de 40 cm : 8 à 12 heures ;
- i) Amortissement phonique pour un mur de 40 cm et une fréquence de 500 Hz : 56 Db.

2.2 Analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057 :**➤ Principe et objectif :**

Le premier test réalisé en laboratoire est l'essai granulométrique. Il se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 µm et par sédimentation les éléments inférieurs ou égaux à 80 µm. Le but est de déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 6,30 et 0,08 mm.

Tout simplement, la terre sera passée à travers plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, hiérarchisées par ordre d'ouverture décroissant. Les tamis superposés sont vibrés et les matériaux restant dans chaque tamis (refus) sont pesés puis convertis en % par rapport au poids total. Et c'est ainsi que l'on déterminera les différents éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles) et leur quantité respective en pesant après dessiccation les différents refus des tamis.



Image 45. Tamis d'analyse granulométrique.

Grâce aux résultats obtenus, on pourra tracer sur un diagramme la courbe granulométrique de la terre. On notera la grosseur des grains en abscisse et le pourcentage des tamisats cumulés en ordonnée, exprimant « la proportion en poids par rapport au poids de l'échantillon sec, de grains dont la grosseur est inférieure à la grosseur portée en abscisse » ¹

➤ **Mode opératoire :**

On prend séparément les deux échantillons des deux différentes terres d'un poids de 500 g chacun. Le premier étant celui prélevé à Tiaret, d'une couleur verdâtre et le second, prélevé à Bouardia, près de Had Chekala dans la wilaya de Relizane, de couleur marron. Les imbiber d'eau et laisser reposer pendant 24 heures.

Après 24 heures, l'eau est dégagée en douceur pour éviter de perdre la fraction fine. L'échantillon est mis à sécher dans une étuve à une température de 105° C.

Après séchage, l'on procède au tamisage catégorisant les diamètres (mm) des composants selon les tamis allant des plus grosses mailles aux plus petites selon les dimensions suivantes :

6.300-5.000-4.000-3.150-2.500-2.000-1.600-1.250-1.000-0.800-0.630-0.500-0.400-0.315-0.250-0.200-0.160-0.125-0.100-0.080.

Après le tamisage et l'épuisement de la quantité de terre, on passe à la pesée du tamisât de chaque tamis ainsi que la quantité qui se trouve au fond du récipient. A la suite de cela, on procède à la pesée du refus qui se trouve dans chaque tamis et l'on trace la courbe.

¹ Doat et al., 1979, p. 168.

➤ **Classe granulaire :**

La classe granulaire désigne un granulat en indiquant son plus petit diamètre représentatif « **d** » suivi de son plus grand diamètre représentatif, « **D** ». Le granulat est appelé **d/D** (exemple gravier 5/25. $d=5$ et $D=25$). La connaissance de « **d/D** » est connue lorsque les granulats atteignent une représentativité de 5% de son tamisât cumulé vers le début pour le « **d** » et vers le fin pour le « **D** ».

La norme NF P 18-304 est plus précise. Elle détermine la classe granulaire en numérisant les critères des plus petits et des plus grands diamètres ainsi que le critère de représentativité.

Il existe 5 classes granulaires principales adaptées de norme française NFP 18-101 :

- Les fines 0/D $D < \text{ou} = \text{à } 0,08 \text{ mm} ;$
- Les sables 0/D $D < \text{ou} = \text{à } 6,3 \text{ mm} ;$
- Les gravillons d/D $d > \text{ou} = \text{à } 2 \text{ mm et } D < \text{ou} = \text{à } 31,5 \text{ mm} ;$
- Les cailloux d/D $d > \text{ou} = \text{à } 20 \text{ mm et } D < \text{ou} = \text{à } 80 \text{ mm} ;$
- Les graves 0/D D est compris entre 6,3 et 80 mm.

2.3- Analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF P94-057 :

➤ **Principe et objectif :**

Le second test est celui de la sédimentométrie. Il correspond en quelque sorte au test de la bouteille qui consiste tout simplement à séparer les différents composants du sol.

En laboratoire au lieu de bouteille l'on a à sa portée une éprouvette graduée. On peut alors calculer les proportions des grains de tailles différentes. C'est la continuité de l'analyse granulométrique qui a pour but l'analyse des sols cohérents dont le diamètre des composants est inférieur à 0,080 mm (ou 0,100 mm) qui utilise la différence de vitesse de chute des particules d'une terre en suspension dans l'eau.

Les particules les plus grosses se déposent en premier et les plus fines en dernier. On mesure régulièrement, dans le temps et à une hauteur donnée (diminution de la densité avec l'éclaircissement du liquide), la variation de la densité. La connaissance de la vitesse de chute des particules selon leur taille permet de calculer les proportions par les différentes grosseurs de grains.

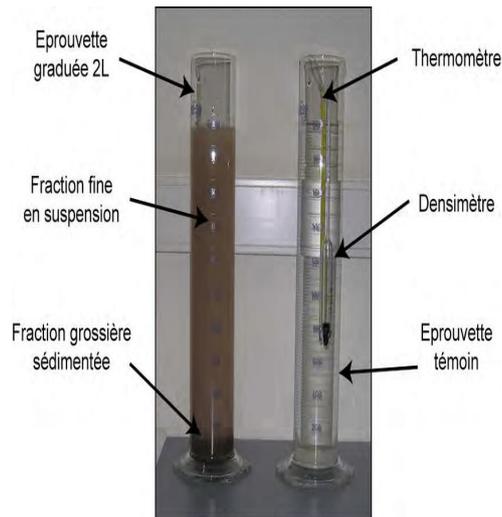


Image 46. Essai de sédimentométrie. Source : Researchgate.net

➤ **Mode opératoire :**

Moyens : Deux éprouvettes de 1000 ml.

- Une avec l'eau +défloculant (témoin) ;
- Une avec le matériau et le défloculant (trempage 15 h) ;
- Agitation ;
- Lecture du densimètre.

On pèse 20 g du matériau, on verse de l'eau distillée dans une éprouvette graduée de 1000 ml jusqu'à obtention d'un demi-litre puis on verse 20 g de l'échantillon dans l'éprouvette, on met cette éprouvette sous l'air pendant 1 heure 30 minutes.

Après avoir mis l'éprouvette sous l'air, on ajoute au matériau un agent défloculant de 20 cm³, il est indispensable de vérifier après défloculation si la solution n'est pas acide (pH 9,5) car les argiles risquent de flocculer. La solution est remuée avec un agitateur pendant 3 mn et laissée au repos pendant 18 h. Les mesures commencent après ce délai. On agite à nouveau la solution de la 1ère éprouvette pendant 3 mn puis l'on y plonge le densimètre gradué de 995 à 1050, doucement après 45 secondes.

On note à l'aide d'un chronomètre les mesures à 1 mn et 2 mn sans sortir le densimètre. Les autres mesures sont prises à 5 mn, 10 mn, 30 mn, 1 h, 2 h, 5 h et 24 h

On plonge le densimètre environ 15 secondes avant de lire et on le retire aussitôt pour le plonger dans l'éprouvette témoin. Il est très important de vérifier à chaque mesure l'égalité de température des 2 éprouvettes car une différence peut influencer la qualité de l'analyse. On ne poursuit pas l'analyse au-delà de 0,001 mm. Car pour cette taille de grains, des phénomènes de turbulence et de défloculation perturbent la sédimentométrie.

➤ **Coefficient d'uniformité :**

Il permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique : $C_u = D_{60}/D_{10}$. Où D_{60} = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant et D_{10} = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Tableau 2. Coefficient d'uniformité :

Coefficient d'uniformité	Classes de granulométrie
$C_u \leq 2$	granulométrie très serrée
$2 < C_u \leq 5$	granulométrie serrée
$5 < C_u \leq 20$	granulométrie semi-étalée.
$20 < C_u \leq 200$	granulométrie étalée
$200 < C_u$	granulométrie très étalée

➤ **Coefficient de courbure :**

Il permet de décrire la forme de la courbe granulométrique : $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60}) = (D_{30}/D_{60})^2 * C_u$, où D_{30} = diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

Si ($1 \leq C_c \leq 3$), le sol est dit bien gradué, c'est-à-dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.

Quand sa granulométrie est discontinue ($1 > C_c > 3$), avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

2.4 Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03 :

➤ **Principe et objectif :**

Les limites de liquidité et de plasticité sont utilisées essentiellement pour l'identification des sols. Les essais de détermination de la limite de liquidité et de plasticité sont aussi utilisés pour la détermination du potentiel de variation volumique des sols. La limite de liquidité est parfois utilisée pour estimer les tassements dans des problèmes de consolidation. Pour la détermination des limites de liquidité et de plasticité, c'est Terzaghi en 1925 qui a proposé des techniques de mesure et c'est Casagrande en 1933 qui a développé un appareil standard pour la mesure de la limite de liquidité. Plus tard, en 1940, Casagrande a utilisé la limite de liquidité et l'indice de plasticité comme base pour la classification des sols.

Ces limites sont mesurées sur la fraction du sol qui passe à travers le tamis de diamètre

0,4 mm. Concernant la teneur en eau, elle est définie par le rapport du poids de l'eau contenue dans un échantillon de sol par rapport au poids de l'échantillon sec. Elle est mesurée en pesant l'échantillon humide (W_h) puis le repeser après l'avoir placé dans l'étuve à 105°C.

$$\text{Soit } W = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 (\%)$$

Limite de liquidité (WL) : Elle est définie par la teneur en eau qui correspond à la fermeture après 25 chocs de l'échantillon rainuré sur une hauteur déterminée d'un centimètre. C'est avec l'appareil de Casagrande que l'en procède à cet essai. L'essai est réalisé à plusieurs reprises sur des prélèvements d'un même sol, soit une cinquantaine de grammes de différentes teneurs en eau. Après avoir étalé l'échantillon sur la coupelle de l'appareil de Casagrande, provoquer une ouverture franche à l'aide de l'outil à rainurer. Compter le nombre de coups nécessaire à chaque fois pour la fermeture des deux lèvres sur 1 centimètre. Reporter sur un les points correspondants aux différents essais et déterminer la teneur en eau correspondant aux 25 coups donnés.

Limite de plasticité (WP) : Elle est définie par une teneur en eau d'un sol lorsque des boudins d'argile façonnés à la main se fissurent au moment où ils atteignent le diamètre de 3 mm.

Mode opératoire :

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de l'appareil de Casagrande de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.

D'après les paramètres de la géologie des sols, nous avons :

Indice de plasticité I_p :

- $I_p \leq 12$: sols faiblement argileux ;
- $12 \leq I_p \leq 25$: sols moyennement argileux ;
- $25 \leq I_p \leq 40$: sols argileux et très argileux.

2.5 Essai VBS au bleu de méthylène :

2.5.1 Principe et objectif :

L'essai au bleu de méthylène appelé aussi « à la tache » permet la détermination de l'activité et de la quantité d'argileuse d'un échantillon. Appelé aussi « essai au bleu », il est

utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol. Il est important matière d'analyse des sols.

Le dosage s'effectue en ajoutant d'une manière successive des quantités de solution de "bleu" tout en contrôlant son adsorption au fur et à mesure. Il est prélevé une goutte que l'on dépose sur un filtre. Et là on détermine l'adsorption maximale obtenue lorsque la tache est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

Mode opératoire :

L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène fixée par 100 g de la fraction granulaire de sol analysé.

Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.

Si la tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le test soit positif. On répète l'essai à l'identique cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.

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

$$VBS = \frac{B}{ms} \times C \times 100$$

B = masse de bleu introduite dans le bêcher (en g).

Ms = masse sèche de la prise d'essai (en g).

C = proportion de 0/5 mm soumis à l'essai dans la fraction 0/5 du matériau sec.

2.5.2 Valeur au bleu VBS :

La VBS est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenu dans le matériau étudié.

Et d'après les paramètres de la géologie des sols, nous avons :

- VBS ≤ 0,1 : sol est insensible à l'eau ;
- 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2 : apparition de la sensibilité à l'eau ;
- 0,2 ≤ VBS ≤ 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux ;
- 1,5 ≤ VBS ≤ 2,5 : sols limoneux de plasticité moyenne ;
- 2,5 ≤ VBS ≤ 6 : sols argileux ;
- 8 ≤ VBS : sols très argileux.¹

¹ Charles A. wikitp.fr/essais-de-sol/essai-au-bleu-de-méthylène

2.6. Détermination de la teneur en carbone Caco NA 278

L'essai détermine le volume de dioxyde de carbone dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique (HCL) d'un volume de 10 ml pour une quantité de 0,50 g du matériau sec.

Il y aura une réaction chimique :



Et $\text{H}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (dégagement du CO_2)

Pour ce qui est de la teneur en CaCO_3 on peut distinguer pour les sols fins :

- 0%-10% de CaCO_3 : argile ou limon ;
- 10%-30% de CaCO_3 : argile marneuse ou limon marneux ;
- 30%-70% de CaCO_3 : marne ;
- 70%-90% de CaCO_3 : calcaire marneux ;
- 90%-100% de CaCO_3 : calcaire.

3. Essais complémentaires :

Comme il a été dit auparavant, nous nous sommes appuyés sur deux thèses pour raffermir nos connaissances, la première en master en génie civil intitulée « Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun », de Lamouri Hafsa, soutenue en 2014 à l'université d'Adrar et la seconde celle d'Edouard Kadjile intitulée « Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité », thèse de master élaborée, également en master présentée à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou en 2010.

3.1 - Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun :

3.1.1 Sites des prélèvements :

Pour la réalisation de l'étude sus citée en dessus comparative de la durabilité de l'adobe à Timimoun, nous avons fait les prélèvements suivants :

- Prélèvement des deux échantillons, des maisons anciennes qui comportent 06 adobes et celles contemporaines avec 03 adobes :

Le prélèvement est fait à ksar Massine. Ce ksar comme la plupart des ksour souffre de son état de dégradation des anciennes constructions en terre, et l'utilisation des matériaux modernes (béton, parpaing,..). Mais il faut signaler que ces dernières années plusieurs maisons ont été construites en toub (adobe), ce qui donne une idée sur le retour à ce mode constructif,

même si ce ne sont pas les habitants originaux du ksar qui les ont entrepris, mais de nouveaux arrivants originaires du nord du pays.



Image 47. Localisation du ksar Massine, Timimoun. Source: Google earth.

- Prélèvement d’argile pour la réalisation de notre propre composition, Ksar « El hadj Guelmane », 18 Km à Timimoun.



Image 48. Localisation du ksar El hadj Guelmane, Timimoun. (Source: Google earth.)

Prélèvement d’un échantillon d’adobes à Adrar centre, pour déterminer leurs résistances.

Prélèvement d’argile à Adrar pour la réalisation d’une composition avec les mêmes proportions que celle de Timimoun.

3.1.2. Caractéristiques des échantillons :

Les prélèvements étaient quatre choix : la brique en terre crue (adobe) ancien et récent

de Timimoun ainsi que la terre d'argile de Timimoun et Adrar pour la confection d'adobe.

Tableau 3. Caractéristiques des échantillons prélevés

	Les échantillons de Timimoun		L'échan-tillon d'Adrar	L'argile de composition	
	Ancien	Récent		Timimoun	Adrar
Couleur	Rouge foncé	Rouge clair	Rouge clair	Lieu de prélèvement : El Hadj Guelmane	Adrar
Etat	Bon	Bon	Bon		
Age	Environ 50 ans	02 ans	Environ 50 ans		
Site	Massine, et prélevé d'un remblai	Massine, et prélevé d'un stock	Adrar centre et prélevé d'un remblai		



Image 49. Echantillons d'adobe ancien, âge 50 ans environ, Timimoun.

Source : Lamouri Hafsa.



Image 50. Echantillon d'adobe d'Adrar, âge 50 ans environ.

Source : Lamouri Hafsa.

3.1.2.1 Méthodes des essais d'identification :

La réalisation de ses essais nous permet de connaître quelques propriétés physiques et mécaniques de l'adobe (argile + sol), pour classer ce matériau dans les catégories des matériaux de construction locaux.

3.1.2.2. Principe de l'essai:

Le principe de cet essai est de placer l'échantillon de dimensions connues entre les deux cotés haut et bas de la presse tel que le montre l'image 51 ci-dessous, puis appliquer des chargements dont l'intensité est croissante. La résistance à la compression est la lecture que sera prise avant la rupture de l'échantillon.

Tableau 4. Dimensions et poids des échantillons prélevés :

Echantillon	N°	Dimensions (cm)		Poids (kg)
		avant surfaçage	après surfaçage	
récents	<i>01</i>	34x14x13	31x14x13	10.900
	<i>02</i>	34x14x13	31x14x13	12.700
	<i>03</i>	34x14x13	31x14x13	12.500
ancien	<i>1</i>	35x15x12	35x15x12	10.600
	<i>2</i>	-	32x15x13	11.200
	<i>3</i>	34x14.5x14	34x14.5x12.5	11.800
	<i>4</i>	34.5x16x13	33.5x16x13	11.800
	<i>5</i>	34x14.5x13	28.5x14.5x12.5	8.800
	<i>6</i>	-	33x16x13.5	10.900
Prélevé d'Adrar	<i>A</i>	30x15x13		7.280
	<i>B</i>	31x14x13,5		8.670
	<i>C</i>	31x15x14		8.915

Tableau 5. Composition des adobes.

	Composition de Timimoun (20 kg)		Composition d'Adrar (80 kg)	
	Pourcentage (%)	Masse (kg)	Pourcentage (%)	Masse (kg)
Argile	20	4	20	16
Sable	30	6	30	24
Chaux	30	6	30	24
Eau	20	4	20	13

**Image 51.** Essai de compression pour une brique d'adobe. Source : Lamouri Hafsa.

3.1.2.3 La confection des briques :

La confection d'argile : la première est réalisée par l'argile de Timimoun, et la deuxième par une argile d'Adrar.

Une proposition d'une composition de mélange de l'adobe stabilisé avec de la chaux.

3.1.2.4 La composition des mélanges :

Proportions des constituants des adobes confectionnées :

3.1.2.5 Dimensions des moules utilisés :

Pour la composition de Timimoun : un moule cylindrique de 15x30 cm, et trois moules carrés

de 10x10x10 cm.



Image 52. Moules cylindriques et cubiques utilisés pour le coulage des échantillons de notre composition d'argile prélevée de Timimoun. Source : Lamouri Hafsa.

Pour la composition d'Adrar : sept moules cylindriques de 15x30 cm.



Image 53. Moules cylindriques utilisés pour le coulage des échantillons de notre composition d'argile prélevée d'Adrar. (Source : Mme Lamouri Hafsa Hannani)

3.1.2.6 Dimensions et poids des adobes confectionnés :

Tableau 6 Dimensions et poids des adobes confectionnés

Echantillon	N°	Dimensions (cm)	Poids (kg)
Argile de Timimoun	C1	9.5x9x9.4	1.065
	C2	10x9x9.5	1.110
	C3	9.1x8.7x9.6	1.125
	C4	27.8x14.5	4.655
Argile d'Adrar	A1	27.5x13.8	5.735
	A2	27.7x14.1	5.645
	A3	27.5x14.3	5.855
	A4	27.7x14.3	5.805
	A5	27.6x14.4	5.820
	A6	27.4x14.1	5.845
	A7	27.9x14.3	5.535

3.1.3. Analyse granulométrique par voie humide et sèche :

Après l'écrasement des échantillons (n° 01 récent) et (n° 05 ancien), le tamisage sec (5 kg de chaque échantillon) dans la tamiseuse électrique (80-50- 31.5-20-10 mm). Cet essai est aussi fait pour le sable de mélange.



Image 54. Série de tamis pour la réalisation de l'essai de l'analyse granulométrique.

Laboratoire de génie civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.

Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n°0,1 récent), âge 2 ans :

Tableau 7. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n°0,1 récent), âge 2 ans.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés %	Complément à 100	Tamisats %
5000	80	0	0	100	100	_100
	50	0	0	100	100	100
	31.5	85.80	85.80	1.72	98.28	98
	20	71.10	156.90	3.138	96.86	97
	10	128.50	285.40	5.708	94.29	94
1200	5	7.15	7.15	0.59	99.41	93
	2	12.76	19.91	1.60	98.40	92
	1	9.51	29.42	2.45	97.54	91
	0.4	38.52	67.94	5.66	94.34	89
	0.2	517.17	585.11	48.76	51.24	48
	0.1	271.17	856.28	71.36	28.64	27
	0.08	33.56	889.84	74.15	25.84	24

Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon récent, âge 2 ans :

Tableau 08. Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon récent, âge 2 ans

Diam (mm)	0.07	0.053	0.03	0.02	0.01	0.009	0.00	0.00	0.001
	5		9	6	8		6	3	
particules %	23	20	18	16	14	10	7	7	7

Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n° 05 ancien), âge 50 ans :

Tableau 09. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon (n° 05 ancien), âge 50 ans.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés %	Complément à 100	Tamisats %
5000	80	0	0	100	100	100
	50	0	0	100	100	100
	31.5	79.0	79.0	1.58	98.42	98
	20	151.20	230.20	4.60	95.40	95
	10	595.60	825.80	16.52	83.48	83
1200	5	25.56	25.56	2.13	97.87	81
	2	60.84	86.40	7.20	92.80	77
	1	39.20	125.60	10.47	89.53	74
	0.4	51.80	177.40	14.78	85.22	71
	0.2	87.50	264.90	22.07	77.92	65
	0.1	519.48	784.38	65.36	34.63	29
	0.08	42.10	826.48	68.87	31.13	26

Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon ancien, âge 50 ans, normes NF P94-056 (03-96) et NF P94-057 (05-92) :

Tableau 10. Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon ancien, âge 50 ans, normes NF P94-056 (03-96) et NF P94-057 (05-92)

Diam (mm)	0.075	0.053	0.039	0.026	0.018	0.009	0.006	0.003	0.001
particules %	23	22	21	21	17	15	11	9	7

Analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g, norme NF P 18-

560 septembre 1990 :

Tableau 11. Analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g, norme NF P 18-560 septembre 1990.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage refus (%)	Pourcentage passant (%)	Observations
5	00	00	00	100	100
4	0.1	0.1	0.01	99.99	100
2.5	0.09	0.19	0.019	99.98	100
2	0.05	0.24	0.024	99.97	100
1.60	02.11	02.35	0.235	99.76	100
0.500	332.30	334.65	33.465	66.53	67
0.200	405.12	739.77	73.977	26.02	26
0.080	257.85	997.62	99.762	0.24	00

3.1.3.1 Essai Proctor normal:

3.1.3.1.1. But de l'essai :

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une densité maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises.

3.1.3.1.2. Principe de l'essai :

- On compacte des échantillons de sol dans un moule normalisé en adaptant diverses valeurs de teneur en eau ; pour chaque essai, déterminer la masse volumique apparente correspondante.
- Porte les résultats sur un graphique et tracer une courbe passant au mieux par les points trouvés ; l'abscisse du maximum de cette courbe représente la teneur en eau optimale W_{opt} et son ordonnée la masse densité sèche maximale $\gamma_{d\max}$.

Valeurs des densités sèches et teneurs en eau pour l'essai de compactage (Proctor normal).

Norme : NF P 94 -093 septembre 1997 :

Tableau 12. Valeurs des densités sèches et teneurs en eau pour l'essai de compactage (Proctor normal). Norme : NF P 94 -093 septembre 1997.

	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
L'eau ajoutée (%)	10	12	14	10	12	14
Poids total humide (g)	4336.0	4404.9	4360.4	4266.2	4352.4	4366.2
Poids du moule (g)	2372.00			2372.00		
Poids du sol humide (g)	1964.00	2032.90	1988.40	1894.20	1980.40	1994.20
Poids du sol sec (g)	1788.38	1828.15	1754.68	1697.00	1749.93	1731.82
Volume du moule (cm ³)	902.75			902.75		
Densité sèche (t/m ³)	01.98	02.02	1.94	1.88	1.94	1.92
N° de la tare	01	02	03	1	2	3
Poids total humide (g)	269.30	291.5	277.20	144.70	160.50	137.50
Poids total sec (g)	245.54	270.17	254.60	131.10	143.50	121.29
Poids de la tare (g)	85.10	79.70	84.90	14.10	14.40	14.30
Poids de l'eau (g)	15.76	21.33	22.60	13.60	17.00	16.21
Poids du sol sec (g)	160.44	190.47	169.70	117.0	129.10	106.21
Teneur en eau (%)	9.82	11.20	13.32	11.62	13.17	15.15

3.1.3.2 Limites d'Atterberg :

3.1.3.2.1. But de l'essai :

La détermination des deux limites (de liquidité ω_l et ω_p de plasticité), qui sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et caractériser son état au moyen de son indice (IL de liquidité, Ip de plasticité et Ic de consistance).

3.1.3.2.2. Définitions :

a) La limite de liquidité :

C'est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de 1cm pour un nombre de chocs $N = 25$.

L'obtention de ce résultat est rare, donc on réalise au moins 03 essais pour chaque échantillon, puis on trace la courbe des teneurs en eau en fonction de nombre de coups. A partir de cette courbe on détermine la teneur en eau (w) qui correspond à un nombre de coups $N = 25$.

La limite de liquidité W_l est : $\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} w_l = w$ où w est la teneur en eau du sol.

Limites d'Atterberg, limite de liquidité. Norme : NF P94-051 Mars 1993 :

Tableau 13. Limites d'Atterberg, limite de liquidité. Norme: NF P94-051 Mars 1993.

N° d'essai	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
	1	2	3	1	2	3
Nombre de coups	18	21	35	18	26	34
N° de la tare	04	05	06	4	5	6
Poids total humide (g)	28.60	27.40	27.30	23.4	21.1	23.1
Poids total sec (g)	25.70	24.90	24.80	21.3	19.4	20.8
Poids de la tare (g)	14.50	14.40	14.40	14.1	14.7	14.2
Poids d'eau (g)	2.9	2.5	2.5	2.1	1.7	2.3
Poids du sol sec (g)	11.2	10.5	10.4	7.2	4.7	6.6
Teneur en eau (%)	25.89	23.81	24.04	29.17	36.1 7	34.8 5
W (%)	24.88	23.31	25.04	28.03	36.3 4	36.1 7

Pour la réalisation de cet essai, en utilisant l'appareil de Casagrande du laboratoire de génie civil de l'université d'Adrar.



Image 55. Appareil de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité. Laboratoire de génie civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.

b) La limite de plasticité :

Est la teneur en eau du rouleau qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$.

Limite de plasticité. Norme : NF P94-051 Mars 1993 :

Tableau 14. Limites d'Atterberg, limite de plasticité. Norme : NF P94-051 Mars 1993

N° de la tare	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
	D	E	F	A	B	C
Poids total humide (g)	11.11	11.00	11.10	11.10	11.00	11.10
Poids total sec (g)	10.80	10.90	11.00	10.80	10.90	11.00
Poids de la tare (g)	10.0	10.20	10.20	10.10	10.30	10.30
Poids d'eau (g)	0.31	0.10	0.10	0.3	0.10	0.10
Poids du sol sec (g)	0.80	0.70	0.80	0.70	0.60	0.70
Teneur en eau (%)	38.75	14.28	12.50	42.86	16.66	14.28
Moyenne (%)		21.84			24.6	



Image 56. Echantillons préparés pour la détermination des limites d'Atterberg.

Laboratoire de génie civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.

c) Indice de plasticité I_p :

Il permet de définir le degré de plasticité d'un sol : $I_p = W_L - W_p$. *Indice de consistance I_c :*

Donne une idée de la structure des argiles du sol : $I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$.

Des argiles ayant même indice de consistance auront des propriétés proches.

L'annexe 03 donne la classification des sols selon leurs indices de consistance.

d) Indice de liquidité I_l :

C'est le complément à 1 de l'indice de consistance :

$$I_l = \frac{W - W_p}{I_p} = 1 - I_c$$

3.1.3.3. Equivalent de sable :

3.1.3.3.1 But de l'essai :

C'est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'un gravier. Il est utilisé pour évaluer la proportion relative d'éléments fins et d'éléments grenus.

3.1.3.3.2. Principe de l'essai :

C'est un essai très simple, il se pratique sur les éléments de taille inférieure à 5mm. Un échantillon de 120 g de matériau sec est placé dans une éprouvette contenant de l'eau et un défloculent qui n'est autre qu'un ajout à la terre de coulage pour la rendre liquide en limitant la quantité d'eau. L'ensemble est mélangé, puis laissé au repos.

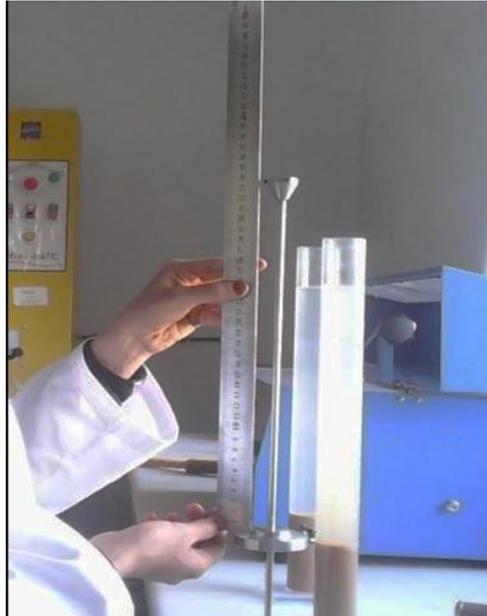


Image 57. Essai de compression pour une brique d'adobe. Source : Lamouri Hafsa.

On effectue cet essai pour le sable de mélange, en utilisant l'agitatrice électrique de laboratoire de Génie Civil de l'Université d'Adrar.



Image 58. Agitatrice électrique pour l'agitation des éprouvettes de l'essai ES. Laboratoire de génie civil, université d'Adrar. Source : Lamouri Hafsa.

L'équivalent de sable ES s'exprime en % : $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$, où

h_1 : hauteur de sable ; h_2 : hauteur total de l'éprouvette - hauteur du piston.

Schématisation des hauteurs pour la détermination de l'équivalent de sable ES, norme : NF

P18-598 Octobre 1991 :

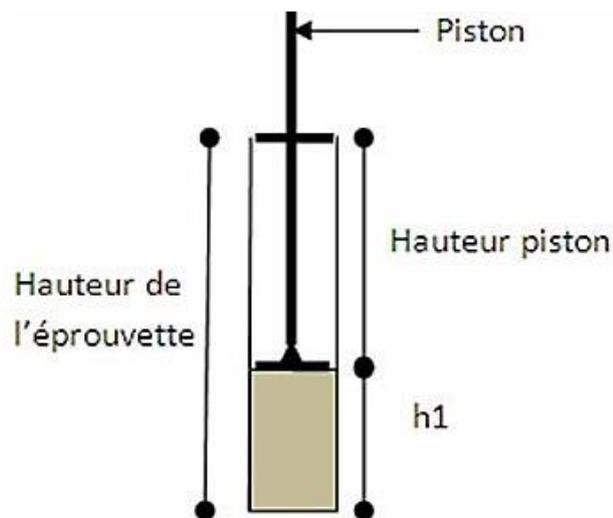


Figure 11. Schématisation des hauteurs pour la détermination de l'équivalent de sable ES.

La construction en adobe existe depuis des siècles et marque sa durabilité et résistance contre les différents efforts et actions. Ce travail expérimental nous donne une idée claire sur cette durabilité à travers les différents essais d'identification effectués sur les propriétés physique et mécanique des adobes.

Si on commence par les essais sur les propriétés physiques des adobes, on trouve d'après l'analyse granulométrique que les échantillons prélevés soit anciens âgés de plus de cinquante ans, ou récents âgés de deux ans, ont la même granularité. Puis l'essai des limites d'Atterberg nous montre que les deux échantillons ont une plasticité presque équivalente. La réalisation de l'essai de la résistance mécanique à la compression des adobes anciens et récents nous donne des résultats malgré faibles (entre 0.4 et 0.7 MPa) mais égaux.

A la fin de cette partie pratique, et d'après les exemples des constructions en adobes existents à travers le monde, et les essais qu'on a effectué, on peut conclure que le temps n'a aucune influence négatif sur la durabilité des adobes, c'est-à-dire que la résistance des blocs d'adobe ne diminue pas dans le temps, et avec des travaux d'entretiens simples et réguliers, on peut classer l'adobe comme le matériau de construction le plus adéquat localement.

Comme conclusion à ses travaux, suite à ces travaux présentés précédemment, Lamouri Hafsa Hannani est sortie avec la conclusion selon laquelle « l'idée de réaliser une étude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre crue anciennes et contemporaines vient de l'état de dégradation et désordre de ce type de construction et le besoin de retour à une construction qui regroupe les meilleures propriétés mécaniques, ainsi que l'adaptation aux habitudes des habitants et à l'environnement.

« L'étape expérimentale de ce travail, porte sur la réalisation des différents essais

d'identification, basés sur l'essai de la résistance à la compression, afin d'obtenir une base scientifique permettant la valorisation de la construction en adobe.

« A la fin de ce travail, nous pensons avoir réussi à répondre à notre but principal qui est celui de protéger les habitations en adobe de se dégrader, par la valorisation de la résistance mécanique à la compression des adobes. »

Ces travaux ne feront qu'enrichir le peu de connaissances sur un savoir ancestral dans un pays de tradition orale.

Ainsi nous aurons profité de l'enrichissement du monde de la terre crue avec les travaux précédents de Lamouri Hafsa Hannani.

3.2. Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité :

La thèse élaborée par Edouard Kadjile sur laquelle nous nous sommes basés date de 2010 et a été soutenue par son auteur à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou et a pour but d'éclairer par une étude expérimentale l'évaluation de quelques indicateurs de durabilité du mortier d'enduit réalisé. Les indicateurs de durabilité retenus pour cette étude sont : la performance mécanique, la résistance à l'agression chimique et la stabilité volumétrique de l'enduit.

3.2.1. Le choix des matériaux :

L'intérêt pour cette partie est de chercher à réaliser un enduit traditionnel plus durable en comparaison avec les caractéristiques du mortier normal de référence réalisé et testé également. C'est dans cette optique que le néré, réputé être un agent de renforcement de durabilité des enduits traditionnels africains, a été choisi pour être testé.

Les éléments utilisés sont donc le ciment portland CEM I 45 (de la marque *Diamond Cement*), le sable fin à moyen (80µm à 2mm), l'eau potable et une solution de Néré (de son nom scientifique le *Parkia biglobosa*) dosée à 180g/l.

3.2.2 Composition des mélanges à réaliser :

Les mélanges à réaliser pour les essais sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Ils sont préparés et mélangés conformément à l'EN 1937.

Composition des mélanges à réaliser :**Tableau 15.** Composition des mélanges à réaliser.

Mélange	Matériaux			Solution de néré
	Ciment	Sable	Eau	
M1	X	X	X	
M2	X	X		X

3..2.3. Confection des éprouvettes :

Les éprouvettes des différents mortiers d'enduit pour l'essai sont confectionnées selon les méthodes de l'EN 196-1. Notation : **MR = mortier de référence**, **MN = mortier au néré**. (le néré étant un arbre de la famille des mimosas)

Dosage des mélanges à réaliser :**Tableau 16.** Dosage des mélanges à réaliser.

Mélange	Ciment	Sable 0/2	Eau	Solution de Néré
MR	450g	1350g	225ml	
MN				225ml
Rapport E/C			0,5	

Pour chaque mélange, des moules normalisés permettent de réaliser simultanément trois éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm × 4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés “éprouvettes 4 × 4 × 16”). Un appareil à chocs (NF EN 196.1) permet d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde.

24 heures après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture. Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

3.2.4 Durabilité des enduits :

L'étude de durabilité dans ce contexte a pour objectif d'évaluer quelques caractéristiques principales des mortiers que sont :

- les performances mécaniques ;
- les résistances aux agressions chimiques ;
- la stabilité volumétrique (absorption d'eau, variations dimensionnelles), etc.

3.2.5. Performances mécaniques :

Les essais sont effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances des mortiers d'enduit (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment (ciment portland CEM I – 45) ;
- rapport E/C (dans notre cas $E/C = 0,5$) ;
- granulométrie et nature du sable (sable fin à moyen) ;
- énergie de malaxage et mise en œuvre (malaxeur normalisé) ;
- protection les tous premiers jours (conservation à $\pm 30\text{ }^\circ\text{C}$).

3.2.5.1 Résistance à la traction par flexion :

La mesure de la résistance à la traction par flexion est effectuée à l'aide d'un appareillage spécial pourvu d'un dispositif de flexion par trois points tels que schématisés sur les figures ci-dessous (12 et 13). La résistance est calculée selon la formule :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions $b = 40\text{ mm}$ et $l = 100\text{ mm}$, si F_f est exprimée en newtons (kN), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f (\text{MPa}) = 2.34375 \times F_f (\text{kN})$$

Les résultats d'essai sont exprimés comme la moyenne arithmétique de trois déterminations de la résistance à la flexion et des trois valeurs individuelles.

Si un des résultats des trois déterminations varie de plus de 20 % par rapport à la moyenne, l'essai doit être répété avec de nouvelles éprouvettes.

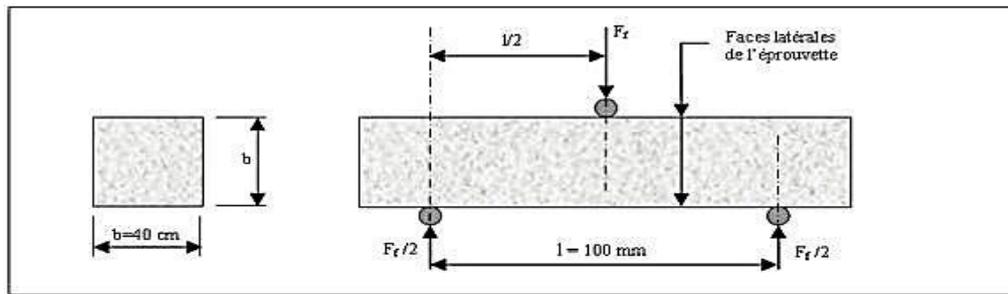


Figure 12. Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion

3.2.5.2. Résistance à la compression :

Les essais sont effectués selon la norme NF P15-451. Les demi-prismes obtenus après rupture en flexion de l'éprouvette ont été rompus en compression au moyen de la presse d'écrasement. La résistance est calculée selon la formule :

$$R_c = F_c / S \text{ avec } S = b^2$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newton, $b = 40$ mm, cette résistance exprimée en Méga pascals vaut :

$$R_c \text{ (MPa)} = F_c \text{ (N)} / 1600$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,05 MPa près et on en fait la moyenne (retenue à 0,1 MPa près). Si l'un des 6 résultats diffère de ± 10 % de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de ± 10 % de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conservation ?

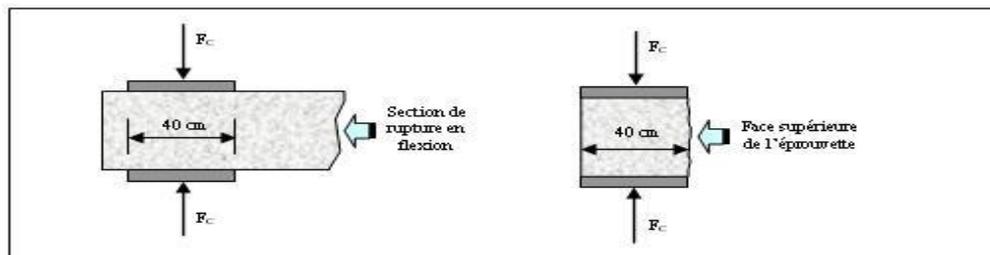


Figure 13. Dispositif de rupture en compression

3.2.5.3. Résistance aux agressions chimiques :

Pour l'essai de résistance aux milieux agressifs, les solutions chimiques suivantes ont été retenues :

- **Sulfate de sodium** : les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains

composés chimiques expansifs tels que : l'ettringite secondaire (l'ettringite est une espèce minérale, composée de sulfate de calcium et d'aluminium hydraté) et le gypse. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations (Université de Sherbrooke : GCI 714 – Durabilité et réparations du béton). Les sulfates se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux des milieux agraires ;

- **Chlorure de magnésium** : un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Ces milieux peuvent contenir des ions agressifs tels les chlorures. La plupart du temps, les attaques chimiques surviennent lorsque les agents agressifs s'associent avec l'eau pour former une solution agressive qui peut pénétrer le béton (tout en entraînant d'autres substances corrosives: ions.¹ Le choix de ces solutions chimiques se justifie donc par le fait que les constructions en milieu agricole (cultures ou jardin autour des maisons) et les constructions soumises aux intempéries (pluie, vent humide, etc.) sont courantes en Afrique. L'agressivité de ces solutions sur le ciment a été mise en évidence par plusieurs recherches, notamment celle de Douglas E. et de Verbeck K, G.J. (Douglas E, 1989 : « Mortier de ciments au laitier et béton de laitier : caractéristiques de durabilité », Matériaux complémentaire en cimentation Canmet V.M Malhotra éditeur, p 373 – 411).

Après 24h de cure sous l'eau, les spécimens de mortiers sont immergés dans les solutions de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et de chlorure de magnésium (MgCl_2) à 5% de concentration chacune. La variation du poids des éprouvettes est examinée après 2, 7, 14 et 21 jours.

Après attaque, les parties altérées du mortier sont nettoyées avec de l'eau, puis sont séchées pendant une demi-heure selon la norme ASTM C267-96 « *Résistance des mortiers aux produits chimiques* », et enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte en masse des éprouvettes :

$$\text{Perte en masse (\%)} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100$$

Avec m_1 et m_2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

3.2.5.4 Stabilité volumétrique :

La mesure de l'absorption d'eau par capillarité et des variations dimensionnelles et

¹ Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 La durabilité des bétons, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, France 450 P

pondérales sont effectuées sur les éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16) cm, pour chacune des deux formulations des mortiers. Les éprouvettes sont testées aux 2, 7, 14 et 21 jours d'âge.

L'absorption d'eau par capillarité :

L'essai est effectué à température « régulée » du laboratoire, sur trois demi-prismes (éprouvettes 4 x 4 x 16 cm après essai de flexion) conformément au §8 de la norme NF EN 1015-18 - *Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci*.

Les éprouvettes sont immergées par leur base rompue par flexion de telle manière à ce qu'elles ne touchent pas le fond du récipient et qu'elles soient immergées dans de l'eau, sur une hauteur d'eau de 5 à 10 mm au dessus de cette base rompue.

A cet instant, le chronomètre est déclenché et le niveau d'eau est maintenu constant pendant tout l'essai. Après 10 minutes, les éprouvettes sont retirées du récipient et essuyées brièvement avec un chiffon humide. Les éprouvettes sont pesées M_1 et replacées dans le récipient. Après 90 minutes, l'opération est répétée et les éprouvettes sont pesées à nouveau M_2 .

Le coefficient de capillarité est égal à la valeur moyenne, exprimée en grammes, de la reprise de poids de chaque éprouvette entre 10 et 90 minutes :

$$W = 0,1 (M_2 - M_1) [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{min}^{0,5})]$$

Les variations dimensionnelles et pondérales :

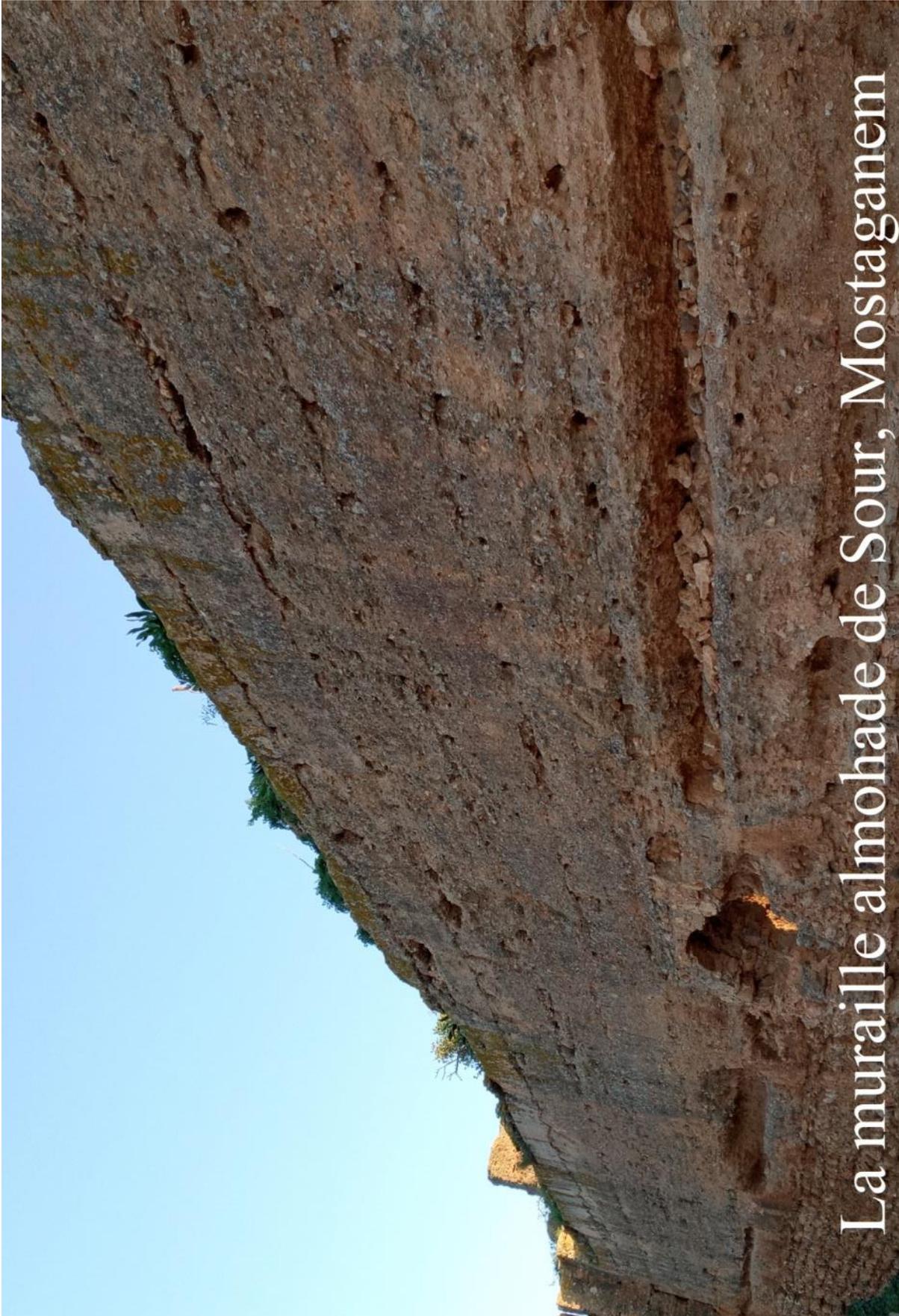
L'essai est effectué sur trois éprouvettes de dimensions 4 x 4 x 16 cm munies de dispositifs de mesure aux extrémités. Dès le démoulage (24 heures après fabrication), la distance entre les extrémités est déterminée et les éprouvettes sont pesées. Les mêmes mesures sont effectuées après 2, 7, 14 et 21 jours de séchage en ambiance à $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 5)\%$ HR, les éprouvettes étant stockées sur chant.

De ce qui précède et vue notre expérience à Bouardia dans la wilaya de Relizane, Sour dans la wilaya de Mostaganem, Mansourah à Tlemcen et autres lieux, nous concluons que la tâche est ardue quant aux essais et analyses afin de réussir d'abord un matériau sûr et apte à durer le plus longtemps possible, résistant et performant. Un matériau de terre crue aux propriétés physiques et mécaniques inégalables qui pourraient défier aussi bien les phénomènes naturels qui vont du vent et la pluie au séisme et à la prédation humaine en tous genres.

Station météorologique de Mostaganem.

Totaux mensuels des précipitations

MOIS	2019	2020
Janvier	55,2	38,0
Février	1,4	00
Mars	17,0	34,6
Avril	35,0	32,4
Mai	7,5	27,4
Juin	0,4	1,0
Juillet	0,2	0,6
Août	0,0	
Septembre	21,2	
Octobre	32,8	
Novembre	54,2	
Décembre	40,0	



La muraille almohade de Sour, Mostaganem



Chapitre –V–

Interprétation des résultats

Introduction :

Parmi la douzaine de prélèvements, le choix est tombé sur trois échantillons que nous allons clore cette étude qui sera basée sur du concret, soit l'épluchage des essais, analyses, observations et constatations liés à ce parcours qui nous a amenés à traverser des centaines de kilomètres à travers plusieurs wilayas d'Algérie au niveau d'administrations, de laboratoires, chez des campagnards et citoyens, parmi les ruines, les chantiers sur des routes et pistes poussiéreuses mais aussi à feuilleter ouvrages et documents en tous genres, à demander avis et conseils... Et le résultat est si probant.

Parmi la douzaine de prélèvements, le choix est tombé sur trois échantillons que nous avons présentés au Laboratoire de Travaux Publics de l'Ouest - LTPO –, unité de Tiaret, qui nous a gratifiés d'essais et analyses dont nous présentons comme les résultats. D'autres laboratoires n'étaient pas disponibles sans en connaître les causes.

Aussi pour mieux arriver à cerner notre cas concret qu'est la restauration de la Muraille de Sour, Mostaganem, toujours en rapport avec notre sujet « **L'architecture de terre** » et approfondir nos connaissances en matières de restauration nous avons axé nos efforts également vers « **les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du matériau terre dans la réhabilitation et la restauration du bâti ancien construit en terre** » et pour cela, nous avons dû nous référer également à deux thèses citées précédemment et que nous rappelons de nouveau « Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun » de Lamouri Hafsa Hannani, thèse en master en génie civil, soutenue à l'université d'Adrar en octobre 2014 et « Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité », thèse de master élaborée par Edouard Kadjile », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou, 2010.

1. Muraille de Sour, Mostaganem. Essais et analyses des prélèvements :

1.1. Résultats de l'essai granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057

Tableau 17. Résultats : Terre en technique de pisé.

Ouverture des mailles des tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
6.3		00	100
5	22	04	96
4	49	10	90
3.15			
2.5			
2	98	20	80
1.60			
1.25			
1	130	26	74
0.8			
0.63			
0.5	164	33	67
0.4	184	37	63
0.315	255	51	49
0.25			
0.2	398	80	20
0.16			
0.125	422	84	16
0.1			
0.08	430	86	14

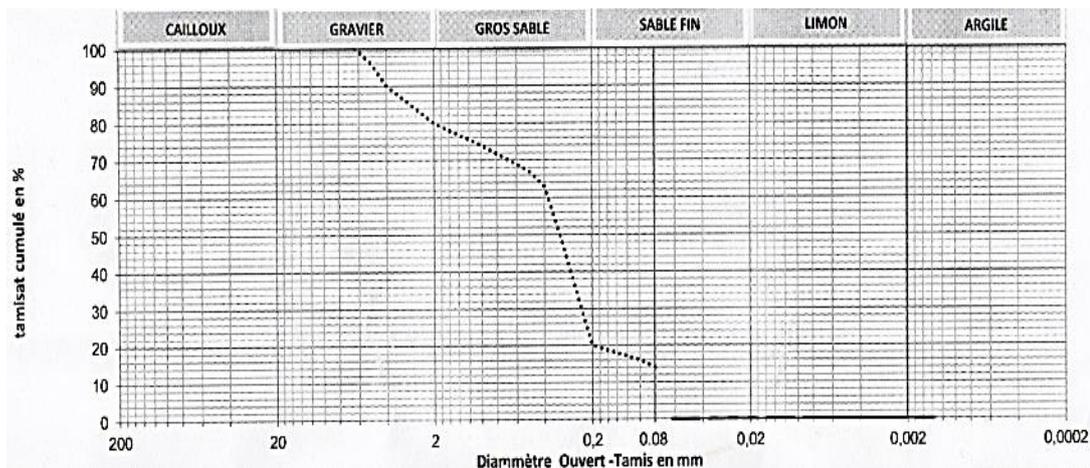


Figure 14. LTPO Tiaret. Courbe granulométrique
du pisé de la muraille de Sour, Mostaganem

- Cailloux : 200 mm- 20 mm
- Gravier : 20 mm - 2 mm
- Sables grossiers : 2 mm- 0,2 mm
- Sables fins : 0,2 mm - 0,02 mm

➤ **Interprétation de la courbe granulométrique :**

D'après la courbe granulométrique la répartition est la suivante :

Sable fin :5%

Gros sable :60 %

Gravier : 20 %

La terre du pisé prélevés est ont composée d'un grand pourcentage de sable de dimensions comprises dans l'intervalle de 2mm -0.02 mm majoritaire en sable.

1.2 Résultats de l'essai VBS au bleu de méthylène :

Valeur au bleu VBS :

$VBS \leq 0,1$: sol est insensible à l'eau ;

$0,1 \leq VBS \leq 0,2$: apparition de la sensibilité à l'eau ;

$0,2 \leq VBS \leq 1,5$: seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sableux argileux ;

$1,5 \leq VBS \leq 2,5$: sols limoneux de plasticité moyenne ;

$2,5 \leq VBS \leq 6$: sols argileux ;

$8 \leq VBS$: sols très argileux.

$VBS= 0.32$, $0,2 \leq 0.32 \leq 1,5$ donc terre sablonneuse limoneuse

1.3. Résultats de teneur en carbone Caco NA 2789

- 0%-10% de caco3 : argile ou limon ;
- 10%-30% de caco3 : argile marneuse ou limon marneux ;
- 30%-70% de caco3 : marne ;
- 70%-90% de caco3 : calcaire marneux ;
- 90%-100% de caco3 : calcaire.
- Teneur en carbonates 31% donc notre terre est la marne.

1.4. Teneur en sulfate SO_4^{-2} NA -16002-5042

Résultats :

- Teneur en sulfates est 2400 mg/kg.

1.5. Résultats d'essai Proctor normal ou modifié NFP 94-093

La densité sèche du pisé est dans les normes 1,73 t/m³ et 1,80 t/m³ selon les deux procédés Proctor normal et modifié respectivement. (Voir figures 15 et 16 ci-dessous)
On opte pour la valeur 1.80 t/m³ puisque notre sol n'est pas traité. Une densité élevée ce qui signifie une compacité élevée en conséquence une résistance mécanique élevée.

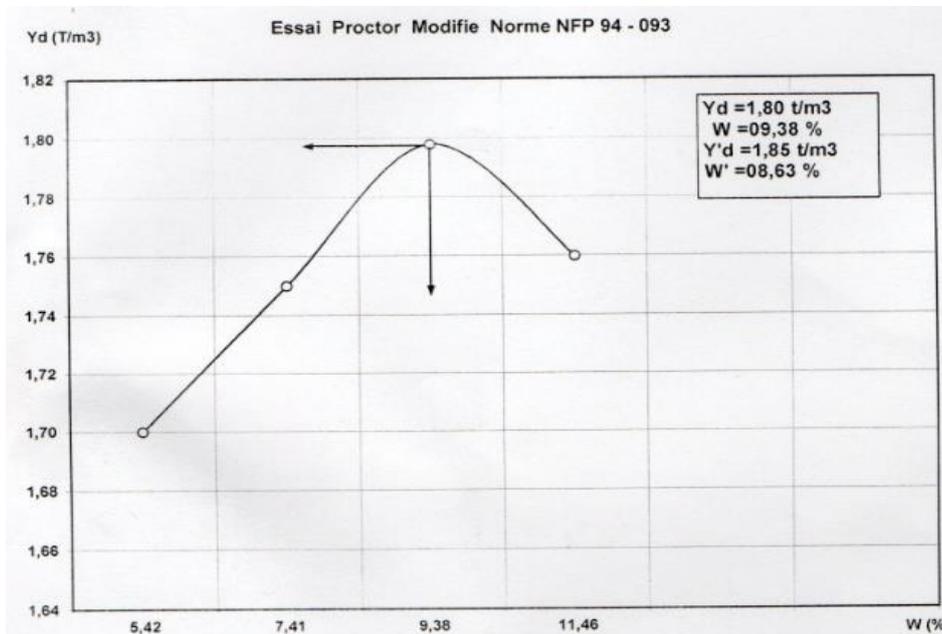


Figure 15. LTPO de Tiaret. Essai Proctor modifié. Norme NFP94-093

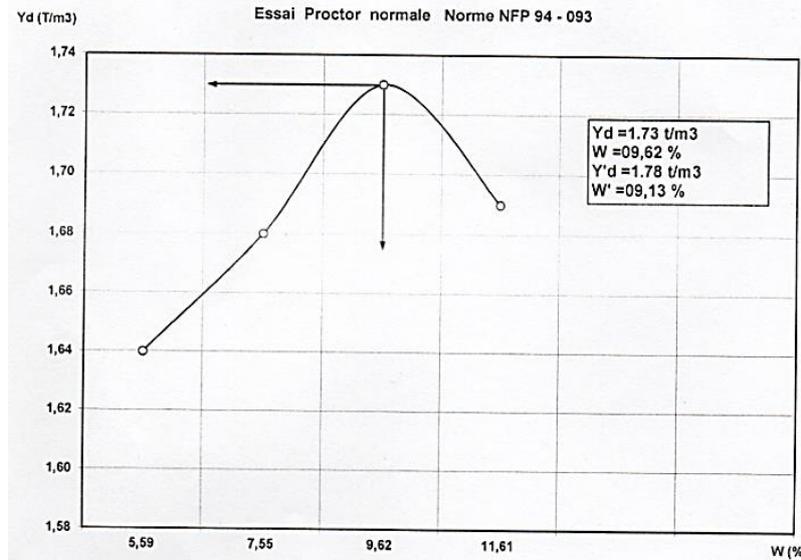


Figure 16. LTPO de Tiaret. Proctor Normal. Norme NFP94-093

De ce qui précède nous concluons que notre batterie d'essais au niveau du LTPO de Tiaret nous a été bénéfique à plus d'un titre en vue de la connaissance approfondie du matériau « terre crue » compactée dans le pisé de la muraille de Sour il y a 700 ans pourrait être retrouvée et sûrement non loin dans les environs dans le but d'une préservation et d'une restauration en bonne et due forme répondant aux normes assurant la durabilité de l'intervention.

2. Expérimentation sur des échantillons choisis en différents endroits :

Deux échantillons ont été choisis dans le cadre de notre étude pour différentes raisons dont la disponibilité des moyens et autres promesses d'aide d'aboutir à sauver un prestigieux monument historique. Le premier, un sol verdâtre prélevé à Tiaret et le second à Bouardia dans la commune de Had Chekala, wilaya de Relizane, comme il a été précisé dans le chapitre précédent.

2.1 Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057 :

Résultats pour l'échantillon n ° 1

Prélèvement à Tiaret (sol verdâtre)

Tableau18. Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057. Echantillon de Tiaret.

Ouverture des mailles des tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
6.3	00	00	100
5	02	00	100
4	03	01	99
3.15			
2.5			
2	08	2	98
1.60			
1.25			
1	18	4	96
0.8			
0.63			
0.5	45	9	91
0.4	58	12	88
0.315	65	13	87
0.25			
0.2	96	19	81
0.16			
0.125	121	24	76
0.1			
0.08	144	29	71

Résultat pour l'échantillon n°2
Prélèvement à Bouardia (sol marron)

Tableau19. Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide NF P94-056 et NF P94-057. Echantillon n°2 de Bouardia.

Ouverture des mailles des tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
6.3	00	00	100
5	01	00	100
4	02	00	100
3.15			
2.5			
2	05	01	99
1.60			
1.25			
1	08	03	97
0.8			
0.63			
0.5	14	03	97
0.4	21	04	96
0.315	30	06	94
0.25			
0.2	103	20	80
0.16			
0.125	158	32	68
0.1			
0.08	187	37	63

2.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie NF P94-056 et NF P94-057 :

Les résultats de l'analyse de notre échantillon sont inscrits sur les tableaux suivants :

Tableau 20. Résultats pour l'échantillon n° 1. Prélèvement à Tiaret (sol verdâtre) :

Temps de lecture	R lecture densimètre	T (°C)	Ct	P% sur tamis 80 µm	D (µm)
30 s	1.019	23°	1.1	60	
01 mn	1.017	//	//	54	
02 mn	1.011	//	//	37	
05 mn	1.007	//	//	26	
10 mn	1.006	//	//	23	
20mn	1.003	//	//	16	
40 mn	1.002	//	//	13	
80 mn	1.001	//	//	10	
04 h	1.0000	//	//	08	
24h	1.000	//	//	06	

Tableau 21. Résultats pour l'échantillon n°2. Prélèvement à Bouardia (sol marron)

Temps de lecture	R lecture densimètre	T (°C)	Ct	P% sur tamis 80 µm	D (µm)
30 s	1.015	23°	1.1	43	
01 mn	1.014	//	//	41	
02 mn	1.013	//	//	38	
05 mn	1.011	//	//	33	
10 mn	1.010	//	//	31	
20mn	1.009	//	//	29	
40 mn	1.008	//	//	26	
80 mn	1.007	//	//	24	
04 h	1.006	//	//	22	
24h	1.004	//	//	16	

➤ **Elaboration de la courbe granulométrique**

En abscisse le diamètre des grains et en ordonnée le pourcentage du tamisât cumulé.

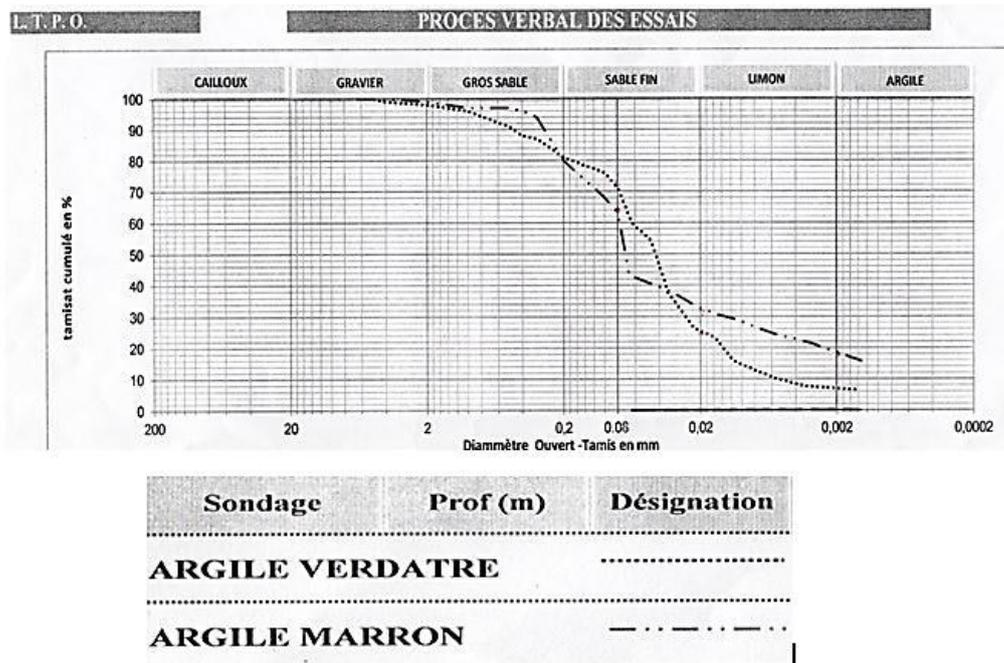


Figure 17. Procès verbal d'essais, LTPO de Tiaret. Résultats des tests des échantillons de terre prélevés à Tiaret (sol verdâtre) et Bouardia (sol marron).

Sols à matrice grossière :

- Cailloux : 200 mm- 20 mm
- Graviers : 20 mm - 2 mm
- Sables grossiers : 2 mm- 0,2 mm
- Sables fins : 0,2 mm - 0,02 mm

Sols à matrice fins :

- Limons : 0,02 mm - 0,02 mm
- Argiles : 0,002 mm - 0 mm

➤ **Interprétation des résultats :**

L'analyse granulométrique nous a donné la répartition suivante :

- Pour le sol verdâtre, échantillon de Tiaret : 8% d'argile ,19% de limons et 74% de sable ;
- Pour le sol marron, échantillon de Bouardia : 5% d'argile, 14% de limons et 68% de sable.

En comparant avec les données de CRAterre pour la confection de la brique en terre crue qui sont en proportion de sable de 55 à 75 %, argile de 10 à 28 % et en limon de 15 à 18 %, nos résultats sont loin d'être satisfaisants.

Les deux échantillons de terre prélevés sont composés d'un grand pourcentage de sable dans l'intervalle de 2 mm-0.02 m donc une prédominance d'une fraction particulière

qui n'est autre que le sable et un petit pourcentage d'argile. Cela signifie que notre sol est un sable limoneux argileux.

➤ **Coefficient d'uniformité :**

Tableau 22. Coefficient d'uniformité.

Coefficient d'uniformité	Classes de granulométrie
$Cu \leq 2$	granulométrie très serrée
$2 < Cu \leq 5$	granulométrie serrée
$5 < Cu \leq 20$	granulométrie semi-étalée.
$20 < Cu \leq 200$	granulométrie étalée
$200 < Cu$	granulométrie très étalée

Pour notre premier échantillon (sol verdâtre de Tiaret) : $Cu = 0.045/0.0077$ $Cu = 5.84$ donc une granulométrie est semi-étalée. Pour notre second échantillon (sol marron de Bouardia), le Cu n'est pas mesurable puisque le d_{10} n'est pas atteint.

➤ **Coefficient de courbure :**

$$\text{Pour notre échantillon sol verdâtre, le } Cc = \frac{(0.012)^2}{0.045 \times 0.0077} = 0.415$$

$Cc=0.415$ signifie qu'il est mal gradué avec une granulométrie discontinue.

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forment des pentes stables.

Donc pour que notre terre soit convenable à l'utilisation dans la construction en terre crue et la confection d'un adobe ou autre technique, le procédé de stabilisation est imposé dans ce sens afin d'améliorer les propriétés permanentes compatibles avec une application particulière.

2.3. Essai limite d'Atterberg NFP 94 051 03 :

**Résultats pour l'échantillon n° 1.
Prélèvement à Tiaret (sol verdâtre)**

Tableau 23: Les résultats de la limite de liquidité :

	1er essai		2ème essai		3ème essai	
Nombre de coups	17		22		27	
N° tare	77	A48	X3	D4	61	170
Poids total humide (g)	6.06	6.85	5.89	6.06	6.10	6.43
Poids total sec (g)	5.45	6.08	5.37	5.53	5.49	5.77
Poids de la tare (g)	3.83	4.03	3.95	4.08	3.78	3.91
Poids de l'eau	0.61	0.77	0.52	0.53	0.61	0.66
Poids de sol sec (g)	1.62	2.05	1.42	1.45	1.71	1.86
Teneur en eau (%)	37.65	37.56	36.62	36.55	35.67	35.48
La moyenne	37.61		36.59		35.58	

Tableau 24. Les résultats de la limite de plasticité

	1er essai	2ème essai	3ème essai	4ème essai
N° tare	300	P4	182	CD
Poids total humide (g)	5.01	4.99	4.73	4.56
Poids total sec (g)	4.87	4.85	4.59	4.42
Poids de la tare (g)	4.14	4.11	3.85	3.65
Poids de l'eau	0.14	0.14	0.14	0.14
Poids de sol sec (g)	0.73	0.74	0.74	0.77
Teneur en eau (%)	19.18	18.92	18.92	18.18
La moyenne	19.05		18.05	
	18.80			

On conclut que les limites de liquidité ainsi que celle de plasticité sont comme suit :

Tableau 25. Limites de liquidité et de plasticité

Limite de liquidité : $Wl=36.00$ (%)	Indice de plasticité $I_p= 17.20$ %
Limite de plasticité : $Wp=18.80$ (%)	

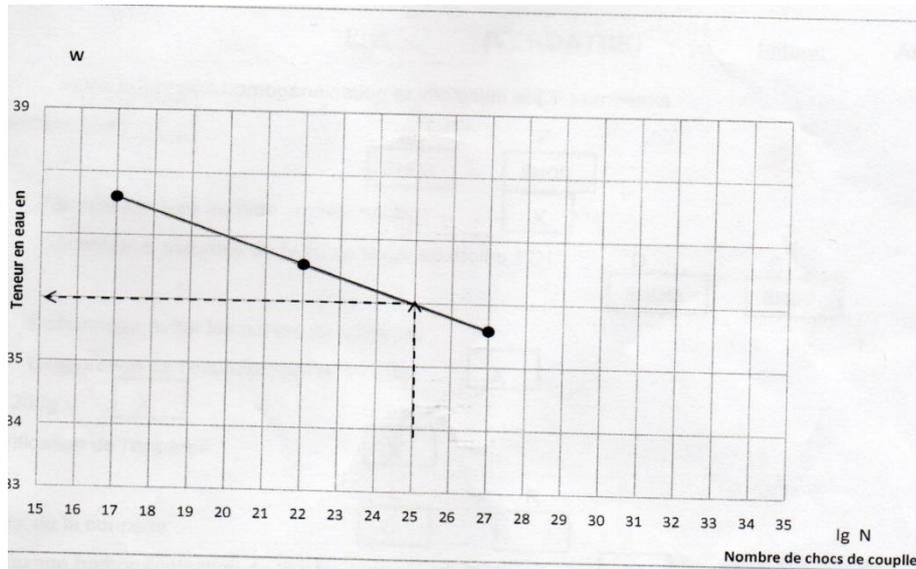


Figure 18. LTPO de Tiaret. Essai limite de liquidité

Résultats pour l'échantillon n°2. Prélèvement à Bouardia (sol marron)

Tableau 26. Les résultats de la limite de liquidité

	1er essai		2ème essai		3eme Essai	
Nombre de coups	16		21		26	
N° tare	H33	69	280	1BB	ACZ	2BB
Poids total humide (g)	6.58	7.17	6.88	7.31	6.65	6.48
Poids total sec (g)	5.99	6.46	6.24	6.66	6.07	5.96
Poids de la tare (g)	3.84	3.86	3.82	4.18	3.78	3.90
Poids de l'eau	0.59	0.71	0.64	0.65	0.58	0.52
Poids du sol sec (g)	2.15	2.60	2.42	2.48	2.29	2.06
Teneur en eau (%)	27.44	27.31	26.45	26.21	25.33	25.24
La moyenne	27.37		26.33		25.29	

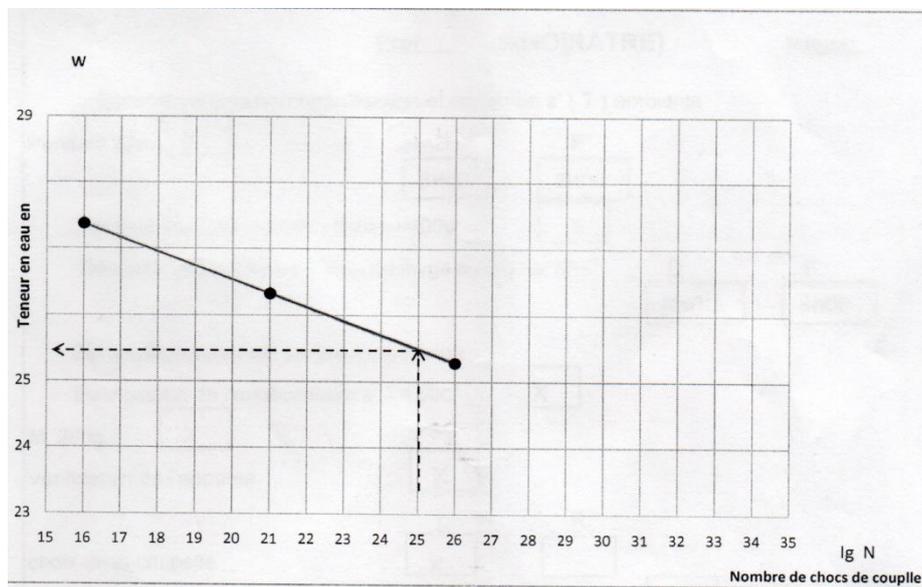
Tableau 27. Les résultats de la limite de plasticité

	1 er essai	2ème essai	3ème essai	4ème essai
N° tare	F3	42	45	FYY
Poids total humide (g)	4.89	4.80	4.61	4.56
Poids total sec (g)	4.78	4.69	4.49	4.44
Poids de la tare (g)	4.04	4.01	3.75	3.72
Poids de l'eau	0.11	0.11	0.12	0.12
Poids de sol sec (g)	0.74	0.68	0.74	0.72
Teneur en eau (%)	14.86	16.18	16.22	16.67
Moyenne	15.52		16.44	
	15.98			

En conclusion les limites de liquidité et de plasticité ainsi que l'indice de plasticité sont comme suit :

Tableau 28. Limites de liquidité et de plasticité :

Limite de liquidité : $Wl=36.00(\%)$	Indice de plasticité $I_p= 9.51 \%$
Limite de plasticité : $Wp=18.80(\%)$	

**Figure 19.** LTPO de Tiaret. Limite de liquidité**Résultats :**

- Pour l'argile verdâtre, échantillon prélevé à Tiaret, $I_p=17.20$ donc un sol moyennement argileux ;

- Pour l'argile marron, échantillon prélevé à Bouardia, $I_p=9.51$ donc un sol faiblement argileux.

• **Le diagramme de plasticité** : Casagrande proposa un diagramme de plasticité (voir figure 20 ci-dessous) permettant d'identifier les sols à grains fins à partir des limites d'Atterberg. Le diagramme est divisé en deux zones par la ligne A, chaque zone étant elle-même subdivisée en trois régions, selon la plasticité des sols.

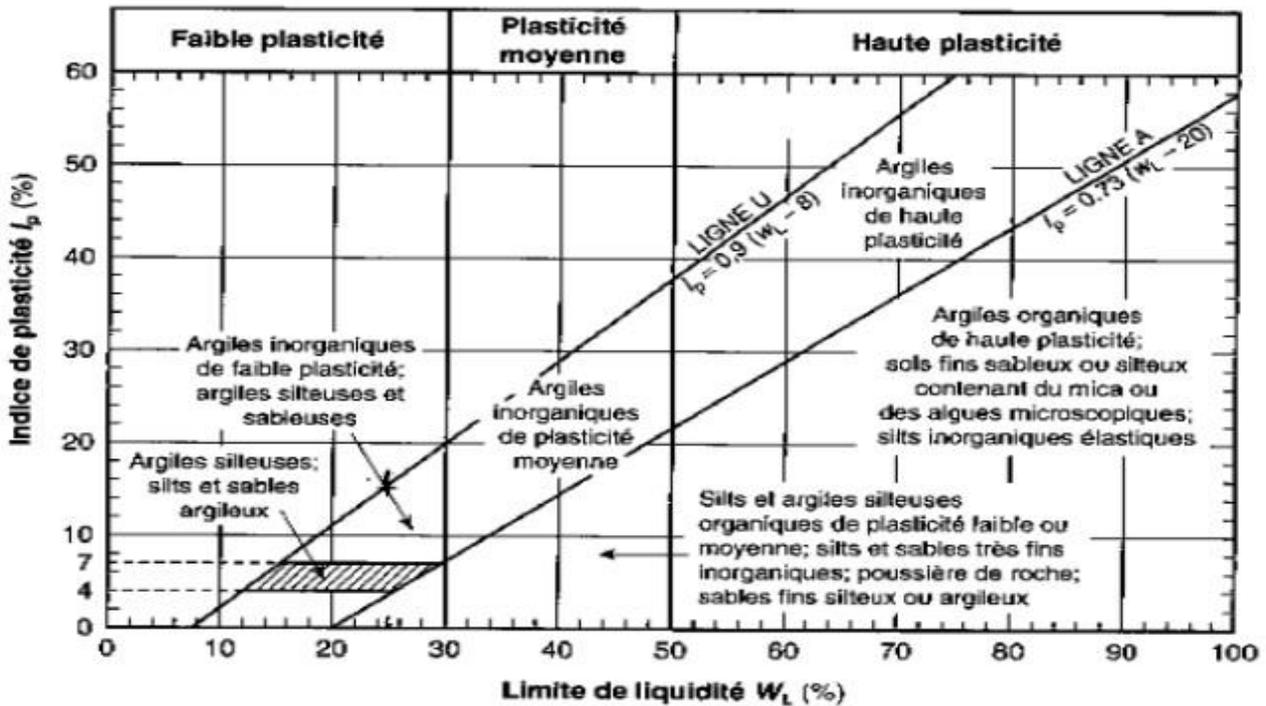


Figure 20. Diagramme de plasticité des sols de Casagrande.

✎ Résultats :

Concernant le sol verdâtre, prélevé à Tiaret: $I_p=17.20\%$ et $W_l=36\%$ donc notre sol est de plasticité moyenne.

2.4. Résultats de l'essai VBS au bleu de méthylène :

➤ Valeur au bleu VBS :

- a. $VBS \leq 0,1$: sol est insensible à l'eau ;
- b. $0,1 \leq VBS \leq 0,2$: apparition de la sensibilité à l'eau ;
- c. $0,2 \leq VBS \leq 1,5$: seuil distinguant les sols sablo-limoneux ;
- d. $1,5 \leq VBS \leq 2,5$: sols limoneux de plasticité moyenne ;
- e. $2,5 \leq VBS \leq 6$: sols argileux ;

f. $8 \leq \text{VBS}$: sols très argileux.

- La terre verdâtre, échantillon prélevé à Tiaret a un VBS = 2.17 donc un sol limoneux de plasticité moyenne ;

- La terre marron, échantillon prélevé à Bouardia a un VBS = 1.07 donc un sol insensible à l'eau c'est-à-dire sol sableux.

2.5 Résultats Teneur en carbone CaCO_3 NA 278 :

Suivant la teneur CaCO_3 on peut distinguer pour les sols fins :

2. 0%-10% de CaCO_3 : argile ou limon ;
3. 10%-30% de CaCO_3 : argile marneuse ou limon marneux ;
4. 30%-70% de CaCO_3 : marne ;
5. 70%-90% de CaCO_3 : calcaire marneux ;
6. 90%-100% de CaCO_3 : calcaire.

- Le prélèvement de terre verdâtre, échantillon de Tiaret a une teneur en carbonate (CaCO_3) de 40 % donc notre sol est la marne ;

- Le prélèvement de terre marron, échantillon de Bouardia a une teneur en carbonate (CaCO_3) de 9 % donc notre sol est argile ou limon.

Conclusion :

D'après les résultats obtenus précédemment et suite aux tests de laboratoire l'on conclut que nos deux échantillons de terre ne sont pas convenables à l'utilisation dans la construction en terre crue notamment à la fabrication de l'adobe, la brique en terre crue. Le procédé de stabilisation est imposé dans ce sens pour améliorer les performances techniques de nos terres choisies.

Les échantillons de terre prélevés à Tiaret et à Bouardia en longeant la RN 90, 6 km au sud de la commune de Had Chekala dans la wilaya de Relizane se sont avérés de texture sableuse et moyennement plastique.

Cela signifie que la cohésion de l'ensemble est faible et les briques se désagrégeront d'où il est préconisé un traitement avec un liant hydraulique en ciments Portland artificiel (CPA) de classe 250 ou 325 (CPA 250 – CPA 350) de 6 à 12%. Il est recommandé des ciments comportant 80 % d'éléments inférieurs à 80 microns ce qui changera la granularité de nos matériaux en augmentant leur résistance à la compression et à l'érosion ainsi que l'insensibilité à l'eau.

L'addition minérale telle que celle d'argile avec un apport d'au moins 25 % ou un

rajout en faible quantité de bitume de 2 à 4% améliorera l'imperméabilisation de la terre alors que l'ajout des fibres est indispensable.

Le succès de la stabilisation dépend d'un bon malaxage. L'ajout de stabilisants en poudre, le ciment dans notre cas, sont mélangés à la terre sèche. Quant aux émulsions de bitume, on les incorpore à la terre déjà imbibée d'eau afin d'obtenir de bons résultats de grande performance à tous égards et de durabilité ainsi qu'une meilleure résistance.

Malheureusement la propagation de la pandémie de la Covid-19 obligeant la limitation de nos mouvements par un confinement en même temps que celui des personnels des différents laboratoires à travers le territoire national, nous n'avons pu atteindre tous nos buts.

3. Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun :

Comme il été écrit auparavant, il s'agit des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun, objets de la thèse de Lamouri Hafsa Hannani, option génie civil, soutenue à l'université d'Adrar en octobre 2014. Nous avons retenu la compression.

Tableau 29. Résultats essai à la compression. Dimensions et poids des échantillons

Echantillon	N°	Dimensions (cm)		Poids (kg)
		avant surfaçage	après surfaçage	
récents	01	34x14x13	31x14x13	10.900
	02	34x14x13	31x14x13	12.700
	03	34x14x13	31x14x13	12.500
ancien	1	35x15x12	35x15x12	10.600
	2	-	32x15x13	11.200
	3	34x14.5x14	34x14.5x12.5	11.800
	4	34.5x16x13	33.5x16x13	11.800
	5	34x14.5x13	28.5x14.5x12.5	8.800
	6	-	33x16x13.5	10.900
Prélevé d'Adrar	A	30x15x13		7.280
	B	31x14x13.5		8.670
	C	31x15x14		8.915

On a obtenu :

Tableau 30 : Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes récents (âge 02 ans) prélevés de Timimoun :

N°	Charge kN)	Résistance(MPa)
01	/	/
02	8.9	0.5
03	8.6	0.5

On a obtenu :

Tableau 31. Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes récents (âge 50 ans) prélevés de Timimoun :

N°	Charge (kN)	Résistance (MPa)
1	10.2	0.6
2	7.1	0.4
3	0.3	0.02
4	14.5	0.7
5	/	/
6	0.1	0.05

Tableau 32 : Valeurs des charges et résistances à la compression des adobes confectionnés :

Echantillon	N°	Charge kN	Résistance(MPa)
Argile de Timimoun	C1	6.4	3
	C2	6.6	3
	C3	5.7	2
	C4	15.7	7
Argile d'Adrar	A1	13.7	6
	A2	12.9	6
	A3	11.9	5
	A4	13.9	6
	A5	13.9	6
	A6	12	5
	A7	15.8	7

3.1. Résultats de l'analyse granulométrique par voie humide et sèche :

Après l'écrasement des échantillons (n° 01 récent) et (n° 05 ancien), le tamisage sec (5 kg de chaque échantillon) dans la tamiseuse électrique (80-50- 31.5-20-10 mm). Cet essai est aussi fait pour le sable de mélange.

Tableau 33. Résultats d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon n° 01 récent, âge 2 ans :

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	refus cumulés %	Complément à 100	Tamisats %
5000	80	0	0	100	100	_100
	50	0	0	100	100	100
	31.5	85.80	85.80	1.72	98.28	98
	20	71.10	156.90	3.138	96.86	97
	10	128.50	285.40	5.708	94.29	94
1200	5	7.15	7.15	0.59	99.41	93
	2	12.76	19.91	1.60	98.40	92
	1	9.51	29.42	2.45	97.54	91
	0.4	38.52	67.94	5.66	94.34	89
	0.2	517.17	585.11	48.76	51.24	48
	0.1	271.17	856.28	71.36	28.64	27
	0.08	33.56	889.84	74.15	25.84	24

Tableau 34. Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon n° 01 récent, âge 2 ans:

Diam (mm)	0.075	0.053	0.039	0.026	0.018	0.009	0.006	0.003	0.001
particules %	23	20	18	16	14	10	7	7	7

Analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon récent, âge 2 ans.

Tableau 35. Résultats d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie pour l'échantillon n° 05 ancien, âge 50 ans :

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Pourcent age refus cumulés %	Complément à 100	Tamisats %
5000	80	0	0	100	100	100
	50	0	0	100	100	100
	31.5	79.0	79.0	1.58	98.42	98
	20	151.20	230.20	4.60	95.40	95
	10	595.60	825.80	16.52	83.48	83
1200	5	25.56	25.56	2.13	97.87	81
	2	60.84	86.40	7.20	92.80	77
	1	39.20	125.60	10.47	89.53	74
	0.4	51.80	177.40	14.78	85.22	71
	0.2	87.50	264.90	22.07	77.92	65
	0.1	519.48	784.38	65.36	34.63	29
	0.08	42.10	826.48	68.87	31.13	26

Tableau 36. Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon n° 05 ancien, âge 50 ans : normes NF P94-056 (03-96) et NF P94-057 (05-92)

Diam (mm)	0.075	0.053	0.039	0.026	0.018	0.009	0.006	0.003	0.001
particules %	23	22	21	21	17	15	11	9	7

3.2 Analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g,
Norme NF P 18-560 septembre 1990 :

Tableau 37. Résultats analyse granulométrique pour le sable de mélange ; poids total de 1000g. Norme NF P 18-560 septembre 1990

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage refus (%)	Pourcentage passant (%)	Observations
5	00	00	00	100	100
4	0.1	0.1	0.01	99.99	100
2.5	0.09	0.19	0.019	99.98	100
2	0.05	0.24	0.024	99.97	100
1.60	02.11	02.35	0.235	99.76	100
0.500	332.30	334.65	33.465	66.53	67
0.200	405.12	739.77	73.977	26.02	26
0.080	257.85	997.62	99.762	0.24	00

- Le tracé des courbes granulométriques des échantillons d’adobe récent et ancien, et du sable de mélange, tracées par le logiciel : Sol Test 2009.

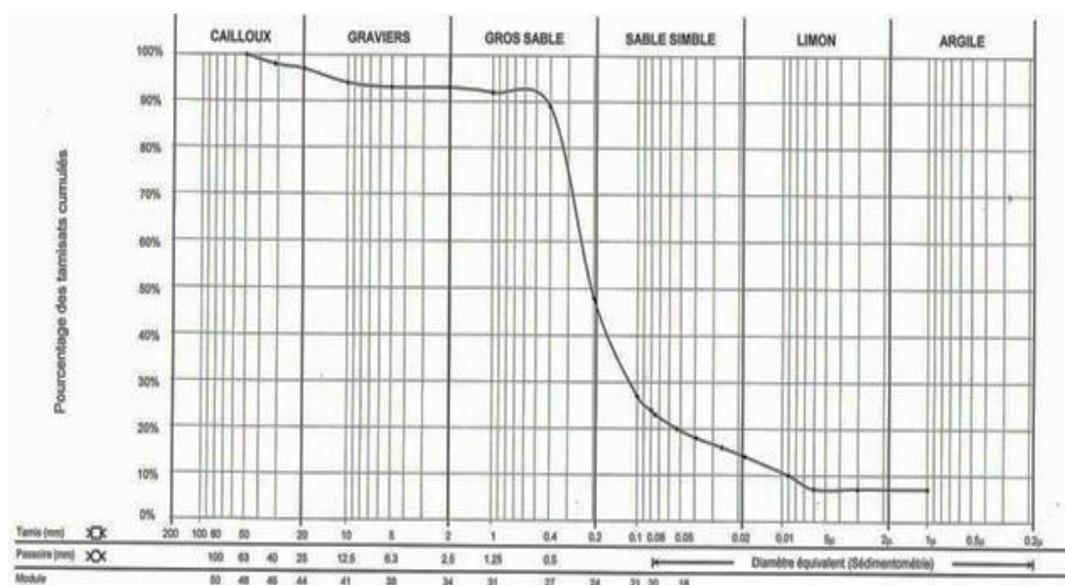


Figure 21 : La courbe granulométrique de l'échantillon (01 récent, âge 02 ans).
Granulat discontinu.

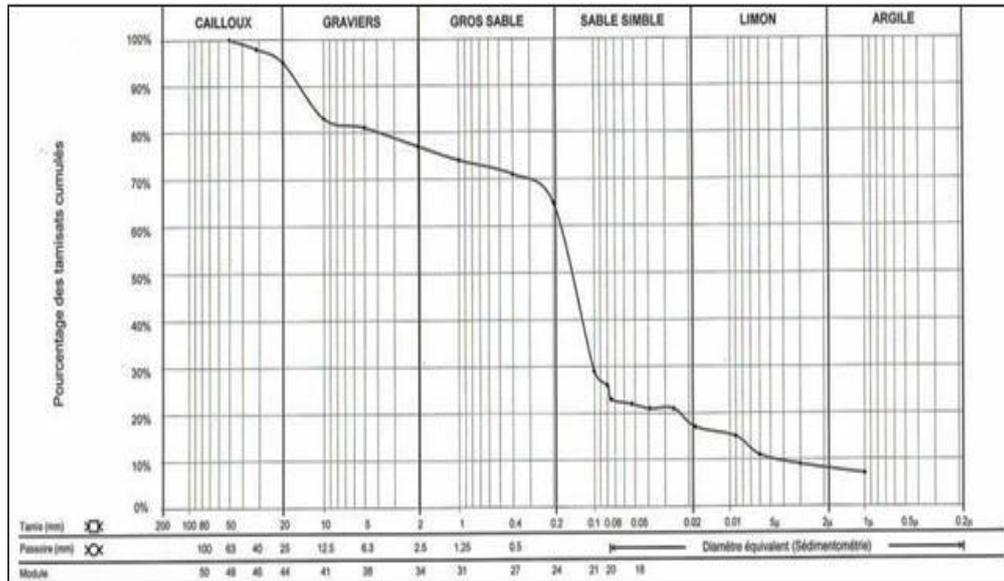


Figure 22: La courbe granulométrique de l'échantillon (05 ancien, âge 50 ans).

Granulat discontinu.

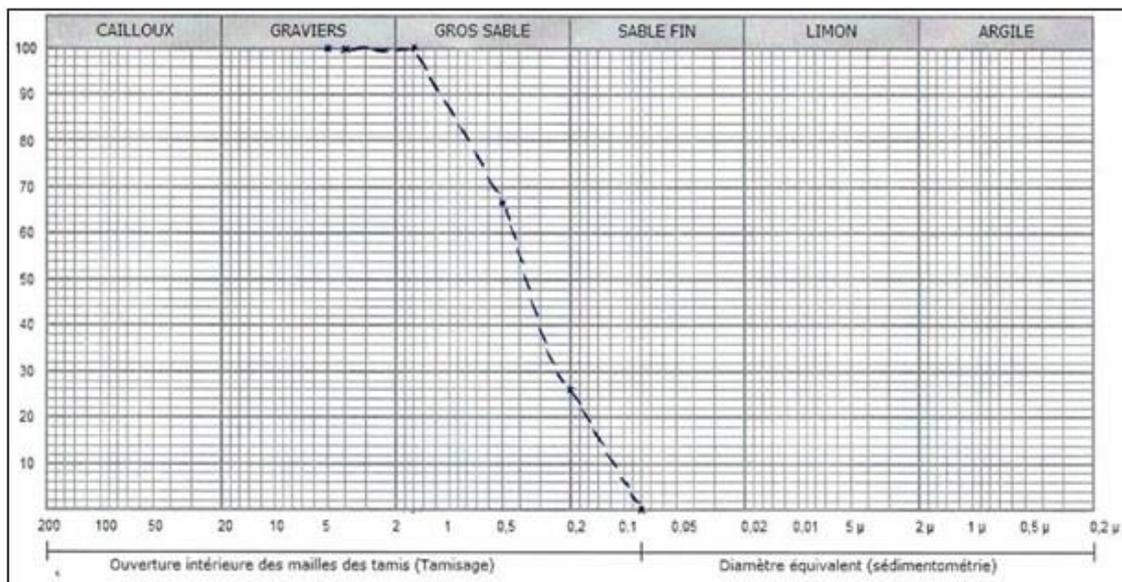


Figure 23: La courbe granulométrique du sable de mélange.

D'après les courbes granulométriques, et les tableaux de classification des sols, on peut analyser que :

- Les adobes récents (2 ans) prélevés de Timimoun sont constitués des argiles inorganiques de faible plasticité, argiles silteuses et sableuses.

Les adobes anciens, 50 ans prélevés à Timimoun, même composition que les récents.

- Le sable de mélange est constitué de: ~ 26 % sable fin et ~ 74 % gros sable.

3.3. Résultats de l'essai Proctor normal Norme : NF P 94 -093 :

Tableau 38. Résultats de l'essai Proctor normal Norme : NF P 94 -093

	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
L'eau ajoutée (%)	10	12	14	10	12	14
Poids total humide (g)	4336.0	4404.9	4360.4	4266.2	4352.4	4366.2
Poids du moule (g)	2372.0 0			2372.0 0		
Poids du sol humide (g)	1964.00	2032.90	1988.4 0	1894.2 0	1980.40	1994.2 0
Poids du sol sec (g)	1788.38	1828.15	1754.6 8	1697.0 0	1749.93	1731.8 2
Volume du moule (cm ³)	902.75			902.75		
Densité sèche (t/m³)	01.98	02.02	1.94	1.88	1.94	1.92
N° de la tare	01	0 2	03	1	2	3
Poids total humide (g)	269.30	291.5	277.20	144.70	160.5 0	137.50
Poids total sec (g)	245.54	270.17	254.60	131.10	143.5 0	121.29
Poids de la tare (g)	85.10	79.70	84.90	14.10	14.40	14.30
Poids de l'eau (g)	15.76	21.33	22.60	13.60	17.00	16.21
Poids du sol sec (g)	160.44	190.47	169.70	117.0	129.1 0	106.21
Teneur en eau (%)	9.82	11.20	13.32	11.62	13.17	15.15

Courbes Proctor ($\gamma_d = f(w)$). Adobe récent et ancien, tracées. Logiciel : Sol Test 2009.

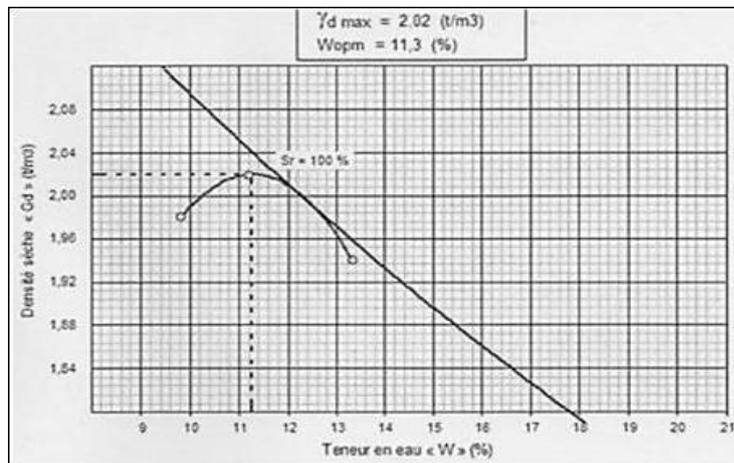


Figure 24: Courbe Proctor pour l'échantillon (01 récent, âge 02 ans).

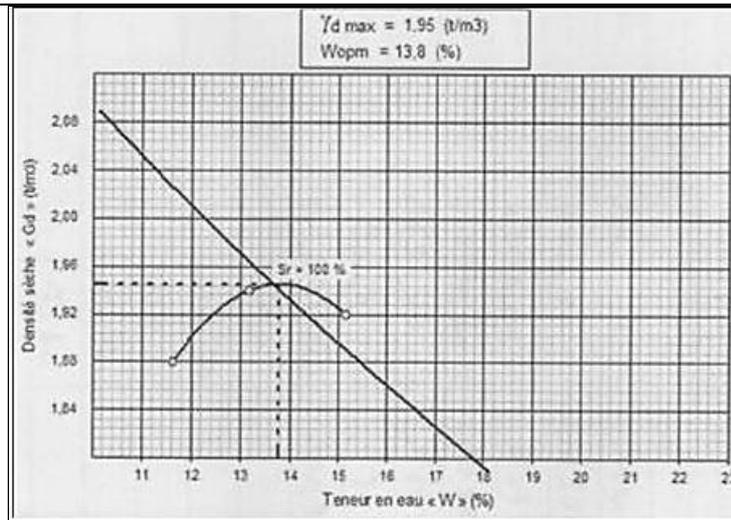


Figure 25: Courbe Proctor pour l'échantillon (05 ancien, âge 50 ans).

Après le traçage des courbes des teneurs en eau en fonction des densités sèches, les résultats de cet essai sont :

- Pour les blocs d'adobe récents de Timimoun : $\omega_{opt} = 11.3\%$, $\gamma_{max} = 2.02 \text{ t/m}^3$
- Pour les blocs d'adobe anciens de Timimoun : $\omega_{opt} = 13.8 \%$, $\gamma_{max} = 1.95 \text{ t/m}^3$.

3.4. Résultats des limites d'Atterberg :

3.4.1. La limite de liquidité Norme : NF P94-051 Mars 1993 :

Tableau 39. La limite de liquidité Norme : NF P94-051 Mars 1993 :

N° d'essai	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
	1	2	3	1	2	3
Nombre de coups	18	21	35	18	26	34
N° de la tare	04	05	06	4	5	6
Poids total humide (g)	28.60	27.40	27.30	23.4	21.1	23.1
Poids total sec (g)	25.70	24.90	24.80	21.3	19.4	20.8
Poids de la tare (g)	14.50	14.40	14.40	14.1	14.7	14.2
Poids d'eau (g)	2.9	2.5	2.5	2.1	1.7	2.3
Poids du sol sec (g)	11.2	10.5	10.4	7.2	4.7	6.6
Teneur en eau (%)	25.89	23.81	24.04	29.17	36.17	34.85
W (%)	24.88	23.31	25.04	28.03	36.34	36.17

3.4.2. La limite de plasticité Norme : NF P94-051 Mars 1993 :

Tableau 40. La limite de plasticité Norme : NF P94-051 Mars 1993

N° de la tare	Echantillon (01 récent)			Echantillon (05 ancien)		
	D	E	F	A	B	C
Poids total humide (g)	11.11	11.00	11.10	11.10	11.00	11.10
Poids total sec (g)	10.80	10.90	11.00	10.80	10.90	11.00
Poids de la tare (g)	10.0	10.20	10.20	10.10	10.30	10.30
Poids d'eau (g)	0.31	0.10	0.10	0.3	0.10	0.10
Poids du sol sec (g)	0.80	0.70	0.80	0.70	0.60	0.70
Teneur en eau (%)	38.75	14.28	12.50	42.86	16.66	14.28
Moyenne (%)	21.84			24.6		

On obtient ainsi les indices suivants :

Tableau 41. Indices de liquidité et de plasticité.

Essais	Résultats	
	Adobe récent	Adobe ancien
Limite de plasticité wp (%)	21.84	24.60
Indice de plasticité Ip	2.75	8.90
Indice de consistance Ic	-0.066	0.113
Indice de liquidité Il	1.066	0.887

Les résultats obtenus pour ω_l et ω_p ne sont pas fiables (ils ne donnent pas une classification exacte pour nos échantillons, surtout pour la valeur de I_p des briques d'adobe récentes). Pour cela, nous réalisons une autre fois ces deux essais et nous trouvons les résultats suivants :

Tableau 42. Valeurs de la limite de liquidité w_L , la limite de plasticité w_p et l'indice de plasticité I_p .

Limites d'Atterberg	Résultats	
	Adobe récent	Adobe ancien
Limite de liquidité w_L (%)	26.50	29.20
Limite de plasticité w_p (%)	16.40	14.90
Indice de plasticité I_p	10.1	14.3

D'après le tableau de classification des sols selon leur I_p : Figure 20, page 120,

Diagramme de plasticité des sols selon Casagrande (1948) :

- Les adobes récents prélevés de Timimoun sont peu plastique ($5 < I_p < 15$).
- Les adobes anciens prélevés de Timimoun sont aussi peu plastique.

D'après le tableau de classification des argiles selon leur I_c (annexe 03) :

- La consistance du sol des blocs d'adobe récents prélevés de Timimoun est liquide.

La consistance du sol des blocs d'adobe anciens prélevés de Timimoun est pâteuse ou très molle.

3.5 Résultats d'équivalent de sable NF P18-598 Octobre 1991 :

Tableau 43. Résultats d'équivalent de sable NF P18-598 Octobre 1991 :

Echantillon	Essai 1	Essai 2
h1 (cm)	9.7	9.8
h2 (cm)	8.3	8.2
ES (%)	85.57	83.67
Moyenne (%)	84,62	

Selon le tableau de classification des sols selon leurs équivalent de sable ES (annexe 04): le sable utilisé pour le mélange ou bien la composition est un sable très propre, mais avec l'absence presque totale de fines argileuses, ce qui provoque le risque d'entraîner un défaut de plasticité du mélange. Il faudra rattraper ce problème par une augmentation du

dosage en eau.

Conclusion :

La construction en adobe existe depuis des siècles et marque sa durabilité et résistance contre les différents efforts et actions. Ce travail expérimental nous donne une idée claire sur cette durabilité à travers les différents essais d'identification effectués sur les propriétés physique et mécaniques des adobes.

Si on commence par les essais sur les propriétés physiques des adobes, on trouve d'après l'analyse granulométrique que les échantillons prélevés soit anciens âgés de plus de cinquante ans, ou récents âgés de deux ans, ont la même granularité. Puis l'essai des limites d'Atterberg nous montre que les deux échantillons ont une plasticité presque équivalente.

La réalisation de l'essai de la résistance mécanique à la compression des adobes anciens et récents nous donne des résultats malgré faibles (entre 0.4 et 0.7 MPa) mais égaux.

A la fin de cette partie pratique, et d'après les exemples des constructions en adobes existent à travers le monde, et les essais qu'on a effectué, on peut conclure que le temps n'a aucune influence négatif sur la durabilité des adobes, c'est-à-dire que la résistance des blocs d'adobe ne diminue pas dans le temps, et avec des travaux d'entretiens simples et réguliers, on peut classer l'adobe comme le matériau de construction le plus adéquat localement.

Comme conclusion à ses travaux et suite aux questionnements présentés précédemment, Lamouri Hafsa Hannani est sortie avec la conviction que « l'idée de réaliser une étude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre crue anciennes et contemporaines vient de l'état de dégradation et désordre de ce type de construction et le besoin de retour à une construction qui regroupe les meilleures propriétés mécaniques, ainsi que l'adaptation aux habitudes des habitants et à l'environnement.

« L'étape expérimentale de ce travail, porte sur la réalisation des différents essais d'identification, basés sur l'essai de la résistance à la compression, afin d'obtenir une base scientifique permettant la valorisation de la construction en adobe.

« A la fin de ce travail, nous pensons avoir réussi à répondre à notre but principal qui est celui de protéger les habitations en adobe de se dégrader, par la valorisation de la résistance mécanique à la compression des adobes. »

4. Enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité

Nous abordons « Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité », thèse de master élaborée par Edouard Kadjile, Ouagadougou, 2010.

Commençons d'abord par une note sur les instruments de mesures utilisés et les conditions de réalisation des essais et qui sont comme suit :

- a) Balance électronique SEDITECH : capacité maxi 6kg, précision 0,1g avec fonction Tare ;
- b) Malaxeur électrique HOBART avec défaut de fixation de la cuvette de malaxage ;
- c) La Presse pour test de résistances mécaniques n'est pas automatique comme décrit dans les normes. Les charges appliquées manuellement aux éprouvettes sont non constantes ;
- d) L'humidité relative du laboratoire n'a pas été vérifiée pendant les essais. Les normes précisent d'avoir une HR = $\pm 50\%$;
- e) La température de l'eau où sont immergées les éprouvettes est de ± 30 °C. Les normes recommandent 20 ± 1 °C.

4.1. Performances mécaniques :

- Les essais sont réalisés sur les trois éprouvettes à différents âges après démoulage et conservation dans l'eau pendant 24 h.



Spécimen normal
(ciment+sable+eau)



Spécimen au nééré
(nééré+sable+eau)

Image 59. Spécimens pour les mortiers tests. Photo Edouard Kadjile

4.1.1. Résistance à la traction par flexion :

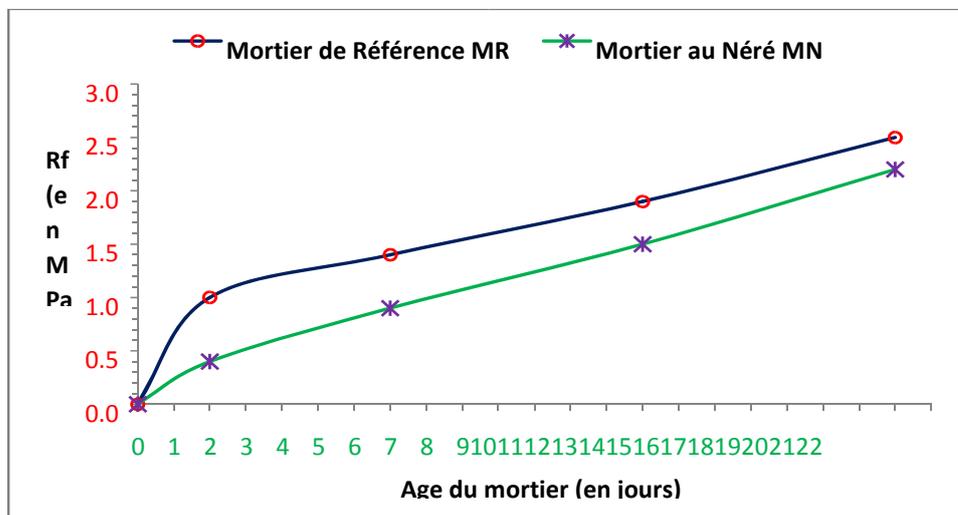
- Les trois éprouvettes prismatiques sont testées à la traction par flexion comme sur



Image 60. Dispositif d'essai de la résistance à la traction par flexion. Crédit photo Edouard Kadjile.

Tableau 44. Résultats des essais de traction par flexion :

Type de mortier	Résistance à la traction par flexion Rf (MPa)			
	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	1,0	1,4	1,9	2,5
MN	0,4	0,9	1,5	2,2

**Figure 26.** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers étudiés**4.1.2. Résistance à la compression :**

Les six demi-éprouvettes prismatiques sont testées à la compression comme sur la photo.

**Image 61.** Dispositif d'essai de la résistance à la compression. Crédit photo Edouard Kadjile.

Les résistances à la compression R_c (MPa) des mortiers testés à différents âges se présentent comme suit :

Tableau 45. Résultats des essais de compression :

Type de mortier	Résistance à la compression R_c (MPa)			
	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	1,2	1,8	2,8	4,2
MN	0,6	1,3	3,0	5,3

Le graphe de la figure 9 illustre l'évolution de la résistance à la compression des mortiers issus de l'essai de traction par flexion.

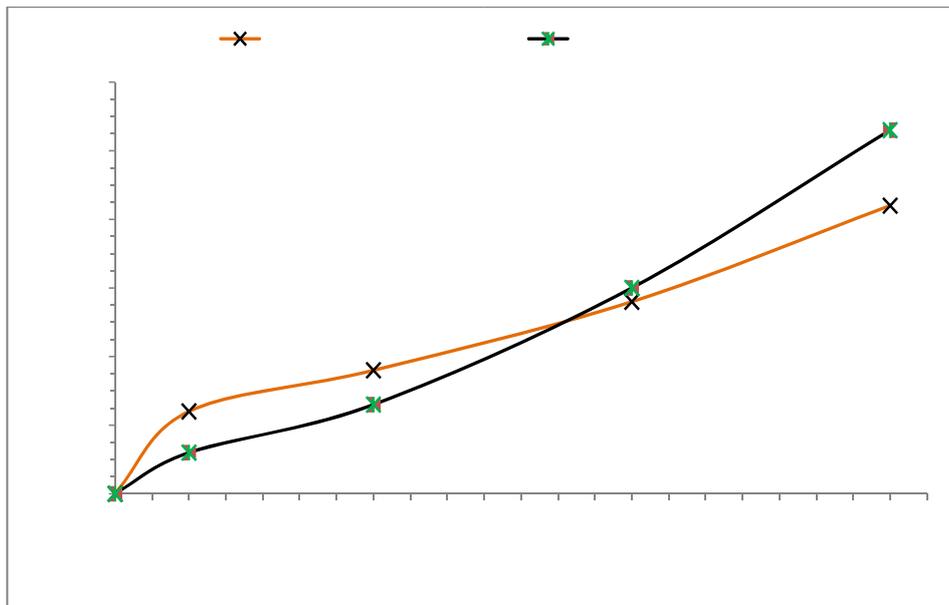


Figure 27. Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés

L'analyse des figures permet d'apporter les commentaires suivants :

D'abord, nous remarquons une augmentation continue de la résistance à la flexion et à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'âge (2, 7, 14 et 21 jours). Cette augmentation est due à l'hydratation du ciment au cours du temps, ce qui provoque l'évolution de la compacité ; cependant :

i- Résistance à la flexion.

a) La résistance du mortier MN évolue presque comme une fonction linéaire du temps. On peut l'approcher par l'équation $Rf = 0,09 \times Age + 0,21$; Celle du mortier MR s'avoisine à une fonction logarithme du temps ;

b) La différence de la résistance entre les mortiers MR et MN est dégressive de l'ordre de 0,1MPa, du 2^{ème} au 21^{ème} jour de l'essai ; ceci montre que le mortier MN est certes moins résistant que le mortier MR mais développe une capacité d'acquisition de résistance plus rapide que ce dernier ;

ii- Résistance à la compression.

– La résistance du mortier MR garde la même allure d'évolution que dans le cas de la résistance à la flexion ;

– La résistance à la compression du mortier MN augmente au dessus de celle du mortier MR à partir de l'âge de 14 jours. Il faut noter que ce mortier MN testé à l'âge de 14 jours a subi un compactage manuel (panne du compacteur !) et ceci pourrait être la cause de cette augmentation de résistance. Dans le cas contraire, on dira alors que cette augmentation est due à la présence du néré qui favorise la cohésion des matériaux en présence après un temps de cure de 14 jours ;

– La résistance à la compression du mortier MN reste supérieure à celle du mortier de référence jusqu'au 21^{ème} jour. Cependant nous pensons ici qu'une comparaison de leurs comportements à plus long terme pourrait permettre de tirer une conclusion plus avisée.

Au regard de ces résultats de résistance mécaniques des deux mortiers ayant le même dosage en liant (ciment), la différence des résistances observées ne dépend pas donc du liant seulement mais de tous les constituants. Dans ce contexte, la seconde hypothèse est validée.

iii- Masse volumique apparente des mortiers :

Les éprouvettes de 4cm x 4cm x 16cm donnent un volume de $V = 256 \text{ cm}^3$. Avant chaque essai les éprouvettes sont pesées pour la masse brute M. La masse volumique apparente est égale à $\rho = M / V$.

Tableau 46. Masse volumique apparente des mortiers étudiés :

Age	2j	7j	14j	21j
MR : ρ_{MR} (Kg/m ³)	1911	1958	1960	1962
MN : ρ_{MN} (Kg/m ³)	1844	2059	2072	2067

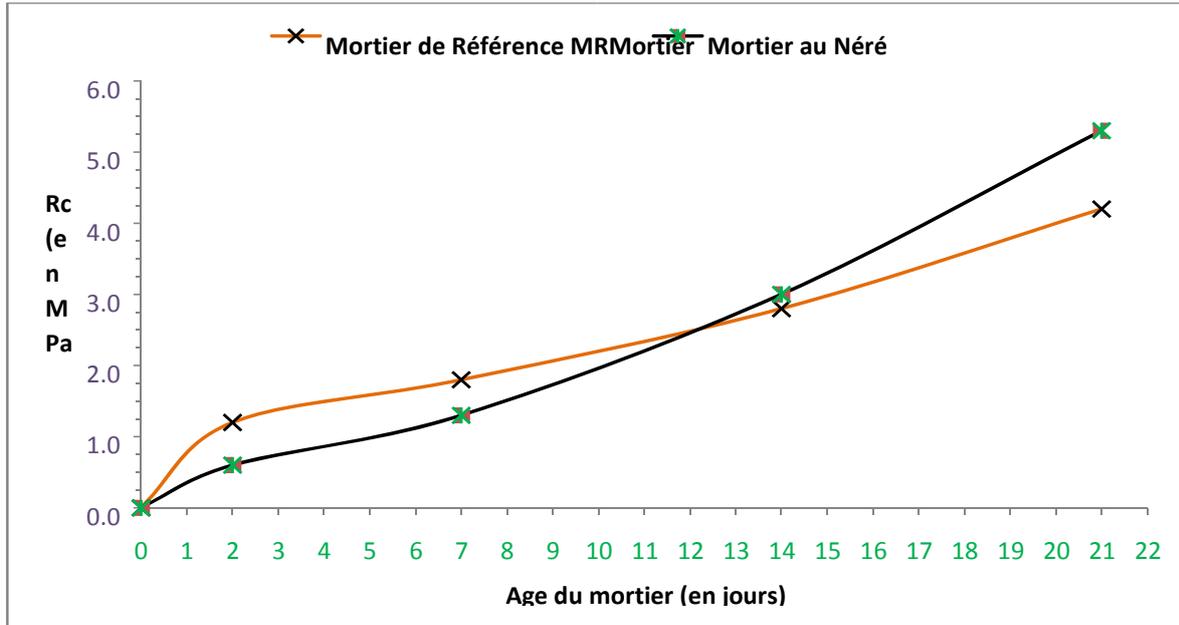


Figure 28. Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.

4.1.3. Résistance aux agressions chimiques :

i- action de la solution de sulfate de sodium Na₂SO₄ à 5%

Tableau 47. Résultats des essais de résistance au sulfate de sodium à 5%

Type de mortier	Perte de masse (%)			
	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	0	0,02	0,02	0,04
MN	0	0	0,01	0,02

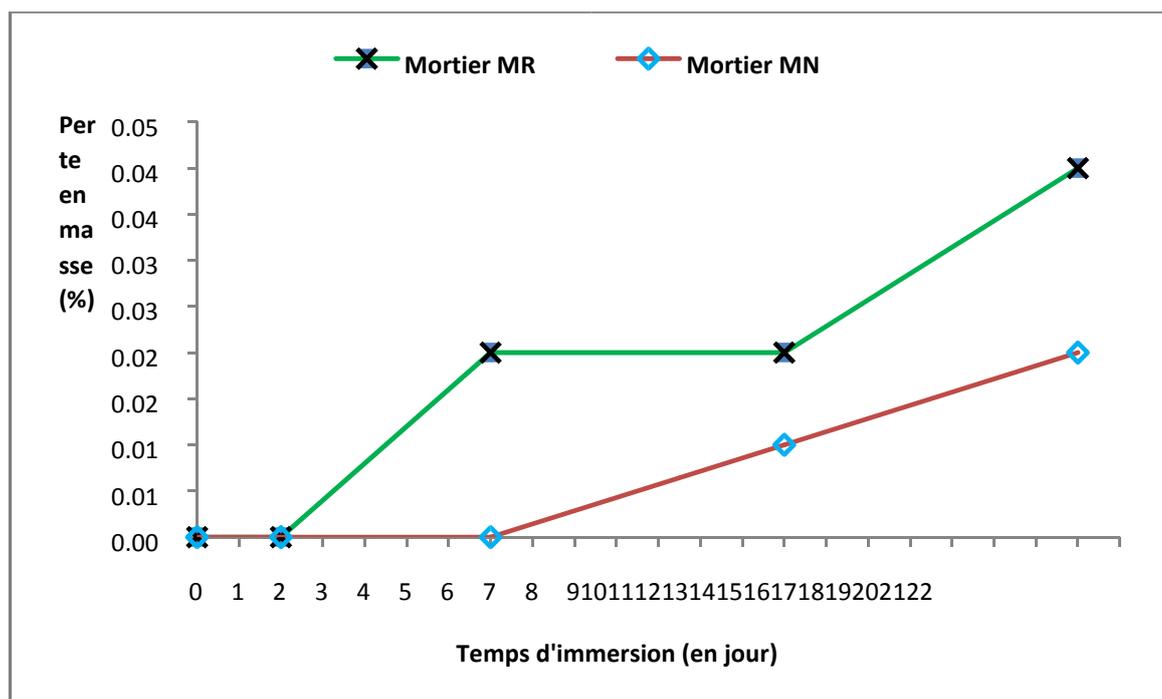


Figure 29. Evolution de la perte en masse par le Na_2SO_4 des mortiers étudiés

ii- **Action de la solution de chlorure de magnésium MgCl_2 à 5%**

Tableau 48. Résultats des essais de résistance au chlorure de magnésium à 5% :

Type de mortier	Perte en masse (%)			
	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	0	0,01	0,01	0,01
MN	0	0,01	0,02	0,02

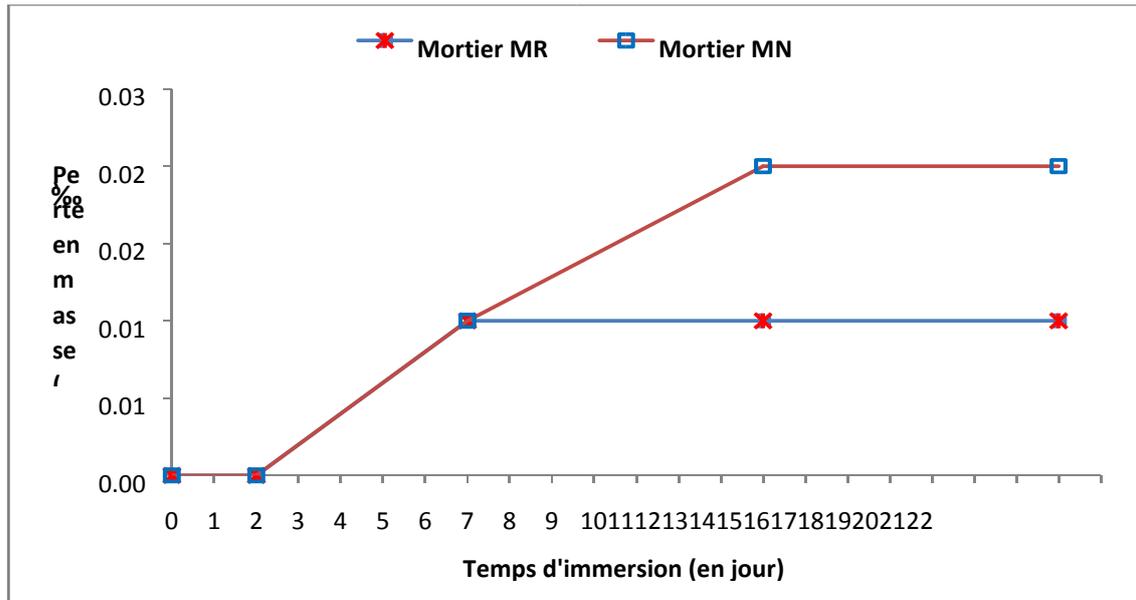


Figure 30. Evolution de la perte en masse par le MgCl₂ des mortiers étudiés

Après 24h jusqu'à 21 jours, les différents mortiers développent leurs aptitudes à résister aux attaques des solutions chimiques.

Les résultats montrent en premier lieu que les mortiers MN ont une résistance chimique à la solution de sulfate de sodium (Na₂SO₄) à 5% meilleure que celle des mortiers MR (figure 29).

Nous pouvons observer pour le mortier MN un pourcentage en perte de masse relativement faible, cela serait dû à la présence du néré qui réduirait l'alcalinité du milieu cimentaire et favoriserait donc la stabilisation de la formation de l'hydroxyde de sodium (NaOH). La réaction chimique qui se produit sur la pâte cimentaire s'écrit :



Ca(OH)₂ : Portlandite (ou chaux hydratée) résulte de l'hydratation des constituants anhydres du ciment. La Portlandite et les aluminates sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates ;

CaSO₄·2H₂O : gypse secondaire. C'est un produit expansif (départ des dégradations) qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté.

NaOH : hydroxyde de sodium, alcalinité élevée (stabilisation des C-S-H)

Comme dans cette réaction, l'expansion peut provenir aussi de la formation de l'ettringite secondaire à partir de l'aluminate tricalcique (3CaO, Al₂O₃) en abréviation C₃A :

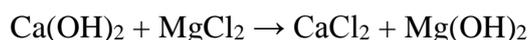


La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation des cristaux très fins dont le

volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures au volume du solide initial¹. Ce résultat s'apparente à celui de la recherche publiée par Mezghiche, 1994.

Notons par ailleurs que le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C₃A du ciment.

En revanche, les résultats obtenus pour le deuxième essai (figure 30) montrent que les mortiers MR ont une meilleure résistance chimique à la solution de chlorure de magnésium (MgCl₂) à 5% par rapport aux mortiers MN. Cela peut être dû au fait que dans les mortiers MN, à cause de la présence du néré, l'hydratation du ciment libèrerait une faible quantité de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) qui au contact du MgCl₂ libèrerait également peu de chlorure de calcium (CaCl₂) soluble et par conséquent une quantité plus importante de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)₂), tandis que dans les mortiers MR, l'hydroxyde de calcium serait consommé par une réaction pouzzolanique pour former à la fin de nouveaux hydrates stables (Mezghiche, 1994). La réaction chimique qui se produit est :



Les résultats du test d'agression chimique ont montré que tous les types d'enduits étudiés sont vulnérables aux attaques des milieux agressifs (soit au Na₂SO₄ ou soit au MgCl₂). La troisième hypothèse se trouve donc infirmée.

4.2. Stabilité volumétrique :

i- Absorption d'eau par capillarité

Tableau 46. Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité des mortiers :

Type de mortier	Temps de pesage		Coefficient de capillarité W (Kg/m ² min ^{0.5})
	10min (masse M ₁)	90min (masse M ₂)	
Mortier MR	249,2	249,7	0,05
	366,3	366,7	
	157,9	158,5	
Mortier MN	184,6	185,5	0,07
	273,1	273,6	
	245,3	246,0	

¹ BARON, J. ET OLLIVIER J.-P. : « La durabilité des bétons », 1992, p166

Variations pondérales :

Les mesures des variations pondérales se présentent comme suit.

Tableau 47. Résultats des variations pondérales des mortiers :

Age des mortiers	Mortier MR		Mortier MN	
	Masse brute (g)	Taux de variation	Masse brute (g)	Taux de variation
2j	459,3		462,1	-
7j	458,4	- 0,20 %	459,9	- 0,48 %
14j	457,7	- 0,15 %	459,4	- 0,11 %
21j	457,2	- 0,11 %	458,5	- 0,20 %
		- 0,15 %		- 0,26 %

Les tests de l'absorption d'eau par capillarité effectués sur les spécimens conservés dans l'eau montrent que le mortier MN ($W = 0,07 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$) est plus apte à l'absorption d'eau que le mortier MR ($W = 0,05 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$). Ces deux mortiers ont de coefficient inférieur à $0,2 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$ (faible capillarité), donc ils peuvent être réalisés sur des surfaces exposées à la pluie (DTU 26.1, avril 2008).

Quant aux tests de variations pondérales effectués à différents âges des spécimens, les résultats montrent là encore que le mortier MN connaît une plus forte diminution de son poids (- 0,26 % en moyenne) que le mortier MR (- 0,15 % en moyenne) sur les 21 jours de test.

Les résultats de ces tests de stabilité volumétrique permettent simplement d'invalider la quatrième hypothèse en disant que les enduits varient en poids lorsqu'ils absorbent de l'eau par capillarité. Cependant il faut noter que ces valeurs sont tout de mêmes faibles.

Conclusion et perspectives d'Edouard Kadjile :

Les enduits traditionnels jouent un rôle très important dans les constructions. Ils habillent les ouvrages en leur donnant esthétique et protection.

A travers notre étude, nous avons voulu analyser les techniques de fabrication et de mise en œuvre des enduits traditionnels et tester leur durabilité en se basant sur les essais de leurs résistances mécaniques, de leurs résistances aux milieux agressifs et de leurs variations dimensionnelles et pondérales. A l'issue de nos travaux de laboratoire qui ont porté sur l'essai de deux types d'éprouvettes de mortier d'enduits, on retiendra que :

- a) le mortier de référence MR est plus résistant à la flexion que le mortier au néré MN, tandis que la résistance à la compression du mortier au néré MN devient plus importante par rapport à celle du mortier de référence MR à partir du 14^{ème} jour de leur cure sous l'eau à la température de ± 30 °C ;
- b) le mortier au néré MN développe une résistance à l'agression de la solution de sulfate de sodium meilleure que le mortier de référence MR. En revanche, ce dernier est plus résistant à l'agression de la solution de chlorure de magnésium ;
- c) l'absorption d'eau par capillarité du mortier MR est plus faible que celle du mortier MN et la variation pondérale moyenne du mortier MN est supérieure à celle du mortier MR.

En matière de prédiction de la durabilité des enduits traditionnels, force est de constater que si les essais de laboratoire sont faits dans les conditions requises, la connaissance des caractéristiques des matériaux permet de faire un choix satisfaisant de l'enduit. Si au cours de notre étude il est apparu que certaines hypothèses de départ ne sont pas véritablement confirmées ou infirmées, cela est à mettre au compte des difficultés liées aux conditions de travail en laboratoire (manque ou panne des équipements de travail ou de mesure, non respect des conditions de température et d'humidité relative du laboratoire, substitution du matériel électronique par de la mécanique) et de l'organisation du stage. Au-delà de ce qui précède, et pour enrichir davantage cette étude, nous souhaitons que des tests de durabilité soit réalisés sur d'autres matériaux (latérite, chaux, argile, etc.) avec de différentes concentrations en solution de néré et cela sur une plus longue période (au moins 28 jours) pour avoir une plus large connaissance des comportements de ces matériaux en corps d'enduit.

Conclusion :

L'Algérie qui émerge s'arme de règles, de codes et de lois afin d'éviter les dégâts ou les limiter à la rigueur en matière de construction et les laboratoires publics comme privés mettent leurs moyens et compétences au service de qui le voudrait. Au-delà de l'architecture de terre, les laboratoires devraient tirer les leçons des terribles séismes qui ont fauché tant de vies humaines et quant au domaine de la terre crue, ils devraient s'échanger expériences et résultats de recherches.

Au moment où voulions clore ce chapitre, une nouvelle est tombée toute fraîche en matière d'évolution de génie humain, génie civil et architecture et qui n'est autre qu'une maison imprimée en trois dimensions à Bruay-sur-l'Escaut en France et le chantier ne nécessite pas plus de 3 personnes. Les temps ont changé et les sciences du bâti avec. L'heure

est à la brique qui emmagasine de l'énergie ou une autre qui se régénère grâce à des bactéries, etc. Et cela nous interpelle quant à l'utilité des essais, analyses, recherches et autres expériences. Les tests des matériaux de construction qui vont du grain de sable au béton bitumineux (*bb*) sont une étape essentielle et fondamentale pour ne pas dire vitale qui épaulé l'ingénieur, l'architecte, le maître de l'ouvrage afin d'éviter fautes graves et erreurs aux conséquences parfois irrémédiables. De ce fait, toute analyse, essais, tests en tous genres servent à prévoir les difficultés et les problèmes avant d'engager les travaux et aussi à éviter d'être hors-normes et au-delà des exigences légales liées aux différentes réglementations.

Le souci humain est général quant à la bonne construction. « Dans les zones sismiques où il est construit avec de la terre, à chaque fois qu'un tremblement de terre se produit, de nombreuses constructions de ce matériau s'effondrent, provoquant des pertes économiques considérables et de malheureuses pertes en vies humaines. Les communautés académiques et professionnelles de certains pays sismiques ne sont pas restées impassibles face à cette grave situation. »¹

Après nos différentes pérégrinations scientifiques à travers plusieurs wilayas d'Algérie, par monts et pas vaux, en quête de savoir sur un élément essentiel qui longe le temps et l'espace sans perdre de sa valeur, nous nous sommes résignés, confinement dû à la pandémie de la Covid-19, à faire appel à des tests appliqués au niveau d'autres universités et instituts en plus de milliers de pages en ouvrages, fascicules, journaux et autres publications en tous genres, dans plusieurs langues, en vue de comprendre et d'interpréter les différents essais, analyses et différents tests afin d'arriver à un résultat probant en matière de restauration d'un cas concret qu'est la muraille de Sour dans la wilaya de Mostaganem.

De ce fait les approches par nos soins de différents laboratoires à des fins d'essais, de tests et d'analyses spécifiques sur différents échantillons de terre se sont avérées insuffisantes et aussi il a été constaté que l'empirisme et l'expérience ne suffisent pas toujours, le cas de l'adobe de Bouardia est édifiant vu qu'il n'a jamais répondu aux normes scientifiques et pourtant la population tient encore à ce noble matériau qu'est la terre crue.

¹ Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú Seismic resistant earthen, M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, C. Iwaki, 1988 ;



Conclusion générale

Conclusion générale :

L'architecture de terre, un monde en pleine évolution. La métamorphose est palpable, les recherches vont bon train, la matière grise est à son paroxysme en matière d'invention, de découverte et de création. Le bien-être de l'individu, objectif principal de l'architecture, devient objet d'inspiration, d'imagination, d'expérimentation dans tous les domaines mais les plus en vue et captivants sont là où l'humain voudrait être moins gaspilleur et le matériau terre en est le principal.

Malgré le tapage médiatique mondial dont celui des organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, l'évolution et l'émancipation de l'humanité vers un bien-être sans déprédation et sans gâchis n'est pas pour demain.

Avec de la bonne volonté et un appel au savoir-faire ancestral, la réhabilitation et la restauration ne devraient aucunement poser problème pour redonner une âme à ces œuvres sur lesquelles le temps, la prédation des individus, la négligence ou quelque passage d'un fléau telle une guerre ou l'intolérance humaine ont eu raison.

Dans notre étude sur le plus ancien matériau de construction du monde qui nous amènent au-delà de nos espérances en matière d'assimilation de propriétés physiques, mécaniques et de durabilité de matériau terre dans la réhabilitation et la restauration du bâti ancien et au-delà du cas concret qu'est la muraille de Sour dont se sont chargés des bénévoles, grâce à notre sensibilisation, à revaloriser ce patrimoine historique, l'apport de laboratoire des travaux publics –LTPO, unité de Tiaret, qui nous a permis d'utiliser ses moyens conséquents et les compétences de son personnel ainsi que le savoir-faire et l'expérience des ruraux, toujours amoureux de la terre crue, nous avons découvert les contraintes et pas des moindres quand à la restauration et l'habilitation du bâti en terre. Et là, l'affaissement à ras du sol de la citadelle de Bam en est le meilleur exemple et sa restauration en est une autre ; un exemple à suivre.

Ainsi nous retenons qu'en matière de terre crue que rien ne se perd mais tout se transforme à la condition sine qua non de tenir compte des exigences du terrain qui, parfois subit des prédatations en plus d'éventuels séismes, des conditions météorologiques parfois extrêmes...

De nos recherches bibliographiques dans plusieurs langues, la pratique au niveau de laboratoires, le contact avec les connaisseurs, hommes de terrain expérimentés, il serait utile, impératif et nécessaire d'approfondir les recherches en matière de compréhension des prédispositions de la vulnérabilité et parfois même la fragilité du matériau terre avant d'entamer toute tentative de réhabilitation et la restauration du bâti ancien construit en terre.

Conclusion générale :

L'être humain en quête d'un abri durable pour contrer la nature au lieu de s'y adapter, car parfois capricieuse, se retrouve victime de son ambition qui ne le quittera qu'une fois comprise l'idée que « Nous sommes l'humanité une et indivisible. Et si cela était pris en considération, on devrait faire passer la personne humaine comme capital avant l'intérêt de la finance et la pensée réduite à la survie d'une nation, d'un peuple ou d'une communauté. »¹

Enfin, la déviation de l'humanité vers un bien-être coûteux regorgeant d'inutilités nous donne à réfléchir car la déviation du chemin collectif à tous est bien loin dans le temps et dure encore. La terre crue sera plus que jamais une nécessité même si elle tarde à s'imposer.

« L'homme aveuglé par l'éclat d'un horizon incertain s'éloigna de la terre et s'égara pour ne plus retrouver le chemin de la sérénité. » ²

¹ Ouahiba Mostefaï, « Les Hauts Plateaux, l'avenir de l'Algérie », Ouest Info, quotidien algérien d'information, .15.09.2020

² Ouahiba Mostefaï, « Les Hauts Plateaux, l'avenir de l'Algérie », Ouest Info, quotidien algérien d'information, .15.09.2020



Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Retour à la construction de terre, Mostefaï Ouahiba, quotidien national algérien d'information Réflexion, 3 février 2020 ;
2. L'Arbre, un regard vers le ciel et identité de la ville, Mostefaï Ouahiba, quotidien national algérien d'information Réflexion, 23 mars 2020 ;
3. Risque d'effondrement de la muraille de Sour, Mostefaï Ouahiba, quotidien national algérien d'information Réflexion, 25 juin 2020 ;
4. Les Hauts Plateaux, l'avenir de l'Algérie, Mostefaï Ouahiba, quotidien national algérien d'information Info Ouest du 15 septembre 2020 ;
5. Architecture en terre d'aujourd'hui, les techniques de la terre crue ; Muséo, Ed. CRAterre ;
6. Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction Guillaud, Joffroy, Odul & CRAterre-EAG, 1995 ;
7. Colorado.edu/today/2020/01/15/building-materials-come-alive ;
8. Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea, Universidad Católica del Perú Seismic resistant earthen, M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, 1988 ;
9. Construire en terre, de CRAterre, Patrice Doat, 1979 ;
10. Doat et al. 1979 ; Cañas, Cid-Falceto & Mazarrón, 2012 ;
11. Martin Sauvage, La construction des ziggurats sous la troisième dynastie d'Ur, 1998, British Institute for the Study of Iraq ;
12. Pathologies des bâtiments traditionnels dans le contexte spécifique des médinas. 2009, Rapport/étude de Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit; MI Maroc ;
13. Site de l'IEA - the International Energy Agency.- sur le web ;
14. Site de l'Unesco sur le Web ;
15. Thèse : « Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun », Lamouri Hafsa, 2014, Université d'Adrar ;
16. Thèse : « Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité », thèse de master élaborée par Edouard Kadjile. », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou, 2010 ;
17. Traité de construction de terre, Hugo Houben et Hubert Guillaud, édition Parenthèses.
18. Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Anger & Fontaine, 2009 ;
19. De la domination turque dans l'ancienne régence d'Alger, M. Walsin Esterhazy, Capitaine d'Artillerie, Editions Librairie Charles Gosselin, Paris, 1840.