

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Amar TELIDJI de Laghouat
Faculté des Technologies
Département d'architecture

Mémoire

Présenté pour l'obtention de diplôme de magister en architecture.
Option : Constructions en environnement aride.

Par :

KERROUM Nadir

Architecte d'Etat

Thème

**Contribution à la restauration des architectures de terre
par la durabilité de leurs enduits**

Cas d'étude : Le Quartier historique de Z'gueg El Hadjadj - Laghouat

Soutenu publiquement le 20/03/2013 devant le jury composé de:

Pr. KHENFER MOHAMED MOULDI
Pr. BOUHICHA MOHAMED
Dr. BENCHEIKH HAMIDA
Dr. NOUIBAT BRAHIM

Université de Laghouat
M.E.S.R.S.
Université de Laghouat
Université de M'sila

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

Dédicaces.

A ma petite famille,

A mes parents,

A tous les amis et proches.

Remerciements.

Je tiens à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, et particulièrement :

Au Professeur Mohamed BOUHICHA, mon Encadreur qui, au-delà de ses occupations administratives et de ses préoccupations scientifiques et pédagogiques, s'est prêtée à mon écoute et n'a ménagé aucun effort à me conseiller et m'orienter.

A Mr. Benharzallah KROBA, mon Co-encadreur pour m'avoir assisté pendant plusieurs mois, et pour avoir supervisé mes essais au laboratoire, et mis tous les moyens nécessaires à ma recherche,

A mon ami et collègue Mr. Kamel BENARFA Chef du département architecture à l'Université de Laghouat qui n'a cessé de m'encourager et de m'orienter

Aux enseignants des deux départements génie-civil et architecture de l'Université de Laghouat qui m'ont aidé dans le traitement du sujet dont leur appui me fut d'un grand apport.

Mes remerciements vont également au personnel du Laboratoire du Département Génie-civil pour toute l'aide qu'ils m'ont apporté.

Je tiens également à remercier prématurément, le Président, le Professeur *Mohamed Mouldi KHENFER*, et les Membres du Jury, le Docteur *Brahim NOUIBAT* de l'université de M'Sila et le Docteur *Hamida BENCHEIKH* de l'université de Laghouat, qui auront accepté d'examiner mon travail.

Merci à ma famille qui a toujours été pour moi d'un grand soutien moral et particulièrement à ma femme pour ses précieux conseils, et qui était toujours à côté de moi pour partager les difficultés et surtout lors de la dernière phase de finalisation de la thèse.

ملخص

بدأت عمارة التراب في جذب اهتمام متجدد لم يسبق له مثيلا . أسباب أهمية هذه ال "عمارات بدون معماريين" و كذا حالات تدهورها، تسببا في إصدار العديد من النصوص والتوصيات لدراستها وترميمها و كذا حفظها. زقاق الحجاج، أحد النواة المكونة لمدينة الأغواط، عبارة عن مجموعة وحدات سكنية بنيت كليا من لبنات ترابية تكسوها طبقة من التلبس الترابي مع بعض الجير المسندة. هذا الإرث الثقافي الذي لا يقدر بثمن يظهر اليوم حالة عالية من التلف بسبب الأنشطة البشرية وعمليات الأحوال الطبيعية. فهم ظواهر التفتت و التعرية للتلبس الترابي الخارجي للبنات الجدران يجيز لنا البحث عن مسالك أكثر نجاعة و أكثر تكييف فعلي لمادة التراب، حتى نتمكن لاحقا من المساهمة في حل معضلة من معضلات الحفاظ على القصور وحفظ إرث العمارة الترابية و لا سيما حماية سطح الواجهة المعرضة للتقليل الجوية. اهتمامنا لهذا البحث يحمل سعة خاصة لمعالجته واحدة من المعضلات المتعددة في الحفاظ على فن العمارة الترابية: التلبس الترابي.

بدأت عمارة التراب في جذب اهتمام متجدد لم يسبق له مثيلا . أسباب أهمية هذه ال "عمارات بدون معماريين" و كذا حالات تدهورها، تسببا في إصدار العديد من النصوص والتوصيات لدراستها وترميمها و كذا حفظها. زقاق الحجاج، أحد النواة المكونة لمدينة الأغواط، وهو عبارة عن مجموعة وحدات سكنية بنيت كليا من لبنات ترابية تكسوها طبقة من التلبس الترابي مع بعض الجير المسندة. هذا الحي الذي يمثل إرثا ثقافيا لا يقدر بثمن لهذه المدينة للجنوب الجزائري، يظهر اليوم حالة عالية من التلف بسبب الأنشطة البشرية وعمليات الأحوال الطبيعية.

يندرج مشروع حفظ هذا الإرث في إطار بحث علمي مصمم لمعالجة واحدة من المعضلات المختلفة في الحفاظ على فن العمارة الترابية ألا وهو التلبس الخارجي للجدران.

اهتمامنا لهذا البحث يحمل سعة خاصة بما أن فهم ظواهر التفتت و التعرية للتلبس الترابي الخارجي للبنات الجدران يجيز لنا البحث عن مسالك أكثر نجاعة و أكثر تكييف فعلي لمادة التراب، حتى نتمكن لاحقا من المساهمة في حل معضلة من معضلات الحفاظ على القصور وحفظ إرث العمارة الترابية و لا سيما معالجة التلبس الخارجي لها.

الرجوع لمادة التراب في تزايد مستمر لأسباب بيئية، كما أنها أصبحت أمر ضروري لا مفر منه، بما أن قطاع البناء لا يزال مستهلكا كبيرا للطاقة ومنتجا للآثار الخارجية السلبية.

البناء بهذه المادة ممكن في أي مكان، بقدر ما أن التربة تحتوي على القليل من الطين والماء، محسنة هكذا ظروف العيش لسكان بعض مدن العالم الثالث. ميزتها الرئيسية تبق الاقتصاد، تقنيات لا تتطلب كثيرا من الاستثمارات، دون استبعاد إنتاج صناعي نظيف خال من التلوث مع خلق العديد من فرص العمل. ما يشغل للفكر حاليا هم البحوث الأساسية لهذه المادة، أليست هذه المادة عرضة للجهل أكثر منها للماء؟

كلمات دلالية:

عمارة التراب؛ التلبس الخارجي؛ لبنات ترابية؛ حفظ؛ إرث؛ القصور؛ طين.

Résumé

Les architectures de terre commencent à connaître un regain d'intérêt sans précédent, l'importance que ces "architectures sans architectes" ont suscité mais aussi l'état de leur dégradation, sont à l'origine de nombreux textes et recommandations visant à les étudier, les restaurer et les conserver.

Z'gueg El Hadjadj, un des noyaux formateurs de la ville de Laghouat, est un ensemble d'unités d'habitation construites totalement en adobes revêtues par un enduit de terre à base de chaux. Ce patrimoine culturel inestimable montre aujourd'hui un état d'altération important, lié aux activités anthropiques et aux processus naturels d'altération.

La compréhension des phénomènes d'effritement et de décollement de ces enduits des murs en adobes nous permet de rechercher des procédés de protection plus efficaces et réellement adaptés au matériau terre et permettrait par la suite de contribuer à la résolution des problèmes de préservation des ksour et la sauvegarde du patrimoine architectural en terre par la protection des surfaces exposées aux intempéries notamment.

Notre attention porte un intérêt particulier à cette recherche qui traite un des différents problèmes de la restauration des architectures de terre : les enduits de terre.

La partie expérimentale est consacrée à l'observation du comportement des briques enduites face à un programme de quatre essais de durabilité :

1. l'essai de séchage-mouillage
2. l'essai d'absorption de remontée capillaire.
3. l'essai d'abrasion appelé aussi essai de la brosse métallique.
4. l'essai d'adhérence (enduit- support)

Pour l'essai n°1, Le test s'est montré extrêmement sévère. Il ne semble pas être convenable pour une prédiction sur la résistance à l'eau de ces types d'échantillon.

Pour l'essai n°2, La présence du ciment contribue à réduire la porosité de l'enduit, le mortier à teneur importante en chaux (2 à 3 fois plus de chaux que de ciment en volume) est plus poreux qu'un mortier de ciment.

Pour l'essai n°3, le coefficient d'abrasion de tous les enduits, dont la dernière couche est composée de ciment et de sable fin, a enregistré des meilleurs résultats.

Pour l'essai n°4, Sur les 9 échantillons prévus pour l'essai d'adhérence, 2 seulement ont difficilement réussi l'examen du carottage, les pastilles collées ont tendance à s'arracher des briques très rapidement, Ceci ne nous a pas permis de tirer la moindre conclusion, sauf peut être que l'extractomètre est beaucoup plus indiqué pour les bétons à ciment que pour le matériau terre.

La durabilité des constructions en terre reste une préoccupation permanente, le matériau terre n'est il pas vulnérable plus à l'ignorance qu'à l'eau ?

Mots clés :

Architectures de terre; adobe; enduit extérieur; patrimoine; restauration; ksours; essais de durabilité.

Abstract

Earth architectures start to know a renewed interest without precedent. The importance that these "architecture without architects" have generated but also the state of degradation, are the source of many texts and recommendations for the study, restore and preserve them.

Z'gueg El Hadjadj, one of the formative cores of the city of Laghouat, is a whole of housing units built completely of adobes covered by a layer of rammed earth containing lime.

This quarter that represents a priceless cultural heritage for this city in southern Algeria, is now showing an important state of deterioration due to human activities and natural processes of weathering.

The proposed preservation of this heritage is part of a research orientation designed to treat one of the various problems of earthen architecture preservation, particularly rammed earth plasters.

Our attention carries a particular interest to this research because the phenomena comprehension of crumbling and detachment of earthen plasters in adobe walls allows us to seek protection processes more efficient and really adapted to the earthen material and would make it possible thereafter to take part in solving problems of preserving ksour and preservation earthen architectural heritage by the treatment of external plasters.

Rammed earth is a material that is returned more for reasons of environmental awareness; it becomes unavoidable since the construction sector remains a major energy consumer and producer of negative externalities.

Building with earth is possible everywhere, in the measure that the earth includes a little clay and water, thus improving conditions of life of the population of some cities in the Third World.

Its principal advantage remains the economy, techniques that don't require much investment, without excluding a healthy industrial production creating many jobs.

What concern at present time, these are the basic research on this material, the material earth is it not more vulnerable to the ignorance that to the water?

Keywords:

Earth architectures; adobe; external plasters; preservation; ksour; earthen architectural heritage; clay.

Problématiques et opération de recherche.	
Avant-propos.....	2
Problématiques.....	3
Opération de contribution	3
Chapitre 1. Contexte, réhabilitation et méthodologie d'approche.	
1.1. Monographie de Laghouat	
1.1.1. Situation géographique.....	6
1.1.2. Climat.....	6
1.1.3. Aperçu historique.....	6
1.1.4. Présentation du Quartier Z'gueg El Hadjadj.....	8
1.1.5. Structure des îlots.....	13
1.1.6. La maison.....	14
1.1.7. Techniques de construction.....	16
1.1.8. L'état de dégradation, diagnostic et état des lieux.....	20
1.1.9. Causes des désordres.....	21
1.1.10. Objet de la réhabilitation.....	23
1.1.11. Orientation de la contribution.....	24
1.2. Outils juridiques de classement des sites historiques	
1.2.1. Proposition de classement en secteur sauvegardés.....	26
1.2.2. Procédures classement des monuments et sites historiques.....	26
1.2.3. Cadre juridique	26
1.3. Méthodologie d'approche	
1.3.1. Introduction.....	27
1.3.2. Une méthodologie pour la construction à restaurer.....	27
1.3.3. Une méthodologie pour le matériau à restaurer.....	33
1.3.4. Conclusion.....	41
Chapitre 2. Matériau terre, développement durable et établissement humains.	
2.1. Développement durable.	
2.1.1. Introduction.....	43
2.1.2. Le concept de développement durable.....	43
2.1.3. La construction durable.....	43
2.1.4. Le secteur du bâtiment comme un écosystème.....	45
2.1.5. Le matériau terre.....	45
2.1.6. Le rôle du changement technologique.....	48
2.2. Etablissement humains.	
2.2.1. Introduction.....	50
2.2.2. Établissements urbains et les risques naturels et environnementaux.....	50
2.2.3. Campagne pour un meilleur avenir urbain	50
2.2.4. Croissance des bidonvilles.....	50
2.2.5. ONU-HABITAT: Objectifs de développement du Millénaire.....	52
2.2.6. Amélioration des taudis par l'usage du matériau terre.....	52
2.2.7. Un déficit chronique.....	53
2.2.8. Conclusion.....	53
Chapitre 3. Aperçus généraux, traitement et stabilisation du matériau terre.	
3.1. Aperçus généraux.	
3.1.1. Introduction.....	56
3.1.2. Diversité architecturale.....	56
3.1.3. Diversité d'applications.....	57
3.1.4. Origine.....	58
3.1.5. Propriétés.....	58
3.1.6. Identification.....	62
3.1.7. Classification.....	62
3.1.8. Caractéristiques.....	63

3.2. Traitement et stabilisation.	
3.2.1. Réflexions de base.....	67
3.2.2. La Stabilisation.....	68
3.2.3. Densification par compression ou Stabilisation physique.....	69
3.2.4. Densification par gradation.....	71
3.2.5. Les Matériaux de stabilisation.....	73
3.2.6. Conclusion.....	81
Chapitre 4. Durabilité du matériau terre	
4. 1. Aperçu des recherches antérieures sur la durabilité des murs en terre.	
4.1.1. Introduction.....	83
4.1.2. Facteurs affectant la durabilité des murs en terre.....	83
4.1.3. Causes de l'érodabilité.....	84
4.1.4. Aperçu des recherches antérieures sur la durabilité des murs en terre.....	86
4.1.5. Essais concernant la résistance à l'érosion des spécimens de murs en terre.....	86
4.1.6. Les Essais.....	87
4.1.7. Essais de simulation au laboratoire.....	89
4.1.8. Essais de vieillissement naturel.....	103
4. 2. Recherche expérimentale et analyses ds résultats	
4.2.1. Introduction.....	110
4.2.2. Contexte général de l'étude.....	110
4.2.3. Enduits utilisés dans les essais.....	111
4.2.4. Programme des essais.....	111
4.2.5. Interprétations.....	124
4.2.6. Conclusions.....	128
Conclusions	
Conclusions, recommandations et perspectives.....	130

Liste des figures

Titre de la figure	Page
Chapitre 1.	
Figure 1 : Vue générale sur la ville de Laghouat (à partir de z'gueg el Hadjadj).....	6
Figure 2 : Noyau historique de la ville de Laghouat.....	7
Figure 3 : Positionnement des deux tribus.....	7
Figure 4 : Les 2 Oasis (à l'époque de siège 1852)	8
Figure 5 : Le Quartier avant 1852.....	9
Figure 6 : Le Quartier après 1852.....	10
Figure 7 : Le Quartier après 1962.....	10
Figure 8 : Le Quartier actuellement (2010)	11
Figure 9 : Affectation d'activités commerciales et artisanales sur la rue principale reliant les 2 places.	12
Figure 10 : Circulation piétonne à l'intérieur du Quartier.....	13
Figure 11 : Localisation de l'ilot échantillon.....	13
Figure 12 : Usage de blocs de béton dans des surélévations.....	14
Figure 13: Ensemble de maisons formant l'ilot échantillon.....	14
Figure 14 : Typologie des habitations et mode d'assemblage.....	15
Figure 15 : 2 modèles d'une habitation à deux niveaux.....	15
Figure 16 : Type de cage d'escaliers.....	16
Figure 17 : Rez de chaussée commercial.....	16
Figure 18 : Type de cour (haouch par rapport au bâti)	16
Figure 19 : Type d'accès à la maison.....	16
Figure 20 : Organisation des espaces par rapport à la cour.....	16
Figure 21 : murs en briques d'adobe.....	17
Figure 22 : Coupe sur le mur d'adobe.....	18
Figure 23 : Assises des murs en pierres sèches.....	18
Figure 24 : Coupe et vue sur le plancher.....	19
Figure 25 : Profil sur façade urbaine: Typologie des ouvertures.....	19
Figure 26 : Vue sur un type de linteau.....	20
Figure 27 : Vue sur les terrasses.....	20
Figure 28 : Exemple typique de décrépitude d'un mur en adobe à z'gueg el Hadjadj.....	20
Figure 29 : Une maison abandonnée.....	22
Figure 30 : Antennes et mats électriques fleurissants..... ;.....	23
Figure 31 : nouvelles constructions paradoxales.....	23
Figure 32 : Organigramme du projet TERRA.....	24
Figure 33 : Schéma des différentes étapes pour résoudre un problème de stabilité.....	32
Figure 34 : Diagramme courant présentant des suggestions de méthodes expérimentales utilisées dans processus conceptuel des enduits et des mortiers de réparation.....	35
Chapitre 2.	
Figure 35 : Energie nécessaire à la fabrication de quelques matériaux (en kWh/m ³)	48
Figure 36 : La croissance des bidonvilles (en milliards d'habitants)	51
Figure 37 : La population des bidonvilles (estimations 2001)	51
Figure 38 : Proportion de la population urbaine vivant dans des taudis, 1990 et 2010.....	52
Chapitre 3.	
Figure 39 : Carte du monde avec localisation des diverses régions où sont connues des méthodes	56

traditionnelles de construction en terre crue.....	
Figure 40 : Schéma des différents procédés constructifs à partir du matériau terre.....	57
Figure 41 : Origine, propriété de cohésion.....	58
Figure 42 : Texture de la terre.....	59
Figure 43 : La représentation de la granularité d'une terre.....	59
Figure 44 : Les propriétés plastiques d'une terre.....	59
Figure 45 : états hydriques.....	60
Figure 46 : Diagramme de compressibilité.....	61
Figure 47 : Diagramme de résistance à la traction.....	61
Figure 48 : Préparation de l'adobe.....	61
Figure 49 : Performance des matériaux de construction.....	64
Figure 50 : Exemple de résistance à la compression pour une maison à 1 niveau.....	64
Figure 51 : Durabilité des blocs comprimés en fonction de la résistance, plasticité et texture.....	64
Figure 52 : Durabilité des matériaux.....	64
Figure 53 : Structure argilo-limoneuse avant et après humidification.....	70
Figure 54 : Influence du mode de compression sur le taux de vide.....	70
Figure 55 : Influence de la teneur en eau de moulage sur la masse volumique sèche.....	71
Figure 56 : correction de granularité de terre par mélange.....	72
Figure 57 : Effet de la déformation sur la résistance à la compression.....	73
Figure 58 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression.....	74
Figure 59 : Influence de la masse volumique et de la limite de liquidité sur la résistance	75
Figure 60 : Influence de l'indice de plasticité et le temps de retenu sur la résistance mécanique.....	76
Figure 61 : Influence du temps de malaxage et la température de cure sur la qualité du produit fini.....	76
Figure 62 : Influence de la teneur en chaux sur la teneur en eau.....	78
Figure 63 : Influence de la teneur en chaux sur la résistance mécanique du produit.....	78
Figure 64 : Influence de temps de cure et la teneur en chaux sur la résistance à la compression.....	79
Chapitre 4.	
Figure 65 : Les effets de l'érosion pluviale.....	85
Figure 66 : Schéma de sélection des essais.....	88
Figure 67 : Méthodologie d'étude du vieillissement des matériaux.....	90
Figure 68 : Installation d'essai de perméabilité à l'eau.....	91
Figure 69 : Schéma du dispositif de l'essai d'absorption.....	92
Figure 70 : Essai d'immersion de surface.....	92
Figure 71 : Essai d'arrosage ou de dégradation accélérée de pomme de douche.....	93
Figure 72 : Relation entre la granulométrie de la terre et la résistance à l'érosion des briques.....	94
Figure 73 : Dispositif de l'essai de la goutte d'eau.....	96
Figure 74: Geelong banc d'essai.....	96
Figure 75 : Résultats de l'essai d'abrasion sur les différents échantillons.....	99
Figure 76 : Dispositif d'essai de la résistance à l'abrasion d'enduit de terres.....	99
Figure 77: Schéma de l'appareillage de type canal.....	100
Figure 78 : Schéma de l'essai d'érosion par cylindre tournant.....	101
Figure 79 : Schéma de l'essai d'érosion par l'érodimètre, et sa variation en fonction de la texture.....	102
Figure 80 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre USDA et ARS.....	102
Figure 81 : simulateur de pluie.....	103
Figure 82 : Panneaux de terre damée à la Station Expérimentale.....	104
Figure 83: Vue générale vers l'Ouest des "murets Dreyfus"	105
Figure 84 : Présentation synthétique de l'état des murets recouverts d'un enduit épais ou tyrolien.....	108

Figure 85 : Schéma du dispositif de l'essai d'absorption.....	114
Figure 86: Balance de précision 0.1 g.....	114
Figure 87: Résistance à l'abrasion, Surface broyée.....	115
Figure 88 : Résistance à l'abrasion : Dispositif de l'essai.....	116
Figure 89 : Composants du dispositif expérimental.....	117
Figure 90 : Dispositif expérimental : Plateau porte-échantillon coulissant.....	117
Figure 91 : Dispositif expérimental : le mécanisme porte-poids (6kg)	118
Figure 92 : Dispositif expérimental : Longueur de course (150 mm)	118
Figure 93 : Brosse utilisée pour l'essai.....	118
Figure 94 : Balance utilisée pour le pesage.....	119
Figure 95 : Dispositions de mise en place de l'échantillon.....	119
Figure 96 : Dispositif de carottage.....	121
Figure 97 : Carottage des spécimens.....	121
Figure 98 : Dispositif d'arrachement, l'Extractomètre.....	122
Figure 99 : Collage de la pastille à l'échantillon.....	122
Figure 100 : Collage de la pastille à l'échantillon.....	123
Figure 101 : Mise en place de l'échantillon dans le dispositif d'essai.....	123
Figure 102 : Exécution de plus d'un carottage sur la même brique.....	123
Figure 103: Variation de la quantité d'eau absorbée par unité de surface dans le temps.....	125
Figure 104: Résistance à l'abrasion des différents enduits.....	127
Figure 105: Comparaison de la résistance à l'abrasion de l'enduit à celle de son support.....	127

Liste des Tableaux

Titre du Tableaux	Page
Chapitre 1.	
Tableau 1 : Les facteurs qui altèrent l'enduit et le mortier originaux et les types de préjudices.....	33
Tableau 2 : Conditions d'analyses visuelles et de documentation.....	36
Tableau 3 : Méthodes expérimentales non destructives qui peuvent être appliquées sur des enduits.....	36
Tableau 4 : Exemple de préparation d'une carte témoin.....	37
Tableau 5 : Les essais des propriétés physiques et mécaniques.....	38
Chapitre 3.	
Tableau 6 : Classification Géotechnique d'après AASHO M 145 (USA)	63
Tableau 7 : Caractéristiques mécaniques du matériau terre.....	65
Tableau 8 : caractéristiques hydriques du matériau terre.....	66
Tableau 9 : Principaux modes de stabilisation.....	69
Chapitre 4.	
Tableau 10 : facteurs de dégradation affectant la durée de vie des matériaux de construction.....	84
Tableau 11 : résistance à l'érosion par l'essai du jet.....	87
Tableau 12 : Observations enregistrées après l'application de l'essai.....	94
Tableau 13 : Classement des enduits en fonction des quantités d'eau absorbées.....	95
Tableau 14 : Enduit assurant l'intégralité des briques après l'essai de durabilité.....	95
Tableau 15: Composition des enduits retenus.....	95
Tableau 16 : Résultats de Webb et al. (1950)	97
Tableau 17 : limites de Perte en poids suggérées par Fitzmaurice (1958)	98
Tableau 18 : Quantité des grains détachés après l'essai des différents échantillons.....	99
Tableau 19 : mesure de la profondeur de l'abrasion.....	100
Tableau 20 : Composition en partie volumique des 8 compositions d'enduits utilisées.....	106
Tableau 21 : Résumé des constats et des pathologies des murets.....	107
Tableau 22 : Principaux résultats obtenus.....	109
Tableau 23 : Programme des essais.....	112
Tableau 24 : Quantités d'eau absorbées par les échantillons en fonction du temps.....	124
Tableau 25 : Résultats de l'essai à l'abrasion.....	126
Tableau 26 : Dosage des liants utilisés dans l'enduit approprié.....	126

Liste des notations

L_l : La limite de liquidité.

L_p : La limite de plasticité.

T.E.O. : La teneur en eau optimale.

I_p : Indice de plasticité.

Q : La quantité d'eau absorbée.

A : La surface du spécimen en contact avec l'eau.

t : Le temps.

S : Le coefficient de Sorptivité du spécimen.

C_a = coefficient d'abrasion.

m_1 = la masse de l'échantillon avant l'abrasion.

m_2 = la masse de l'échantillon après l'abrasion.

$m_1 - m_2$ = la masse la matière détachée par le brossage.

f_u : la force d'adhérence.

F_u : la charge de rupture.

SG : sable gros.

SM : sable moyen.

SF : sable fin.

CH : chaux.

CT : ciment.

Te : terre.

**Problématiques et
Opération de Recherche.**

Avant-propos.

Les bâtisses en terre crue sont perpétuellement exposées aux fluctuations climatiques. Les sollicitations parfois extrêmes issues de ces alternances climatiques ont entraîné des dégradations importantes du matériau terre. La survie des constructions est alors mise en danger. Les dégradations des matériaux observées provoquent en effet souvent une érosion de la construction pouvant aller jusqu'à son effondrement partiel voire total.

Z'gueg El Hadjadj, un quartier dont les maisons en terre représentent un patrimoine culturel inestimable pour la ville de Laghouat.

En sus de l'absence de maintenance et d'entretien de ce quartier par ces locataires, il est soumis à des provocations atmosphériques très fortes engendrées par le climat semi-aride de la région, auxquelles peut s'ajouter parfois l'abandon total des maisons par leurs propriétaires.

Ce patrimoine architectural et historique n'a pas encore fait l'objet d'une sérieuse campagne globale d'inventaire ni de protection centralisée. De nombreuses habitations restent souvent inoccupées et sont destinées à une ruine certaine.

Depuis 2006, une initiative de la wilaya, de la direction de la culture spécialement, visait à sauvegarder le patrimoine architectural en terre de ce quartier ancien en le proposant comme site protégé afin d'être classé comme patrimoine national. En 2008, les dossiers de classification des quatre sites suscités, dont celui de z'gueg el Hadjadj, ont été déposés au niveau de la Direction Centrale du Patrimoine à Alger.

Ces demandes de classification ont pour objectif le placement de ces sites patrimoniaux sous le statut de «patrimoine protégé», ce qui contribuera à leur préservation et leur permettra de bénéficier d'opérations de restauration et de réhabilitation.

En 2000, une étude a été faite à l'université de Laghouat (F.AOUISSI) faisant l'objet d'investigation expérimentale sur plusieurs compositions d'enduits, utilisés à protéger en surface le mur d'adobes.

Les éprouvettes enduites ont été soumises à l'essai de douche pour établir la tenue à l'eau des briques.

10 années plus tard ces mêmes éprouvettes sont stockées au laboratoire de génie-civil de l'université de Laghouat.

L'objectif de cette thèse est de continuer dans la même pensée d'investigation : l'étude de la durabilité de ces revêtements, en optant notamment pour d'autres essais complémentaires.

Les mêmes éprouvettes vont être alors soumises cette fois-ci à l'essai d'abrasion, appelé aussi essai de la brosse métallique (non encore homologué pour le matériau terre) et à l'essai d'arrachement (surface Pulloff) pour voir le comportement d'adhérence de ces enduits sur l'adobe.

Continuer dans le même axe de recherche c'est s'approcher encore plus d'une décision à prendre quant au revêtement à adopter afin de mieux choisir l'enduit approprié et de le recommander à tous les intervenants dans le processus de restauration.

Des intervenants qui, souvent, face à des constructions qu'ils doivent conserver et restaurer, ignorent l'origine des dégradations ou évaluent mal les dommages, entraînant ainsi des travaux de restauration mal adaptés voire néfastes.

Cette continuité est beaucoup plus pertinente si elle s'appuie sur l'étude d'une situation réelle. Le site de z'gueg el Hadjadj a été choisi dans cette optique. Cet ensemble d'habitations en terre crue, dont presque la totalité présente des traces d'érosion sur les façades, des traces

représentatives des dégradations observées sur plusieurs autres sites tels que le ksar de Tajmout ou celui d'Ain Madhi pour en citer que ces deux là.

Problématiques

1. Problématique générale

L'héritage patrimonial ancestral datant de plusieurs décennies souffre d'un manque d'entretien évident. En dépit du fait qu'il représente l'essentiel de nos espaces centraux, ils ne sont guère préparés par du manque d'entretien et la vétusté du cadre bâti.

Le sauvetage de cette architecture s'articule autour d'un double principe de conservation et de valorisation du patrimoine :

1. la préservation et la valorisation d'un quartier ancien, et notamment, le mode d'habiter chargé de valeurs architecturales et sociales historiques.
2. la perpétuation d'une tradition constructive et d'un savoir-faire en voie de disparition, c'est aussi montrer l'intérêt de l'architecture en terre et son potentiel de renouveau, en proposant des solutions améliorées pour les techniques de construction et les performances de ce matériau terre.

Notre cas d'étude se limite un seul dommage qui ronge, parmi tant d'autres, ce patrimoine :

Le revêtement extérieur des murs en adobe, les enduits de protection en terre notamment.

2. Problématique spécifique

Après avoir effectué plusieurs déplacements sur le site, le premier constat alarmant concerne l'état de dégradation et de vulnérabilité de ces constructions, parmi les facteurs des dommages demeure l'érosion des enduits extérieurs de protection, sujet de notre étude. Les pathologies que l'on remarque dans les maisons de ce quartier sont fréquemment dues aux agents climatiques, pluie, vent, rayonnement solaire : désagrégation de l'enduit de revêtement, décollage de ces enduits et la dissolution de la terre qui constituait les murs d'adobes suite à l'action conjointe de la pluie, du vent, et de l'usure, et parfois des déformations des maçonneries en hauteur, dans les angles et les linteaux, dues à l'action conjointe et érosive du vent et de l'eau.

Bien qu'il existe aujourd'hui des normes en matière de stabilisation, nous avons toutefois effectué des essais hydriques et des essais à l'abrasion sur des échantillons dont l'enduit en terre, est stabilisé de différentes variétés de proportion de ciment et de chaux, des échantillons confectionnés en 2000 au laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat par F.AOUISSI) et qui ont déjà servi à des tests de durabilité pour ses recherches de magister sur l'adobe paillé. Ces échantillons vont être repris encore une fois, avec éventuellement sa permission et son consentement préalables, pour nos essais de remontées capillaires, de séchage-mouillage, de la brosse métalliques ainsi que des essais d'arrachements.

Comment peut-on restaurer un revêtement extérieur en terre crue d'un mur d'adobe, par l'usage d'un enduit amélioré plus durable, et qui ressemble à l'enduit original par la compatibilité de leurs propriétés ?

Opération de contribution.

Notre étude rentre dans un cadre de recherche en conservation-restauration des matériaux du patrimoine en terre.

• Objectifs :

Deux principaux objectifs seront directement ou indirectement ciblés dans cette étude :

- L'amélioration de la durabilité des revêtements des murs en adobe, et particulièrement les enduits extérieurs, pour la conservation et la restauration du patrimoine en terre de z'gueg el Hadjadj.
- L'apport d'une aide scientifique et technique aux différents intervenants de la restauration de ce patrimoine.

Z'gueg el Hadjadj, ce quartier, comme il a sera retracé postérieurement, est un ensemble d'unités d'habitation construites totalement en adobes revêtues par un enduit à base de chaux. Ces habitations traditionnelles montrent un état d'altération important, lié aux différentes activités

La ville de Laghouat renferme de biens culturels inestimables dont une grande partie est constituée de constructions édifiées en adobe et notamment le quartier Ben Badis, connu aussi sous le nom de z'gueg el Hadjadj. Ces habitations traditionnelles montrent aujourd'hui un état d'altération important, lié aux activités anthropiques et aux processus naturels d'altération.

Le projet de préservation de z'gueg el Hadjadj s'inscrit dans un volet de recherche qui vise à traiter un des différents problèmes de la préservation des architectures de terre, les enduits de terre particulièrement.

Les murs de tout le quartier sont construits en adobe (brique de terre séchée au soleil). Laghouat qui se situe dans une région semi aride où les précipitations sont faibles mais violentes, ce qui n'empêche pas de négliger les profonds dégâts causés par les fortes averses qui tombent occasionnellement.

Dans cette région, les principaux agents de l'érosion des murs en terre, demeurent la pluie (battante) et les vents.

L'orientation de la recherche sera définie dans le paragraphe 1.2.5. du chapitre 1, une fois l'état de dégradation du site sera décrit où une série de tests va être sélectionnée pour étudier la durabilité des revêtements, les enduits de terre notamment, néanmoins un aperçu sur ces essais est montré ci-dessous dans Expérimentation.

- **Expérimentations**

Vu que les causes réelles de la dégradation de ces biens culturels, qui vont être incessamment classés patrimoine national, sont diverses et variées, et que finalement leur revêtement extérieur ne représente qu'un dommage parmi tant d'autres, cette intervention va se limiter, de ce fait, simplement au recouvrement des murs, une protection en surface pour une meilleure durabilité des parois dans le temps.

Elle a pour but de proposer des techniques de conservation en envisageant l'utilisation d'un enduit de substitution à base de terre en s'appuyant sur les connaissances et les pratiques traditionnelles et de restauration adaptées.

Une partie de cette thèse va être consacrée à l'étude bibliographique de ce matériau terre, l'autre partie va compléter un travail de laboratoire déjà entamé par F. AOUISSI sur des essais de durabilité: l'essai à l'abrasion notamment.

Des échantillons d'enduit et de substrat (adobe) seront prélevés et comparés avec ce qui va être trouvé.

Chapitre 1.

**Contexte, réhabilitation
et méthodologies d'approche.**

1. 1. Monographie de Laghouat.

1.1.1. Situation géographique.

Le terme de Laghouat, vient selon certains de Ghout pluriel Aghouat signifiant maisons avec jardins, selon d'autres, c'est un terme berbère qui désigne: "montagnes en dents de scie", Hadj Kaddour (2008) [1].

Selon Ibn-Khaldoun les Béni-Aghouat est le nom d'une tribu berbère qui habitait la région et cette dernière serait liée à la confédération des Maghraoua.

Laghouat, porte d'accès aux espaces sahariens, située au pied du contrefort de djebel Amour, à 432 Km au sud d'Alger sur l'axe de la RN n°1 reliant la capitale au sud du pays, à 751 m d'altitude à une latitude de 33°41' Nord et à une Longitude de 2° 53' Est.

Elle est bâtie sur 3 hauteurs rocheuses:

- La première domine l'Oued M'Zi et porte le marabout de Sidi Abdelkader.
- La deuxième, au centre, porte l'hôpital militaire datant de la prise de Laghouat (Le 04 décembre 1852. Fort Bouscaren).
- La troisième, à l'Ouest, porte la mosquée de Sidi El Hadj Aissa.

Au Nord, en bordure de Laghouat, une chaîne de montagnes comportant en particulier le "Ras Aioune" et qui domine la prise d'eau — le Milok — le Djebel Lazrègue. Au sud, la région des Dayas (dépression). Plus à l'Ouest, se trouve le "Rocher des Chiens" séparée des trois premières par une dépression, Hadj Kaddour (2008) [1].

La photo de la figure 1 donne une vue générale sur la ville de Laghouat.

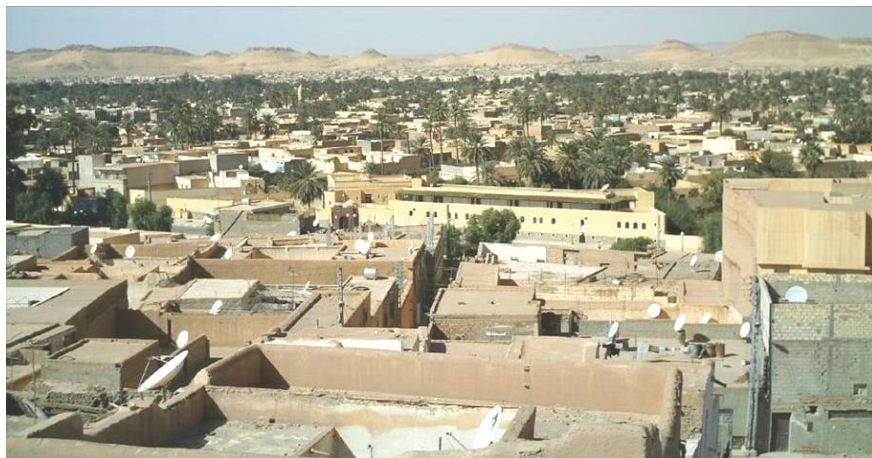


Figure 1 : Vue générale sur la ville de Laghouat (à partir de z'gueg el Hadjadj)

Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

1.1.2. Climat.

Le climat de cette région est de type présaharien connu par sa faible pluviométrie, caractérisé par des étés très chauds et des hivers froids, et l'enregistrement d'importants écarts de températures, Takhi (1988).

Le maxima thermométrique durant le jour atteint facilement les 40 °C, voir plus en été, et le minima avoisine les 6 °C en hiver, la nuit cette température peut descendre jusqu'à -2°C.

Les vents dominants sont ouest et sud-ouest.

1.1.3. Aperçu historique.

1.1.3.1. Processus historique.

Dés le 10ème siècle, à l'emplacement de Laghouat, existait une bourgade berbère, occupée, mais fréquemment détruite. On fait remonter la fondation définitive à 1045 (selon Ibn-Khaldoun).

Avec l'invasion Hilalienne vinrent s'établir les Ouled Sekkal et les Ouled Zid qui fondèrent le Ksar Ben Bouta (qui est en fait le noyau du Ksar de Laghouat). C'est en 1698 que Sidi Hadj Aissa vint s'y établir, et vers 1700 les Ksours environnants se groupent autour de lui.

L'histoire de Laghouat devient certaine à partir de l'époque du grand patron de la ville : Sidi Hadj Aissa. C'est vers 1700, que ce marabout aurait fait comprendre à la population, qu'il était venu se fixer, "intérêt qu'il y tait pour elle à se fixer et à se grouper", Hadj Kaddour (2008) [1].

Les premiers regroupements, figure 2, se sont établit sur les rives de Oued M'Zi et sur les sommets des collines : des Ksours tel que Ben Bouta, Nadjal, Kasbah Ben Fetouh.

Mais les tribus se sont ralliés autour du Ksar Ben Bouta, considéré comme l'un des deux noyaux formateurs de la ville de Laghouat, le deuxième noyau n'était que l'actuel Quartier de Ben Badis (Z'gueg El Hadjadj), Benelhadj et Al. (2006)[2].



Figure 2 : Noyau historique de la ville de Laghouat
Source : Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

C'est vers le même temps que la grande tribu des Larbaâ se serait définitivement établie dans la région et c'est dès la fondation de la ville que se sont fondées le deux Cofs (groupe) ", Hadj Kaddour (2008) [1].

La figure 3 montre la situation des deux tribus.

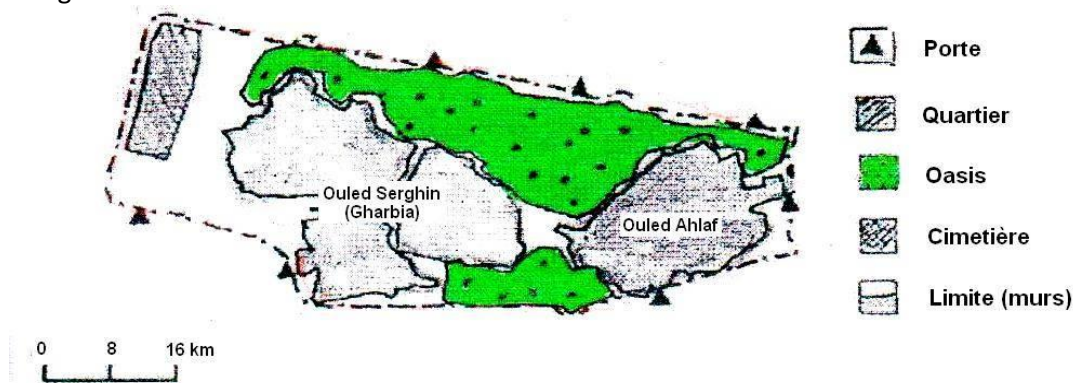


Figure 3 : Positionnement des deux tribus.
Source : Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

Le site d'intervention, le Quartier de Ben Badis, Z'gueg El Hadjadj en l'occurrence, se définit par:

- Les mamelons de Djebel Tizegrarine qui forment une fortification naturelle contre toutes invasion, le Quartier est caractérisé par une pente douce du coté nord, face à l'oasis nord (terres fertiles), et d'une pente très raide du coté sud (fortification naturelle contre toutes invasion).

L'oued M'Zi représente une source d'eau qui favorise la sédentarisation des tribus autour de l'oued, Benelhadj et Al. (2006)[2].

Dans ces espaces désertiques, l'eau représente la vie. L'existence de terres cultivables a permis le développement d'une vie économique basée sur le travail des jardins en palmeraie, en plus de l'artisanat, Sariane et Beztout (1999) [3].

Les terres fertiles longent l'Oued M'Zi, figure 4, procurent aux habitants du Ksar des terres arables pour leur nourriture, et pour la plantation de palmiers dattiers, actuellement Oasis Nord et Oasis Sud, Benelhadj et Al. (2006)[2].

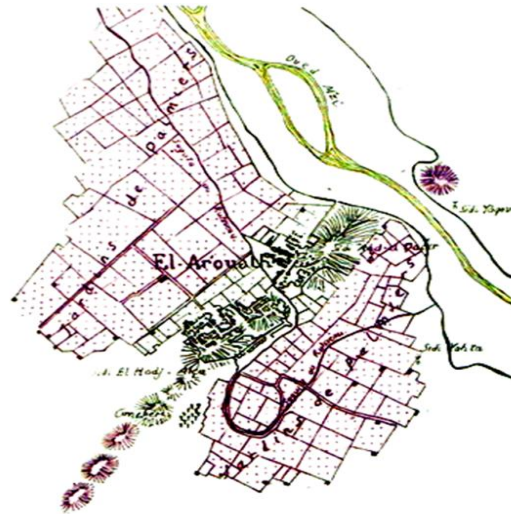


Figure 4 : Les 2 Oasis (à l'époque de siège 1852)

Source : Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.3.2. La genèse de la ville.

Il est largement admis que parmi les facteurs qui ont présidé au choix d'un site par rapport à un autre pour la fondation des établissements humains à travers l'histoire de l'humanité figurent à des degrés variables : l'eau, la défense, les facteurs économiques, les communications et les croyances. Les ksour n'échappent pas à cette logique. Dans ces régions connues pour leur aridité et où l'échelle des distances entre les différents points d'eau se compte par des centaines de kilomètres, il est logique de voir la vie s'installer autour des sources d'eau, Sariane et Beztout (1999) [3].

Au cours de sa longue histoire, Laghouat a vu fleurir des oasis très organisées qui se sont adaptées à la topographie du site.

Toutes les maisons étaient en brique de terre et présentaient une cour intérieure, l'accès à l'intérieur de la maison est assurée par une porte en chicane très basse.

Ces groupements de maisons autour des deux noyaux, séparés par une oasis, représentaient le cœur de la ville et la création de la ville s'effectuait progressivement par la fixation des tribus.

L'existence de plusieurs ksours constituait un lieu idéal et sécurisant pour toute invasion et l'unité spatiale et sociale, comme il a été cité auparavant, se réalisa vraisemblablement par le marabout Hadj Aissa vers le 17^{ième} siècle, Othmani (2000) [4].

1.1.4. Présentation du Quartier Z'gueg El Hadjadj.

1.1.4.1. Lecture Urbanistique.

Sur le plan morphologique, le Quartier, se présente sous forme d'une agglomération très serrée de maisons à cours intérieures, couleur terre.

Le mode d'organisation de ces maisons obéit à une triple préoccupation : Sariane et Beztout (1999) [3].

1.1.4.1.1. Préoccupation climatique.

Dans ces régions les températures peuvent grimper jusqu'à 50° C à l'ombre, l'insolation est à son paroxysme et les vents font pénétrer le sable dans les moindres recoins, l'homme a su trouver

la parade contre ces contraintes climatiques par l'élaboration d'un habitat qui mitige les effets contraignants de ce climat : un plan d'organisation compact pour un ombrage mutuel et une protection contre les vents de sable, des matériaux et une technique qui assurent une isolation thermique efficace .

1.1.4.1.2. Préoccupation défensive.

La présence d'un rempart enveloppant l'ensemble des maisons témoigne du souci de défense, car depuis les temps les plus reculés les habitants de ce type de Quartier étaient la cible des razzias des nomades, belliqueux et plus aguerris aux armes.

1.1.4.1.3. Préoccupation d'ordre social et économique.

Revenant à l'époque de fondation des deux Cofs, selon Sariane et al., le Ksar constitue l'unité de base dans l'organisation de la société ksourienne. En effet, l'oasis est formé d'un certain nombre de ksour. Chaque Ksar correspond à un groupe ethnique ou un "clan" qui vit indépendamment des autres ksour, il dispose de structures communautaires indépendantes. Distants de quelques dizaines ou centaines de mètres ou juxtaposés les uns aux autres – auquel cas, ils sont assimilés à des Quartiers – ils gardent toujours leur autonomie. L'unité se manifestant surtout dans les guerres et les conflits tribaux. Reflet fidèle des relations sociétales, l'organisation du ksar retrace lisiblement la généalogie et l'origine des groupes ethniques. Elle décrit aussi l'agencement des activités économiques dans le ksar ; il n'est pas rare que les ruelles portent le nom des différents corps de métiers.

1.1.4.2. L'évolution chronologique du Quartier.

1.1.4.2.1. Le Quartier avant 1852.

Avant l'occupation française de la ville en décembre 1852, la rue principale du Quartier regroupait des équipements tels que : mosquée, café, bain maure, et quelques boutiques.

A cette époque, le Quartier possédait déjà des remparts, ainsi que la tour de contrôle "Abdallah", et la porte de l'est, coté oued M'Zi, Benelhadj et Al. (2006)[2].

La figure 5 montre Le Quartier avant 1852.

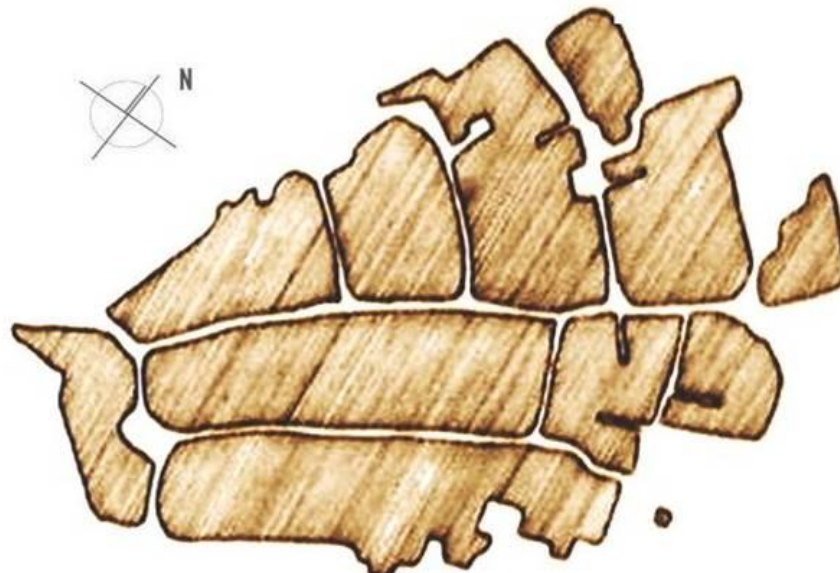


Figure 5 : Le Quartier avant 1852

Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.4.2.2. Le Quartier après 1852.

Durant l'occupation française, et dès la nomination du général Dubarail, le Quartier Ben Badis a connu des interventions de restructuration de réhabilitation et d'extension, cette intervention qui porte son nom se résume par les actions suivantes :

- Fortification de la ville par des remparts, tours, et fort Morand édifié sur la Tour Abdallah.
- Elargissement et alignement des voies.
- La porte de l'est en terre crue fut substituée par la porte de l'Oued construite en pierres taillées.

Implantation de quelques équipements (église, école, hôtel, bain maure), Benelhadj et Al. (2006)[2].

La figure 6 montre Le Quartier après 1852.

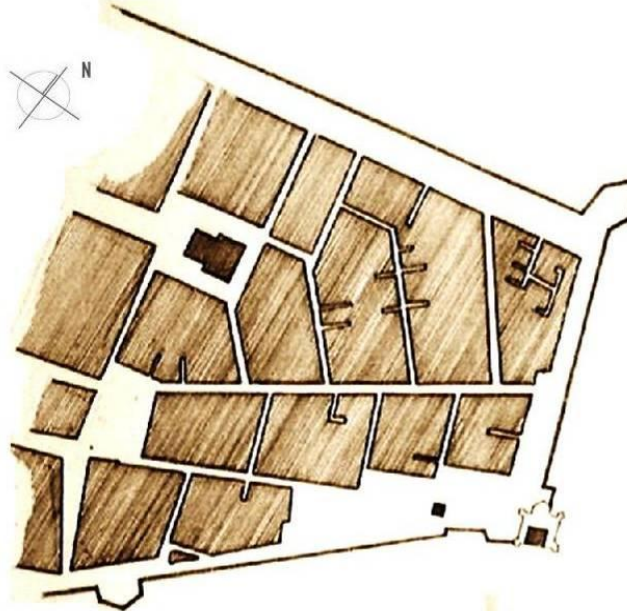


Figure 6 : Le Quartier après 1852

Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.4.2.3. Le Quartier après 1962.

Le Quartier Ben Badis a connu une certaine stabilité sociale après l'indépendance, en préservant une grande autonomie vivrière en matière de nourriture (Jardins entourant le Ksar), commerce et artisanat, Benelhadj et Al. (2006)[2].

La figure 7 montre Le Quartier après 1852.

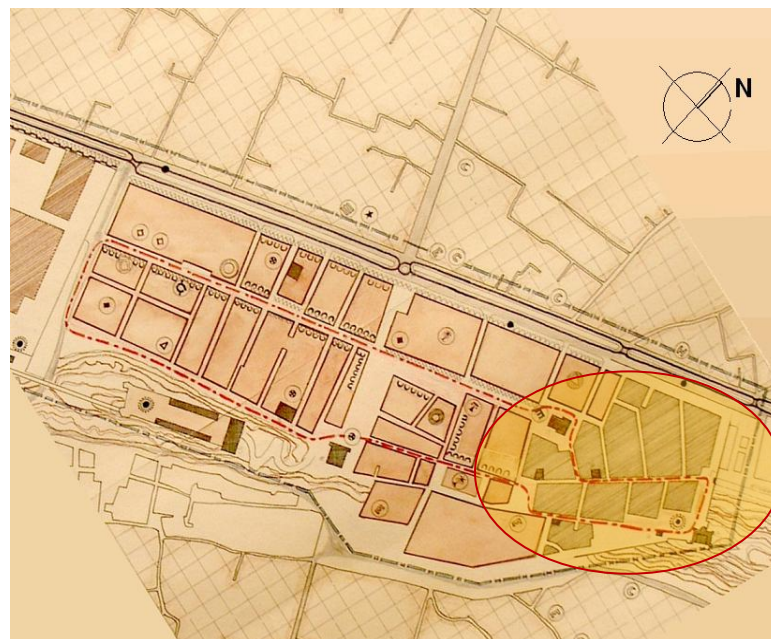


Figure 7 : Le Quartier après 1962

Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

Mais un exode rural continu dû aux mutations politico-économiques, et l'inexistence d'instruments d'urbanisme qui réglementent les sites historiques, ont conduit progressivement à une dégradation de ce site historique, Benelhadj et Al. (2006)[2].

La photo de la figure 8 montre Le Quartier actuellement.



Figure 8 : Le Quartier actuellement (2010)

Source : Google Earth

1.1.4.3. La structure socio spatiale.

1.1.4.3.1. L'organisation.

Le plan du tissu urbain, est structuré par un système de ruelles et de placettes. La hiérarchisation de l'espace garantit un fonctionnement serein et loin de toute équivoque. A partir de l'accès principal du ksar, le cheminement commence généralement par une place relativement grande la "Rahba". Elle peut être un simple espace de transition.

Ces ruelles principales qui desservent des Quartiers se rejoignent plus loin autour de la place. Cette dernière constitue le cœur du ksar. Elle est à la fois un espace physique rehaussé par la présence de la mosquée, mais aussi un espace social. L'espace physique est formé par la place elle-même et par les embouchures des "Droub" qui offrent des lieux de réunion et d'échanges, de détente et de fraîcheur grâce à la couverture qui protège du soleil, au courant d'air qui garantit une ventilation naturelle. A partir des différents "Droub", bifurquent un réseau de petites ruelles appelées "Zgag" ou "Z'gueg". Elles sont plutôt sombres et permettent de pénétrer à l'intérieur des Quartiers. Des impasses, parsemés parfois par des passages couverts (le sabbat) conduisent aux accès des maisons.

Les accès aux maisons sont toujours protégés par un système de chicane. Ce dispositif permet de marquer le seuil et joue le rôle d'un filtre à partir duquel est triée la circulation vers l'intérieur de la maison en ayant comme souci majeur, la préservation de l'intimité de la famille. D'ailleurs et dans cet ordre d'idées, toute une série de règles sont prévues par rapport à la notion de voisinage pour garantir une vie communautaire où règnent la sérénité et l'entente. Les portes ne font jamais face, pour les habitations à terrasse accessible, la hauteur du mur d'acrotère dépasse la hauteur d'un homme debout pour ne pas déranger l'intimité des voisins.

Le Quartier Z'gueg El Hadjadj, figure 9, a une superficie de 3 ha environ, il abrite des habitants de classe moyenne, le nombre des habitants occupants ce Quartier en 2000 était de 3.000 habitants.

Le Quartier accuse une densité des plus fortes (entre 120 et 500 hab/ha), On dénombrait 251 maisons, 40 locaux commerciaux, 3 mosquées, une école, un hôtel, et 3 hammams, Takhi (1988).

La figure 9 montre l'affectation d'activités commerciales et artisanales à Z'gueg El Hadjadj.

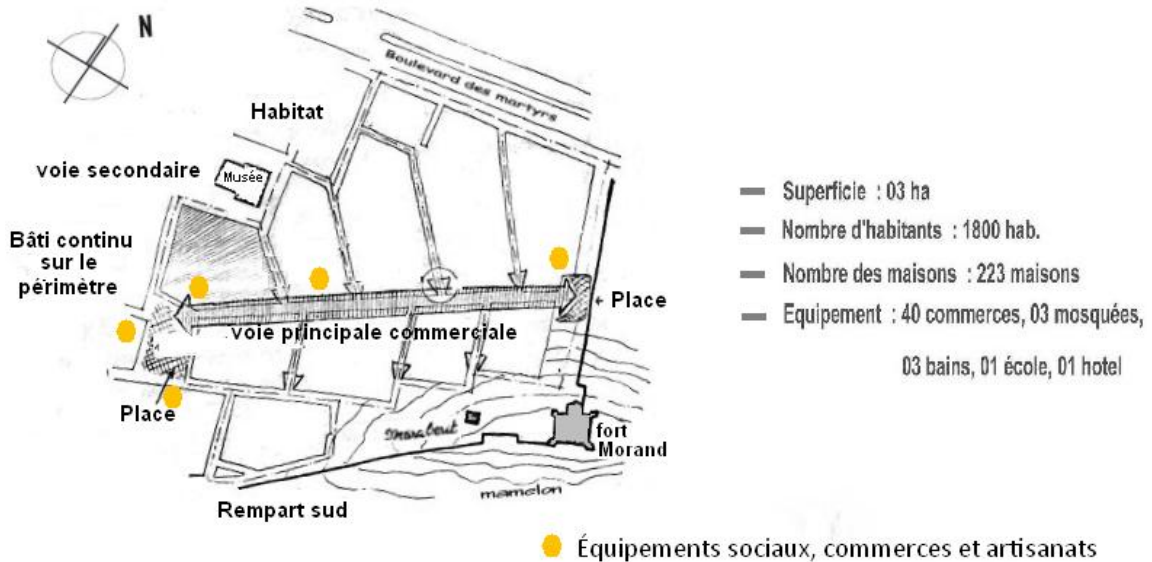


Figure 9 : Quartier Z'gueg El Hadjadj : Affectation d'activités commerciales et artisanales sur la rue principale reliant les 2 places,

Source : BET Arabesques - TAKHI Belkacem - Laghouat

Les éléments agaçant actuellement le Quartier sont :

- La mosquée Souna,
- La mosquée Sidi Abdelkader,
- Le fort Morand,
- Le fort Bouscaren,
- le musée communal, l'ex-église,
- La place z'gueg el Hadjadj.

Ces édifices apparaissent dans le site comme des repères par leur solennelle architecture.

1.1.4.3.2. La structure socio spatiale du tissu.

Au début de sa genèse elle était formée d'un ensemble d'îlots carrés, assez uniformes, contenus par des murs entourant les bâtiments d'habitation et les annexes disposées autour d'une cour. Telle était la solution fonctionnelle qui se répétait pour configurer le tissu urbain. Les maisons étaient construites en maçonnerie de pierres taillées assemblées de façon parfaite. L'adobe était utilisé dans la partie supérieure des murs, Othmani (2000) [4].

1.1.4.3.3. La structure socio spatiale du Quartier.

Cette structure est bâtie sur un plan simple qui consiste à diminuer l'espace au profit de l'ombre, le système de voirie est composé de ruelles et d'impasses, l'étroitesse des ruelles, la rupture de continuité (impasse): expression d'exigences d'origines sociales et climatiques (intimité et ombre). La photo de la figure 10 illustre la circulation à l'intérieur du Quartier.

Les habitations de Z'gueg el Hadjadj ont été toutes construites d'une manière à ce qu'elles soient adaptées aux conditions climatiques sévères de la région.

Ce climat connu par sa rudesse, par l'utilisation de la terre comme matériau de construction, la brique d'adobe en l'occurrence, a contribué à la régularisation du confort thermique intérieur de ces unités d'habitation: l'insinuation de la chaleur ou du froid.



Figure 10 : Circulation piétonne à l'intérieur du Quartier
Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

1.1.5. Structure des îlots.

Comme la plus part des îlots de ce Quartier, cet îlot a subit des transformations à travers le temps, la mutation la plus déroutante était celle de l'époque coloniale (intervention française,...) la figure 11 montre les zones démolies (en pointillés) ainsi que la localisation de l'îlot échantillon : sujet de notre étude.

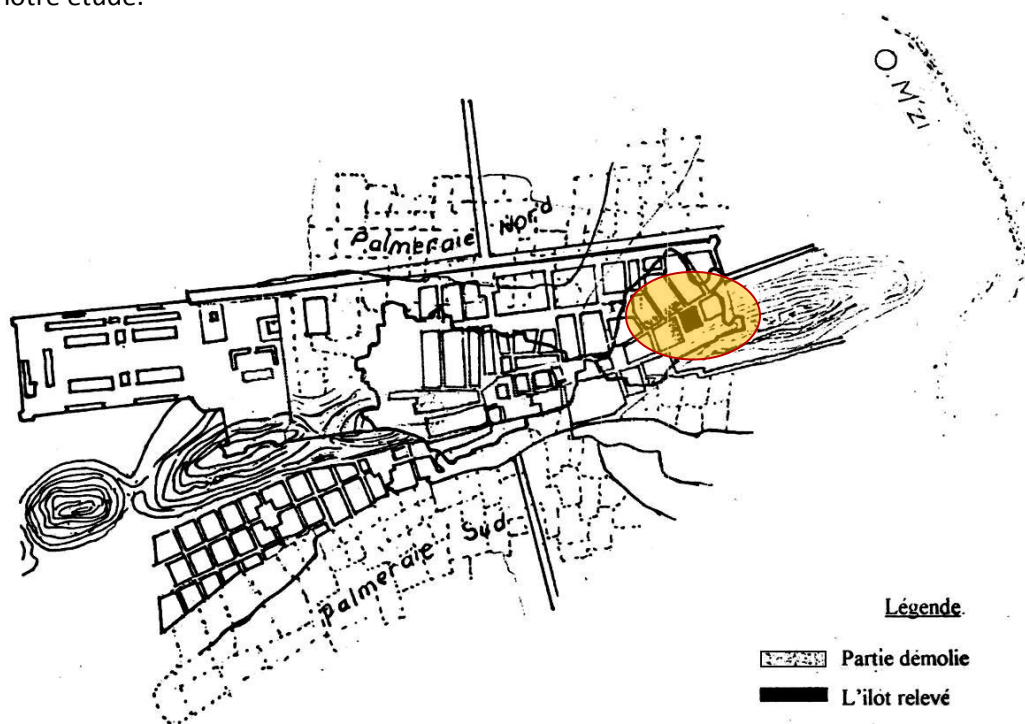


Figure 11 : Localisation de l'îlot échantillon
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

En plus de ces reconversions chronologiques qu'a connu ce Quartier, y a le comportement de certains propriétaires qui, en absence d'un contrôle urbanistique, effectuent des surélévations, facilement reconnaissables (utilisation de blocs de parpaing) avec parfois des ouvertures sur l'extérieur. Figure12.



Figure 12 : Usage de blocs de béton dans des surélévations
Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

Chaque îlot est formé par un ensemble de maisons, figure 13, ces dernières, fermées sur elles mêmes, sont serrées les unes contre les autres.

Chacune de ces maisons, introverties, possède, une cour ou haouch, ouvert vers le ciel.

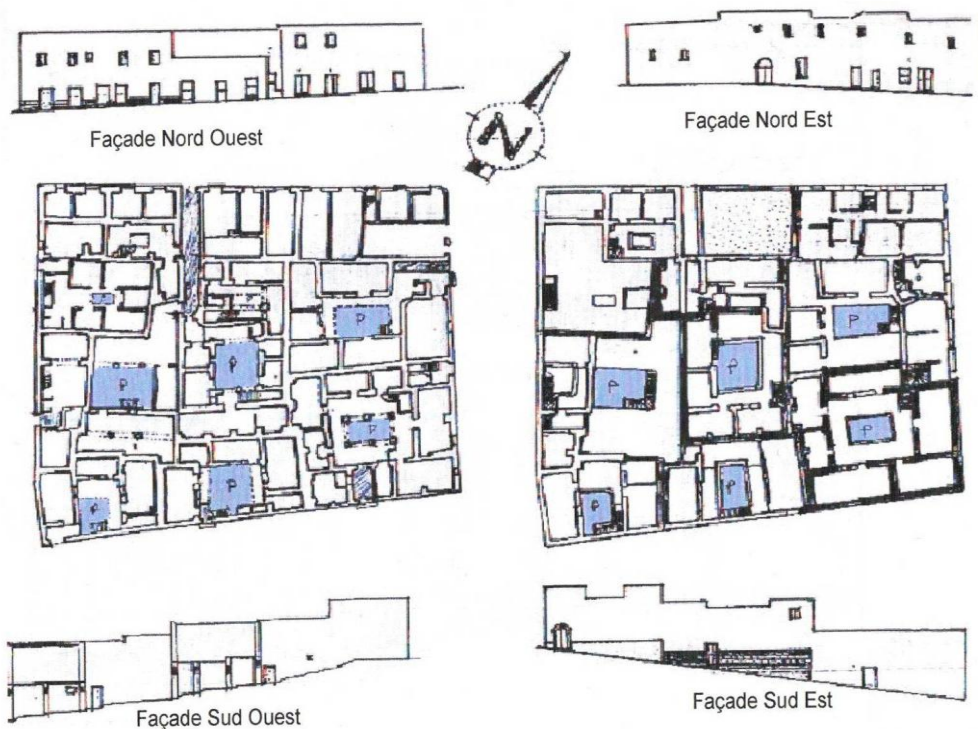


Figure 13: Ensemble de maisons formant l'îlot échantillon
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.6. La maison.

1.1.6.1. Description de la maison (modèle).

Au-delà des quelques petites variations qui peuvent exister entre les différents types de maisons dans ce Quartier, un certains nombres de caractéristiques communes identifie ce qu'on peut appeler la maison traditionnelle type, figure 14.

Il s'agit d'une maison marquée par son introversion et sa centralité. L'entrée se fait par une ouverture en général unique sur la façade. L'entrée en chicane interpose ses écrans à la pénétration du regard au cœur de la maison, elle ouvre sur la pièce la plus vaste de la maison qui

est aussi la plus éclairée, le "Wast Eddar" littéralement le centre de la maison. L'intimité est assurée par la skifa, entrée en chicanes, ou d'un escalier.

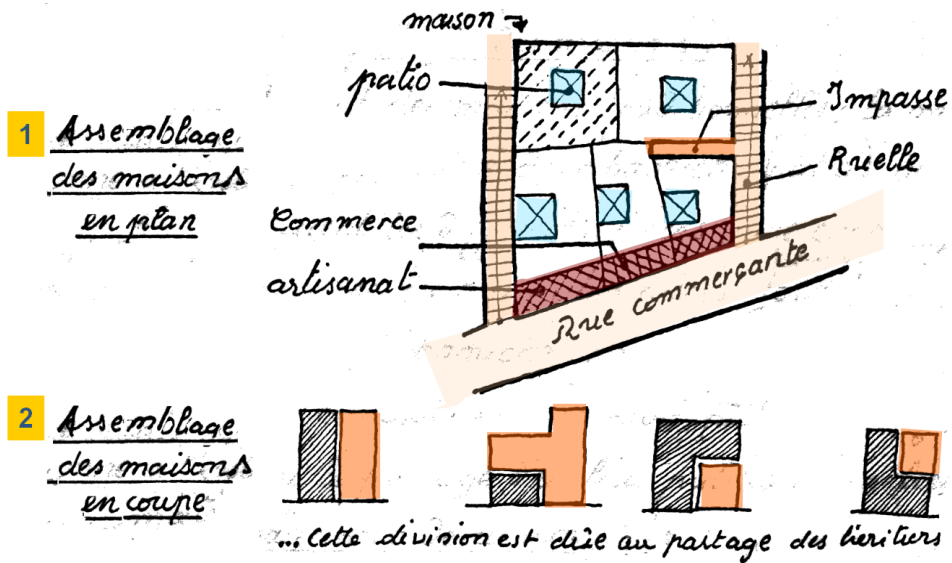


Figure 14 : Typologie des habitations et mode d'assemblage
Source : BET Arabesques - TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.6.2. Typologie de la maison.

Elle résulte des expressions socioculturelles des habitants de l'époque. Les similitudes fonctionnelles et morphologiques de base ont opéré une fusion (juxtaposition et superposition), qui a donné les types particuliers aujourd'hui présents dans l'espace urbain de la ville.

Cette solution est une réponse très adéquate aux exigences climatiques et socioculturelles des occupants. La communication avec l'extérieur ne se fait qu'à l'aide de deux ouvertures : la porte d'entrée et le vide de la cour qui est souvent réduit à un orifice pratiquée dans le toit qui couvre la cour. La forte luminosité et l'ensoleillement excessif nécessitent une telle disposition, il règne alors une agréable ombre à l'intérieur. Par conséquent ce qui était à l'origine une cour devient dans cette architecture, une pièce mais pas n'importe quel pièce ; elle est le cœur de la maison qui bat au rythme des activités domestiques, cuisiner, manger, séjour, tissage, etc. Une succession de pièces s'aligne autour de la cour. Les chambres "Biout" pluriel de "Beit" sont polyfonctionnelles. Un escalier, pour les habitations à deux niveaux, figures 15 et 16, permet l'accessibilité à l'étage dans lequel on trouve la "Satha" qui est une terrasse couverte d'une natte de branches de palmiers.

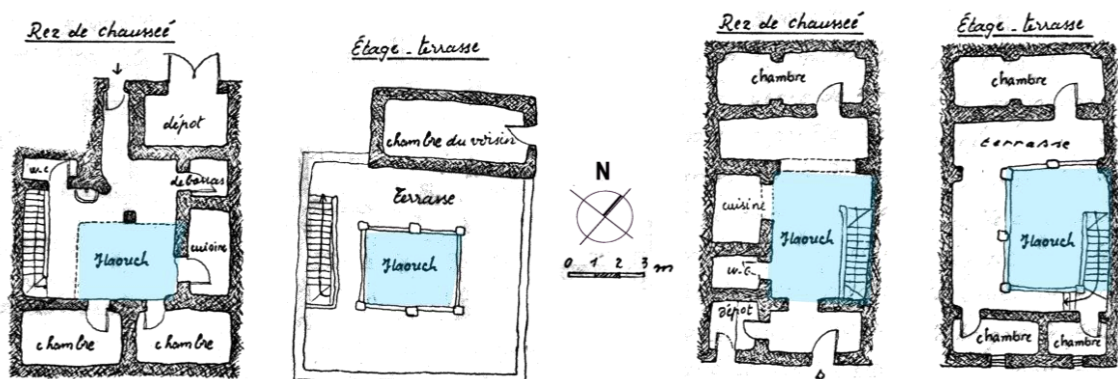


Figure 15 : 2 modèles d'une habitation à deux niveaux
Source : BET Arabesques - TAKHI Belkacem - Laghouat

Les habitations de forme cubique ont généralement un seul niveau moyen (Rez de chaussée) d'environ 2,80 m de hauteur, les terrasses peuvent parfois être accessibles. Elles sont constituées de plusieurs volumes organisés autour d'une cour. La figure 17 montre une habitation dont le rez de chaussée est destiné au commerce.

Pour des raisons d'intimité, l'entrée est conçue en chicane, la skifa assure le passage entre l'extérieur : l'espace public et l'intérieur : le privé, et "Beit Eddiaf", la chambre des invitées est indépendante de l'espace familial.

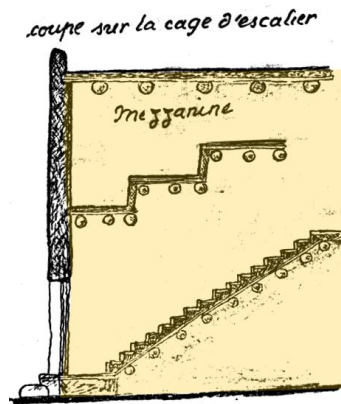


Figure 16 : Type de cage d'escaliers
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

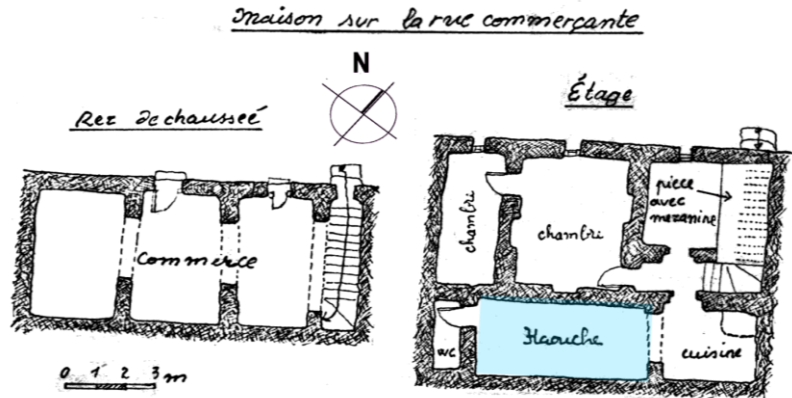


Figure 17 : Rez de chaussée commercial.
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

Dans la cour située à l'entrée de l'habitation on peut manger, accueillir des invités, et y dormir en été, utilisée aussi pour des activités domestiques, lessive, vaisselle, et cuisine. La figure 18 montre les différentes variantes de la situation de la cour par rapport au bâti de la maison.

Organisation des différentes pièces au tour du patio - haouch.

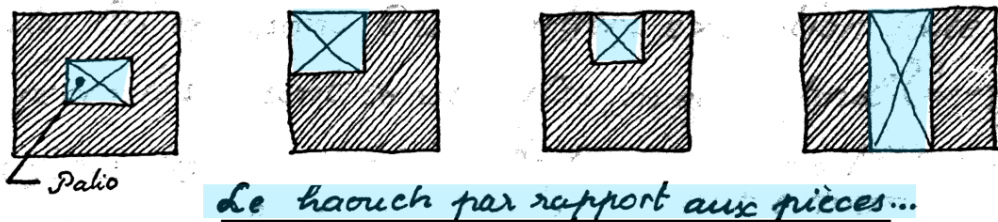


Figure 18 : Type de cour (haouch par rapport au bâti)
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

L'habitation dispose d'une entrée en chicane, la figure 19 montre le type d'accès à la maison. Elle est caractérisée par une organisation introvertie, les différentes pièces sont organisées autour d'une cour, qui est considérée aussi comme un espace de vie indispensable, beaucoup d'activités s'y déroulent. Figure 20.



Figure 19 : Type d'accès à la maison.
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

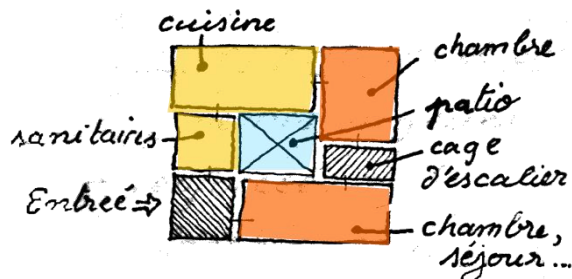


Figure 20 : Organisation des espaces par rapport à la cour.
Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.7. Techniques de construction.

1.1.7.1. Les Matériaux.

La construction de ce Quartier obéit à plusieurs règles architecturales. Sur des fondations en pierres reposent des murs en briques d'adobe : un mélange de terre et de paille selon un procédé

qui consiste à mouler de la terre crue dans des moules en bois et de les faire sécher ensuite au soleil, ces murs d'adobe isolent de la chaleur et du froid.

Le Quartier, construit en adobe, matériau principal, prend la couleur de sa terre d'origine, qui, passant du ocre au brun. Photos de la figure 21.



Figure 21 : murs en briques d'adobe.

Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

A l'origine, cet habitat en terre fut édifié par des familles qui, ayant décidé de se sédentariser, recherchèrent une construction plus solide que leur tente de laine pour faire face aux intempéries et aux ennemis. C'est pourquoi les ksours en général petites forteresses, sont établis le plus souvent sur des pitons rocheux, Sariane et Beztout (1999) [3].

Les matériaux et les éléments constructifs intervenant dans la construction de la maison sont d'usage traditionnel et de diversité limitée.

Comme tous les vieux ksours traditionnels, la construction est réalisée à partir des matériaux locaux, des murs porteurs ou des cloisons, tous les deux ont presque la même épaisseur de mur (entre 40 et 50 cm). L'assise de la grande partie du Quartier est réalisée par la roche des montagnes.

Les principaux matériaux utilisés demeurent : la pierre, l'adobe, le roseau, le tronc de palmier, le mortier à base de terre, de sable, et de chaux.

La confection de l'adobe fait généralement appel à une terre à dominante sablo-limoneuse, avec ou sans amendements de paille. Les témoignages d'un ancien maçon-briquetier, confectionneur d'adobes, permettent de restituer les processus de fabrication de ces briques.

L'analyse raisonnée du patrimoine bâti révèle que l'adobe ou la brique de terre crue s'intègre dans un véritable système constructif faisant appel à d'autres matériaux appropriés pour le traitement des points sensibles, afin de pallier les performances limitées du matériau terre, galets, moellons, pierres taillées, bois, béton de chaux et/ou de ciment, etc. sont diversement sollicités pour le traitement des soubassements, chaînes d'angle, encadrements d'ouvertures, murs courants avec assises alternées, corniches, divers décors, etc...

Les briques, fabriquées généralement avec de la paille, sont coulées dans un cadre ouvert, un rectangle dont les dimensions sont en général de 12x12x30 cm bien que l'on rencontre d'autres tailles. Après que le mélange a été versé dans le moule, celui-ci est retiré. Après quelques heures, les briques sont tournées sur leur tranche pour finir le séchage. Lors du séchage, les briques devraient être placées à l'ombre pour éviter l'apparition de fissures.

Le rez-de-chaussée a généralement une hauteur moyenne de 2,80 m et le premier niveau de 2,50 à 2,60m. La maison peut mesurer dans sa partie la plus haute de toiture environ 7 m en moyenne.

Les maisons sont toutes édifiées sur des fondations en pierre, leurs murs en briques d'adobe et leurs toitures en bois par l'utilisation des troncs de palmier et du roseaux.

Les adobes qu'on fabriquait sont de dimensions différentes une confection proportionnelle à la largeur variable en hauteur du mur, qui diminue lorsque le mur avance en élévation.

L'assemblage est minutieux et le mortier est préparé avec beaucoup de soin.

1.1.7.2. Les procédés de construction.

Le système constructif du Quartier se caractérise par une grande simplicité, il consiste en murs porteurs en briques d'adobe (Toub) construits sur des soubassements en pierre pour protéger les murs des ruissellements des eaux de pluie.

1.1.7.2.1. Fondations.

Les fondations ont une profondeur moyenne variant de 0,50 à 0,80 m, leur largeur est fonction de l'épaisseur du mur. Figure 22.

Elles sont réalisées avec quelques assises en pierres sèches et maçonnées avec un mortier de terre, photo de la figure 23. Elles constituent toute la fondation servant de base pour les murs en adobes. Ces pierres sont de roches provenant du mamelon voisin, les plus grandes sont posées au fond, les plus petites en-dessus.

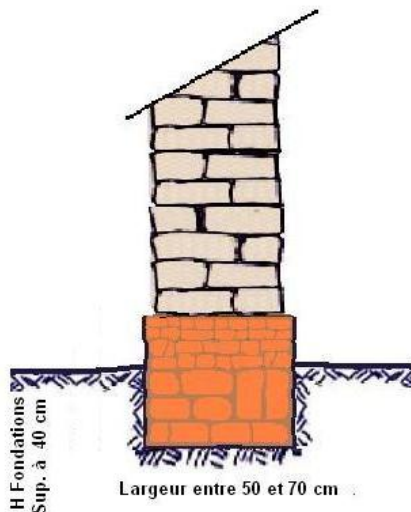


Figure 22 : Coupe sur le mur d'adobe.



Figure 23 : Assises des murs en pierres sèches
Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

1.1.7.2.2. Soubassements.

Ils ont l'épaisseur du mur et sont faits de pierres de taille moyenne, bâtis au mortier de terre. En général, les soubassements sont visibles, exécutés en pierres sèches revêtus d'un enduit de terre stabilisé à la chaux, ou parfois réalisé en mélange de sable et de ciment (interventions récentes), sur une hauteur pouvant atteindre les 1,00 m du niveau du sol.

1.1.7.2.3. Éléments porteurs.

Les murs d'adobes sont porteurs, ils ont entre 40 et 50cm d'épaisseur. Le calepinage diffère selon l'épaisseur des murs, différentes versions ont été observées. Dans certains cas, une structure secondaire ponctuelle peut être regardée : des poteaux de grandes sections (jusqu'un mètre de côté).

1.1.7.2.4. Planchers.

Les planchers sont constitués de poutres des troncs de palmiers, de section ronde de 15 ou 20 cm de diamètre, ou de solives de peuplier de même diamètre, et sont posées sur toute l'épaisseur des murs en adobes, écartées entre elles de 80 cm à 1 m. La figure 24 montre les 2 types de poutres utilisées pour le plancher.

Sur ces poutres reposent des carpettes de roseaux, attachés au fil de fer. Une couche de terre du même mélange que celui utilisé pour les adobes ou parfois mélangée à la chaux est mise sur les roseaux. Dans certains cas, on peut remarquer un tissu posé sous les roseaux dans le but d'orner la face intérieur du plancher.

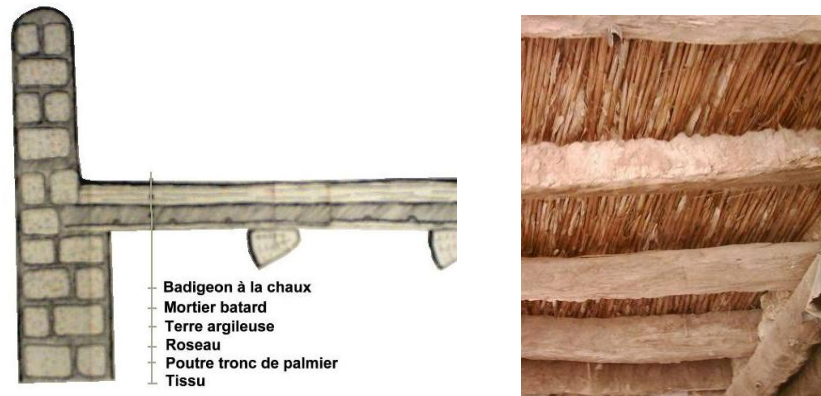


Figure 24 : Coupe et vue sur le plancher.

Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem - Laghouat

1.1.7.2.5. Ouvertures.

Les ouvertures sont très restreintes et de dimensions réduites. Les dimensions des fenêtres varient entre 40x50cm, 50x60cm et excèdent rarement ces chiffres. Les portes sont généralement entre 70 et 80 cm de largeur et entre 170 et 200 cm de hauteur. Figure 25.

Toutes les ouvertures donnent sur une des cours, à l'exception quelques fois des fenêtres qui peuvent donner sur l'extérieur de l'habitation.

Les linteaux sont réalisés avec des planches en bois de section rectangulaire, ils débordent généralement de 30 à 50 cm de part et d'autres de l'ouverture.

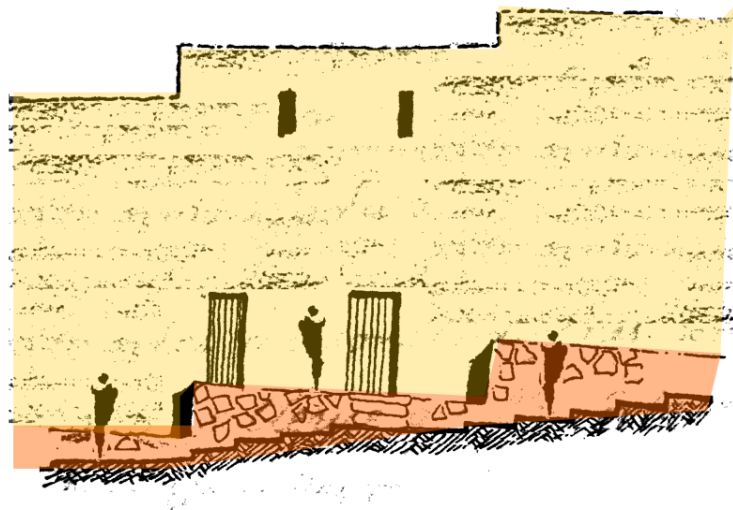


Figure 25 : Profil sur façade urbaine: Typologie des ouvertures

Source : BET Arabesques -TAKHI Belkacem – Laghouat

1.1.7.2.6. Linteaux, portes et fenêtres.

Ils sont de bois de qualité moyenne, photo de la figure 26. Les portes sont montées selon la technique de l'emboîtement.

Les appuis à chaque extrémité sont de 50 cm maximum. Mais il existe une forte tendance à faire des ouvertures très longues avec des appuis courts, ce qui induit finalement une surcharge du mur.

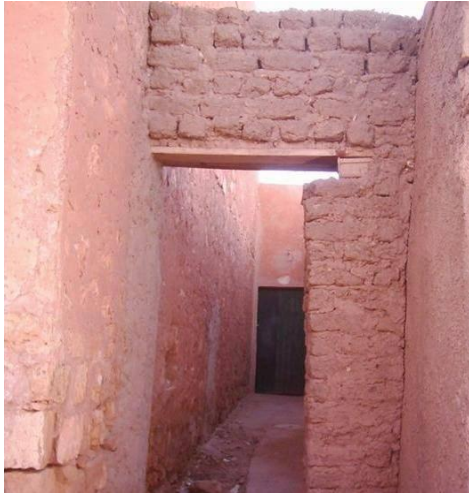


Figure 26 : Vue sur un type de linteau.
Source : Etudiants Département architecture
3^{ème} année (2005-2006)

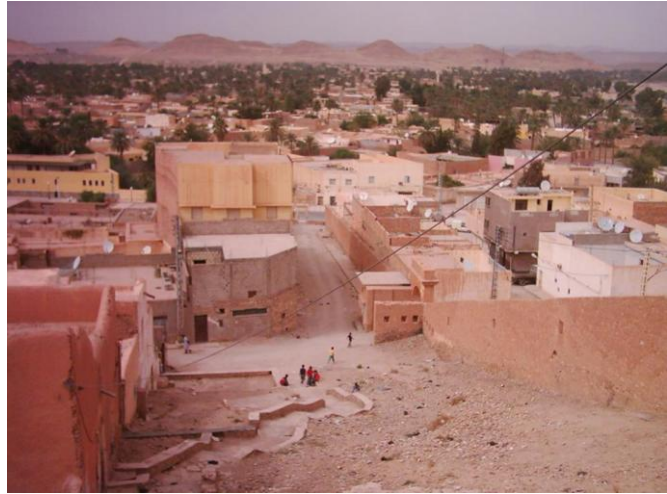


Figure 27 : Vue sur les terrasses.
Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

1.1.7.2.7. Toiture

La toiture est plate, photo de la figure 27, bâtie sur un mortier de terre et paille, le tout posé sur une nappe de roseaux attachés et cloués sur la structure en bois, la charpente est de conception simple.

1.1.8. L'état de dégradation, diagnostic et état des lieux.

A travers les visites effectuées, la première constatation frappante concerne l'état de fragilité et de vulnérabilité des ces maisons, en majeure partie abandonnées, et parmi les facteurs de cette dégradation demeure l'érosion des enduits extérieurs de protection, sujet de notre étude.

La photo de la figure 28 montre le degré de dommage de ces revêtements.

Le contact de proximité effectué sur site avec la population nous a permis de saisir les causes principales de dégradation de ces habitations en terre. Mises à part, les causes intrinsèques au climat, des causes dues au comportement de l'homme sont encore plus graves.



Figure 28 : Exemple typique de décrépitude d'un mur en adobe à Z'gueg el Hadjadj
Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

La première impression qui se dégage de son observation est celle d'un état de dégradation avancé.

On est par ailleurs frappé par le contraste entre certaines maisons à l'état de ruine – quasiment irrécupérables –, d'autres à l'état d'abandon, et quelques maisons encore préservées.

La majorité des maisons est globalement soumise à un processus de dégradation qui prend les formes suivantes :

- la détérioration des revêtements de protection : les enduits notamment ;
- l'introduction de formes architecturales en contraste avec l'existant, et parfois l'adoption de nouveaux motifs de décoration.
- l'utilisation du béton armé et des blocs de bétons (parpaing)
- la prolifération de quelques commerces et la transformation des habitations qui en résulte.

La majorité des constructions sont dégradées, certaines menaçant ruine et d'autres à l'état de délabrement, ajouté à cela l'abandon confirmé du Quartier par une partie de ses habitants.

Des questions ont été posées à quelques locataires de ces habitations dans le but d'avoir une idée sur les natures de propriété, l'état d'occupation et de dégradation de ces unités, et de connaître par conséquent quels sont les positions des propriétaires et leurs attentes pour d'éventuels projets d'Etat de restauration.

Les contraintes et les obstacles relevés sont:

1. L'actualisation de ces unités par l'introduction des commodités de la vie contemporaine accompagnée éventuellement par l'intégration d'équipements de proximité, Les habitants interrogés sont prêts à revenir et à s'y installer dans leurs logements si les infrastructures nécessaires étaient réalisées et des aides accordées.
2. L'indivision de la propriété à l'intérieur du Quartier, du fait des successions et des héritages, bloque les transactions des habitations, accentué par le départ des habitants, d'où son impact sur le processus de réhabilitation.

Des mutations de plus en plus inquiétantes entraînent l'apparition de nouvelles conceptions architecturales et urbaines non adaptées à la réalité locale sur les plans de l'architecture et du paysage, et le Quartier est confronté à d'innombrables problèmes. Les techniques constructives traditionnelles disparaissent et les constructions en terre sont de moins en moins renouvelées et entretenues.

L'utilisation du béton armé progresse, des unités d'habitation adaptées à la vie moderne remplacent les maisons en ruine. Incapables de remplir les fonctions urbaines naissantes, ces dernières sont de plus en plus abandonnées et livrés à un processus de dégradation inéluctable, Sadki (2009) [5].

- Des espaces physiques habitables sont rasés et transformés en utilisant des nouveaux matériaux et des nouvelles techniques constructives.
- Ce processus a de fortes conséquences sur la préservation et la conservation d'un patrimoine historique.

1.1.9. Causes des désordres.

Les observations visuelles des désordres et de leur localisation nous renseignent parfaitement sur les causes des dégradations des façades des murs.

Bien que plusieurs facteurs soient réunis pour accélérer le processus de dégradation, les facteurs atmosphériques notamment, ainsi le manque d'entretien et l'abandon de cette tradition sont aussi à l'origine de l'aggravation des désordres.

1.1.9.1. Désordres inhérents au climat et à l'environnement.

La plupart de ces désordres sont imputables à l'action de l'eau, des averses sous forme de pluies battantes quoiqu'occasionnelles génèrent des forts préjudices sur la face extérieure des parois, ajouter à cela les vents et les vents de sable où des murs sont directement exposés à ces facteurs climatiques (gel-dégel, écarts de température, vents de sable ...).

De tous les facteurs de dégradation demeure l'érosion des enduits extérieurs de protection, sujet de notre étude.

1.1.9.2. Désordres d'ordre humain.

D'autres désordres anthropiques plus graves, dus parfois au non respect des dispositions constructives et des règles de construction (absence d'harpage au niveau des angles) causant la dislocation des murs au niveau des angles et parfois au manque d'entretien à cause de l'abandon du Quartier par ses habitants, photo de la figure 29.

La désertion du Quartier, la perte du savoir-faire en matière d'entretien et la dilution du système de solidarité et d'entraide pour les travaux de restauration ont fortement contribué à ce désordre. Les habitants du Quartier sont à majorité locataires, les propriétaires (la plus part sont des héritiers) ont bondonné le Quartier pour aller s'installer ailleurs.



Figure 29 : Une maison abandonnée....

Source : Etudiants Département architecture 3^{ème} année (2005-2006)

1.1.9.2.1. Le relâchement des liens sociaux.

Les liens sociaux se relâchent peu à peu et les familles se dispersent. Il n'était pas rare, il y a quelques dizaines d'années qu'un Quartier tel que Z'gueg el Hadjadj abrite une dizaine de personnes d'une même famille.

1.1.9.2.2. L'influence du mode de vie contemporain.

Autre cause de la disparition des constructions en terre : l'influence du mode de vie contemporain et sa conséquence de pollutions diverses.

Depuis quelques temps, et avec l'apparition du béton, lorsqu'une habitation en terre en trop mauvais état est abandonnée, les propriétaires la reconstruisent en béton ce qui constitue une absurdité lorsque l'on considère les qualités isolantes de la terre dans cette région très chaude en été et froide en hiver.

Certains propriétaires ont largement contribué à la défiguration du paysage. Ils n'hésitent pas à construire dans ce tissu de démesurées bâtisses en béton qui restent souvent sans enduits.

Ce Quartier est à présent affligé de ces nouvelles constructions hideuses et paradoxales dans leur intégration, ajouter à cela les paraboles qui fleurissent sur les terrasses en terre ; des mats électriques et des câbles posés n'importe comment. Photos des figures 30 et 31.



Figure 30 : Antennes et mats électriques fleurissant sur les terrasses.

Source : Etudiants Département architecture
3^{ème} année (2005-2006)



Figure 31 : nouvelles constructions paradoxales.

Source : Etudiants Département architecture
3^{ème} année (2005-2006)

1.1.9.3. La déficience des autorités locales.

Z'gueg el Hadjadj, considéré comme étant le premier noyau sur lequel la ville s'est fondée, a atteint une étape avancée de dégradation générée par la marginalisation et l'oubli ainsi que par la carence des autorités locales.

Peu à peu, c'est un patrimoine ancestral qui disparaît, formellement, les causes de cette dégradation sont multiples.

Il est bien certain que les autorités locales doivent faire face, il n'y a presque pas de réglementation interdisant de telles interventions dans des tissus anciens, chacun construisant ce qu'il veut où il veut.

Il y a aussi un problème important, celui de l'héritage. Les familles étant très nombreuses, au bout de deux générations, les héritiers se multiplient, souvent sans moyens financiers, et la restauration devient alors quasiment impossible.

1.1.10. Objet de la réhabilitation.

Le projet doit s'articuler autour d'un double principe de conservation et de valorisation du patrimoine. Les objectifs, sont autant, la préservation et la valorisation d'un ksar, mode d'habiter chargé de valeurs sociales historiques et architecturales, que la perpétuation d'une tradition constructive et d'un savoir-faire qui se meurent.

La réhabilitation de z'gueg el Hadjadj nécessite de dresser un état des lieux qui permettra d'identifier toutes les pathologies et toutes les causes probables d'effondrement partiel ou total des logements du Quartier (constructions en terre) et de proposer des solutions adéquates pour la restauration et la reconstruction.

1.1.10.1. Conservation.

La construction en terre pourrait bien alors être l'une des solutions de "l'après développement". La conservation : étape obligée vers une modernité? La conservation des patrimoines architecturaux en terre est aussi associée au développement d'un tourisme international aux retombées économiques très importantes. Mais il faut veiller à ce que ces retombées soient assurément profitables aux populations et aux patrimoines eux-mêmes en installant des conditions de valorisation à même de garantir un développement durable. L'enjeu est réel si l'on considère une tendance à la gestion de profits immédiats et maximums, Guillaud (2002) [6].

1.1.10.2. Préservation.

La préservation des architectures de terre à caractère historique est une démarche engagée en de très nombreux pays qui vise une remise en état et en valeur d'un patrimoine bâti dont l'importance

culturelle est majeure. Au-delà d'une intervention sur quelques bâtiments isolés, il s'agit aujourd'hui de la préservation de sites parfois très vastes, Houben et Guillaud (2006) [7].

Il existe aujourd'hui des organismes internationaux qui multiplient les colloques et séminaires sur ce thème de la préservation des sites et édifices historiques. Par exemple, l'ICCROM « *International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property* » fondé par l'Unesco en 1959 et qui agit en temps qu'organisation scientifique intergouvernementale autonome.

1.1.10.3. Procédés de restauration, entre traditionalisme et modernisme.

Devant la nécessité de créer une aile science de la construction en terre, comme il existe une science du béton, il a été décidé par trois organismes, le Centre international de la construction en Terre de l'École d'Architecture de Grenoble (CRATerre-EAG), le Getty Conservation Institute (GCI) et le Centre International d'Études sur la Conservation et la Restauration des Biens Culturels (ICCROM), de fédérer leurs travaux autour d'un projet cadre, le projet TERRA, Gelard (2005) [8].

Son but est de promouvoir le matériau terre, par la recherche, par la formation, par l'enseignement et enfin par la gestion de l'information et des publications.

L'organigramme, figure 32, réunit les aspects du projet TERRA.

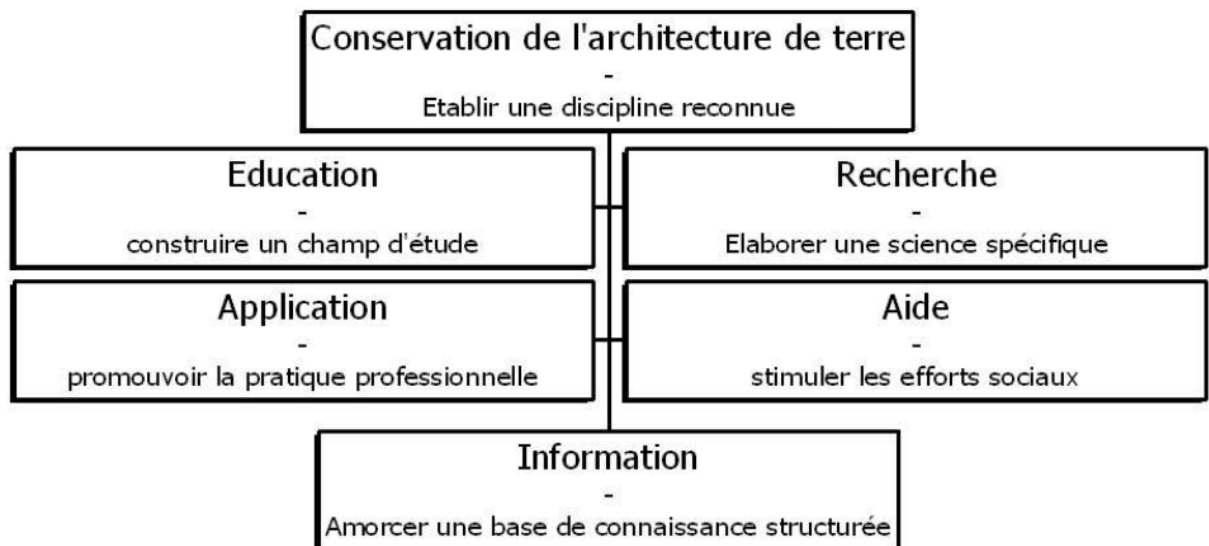


Figure 32 : Organigramme du projet TERRA

Source : David GELARD- Thèse - Institut National Polytechnique de Grenoble

Ces problématiques concernent les restaurateurs. De nombreux monuments ont déjà été restaurés et ce par des moyens modernes ou anciens.

On entend par procédé moderne, "les interventions chimiques". A l'inverse les procédés anciens qui font appel à des techniques traditionnelles privilégiant l'utilisation de matériaux naturels disponibles sur le site à restaurer.

Il reste parfois, que les techniques classiques de conservation, sont souvent plus "douces" et redonnent, aux populations locales l'envie de préserver leur patrimoine et, par conséquence leur culture, en faisant appel à leur savoir-faire. Ainsi, et le soutien de projets divers, des monuments ont peut être restaurés, illustrant alors la culture d'un pays, Gelard (2005) [8].

1.1.11. Orientation de la contribution.

Notre intervention sur le tissu à travers les opérations de restauration ou de récupération du patrimoine architectural s'insérera dans les directives émises dès le départ, dans le but de préserver le caractère historique du lieu.

Sur le plan urbain, tous les éléments composants le territoire, et le Quartier particulièrement sont indissociables en soi, d'un environnement de rapports socio-économiques, historico-spatiaux, fonctionnels et symboliques.

En outre, tous les éléments du tissu historique restent inscrits dans un système de relations identiques, dont la fiabilité provient de la lecture et l'interprétation du processus formatif de ce tissu.

Sur le plan restauration, le revêtement d'enduit proposé comme traitement à ces constructions en terre doivent être durables, homogènes et de parfaite adhérence avec ces murs d'adobes afin d'éviter de produire des décollements pouvant avoir des conséquences fatales sur le paysage urbain.

Le revêtement du mur doit être surveillé et doit s'accorder avec le support. Il n'est pas question de réparer les dégâts avec n'importe quel enduit.

Conte tenu des désordres et des pathologies observés au niveau du site de Z'gueg el Hadjadj en particulier dues essentiellement à la vulnérabilité de la brique d'adobe à l'eau, nous établissons des recommandations pour l'enduit extérieur en terre dans le but de corriger et d'améliorer son imperméabilité à l'eau. Bien qu'il existe aujourd'hui des normes en matière de stabilisation, nous avons toutefois effectué des essais hydriques et des essais à l'abrasion sur des échantillons dont l'enduit en terre, est stabilisé de différentes variétés de proportion de ciment et de chaux, des échantillons qui ont déjà servi à des tests de durabilité voilà déjà dix années (AOUISSI), et qui vont être repris encore une fois pour des essais de remontées capitulaires, de séchage-mouillage, de la brosse métalliques ainsi que des essais d'arrachement.

1. 2. Outils juridiques de classement des sites historiques.

1.2.1. Proposition de classement en secteur sauvegardés.

La Direction de la Culture de la Wilaya de Laghouat a entrepris d'introduire auprès du ministère de la Culture une demande de classification de quatre sites, situés sur le territoire de la wilaya, comme patrimoine national. Les dossiers de classification portent sur le vieux ksar de Laghouat (s'étendant de la ruelle Hadjadj au Quartier El Gharbia), dont l'étude a été achevée et qui attend la parution de la décision de sa classification de la part du ministère de tutelle, pour que soit lancée l'opération de préservation, cadi (2009) [9].

1.2.2. Procédures classement des monuments et sites historiques.

Les dispositions de l'article 7 de la loi n° 98-04 du 15 juin 1998, portant ouverture des procédures en vue du classement des monuments et sites historiques a pour objet de fixer les formes, les conditions et les modalités d'établissement et de gestion de l'inventaire général des biens culturels protégés, joradp (2009) [10].

Il est créé, auprès du ministre chargé de la culture, un registre d'inventaire général des biens culturels protégés dont la forme et le contenu seront précisés par arrêté du ministre chargé de la culture.

La mise à jour de la liste générale des biens culturels est faite en tenant notamment compte :

- des biens culturels immobiliers ayant subi une destruction irréversible ;
- des biens culturels immobiliers et mobiliers inscrits sur la liste de l'inventaire supplémentaire et qui n'ont pas fait l'objet d'un classement définitif comme précisé à l'alinéa 2 de l'article 10 de la loi n° 98-04 du 15 juin 1998, joradp (2009) [10].

La loi 98 - 04 du 15 juin 1998 relative a la protection du patrimoine culturel et qui a pour objet de définir le patrimoine culturel de la nation, d'édicter les règles générales de sa protection, sa sauvegarde et sa mise en valeur, et de fixer les conditions de leur mise en œuvre.

Les articles 7 et 8 mentionnent l'établissement par le ministère chargé de la culture un inventaire général des biens culturels classés, inscrits sur l'inventaire supplémentaire ou créés en secteurs sauvegardés.

Les biens culturels immobiliers comprennent notamment les ensembles urbains. Quelque soit leur statut juridique, ils peuvent être soumis à l'un des régimes de protection ci-dessous énoncés en fonction de leur nature et de la catégorie à laquelle ils appartiennent :

- L'inscription sur l'inventaire supplémentaire,
- Le classement ,
- La création en "secteurs sauvegardés", joradp (2009) [10].

Les catégories de patrimoine sont clairement définies et à chacune d'elles est prescrit le moyen approprié de protection, de sauvegarde et de mise en valeur, Ouageni (2007) [11].

1.2.3. Cadre juridique.

La loi 98 - 04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine historique, et dans ses articles 41,42 et 43, qui érige en secteurs sauvegardés, les ensembles immobiliers urbains ou ruraux tels que les casbahs, médinas, ksours, villages et agglomérations traditionnels caractérisés par leur prédominance de zone d'habitat, et qui, par leur homogénéité et leur unité architecturale et esthétique, présentent un intérêt historique, architectural, artistique ou traditionnel de nature à en justifier la protection, la restauration, la réhabilitation et la mise en valeur, ou de nature à justifier la conservation, la restauration et la mise en valeur de tout ou partie d'un ensemble d'immeubles, joradp (2009) [10].

1. 3. Méthodologie d'approche

1.3.1. Introduction.

Avant de donner un aperçu, qui est de l'échelle du matériau, sur un des modèles de structure d'approche systémique sur la recherche autour d'une méthode pour la restauration des enduits traditionnels en terre, sujet de notre recherche, proposée par N. Arioglu & S. Acun de la Faculté d'architecture de l'université d'Istanbul (2005), il nous a paru utile de dresser un aperçu qui soit de l'échelle de l'architecture du patrimoine à restaurer par la recherche bibliographique sur une méthodologie de conservation et de restauration d'une construction en terre.

La lecture de différentes méthodologies proposées pour la conservation des constructions en terre montre que celles-ci se limitent en général à un point de départ ou le problème technique de la conservation des matériaux est abordé. Ceci mène en général à des solutions techniques qui perdent de vue le cadre architectural et social, tant pour l'évaluation du problème posé par la conservation que pour les possibles solutions, Van balen (1990) [12].

L'étude des techniques d'entretien et leurs applicabilités dans la conservation semble par contre négligée. Pour un grand nombre de conservateurs ces techniques sont beaucoup trop vigoureuses, bien qu'appliquées pendant des dizaines d'années. Hélas il faut dire que l'efficacité de ces techniques diminue fortement quand les intervalles des travaux deviennent si importants qu'on ne se souvient plus du dernier entretien. L'intervention doit clairement se distinguer des éléments originaux. Dans le cas des objets architecturaux ce type d'intervention ne peut satisfaire que quand on tient compte de la dimension architecturale. Pour cette raison une proposition d'une lecture et d'une analyse plus approfondies de la dimension architecturale avant de définir le type d'intervention sont utiles, et l'ajout de la dimension architecturale à la préservation de l'intégrité de l'architecture en terre comme un tout, qui comprend les concepts et techniques traditionnelles qui étaient utilisés à l'origine et continuent à être utilisés aujourd'hui, est complémentaire, Van balen (1990) [12].

Les enduits, qui servent évidemment à protéger la façade de la construction, sont considérablement affectés par les facteurs environnementaux et par conséquent ils sont ceux qui rendent souvent la conservation et la réparation nécessaires, Arioglu et Acun (2005) [13], Sans compter leur nécessité fonctionnelle pendant la construction du bâtiment, les enduits portent une valeur esthétique selon leurs formes architecturales et les techniques de construction. Quoiqu'ils servent différents buts dans une construction, leurs détériorations morphologiques et les tentatives de conservation devraient être analysées ensemble puisqu'ils sont fondamentalement faits de matériaux similaires. L'enduit couvre la façade de la construction et préserve le matériau qui constitue la structure du mur des conditions climatiques de l'extérieur, Arioglu et Acun (2005) [13].

1.3.2. Une méthodologie pour la construction à restaurer.

Pour Meda-Corpus, les étapes à suivre pour tout processus de constat sont :

- Le pré-diagnostic, qui consiste à faire une première évaluation de l'état du bâtiment et de définir, lors de la première visite, les aspects du travail pour des études pluridisciplinaires.
- Les études pluridisciplinaires, qui récoltent toutes les informations des tests et analyses des désordres dans le bâtiment. Elles serviront de guide pour une future intervention.
- Le diagnostic, qui consiste à analyser les informations des études pluridisciplinaires et déterminer les besoins d'intervention en réhabilitation ou entretien. Ce programme définit les travaux de réparation et de consolidation des structures existantes et d'amélioration de tous les éléments dégradés, Corpus (2004) [14].

Pour K. Van Balen, une bonne intervention doit maintenir en bon état l'ouvrage architectural tout en en conservant sa valeur existante. Elle s'effectue suivant un programme établi après plusieurs opérations de diagnostic général des désordres.

Tout projet de réhabilitation ou d'entretien exige des travaux préalables qui permettent d'avoir une bonne connaissance de la bâtisse et de ses éléments constructifs.

Une approche similaire a été élaborée en s'inspirant de celle relative à l'intégration de problèmes techniques dans un contexte plus vaste de conservation étudiée pour des problèmes de consolidation structurelle et des problèmes analogues d'évaluation de risques dans la protection du patrimoine contre les risques naturels, Van balen (1990) [12].

Le point de départ de cette méthodologie est que chaque problème technique se trouve dans un vaste contexte qu'il faut analyser profondément.

Pour cela une approche pas à pas est proposée qui distingue les phases : analyse, diagnostic, et thérapie et contrôle.

1.3.2.1. L'analyse.

Une construction historique doit être analysée dans ses différentes dimensions. Il s'agit d'un objet architectural qui reflète une histoire et donc l'analyse historique doit être étudiée. Il s'agit d'un conglomérat de matériaux et par conséquent le comportement de ces matériaux doit être connu. L'architecture nous dévoile aussi une typologie de construction qui ressort de l'histoire de l'architecture et est la réponse envers les différentes restrictions comme le climat, la présence de matières premières, une technologie acquise dans la période de construction et des différentes interventions ultérieures, Van balen (1990) [12].

La phase de l'analyse envisage donc d'effiler ces différentes dimensions afin de pouvoir les estimer et les confronter dans le diagnostic ou les grandes lignes de l'intervention doivent être définies.

L'analyse doit donc mentionner tous les états des composants du bâtiment, et identifier l'origine de l'affectation de la maison traditionnelle ce qui va permettre par la suite de préciser les urgences relatives d'intervention, Van balen (1990) [12].

Elle tiendra essentiellement compte des pas suivants :

a) l'étude de l'environnement dans lequel se trouve l'objet de l'étude, la situation géographique, le climat, le microclimat (urbanistique), la situation dans un réseau urbain, la disponibilité de matières premières, la technologie acquise par la société.

b) l'étude historique du bâtiment basé sur des sources écrites, iconographiques mais aussi des témoins dans la construction même. Cette étude nécessite donc un relevé précis et détaillé de la bâtisse.

c) l'étude des matériaux : leur composition originale, l'origine des matières premières employées, leur état de conservation, l'emplacement mutuel, les dégradations qui témoignent de leur incompatibilité (fissures, dégradation plus accentuée dans la zone de contact,...), les caractéristiques physiques et structurels (porométrie, isothermies, . . .) des matériaux. Dans le cas des constructions en terre la connaissance de la structure interne du matériau ainsi que les caractéristiques des terres employées pour la fabrication est de grande importance.

d) le comportement mécanique des constructions portantes en terre doit être étudié en tenant compte du système global de la structure et pas seulement des matériaux isolés. Par exemple le comportement d'une paroi en terre renforcée de pannes de bois lors d'un tremblement de terre, ne peut s'expliquer que par la compréhension de l'interaction des différents matériaux.

Les éléments cités ci-dessus semblent assez évidents et font l'objet de la plupart des études préalables, mais cette approche ne peut satisfaire que si les éléments suivants sont aussi inclus :

e) l'architecture reflète aussi une typologie de construction qui à son tour reflète la connaissance du savoir-faire d'une société à une certaine période. Certaines de ces typologies sont

la cumulation de la connaissance acquise pendant des siècles, des réponses aux restrictions posées par l'environnement et les dégradations qui en suivent. La protection des parois en terre par des enduits, qui sont souvent renouvelés pendant les travaux d'entretien, en est un exemple.

f) typologie et matériau sont liés entre eux dans la conception initiale du bâtiment et donc dans une approche de conservation. Le conservateur approchera donc avec beaucoup de retenue le bâtiment en respectant la typologie.

1.3.2.2. Le diagnostic.

Selon Koenraad Van Balen, le diagnostic est en effet la confrontation et la synthèse des résultats de l'analyse. Il faudra résoudre différents problèmes comme :

a) faut-il consolider une ruine de murailles en adobe sans restaurer ces éléments typologiques qui ont été conçus, mais qui n'existent plus, pour la protection des parties supérieures des murs (voir par exemple les surplombs des toitures ou les enduits)?

b) doit-on réemployer comme élément structurel un mur en adobe qui apparemment est lézardé par la perte de cohésion du matériau même et par des fissurations dues à des tassements différentiels? La valeur historique de ce mur sera appréciée différemment s'il porte des traces uniques pour l'histoire ou s'il peut être refait à neuf sans changer vraiment la valeur historique du bâtiment.

c) dépendant de la valeur unique de l'élément sur lequel il faut intervenir, une technique de consolidation et de conservation peut être exécutée pour autant que cette technique offre assez de garantie.

d) beaucoup de constructions en terre ont pu survivre tout au long des décennies, des centaines par l'entretien qu'elles ont subi régulièrement. Cet entretien de nos jours est souvent négligé et beaucoup de ces bâtiments fragiles en terre sont dans des situations déplorables.

e) la perte de la main d'œuvre spécialisée et du savoir-faire traditionnel est une hypothèque sur la poursuite des travaux d'entretien tellement nécessaire.

En résolvant les dilemmes il faudra définir les objectifs précis de l'intervention. Ceci aussi bien au niveau architectural qu'au niveau technique, Van balen (1990) [12].

1.3.2.3. Les études pluridisciplinaires.

Pour Meda Corpus, une fois la phase "diagnostic" est achevée vient la l'étape charnière des études pluridisciplinaires, cette étape, qui comme il a été mentionné précédemment, récolte toutes les informations des essais et analyses des désordres dans la construction et servira de feuille de route pour une future intervention.

Une bonne connaissance du bâti permet de réussir son entretien ou sa réhabilitation. Comprendre permet de livrer des hypothèses sur la nature des désordres et d'enrichir la recherche historique afin de choisir le concept convenable d'entretien ou de réhabilitation et d'offrir non seulement la solution économique et technique mais aussi conservatrice du patrimoine bâti, Van balen (1990) [12].

La nature très sensible du matériau terre demande cette compréhension, car une intervention fautive peut être plus catastrophique que l'absence d'intervention, Odul (1990) [15].

Les études pluridisciplinaires consistent à fournir tous les résultats des études et des différentes analyses qui nous permettent de récolter toutes les informations nécessaires qui constituent le diagnostic. Elles comprennent l'étude historique et documentaire, l'étude socio-économique, le relevé architectural, l'inspection détaillée de la bâtisse, l'analyse constructive et structurelle, les essais in situ et en laboratoire.

1.3.2.3.1. L'étude historique et documentaire.

Le processus du diagnostic commence par l'établissement de l'étude historique de la bâtisse concernée. Il s'agit de collecter :

- les récits qui décrivent l'architecture de la maison, sa composition spatiale, son usage, le nombre d'étages, ses matériaux constitutifs, la description de son environnement, etc....
- Les documents graphiques anciens s'ils existent

Cette recherche pourra aboutir à l'identification de l'originalité de la maison, sa transformation et son évolution, facteurs qui composent aujourd'hui son espace architectural. En effet, la maison dans son profil actuel est le résultat d'un changement continu des occupants, de leur espace résidentiel qui présente aujourd'hui les traces des différentes interventions où l'état d'origine est parfois présent.

1.3.2.3.2. L'étude socio-économique.

Souvent les habitants des maisons traditionnelles ont quitté leur demeure pour s'installer dans des immeubles où se trouve le "luxe et le confort de la vie contemporaine". Ses anciennes maisons sont alors habitées par des personnes n'ayant pas les moyens économiques, ou le niveau technique suffisant pour l'entretenir. Il est fréquent de trouver des maisons traditionnelles toujours habitées par la même famille, celle-ci ayant fait des travaux d'amélioration au fur et à mesure que ses revenus le lui ont permis. Ainsi, la maison traditionnelle subit des désordres dus au manque d'entretien et aux rajouts de constructions ou installations contemporaines inadaptées avec l'ensemble original.

1.3.2.3.3. Le relevé graphique.

Le relevé n'est pas uniquement une opération de mesurage correct d'une bâtisse accompagnée de sa représentation graphique, mais aussi une opération qui doit représenter toute la problématique du bâti pour mieux la comprendre et l'analyser. On distingue plusieurs types de relevé:

- le relevé architectural,
- le relevé des désordres,
- le relevé des matériaux utilisés et les techniques de leur mise en œuvre,
- le relevé des différentes installations,
- le relevé des abords de la maison.

1.3.2.3.4. L'inspection des désordres dans la bâtisse.

La plupart des désordres sont inspectés par observation visuelle. Une démarche systématique contribue à faciliter l'inspection en allant de l'observation générale à celle la plus détaillée, en utilisant des appareils de mesure très précis. Cette démarche commence par l'inspection:

- des façades,
- des propriétés des matériaux constitutifs, de leur et de leur mise en œuvre.
- de l'état de la couverture et de son système constructif (voûte, plancher en bois, charpente en bois, etc...), ainsi que l'inspection de l'état des canalisations d'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées. Cette inspection comprendra la vérification de leurs capacités de leur inclinaison et de leur raccordement au réseau public.
- des nouvelles installations et leur influence sur le support ancien.
- des conditions de confort à l'intérieur de la maison, hygrométrie (humidité relative de l'air, teneur en eau, niveau de la nappe phréatique, etc...) et acoustique.

1.3.2.3.5. L'analyse constructive et structurelle.

Dans l'objectif d'identifier les désordres structurels dans le bâtiment ancien, une série d'inspections doivent être réalisées. La plupart des anomalies sont inspectées par simple observation visuelle ce qui permet lors de la première visite du bâtiment de voir les déformations portées sur les murs de façades, sur les murs intérieurs, ainsi que sur la terrasse.

Quand on a un doute sur un problème structurel actif, il faut appliquer des instruments de mesure afin de vérifier les déformations à chaque saison et détecter les mouvements pour pouvoir en déduire l'origine et suivre leur évolution après réparation des désordres.

L'analyse systématique ou le diagnostic des altérations nécessite une démarche au cours de laquelle on évalue la stabilité générale du bâtiment et l'état de conservation de ses matériaux constitutifs.

- Essais in situ

La méthode d'inspection visuelle, pourra être complétée par un monitoring continu à l'aide de plusieurs instruments de mesures non destructifs in situ. Les différentes contraintes qui agissent sur la structure ancienne seront évaluées par calcul des descentes des charges et par la détermination des efforts dynamiques qui expliquent la localisation, le sens et la grandeur des déformations.

- Essais en laboratoire

En laboratoire les propriétés physiques et mécaniques des matériaux de construction pourront être analysées sur des échantillons prélevés par micro-carottages. Cette méthode permet de définir la résistance à la compression et à la flexion, la porosité du matériau, la profondeur des altérations et la mesure de la perméabilité (hygrométrie, teneur en eau, condensation). D'autres examens pourront être faits au laboratoire pour identifier les salissures et la nature des altérations.

1.3.2.4. La thérapie et le contrôle.

Dans cette phase seront définis les travaux qui doivent être exécutés. Ils seront décrits et exécutés tenant compte des objectifs définis par le diagnostic. Cette phase est directement liée au contrôle qui est la "rétroaction" vers les phases précédentes, Van balen (1990) [12].

Le contrôle permet en cours d'exécution d'évaluer la thérapie. Les critères d'évaluation sont définis par le diagnostic mais il faut aussi tenir compte de l'incertitude inhérente liée à l'analyse.

On constate par exemple lors de l'intervention que les préalables de l'analyse ne sont pas confirmés, ou pire encore, contredits. Il faut alors retourner à la phase de l'analyse afin de revoir quelles sont les implications des nouvelles données sur les décisions prises. Ainsi la méthodologie se présente comme un parcours avec recouplages, chaque nouvelle donnée sera relatée aux valeurs ressortant de l'analyse.

Il s'agit de définir, pour chaque type de problème qui se pose dans le bâtiment, les paramètres qui reflètent au mieux l'efficacité de l'intervention. De plus si ce paramètre peut être mesuré avec des techniques non destructives, un système optimal de surveillance peut être établi.

Le schéma des différentes étapes pour résoudre de cette manière un problème de stabilité peut être résumé par le graphique de la figure 33 .

Pour des problèmes avec les matériaux, des schémas analogues peuvent être élaborés, Van balen (1990) [12].

La tendance actuelle fait davantage appel à l'ingénierie en vue d'accroître la résistance et de préserver le "matériau terre" des agents de dégradation, ignorant la démarche qui consiste à rendre le "bâtiment" résistant et apte à confronter les agents de dégradation.

La démarche de blindage du matériau que décrit par exemple une imperméabilisation totale de l'enveloppe bâtie tend le plus souvent à sophistiquer la mise en œuvre et à augmenter le risque de malfaçons. En plus, l'expérience a montré que le blindage peut être contreproductif et engendrer des nouvelles pathologies parfois plus graves, Odul (1990) [15].

La qualité d'une architecture de terre, sa durée tout autant que sa destruction rapide dépendent pour l'essentiel de la qualité du "savoir concevoir" mais également du respect des règles essentielles de l'art de bâtir en terre.

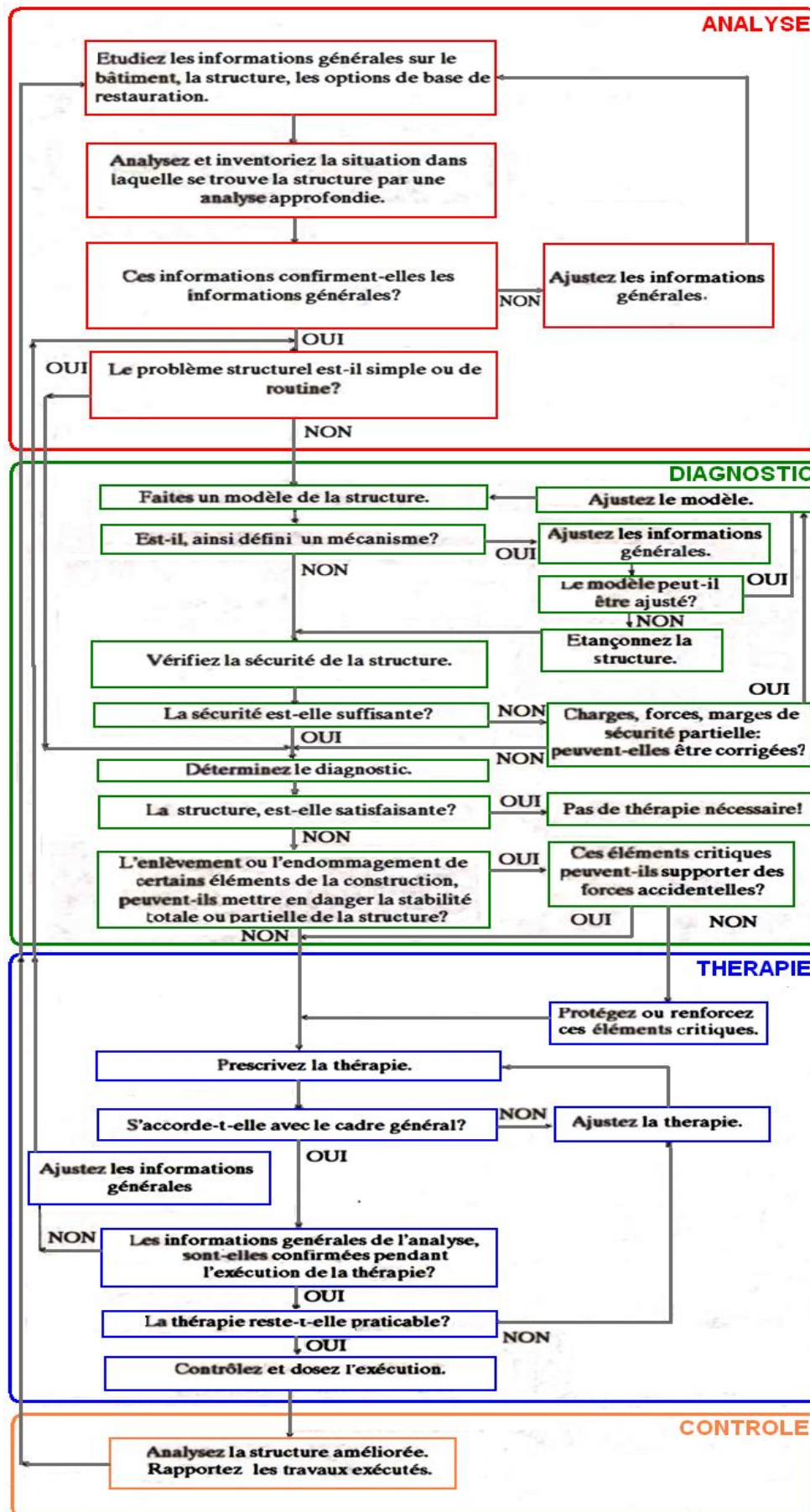


Figure 33 : Schéma des différentes étapes pour résoudre un problème de stabilité
 Source : Koenraad Van Balen- méthodologie de la restauration des monuments en terre

1.3.3. Une méthodologie pour le matériau à restaurer.

Passant à présent à l'échelle du matériau. Un modèle de structure d'approche systémique sur la recherche autour d'une méthode pour la restauration des enduits traditionnels pour les constructions historique, sujet de notre recherche, a été proposé par N. Arioglu et al. de la Faculté d'architecture de l'université d'Istanbul (2005), dans le cadre de la restauration des bâtiments historiques, Arioglu et Acun (2005) [13].

Les enduits sont largement affectés par les facteurs climatiques et par conséquent ils sont ceux qui rendent souvent la conservation et la réparation nécessaires. Leurs détériorations morphologiques et les tentatives de conservation devraient être alors analysées

La première étape dans l'évaluation du mortier ou de l'enduit utilisés dans les bâtiments historiques est la détermination précise du matériau original employé et des raisons qui ont mené à sa détérioration.

Le tableau 1 récapitule brièvement les causes de détérioration et de leurs types du mortier ou de l'enduit.

Durant tout cet extrait d'approche, on se limitera exclusivement à la citation de l'«enduit» sujet de notre contribution.

Tableau 1 : Quelques facteurs qui altèrent l'enduit et le mortier originaux et les types de préjudices

Facteur	Effet	Type de préjudices
Les effets destructifs de l'environnement		
Les eaux acides (avec du CO ₂ , SO ₂) ramenées par l'eau de pluie ou par la neige	Décomposition des carbonates de la chaux liante	Diminution des dispositifs d'adhérence et de cohésion de l'enduit.
la continuité des cycles de gel/dégel	Dissolution des liens du mortier entre les agrégats agglutinants	Décomposition des agrégats
Exposition à une quantité extrême de vapeur d'eau (en cas de feu)	Excès du contenu critique de la vapeur d'eau que peut contenir l'enduit	Conduit à la dissolution de l'enduit
Si le sable utilisé en enduit renferme de l'argile dans le contenu	Désordres internes dus aux gonflements de l'argile dans un environnement d'humidité	Conduit à l'accrochage des enduits dans les rebords par la décomposition
Eau de mer, pollution atmosphérique, utilisation de matériau malpropre	Cristaux anioniques de sel c.à.d. formation des chlorures, des sulfates et des nitrates	Observation d'effritement de l'enduit ainsi que gonflement local et enveloppement.
Formation de plantes	Particulièrement quelques racines de plantes mènent à la dissolution de l'enduit	Observation de la décomposition de l'enduit, ainsi que des fissures profondes et enveloppement du mortier.
Existence de croissance organique	Réduction de la qualité de liaison de l'enduit, avec la formation des insectes.	Affaiblissement biologique, coloration de l'enduit et dissolution
Les effets destructifs des enduits et des mortiers de réparation		
En utilisant plus de ciment que de chaux	Formation d'enduit fortement rigide, fissures	Affaiblissement et dissolution microbiologique de l'enduit
Sels qui peuvent provenir du ciment	Efflorescence (fleuraison) sur la surface de l'enduit	fissures de retrait et diffusion d'eau à travers les fissures, enveloppement dû aux différents travaux
Ajout de la résine synthétique (en excès)	détérioration du régime de perméabilité à l'eau et à la vapeur de l'enduit original	Les sels causent l'efflorescence et mènent aux fatigues internes Dissolution en formes de coquilles sur la surface de l'enduit

1.3.3.1. Les causes de la détérioration des mortiers et des enduits utilisés.

Comme il a été décrit dans le paragraphe 1.1.9. Causes des désordres, une grande partie des phénomènes d'érosion sont alors liés à l'action de la pluie, du vent et des êtres vivants.

La pluie a trois effets principaux :

- impact : l'impact direct et répété de la pluie violente altère la surface des éléments extérieurs et provoque un effritement.
- ruissellement et infiltrations : l'écoulement de l'eau de pluie sur une surface provoque une érosion de surface suivie d'infiltrations dans la masse qui provoque des écroulements.
- rejaillissement et infiltration : impact indirect et répété de la pluie rebondissant sur le sol, auvent, pavement extérieur, éléments saillants ou rentrants, suivi d'altération, effritement et creusement, Odul (1990) [15].

On peut énumérer la liste des causes de dommages des enduits on cite surtout les effets atmosphériques, les effets d'utilisation et les conditions de production ainsi que les effets destructeurs de la restauration. Il est possible de les regrouper, et notamment celles qui sont les plus fréquemment observés, dans deux groupes de base A et B.

1.3.3.2. Une évaluation des mortiers et des enduits produits pour l'usage.

Les enduits utilisés dans les constructions historiques fournissent des informations importantes et utiles sur la technologie de la construction de leur période historique et ils sont de la même importance que les documents historiques.

Par conséquent, les analyses d'évaluation des enduits originaux pendant la restauration doivent être scientifiquement fondées.

Le travail peut être, de temps à autre, multidisciplinaire avec l'inclusion de diverses professions telles que : l'histoire d'art, la restauration, la médecine, la chimie, la biologie, l'ingénierie et l'architecture au sein d'une même équipe pendant le processus d'analyses.

Néanmoins, les déterminations techniques des pratiques qui seront utilisés dans les applications sur le sujet n'ont pas été normalisées, Arioglu et Acun (2005) [13].

Le but de l'analyse de mortier et de l'enduit des constructions historiques n'est pas de faire un contrôle de qualité du matériau employée, mais de déterminer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Afin de pouvoir faire le choix idéal de l'enduit de réparation qui sera employé dans la restauration des constructions historiques, il est nécessaire de connaître parfaitement les propriétés de l'enduit traditionnel.

En conséquence, ceci devrait être rapproché aux mortiers et / ou enduits comparatifs. Après exécution d'une telle comparaison, la production d'un enduit qui porte les propriétés avantageuses de l'enduit traditionnel et de l'enduit comparatif est possible.

Ceci mène à l'utilisation d'un matériau incompatible durant le processus de restauration, Arioglu et Acun (2005) [13].

Une méthode expérimentale qui peut être employée en évaluant les analyses de l'enduit traditionnel aussi bien que les enduits qui seront employés dans la restauration est suggérée ci-dessous, figure 34. Cette méthode se compose de quatre phases de base.

- Phase I ; Analyse visuelle et de documentation,
- Phase II ; Recherche expérimentale,
- Phase III ; Évaluation des expériences faites dans la phase II afin de produire l'enduit et/ou le mortier de réparation,
- Phase IV ; Prise de décision sur la convenance de l'enduit et/ou du mortier de réparation (fig. 1).

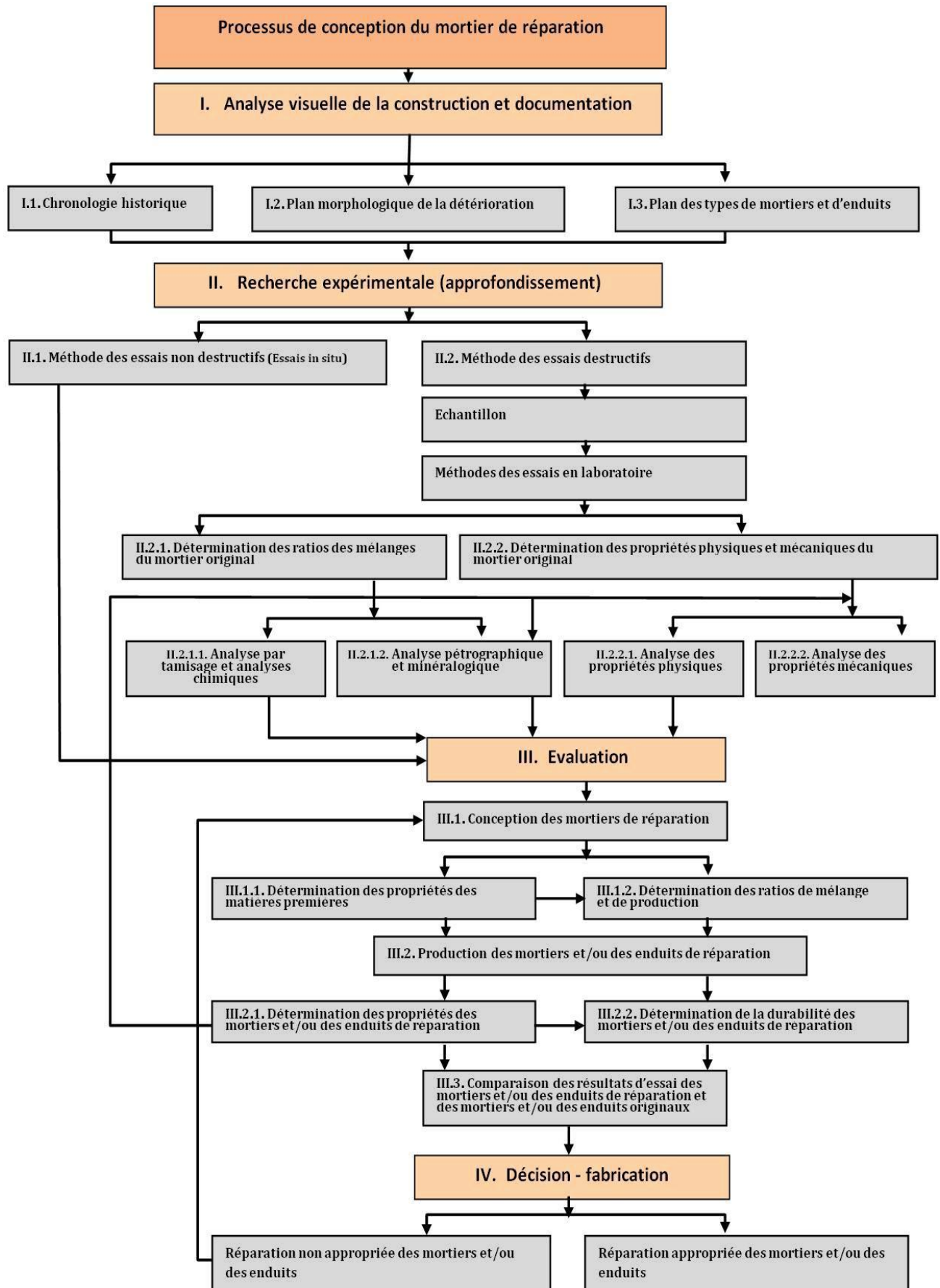


Figure 34 : Diagramme courant présentant des suggestions de méthodes expérimentales utilisées dans le processus conceptuel des enduits et des mortiers de réparation.

1.3.3.2.1. Phase I : Analyse visuelle et documentation.

La première chose à faire dans une construction historique endommagée est l'analyse visuelle. Il est nécessaire d'observer où se situe le enduit original, Arioglu et Acun (2005) [13].

Par conséquent, l'enduit original ou le système de mur devrait être déterminé en enlevant les couches qui appartiennent à la nouvelle époque. Après détermination du mortier et de l'enduit originaux, les causes des préjudices et leurs types devraient être dessinés à l'échelle et leurs photos devraient être prises à la lumière des analyses visuelles. Les conditions de l'analyse et de la documentation visuelles sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Conditions d'analyses visuelles et de documentation.

I. Analyses visuelles et de documentation
I.1 Chronologie Historique Commande chronologique des restaurations précédentes par la recherche des documents historiques
I.2 Plan morphologique de la détérioration Plan des préjudices visuellement observés sur des schémas, faisant des légendes selon les types de préjudices
I.3 Plan des types de mortier et d'enduit Le schéma des types de mortier et d'enduit déterminés dans la construction en faisant une légende sur les schémas

En plus de ces étapes, des facteurs autour de la construction qui peuvent mener à la détérioration, devraient être analysés et documentés.

1.3.3.2.2. Phase II : Recherche expérimentale (prospection).

Cette phase se compose d'une expérience systématique qui peut être suivie pendant la détermination de l'exécution de l'enduit et la production de mortier de réparation. Le travail expérimental se compose de deux groupes :

- des essais in situ non destructifs,
- des essais destructifs en laboratoire.
- Méthodes d'essai non destructives (essais in situ)

En sus des données visuelles, les essais in situ non destructifs, en cas de besoin, devraient être nécessairement effectués pouvant ainsi fournir des informations au sujet des propriétés physiques et mécaniques du mortier ou de l'enduit quant à la détermination du niveau de la détérioration.

Tableau 3 : Méthodes non destructives qui peuvent être appliquées sur des enduits historiques

II.1 Méthodes expérimentales non destructives
II.1.1. Détermination de la quantité d'absorption d'eau A l'aide du tube d'essai type " Carsten ", la quantité d'absorption de l'eau est déterminée sur la surface de l'enduit original.
II.1.2. Détermination de la quantité d'humidité La quantité d'humidité de l'enduit est mesurée à l'aide du "neutron sondage"
II.1.3. La détermination de la dureté A l'aide d'une aiguille, la dureté de l'enduit est évaluée selon l'échelle de dureté de Mohs.
II.1.4. L'examen endoscopique Afin d'apercevoir l'épaisseur et le niveau de la conservation des couches de l'enduit, un trou est ouvert dans le matériau et un dispositif photographique est envoyé à travers ce trou pour observation.
II.1.5. L'examen ultrasonique L'homogénéité et les microfissures sont déterminées, en mesurant la vitesse du transfert du son envoyée du dispositif ultrasonique.

De telles expériences peuvent être entreprises avec une tentative de chasser tous les doutes au sujet de la détermination de dommages produits pendant l'analyse visuelle. En plus, ils constituent également une accumulation de connaissance secondaire pour les essais exigés en laboratoire.

Ces méthodes sont brièvement expliquées dans le tableau 3.

–Méthodes des essais destructifs (Essais en laboratoire)

Des méthodes des essais destructifs sont employées afin de concevoir les ratios de mélange de l’enduit original et de trouver ses propriétés physico mécaniques actuelles. Cette information nous aidera à produire l’enduit de réparation approprié. Afin d'entreprendre ces expériences dans un laboratoire, des échantillons devraient être pris de certaines parties de la construction dans des quantités et des dimensions proportionnées. Ces échantillons sont rassemblés des différentes parties de la construction qui sont pensées pour être construites ou réparées dans différentes périodes de temps.. Durant la prise des échantillons, des schémas photogrammétriques sont préparés pendant la phase d'analyse visuelle, ces schémas retracent l’enduit et les types de dommages seront ainsi utiles. Ces schémas devraient montrer d'où est pris chaque échantillon, et des cartes d'information contenant des données détaillées sur l'endroit des échantillons devraient être préparées (tableau 4), Arioglu et Acun (2005) [13].

Tableau 4 Exemple de préparation d’une carte témoin.

N° Témoin	Endroit	Fonction	Chronologie	Couleur	Type de préjudices
M1	Mur-nord	mortier de jointoiment	Médiéval	Gris terne	Dépôt de sel

• *La détermination des ratios de mélange de l’enduit original.*

La réalisation d'une analyse descriptive de l’enduit original servira à préparer les critères de conception de l’enduit de réparation qui sera produit et aide à concevoir l'état actuel de la construction. La liste d'expériences qui seront réalisées en faisant une analyse descriptive se compose d'analyses minéralogie-pétrographie, d'analyses chimiques, de propriété des essais physiques et mécaniques (montré dans la figure 34).

Ces expériences servent à trouver les paramètres nécessaires afin de produire le matériau similaire à l'original. Calculant le ratio du liant/agrégat, la détermination du type de liant, la dispersion granulométrique des agrégats dans le liant, la définition minéralogique des agrégats, la présence de la matière organique, ses propriétés et son ratio sont parmi la liste de paramètres qui devraient être considérés tout en produisant le matériau qui sera employé dans la restauration des constructions historiques.

Analyse par tamisage et analyses chimiques : En déterminant les types des matériaux employées comme liants et agrégats et de leurs ratios de mélange dans le enduit original, des analyses par tamisage de produit chimique et sont faites. Si le liant dans le mortier et / ou dans l’enduit original est de la chaux, l'analyse par tamisage est faite après la solution du mortier et / ou de l’enduit dans l’acide. Si le liant est de la terre, l'analyse par tamisage de l'agrégat est faite après qu'elle soit dissoute dans l'eau. L'analyse par tamisage est faite afin de déterminer la dispersion dimensionnelle des grains du matériau employé comme agrégats. S'il y a des ajouts additionnels fibreux comme la paille, il sera indiqué pendant l'analyse. Des analyses de calcination sont faites afin de déterminer le type de liant, la présence de la matière organique et leurs ratios de présence. La calcination est une méthode expérimentale qui mesure les pertes de poids de l’enduit témoin par son réchauffement dans un four à hautes températures. Avec les essais de calcination, la détermination de l'humidité, la teneur en eau, la perte par le réchauffement et le contenu de la matière organique sont révélées. L'essai de détermination de carbonate est obtenu

en chauffant l'enduit témoin à des températures élevées et en calculant la quantité de perte, Arioglu et Acun (2005) [13].

D'autres expériences sous la rubrique des analyses chimiques qui sont l'analyse des sels dissouts dans l'eau. On distingue l'analyse de chlorure (Cl⁻), l'analyse de sulfate (SO₄⁻²) et de carbonate (CO₃⁻²), l'analyse de nitrate (NO₃⁻). En interprétant la détermination qualitative (détermination de l'élément type) et quantitative (de quantité) dans l'analyse chimique ainsi que pétrographique et les données rayons X, les types de liants et des agrégats sont alors déterminés.

Les analyses pétrographiques et minéralogiques : Des analyses pétrographiques sont faites afin de déterminer le type et la structure minérale de l'agrégat de l'enduit. L'analyse descriptive minérale dans la partie saine de l'enduit original et l'analyse des pièces minérales déformées sont faites sur les échantillons qui sont préparés en prenant une section transversale de l'enduit. D'autres méthodes d'analyse en déterminant la dimension de grain, la forme, le système de localisation, la couleur, le tissu et la structure en cristal sont le microscope électronique de balayage (SEM) et l'analyse dispersive élémentaire (EDAX). En outre, ces dispositifs sont examinés également par diffraction de rayon X. En plus, avec des analyses ICP des minerais dans le matériau sont exprimés en termes de formules chimiques.

• *La détermination des propriétés physiques et mécaniques de l'enduit original.*

Les essais physiques et mécaniques de propriété effectués pour l'enduit original devraient être aussi bien faits sur les échantillons d'enduit de réparation. Les résultats de ces expériences sont statistiquement évalués et comparés (tableau 5).

Tableau 5 Les essais des propriétés physiques et mécaniques

Les essais des propriétés physiques		
propriété	nom des essais techniques	Objectif à définir
poids	Densité (g/cm ³), gravité spécifique (g/cm ³)	Composité, porosité
Rapport d'absorption d'eau	Taux d'absorption de l'eau pressurisée et le rapport sous conditions atmosphériques (%), coefficient d'absorption capillaire de l'eau (g/cm ² √dak)	Porosité visuelle
Rapport de pore et structure	Mesure de distribution dimensionnelle des pores (porosimétrie), ratio de porosité(%), mesure de degré de saturation(%)	Porosité réelle et propriétés de saturation liées à sa durabilité de cycles de vie
Perméabilité à la vapeur d'eau	Essai de facteur de résistance de diffusion de la vapeur d'eau	Propriétés durables contre les cycles de mouillage-séchage
Résistance à la température	Coefficient d'essai de dilatation thermique	Interaction de propriétés entre l'original et le nouvel enduit

Les essais des propriétés mécaniques	
Détermination de	Objectif à définir
Force de compression (MPa), résistance à la traction (N/mm ²), Force de flexion (N/mm ²)	La résistance contre les charges horizontales et verticales
Le module de Young (N/mm ²)	Ductilité ou propriétés d'adhérence
Force d'adhérence (N/mm ²)	Adhérence à u matériau différent
Détermination de la dureté, force d'abrasion	La force de rigidité et du cycle de vie

1.3.3.2.3. Phase III : Évaluation des expériences.

A la lumière du précédent fait visuel et des analyses expérimentales, le nouvel enduit qui est semblable à l'enduit original dans l'aspect est conçu dans cette phase. Puisque les résultats quantitatifs et qualitatifs des ratios de mélange et des propriétés physico mécaniques de l'enduit original ont été calculés en faisant la distribution statistique des études expérimentales, il est approprié de faire des essais de conception pour le nouvel enduit de réparation, Arioglu et Acun (2005) [13].

–Conception des enduits et / ou des mortiers de réparation

Tout en produisant le nouvel enduit, des soucis esthétiques comme la structure et la compatibilité de couleur devraient être pris en considération ainsi que les propriétés physiques et mécaniques. Les propriétés et les ratios de mélange du matériau actuel devraient avoir lieu dans le processus de conception de l'enduit de réparation.

- *La détermination des propriétés de la matière première*

Il est nécessaire de savoir le type et la taille des agrégats à employer dans l'enduit nouvellement produit ainsi que la structure chimique de la chaux qui sera employée comme liant. En plus, en ayant quelques informations sur les effets des additifs tels que les matières pouzzolaniques, les fumées de silice, les cendres volantes, le ciment blanc, l'acrylique et l'équilibre délicat de leurs rapports de mélange aideront à prévenir les dégâts éventuels, Arioglu et Acun (2005) [13].

- *La détermination des ratios de mélange et de la production.*

Comme résultats des analyses chimiques et de tamisage faits sur l'enduit original, des ratios de masse sont calculés. En conséquence, ces résultats aident à déterminer la quantité du matériau actuel qui sera employé dans le mélange. Des échantillons d'enduit de réparation devraient être réalisés pour l'essai. La première tentative peut ne pas être réussie, donc les résultats des multiples tentatives sont comparés en conséquence. Les propriétés physiques et mécaniques du nouvel enduit qui ressemble à l'original en couleur et en structure sont trouvées à partir des expériences et sont comparées aux valeurs de l'enduit original. Pour finir, le nouveau enduit, dont les propriétés physiques et mécaniques sont compatibles avec celle de l'original devrait être porté à une série d'essais de durabilité. Ces essais nous aideront à décider si l'utilisation du nouveau enduit est appropriée ou pas.

–La production des enduits et des mortiers de réparation

Après la détermination du ratio de mélange et des matériaux qui sont employés pour faire l'enduit ou le mortier de réparation, des mélanges témoins sont préparés et moulés dans des moules en acier aux conditions du laboratoire. Plus tard, les essais physiques et mécaniques des propriétés seront effectués sur les échantillons de l'enduit ou sur le mortier de réparation produits, comme il a été montré précédemment.

En outre, pour déterminer la résistance atmosphérique de condition des mortiers et / ou enduits de réparation, des essais de durabilité doivent être effectués.

- *La détermination des propriétés des enduits de réparation.*

Afin de faire une comparaison entre les échantillons de l'enduit original et les échantillons de l'enduit de réparation produits dans le laboratoire, des essais physiques et mécaniques (dans le tableau 5) et les analyses pétrographiques-minéralogique doivent être conduites (dans " analyses pétrographiques et minéralogiques ").

- *La détermination de la durabilité en enduits de réparation.*

Les expériences de la durabilité sont faites pour mesurer la résistance du nouvel enduit aux conditions atmosphériques. En déterminant la durabilité de l'enduit les expériences suivantes devraient être faites : essais de mouillage-séchage, de gel-dégel et de l'essai de vieillissement dans une solution de decahydrate de sulfate de sodium (solution salée). Ces expériences nous

fourniront des informations sur le comportement du nouvel enduit de réparation dans des états instables de l'atmosphère. En d'autres termes, il sera possible d'apprendre du nouvel enduit la durée la vie par les essais mentionnés ci-dessus.

S'il y a un minimum, ou aucuns préjudices du tout, sur le nouveau enduit des résultats de ces expériences, il est possible de décider que la durabilité du nouveau enduit est élevée et par conséquent, son application est appropriée. L'aspect le plus important d'un enduit idéal de réparation est sa durabilité aux cycles de gel et de dégel ainsi que sa durabilité contre des cristaux de sel dissous dans l'eau contre les cycles d'hydratation et de déshydratation, Arioglu et Acun (2005) [13].

–Comparaison des résultats des essais des enduits de réparation et originaux

La comparaison est faite pour déterminer les similitudes entre les propriétés caractéristiques de l'enduit original et l'enduit de réparation. Dans la comparaison, selon les endroits où l'enduit de réparation est employé, une priorité peut être accordée à quelques propriétés caractéristiques.

La valeur de la propriété caractéristique prioritaire de l'enduit de réparation doit être plus proche de la valeur de l'enduit original.

Pour les autres valeurs de propriété, cette similitude peut être suffisante. En outre, des résultats d'essai de durabilité de l'enduit de réparation sont examinés.

1.3.3.2.4. Phase IV : Prise de décision.

En conclusion, si des propriétés caractéristiques prévues sont trouvées dans l'enduit de réparation (en d'autres termes, obtention de beaucoup de similitudes à l'enduit original), les ratios de mélange sont concluants et alors des décisions sont prises pour l'application. Par ailleurs, si les propriétés caractéristiques du nouvel enduit ne possèdent pas de similitudes à celles de l'enduit original, la conception de l'enduit de réparation (section 3.3.1) devrait être reconsidérée.

Envisager des solutions architecturales appropriées pour des problèmes même techniques, Van balen (1990) [12].

1.3.3.3. Résultats et recommandations.

La conservation des architectures de terre devraient être en premier lieu la cible de n'importe quel projet. Là où l'entretien est insuffisant, les tentatives de conservation et de restauration devraient le remplacer.

Ce qui est nécessaire dans la restauration est l'utilisation du matériau qui ressemble au matériau original au degré le plus étroit ou, en produisant le matériau approprié qui est compatible avec les propriétés du matériau original.

La première dimension du problème actuel est l'insuffisance des ressources et la deuxième dimension provient du manque d'évaluation appropriée de la matière à employer dans la conservation et la restauration.

Cette étude définit l'importance des mortiers et des enduits avec leur histoire et les raisons de la détérioration. Les méthodes expérimentales nécessaires pour la production du nouveau mortier ou enduit de réparation à employer en déterminant l'analyse descriptive de la morphologie originale du mortier et de détérioration sont également analysées. Ainsi, une méthode est alors déterminée, qui peut être employée dans des études de conservation et de restauration.

Cette étude a essayé de récapituler un schéma de base des méthodes expérimentales qui peuvent être suivies dans l'ordre dans le processus de réparation des matériaux les plus importants qui ont été employés dans la construction des constructions historiques : mortier et enduit.

Le manque d'existence d'une norme en ce qui concerne le enduit de réparation à employer dans les constructions historiques exige la conception d'un organigramme tel que présentée dans cette étude.

La méthode expérimentale suggérée peut être appliquée pour chaque type d'enduit ou de construction.

Les mortiers et / ou enduits de réparation vendus actuellement aux marchés peuvent être préparés et améliorés selon les résultats d'expérience ; de cette façon, l'utilisation de l'enduit prêt à l'emploi de réparation vendu aux marchés des sachets en plastique peut faciliter le processus de restauration. En même temps, l'organigramme présenté dans cette étude a installé la pratique en matière d'étude qui peut constituer une norme pour obtenir des archives de données qui incluent des informations sur la diversité de l'enduit selon la période de temps où ils ont été faits, Arioglu et Acun (2005) [13].

1.3.4. Conclusion.

Les habitats de terre de ces Quartiers sont très dégradés. Ce type de construction exige en effet une attention pointue qui, lorsqu'elle n'est pas prêté, les rend davantage vulnérables: l'anéantissement des couronnements entraîne la chute des enduits et la pénétration des eaux dans les murs; la concavité des terrasses (flèche des solives), si elle n'est pas traitée, provoque la stagnation des eaux, puis leur pénétration dans les œuvres; les eaux de ruissellement sapent les bases des murs.

L'objectif principal de la présentation de ces approches méthodologiques est de proposer une réflexion concernant l'analyse et le traitement des pathologies à différentes échelles basée sur des hypothèses d'intervention bien précises.

L'approche proposée veut mettre en évidence l'importance des différentes dimensions de la conservation architecturale qui toutes doivent être prises en considération quand des décisions sur l'intervention doivent être prises.

Par rapport à d'autres matériaux, la terre est extrêmement sensible aux actions de l'eau. Ainsi, cette caractéristique du matériau induit nécessairement que les constructions en terre soient traitées contre les multiples actions néfastes de l'eau.

Laissées à l'abandon, laissé sans entretien, ce patrimoine d'architecture de terre s'écroule lentement car en plus de l'eau qui demeure son pire ennemi, d'autres dangers l'épient :

- Le premier de ces dangers est la planification hâtive des programmes et des actions. Le patrimoine est un domaine sensible et très fragile. C'est une ressource architecturale et économique non renouvelable.
- Le second de ces dangers est la falsification de l'histoire ou l'oubli des toponymes anciens. Ceci est principalement le fruit d'une imparfaite connaissance de ce patrimoine.
- Le troisième danger est la célébration du modernisme sans frein et de la course au développement, que les planificateurs de l'aménagement du territoire mettent beaucoup d'énergie à faire admettre. Des savoir-faire ancestraux, principalement dans les métiers du bâtiment, ont été sacrifiés pour laisser la place à la domination du béton armé et du préfabriqué. Parfois, les habitants construisent à l'intérieur même de ces casbahs des maisons en béton qui défigurent le paysage.
- Le quatrième danger enfin est l'abandon de ces sites et monuments historiques aux risques naturels les plus menaçants et au vandalisme, Erbati (1999) [16].

Chapitre 2.

Matériau terre, développement durable et établissements humains

2. 1. Développement durable.

2.1.1. Introduction.

L'humanité est confrontée en ce début de 21^{ème} siècle à un défi sans précédent. L'environnement naturel s'épuise et se dégrade à un rythme qui n'est pas tenable. Dans tous les domaines : air, eau, sol, biodiversité, les seuils d'alerte sont atteints et parfois largement dépassés : la désertification touche 1/3 des terres émergées, la biodiversité est très gravement menacée, le nombre des régions du globe qui connaissent des stress hydriques graves ne cessent de croître et le climat s'emballe, Brodhag (2006) [16].

Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement, sur une moyenne mondiale, les bâtiments utilisent jusqu'à 40 % de toute l'énergie consommée dans la société, contribuant de ce fait également aux émissions significatives de CO₂. De 30 à 40 % des déchets viennent du secteur du bâtiment et de la construction, et plus de 20 % des ressources d'eau douce sont consommées par ce secteur. De plus, la qualité de l'air intérieur montre une relation entre l'environnement et la santé publique. La confrontation entre les tendances héritées du passé et les obligations de réduction de la pression sur l'environnement que nous imposera le monde de demain, conduira à un constat d'incompatibilité. L'exemple de l'énergie et du changement climatique est le problème le plus emblématique.

2.1.2. Le concept de développement durable.

Le concept de développement durable est donc à la mode. Il en va de lui comme du concept de technologies appropriées : tout le monde s'en saisit, et se l'approprie. Ceci provient du fait que sa définition est vague et change selon la personne qui l'utilise, Doucet (2005) [18]. Néanmoins sa définition la plus élémentaire demeure comme étant un développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre ceux des générations futures (rapport Brundtland "Our common future", rapport sur l'environnement pour les Nations Unies, 1980). Il se traduit concrètement sur le terrain par le concept : "penser globalement, agir localement".

Le développement durable conjugue simultanément trois paramètres fondamentaux :

- l'équité sociale, avec une triple solidarité : sur le long terme, en préservant les intérêts des générations futures ; au présent, en prenant des mesures concrètes contre la pauvreté et en mobilisant les citoyens autour des projets désirables et partagés ; dans l'espace, en créant un contexte géopolitique d'entraide entre le Nord et le Sud.
- la prudence environnementale qui donne la priorité à une politique préventive plutôt que curative, concernant les ressources naturelles et les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes.
- l'efficacité économique, prenant en compte la globalisation des coûts et les interférences avec les deux autres paramètres.

La mise en place du développement durable passe par la "Gouvernance", définie comme une dynamique d'actions partagées et solidaires des acteurs, issue d'un partenariat entre public, privé et société civile. Elle est fondée sur l'éthique de la responsabilité citoyenne et sur la pluralité des points de vue, Miqcp (2003) [19].

2.1.3. La construction durable.

Parler de l'histoire de la construction durable, c'est remonter jusqu'aux origines de l'habitat. Depuis que l'homme a commencé à bâtir, il a fait preuve d'un grand sens du développement durable. L'architecture dite vernaculaire, est toujours parfaitement en phase avec les besoins de celui qui la conçoit : ses caractéristiques, tant formelles que techniques, sont parfaitement adaptées au climat, au lieu et donc au milieu où elle est mise en place, Remaud (2009) [20]. Elle est construite avec les matériaux disponibles à moindre frais et nécessitant le moins d'efforts

dans un lieu donné. C'est donc la plus pure expression du bon sens. On construit en fonction du climat, avec des matériaux locaux et naturels pour répondre avec exigence aux besoins de l'utilisateur, donc dans un style cohérent à l'échelle locale. Dans nos villes du sud, cette méthodologie constructive a été massivement à l'origine du paysage ksourien jusqu'à l'heure actuelle. L'histoire de l'architecture durable, même si le terme est anachronique pour qualifier ce que nous venons d'évoquer, ne doit donc pas se faire en cherchant un commencement, mais un renouveau. Il faut trouver quand on s'arrête de bâtir selon ces critères, quand on y revient et expliquer pourquoi. La responsabilité face à l'Histoire et plus précisément envers nos descendants, le désir de faire œuvre, le souci de la durée. Cette mise en perspective conduit à s'interroger sur les différentes facettes de l'acte de bâtir : que construire (l'architecture), comment construire (la technologie), que conserver (le patrimoine), quelles villes aménager (l'urbanisme), et tout cela pour quel avenir ? , Lemoine (2006) [21].

2.1.3.1. L'énergie grise.

L'« énergie grise » est définie comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour produire un matériau (ou un produit) de construction.

Pour un même objectif de construction l'énergie grise peut être des dizaines de fois plus élevée: par exemple l'énergie grise d'une isolation en fibre de chanvre sera de 40kWh/m³, celle d'une isolation en polystyrène extrudée 850 kWh/m³. Un enduit argile ou terre crue demande 30 kWh/ m³ d'énergie grise, un enduit synthétique en nécessite 110 fois plus soit 3.300 kWh/ m³ !

Les matériaux d'origine naturelle et écologique qui favorisent les circuits courts du cycle de vie (de sa production à sa destruction, en comptant aussi son utilisation, et tous ses besoins en transports....) ont une empreinte écologique et une énergie grise des dizaines de fois meilleure que la plupart des produits industriels et synthétiques, Ciekanski (2008) [22].

Pour éviter les longs transports des sites d'extraction des matières premières ou de production des produits finis jusqu'au chantier de construction, on choisira de préférence des matériaux fabriqués à partir de ressources locales. Ainsi, des matières premières telles que le bois, la terre, l'argile ont un intérêt évident puisqu'on les trouve à proximité de nombreux sites de construction.

L'habitat est le premier poste de dépense énergétique dans le monde et préoccupation écologique oblige, on nous annonce régulièrement des constructions d'« éco- quartiers », de « tours vertes », d'immeubles à « énergie positive ».

2.1.3.2. La construction durable.

La construction durable constitue un moyen de répondre aux besoins actuels de logements et d'infrastructures de la société, sans compromettre l'aptitude des générations futures à satisfaire leurs propres besoins à venir. Cela résume en quelques mots la définition du Programme environnemental des Nations Unies (PNUD) pour la construction durable : « un moyen pour le secteur du bâtiment d'assurer un développement durable, prenant en compte les problèmes écologiques, socio-économiques et culturels. Plus spécifiquement, la construction durable englobe les questions telles que la conception et la gestion des immeubles, les matériaux, et les performances des constructions au niveau de la consommation d'énergie et des ressources. Tout cela étant envisagé dans le cadre plus large de la gestion et du développement urbain. » La construction durable exige une attitude d'esprit dépassant largement la discipline d'une science exacte. Elle impose la combinaison de l'expérience acquise en architecture, en ingénierie et en construction au cours de plusieurs siècles, avec l'exploration innovante de méthodes nouvelles devant permettre de remplir les exigences des générations futures. La construction durable combine ainsi l'expérience vécue au besoin d'explorer de nouveaux horizons. Elle dépend à la fois des connaissances pratiques et de la recherche, Hamdane (2007) [23].

En fonction du contexte et des besoins, et dans l'intérêt de la société et de l'environnement, la construction durable doit combiner l'application de différentes méthodes et de différentes approches, avec l'exploration continue de solides stratégies d'ingénierie, de planification et de

développement. La diversité des approches à la construction durable permet d'apprendre à partir des innovations présentées, et de mettre en valeur les solutions nouvelles.

2.1.4. Le secteur du bâtiment comme un écosystème.

Un effort doit être consenti par le secteur du bâtiment en faveur du développement durable, afin de ne pas dilapider le capital non renouvelable de notre planète.

Une consommation de matériaux majoritairement issus de ces ressources en matière renouvelable ou recyclée, permettrait de ne pas dépasser la limite productive annuelle de la Terre.

2.1.5. Le matériau terre.

Suite à tout ce qui a été cité précédemment comme périls épiant notre planète l'approche du matériau terre dans la construction commence à prendre de l'importance dans notre vie quotidienne, et on commence d'ores et déjà à s'inscrire dans une réflexion multidisciplinaire sur un habitat éco-responsable, c'est-à-dire un habitat socialement équitable, écologiquement soutenable et économiquement viable. « L'habitat éco-responsable est fondé sur un équilibre entre l'homme et son environnement, entre la tradition et la modernité, entre le low-tech et le high-tech. La démarche qui y mène n'est pas une nouvelle contrainte ajoutée à beaucoup d'autres mais un état d'esprit qui recentre les champs du possible, dans un souci de sobriété, Gauzin-Müller (2009) [24].

Construire en terre,

- c'est repenser à la fois globalement et localement l'emploi des ressources de notre planète, en associant terre, eau et soleil dans un véritable défi technique, culturel, social, économique et environnemental.
- c'est défendre le droit de mettre en œuvre un matériau de construction naturel et écologique, abondant, facilement disponible et accessible au plus grand nombre, afin de permettre aux plus démunis de bâtir leur habitat "avec ce qu'ils ont sous les pieds".
- c'est promouvoir les ressources locales, à la fois humaines et naturelles, améliorer les conditions de vie, valoriser la diversité culturelle et maintenir les systèmes d'entraide sociale pour la construction et l'entretien du cadre bâti.
- c'est employer un "béton naturel" qui offre une réelle alternative écologique et économique face à des matériaux et des procédés de production nocifs pour l'environnement.
- c'est revaloriser, adapter et transformer plus de 11 000 ans de connaissances et de savoir-faire, et associer un matériau séculaire à une architecture innovante.
- c'est reconnaître la valeur culturelle du bâti vernaculaire, s'opposer aux destructions et encourager la réhabilitation d'un bâtiment en respectant le matériau et l'expression architecturale.
- c'est poursuivre le développement de l'art de bâtir et sa mise en forme complexe dans un ensemble unissant architecture, esthétique et décoration.
- c'est développer l'innovation pour optimiser le matériau, simplifier les mises en œuvre et produire de nouvelles architectures, Coulombel et Al. (2010) [25].

Elle fait appel à la créativité et à la mise en commun des compétences dans un esprit d'ouverture. Les principes fondamentaux qui nous permettent de construire un habitat éco-responsable sont tous d'une grande simplicité et pour la plupart connus depuis longtemps. Pratiqués dans l'architecture vernaculaire, ils ont été redécouverts au début du 20ème siècle par Frank Lloyd Wright sous la dénomination architecture organique puis propagés dans les années 1970 sous le terme d'habitat bioclimatique.

Ces mesures simples et pragmatiques, qui ne coûtent que de la matière grise, sont infiniment plus efficaces que toute forme de complexité artificielle : si on utilise des outils, des démarches et

des raisonnements compliqués, s'y retrouver et faire des progrès devient très difficile et demande l'intervention "d'experts" souvent autoproclamés, Gauzin-Müller (2009) [24].

2.1.5.1. La terre : matériau local.

L'expression "matériaux locaux" désigne globalement un ensemble de substances naturelles utilisables dans le domaine de la construction et disponibles localement. La terre, la pierre, le gypse, le bois sont parmi les matériaux locaux les plus couramment utilisés.

Ne nécessitant ni achat, ni transport, ni gaspillage ou transformation à caractère industriel, ils permettent le maintien des équilibres écologiques et le respect de l'environnement.

Trois critères permettent de définir entièrement le matériau local.

Ils concernent:

- 1) les conditions géographiques: puissance du gisement (par exemple) et conditions d'exploitation (extraction, transport...),
- 2) les conditions technologiques: l'existence et le degré de savoir-faire local conditionnent l'utilisation du matériau,
- 3) les conditions économiques: ce critère gouverne la décision de construire. De ce fait, il est étroitement lié aux deux premiers cas il englobe le coût d'extraction des matières et ceux de production et d'exécution.

Vues son abondance et les multiples possibilités qu'elle offre pour la construction, la terre est le matériau local par excellence. C'est un matériau composite, formé par le mélange naturel d'agrégats dans des proportions variables (graviers, sables, limons et argiles). Sa nature est conditionnée par plusieurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. La grande diversité des terres - dont certaines seulement sont aptes à la construction - résulte d'une multiplicité de facteurs dont les plus importants sont la structure de la roche mère et le climat local.

Plus de vingt méthodes traditionnelles de construction en terre ont été répertoriées de par le monde, sans compter les diverses variantes régionales qui permettent l'utilisation des ressources locales en les adaptant aux contraintes les plus diverses.

Dix mille ans de traditions et de savoir-faire populaires font qu'aujourd'hui, le tiers de la population mondiale vit dans des habitats à base de terre, El Kadiri (1989) [26].

2.1.5.2. La terre : écomatériau.

Dans la perspective d'un habitat durable, les matériaux de construction devraient satisfaire le plus possible à l'ensemble des exigences relatives à l'environnement et à la santé.

Les organismes de certification, les organismes d'inspection et les laboratoires d'essais devraient intégrer ces exigences, et les fiches techniques des matériaux devraient comporter des données claires indiquant leurs impacts sur l'environnement et la santé, Jadoul (2002) [27].

Le choix des matériaux doit se faire dans le souci d'économiser les ressources naturelles, d'éviter les émissions polluantes et de minimiser la production de déchets.

Les écomatériaux sont définis selon quatre critères, Conteville et Den Hartigh (2009) [28] :

1. *Mise en œuvre*: Qualités techniques, aptitude à l'emploi et à la mise en œuvre, durabilité de ses performances dans le temps ;
2. *Santé et confort*: Non nuisible à la santé de l'occupant ou de l'artisan ; confort de l'habitant ;
3. *Environnement*: Matières premières issues de ressources renouvelables, peu énergivore sur l'ensemble de son cycle de vie, très économe en énergie pendant la durée de vie du bâtiment grâce à son pouvoir d'isolation ;
4. *Développement local équitable*:

Mobilisant des ressources locales et créateur d'emploi dans le cadre d'activités redistributives; accessible à tous (en termes de ressources financières et d'information fournie).

Il s'agit là d'indicateurs aidant les acteurs à définir le caractère écologique d'un matériau. Aucun d'eux n'est excluant, mais doit inviter à une constante amélioration du produit d'un point de vue social, environnemental et économique. , Conteville et Den Hartigh (2009) [28].

Pour produire les matériaux de construction, on prélève dans l'environnement des ressources naturelles : des matières premières et de l'énergie. Il y a exploitation durable lorsque l'on prélève dans l'environnement moins de matières premières qu'il peut s'en produire.

Certaines ressources se renouvellent plus ou moins rapidement : il faut une saison de culture pour produire le lin ou le chanvre utilisé comme isolant.

D'autres ressources ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine : il a fallu à la Terre des millions d'années pour constituer ses réserves de pétrole, de gaz naturel ou de charbon ou pour produire ses gisements d'argile, de chaux et de pierre naturelle.

Si l'argile, la chaux et la pierre sont encore relativement abondantes, les réserves de pétrole, de gaz naturel et de charbon seraient épuisées d'ici quelques dizaines d'années, Jadoul (2002) [27].

Au delà de ces vitrines technologiques, prenons l'exemple plus familier d'une maison moyenne de 100 m² en béton armé: l'énergie nécessaire à sa construction représente l'équivalent de 40 années de dépense de chauffage.

À titre de comparaison, avec la même énergie nous pourrions construire l'équivalent de 10 maisons en bois ou 50 maisons en terre crue de même surface, toute chose étant égale par ailleurs. Le responsable: le ciment (et l'acier) constituant le béton armé qui nécessite une énergie considérable (de l'argile et du calcaire cuit à une température de 1800°C!): l'industrie cimentière représente à elle seule 5 % du dégagement mondiale en CO₂ (essentiellement par énergie fossile: pétrole, charbon), et pour le béton armé ce chiffre atteint 10%.

Piètre bilan pour un matériau qui fait jeu égal avec le bois et la terre crue dans la part de l'habitat mondial... et pourtant aujourd'hui, malgré son caractère polluant et énergivore, la production mondiale de ciment explose! La Chine augmente sa production chaque année de l'équivalent de la production annuelle Française....à ce rythme d'ici 2020 le béton représentera près de 15 % du CO₂ mondiale.

Cela devient problématique au regard des 3 milliards d'être humains supplémentaires qu'il faudra loger d'ici 2050 dans des conditions dignes. On le comprend les choix constructifs pour ces prochaines années auront beaucoup de conséquences sur le climat, l'environnement et l'état des ressources fossiles, Bellal (2010) [29].

La figure 35 : donne un aperçu des énergies nécessaires à la fabrication de quelques matériaux

Sans s'étendre sur les aspects techniques, la terre crue n'est pas le matériau des pauvres, elle permet de se loger dans des conditions très confortables et durables, en témoigne les architectures du passée.

Elle n'est pas réservée à l'habitat individuel, elle peut répondre au besoin de densité par des constructions collectives qui peuvent atteindre 6 étages, l'exemple de Shibām au Yémen est illustrant pour soutenir cette affirmation: c'est dire à quelle point cette technique, réactualisée avec nos moyens modernes et notre force mécanique actuelle, présente un grand potentiel.

Par sa plasticité et plus encore lorsqu'elle est associée à une structure en bois, elle résiste bien au séisme pourvu que les dispositions constructives soit respectée. Enfin pour beaucoup de pays sans ressource pétrolière c'est un instrument d'indépendance économique, culturelle et l'occasion de créer de l'emploi en lançant des programmes de constructions, Bellal (2010) [29].

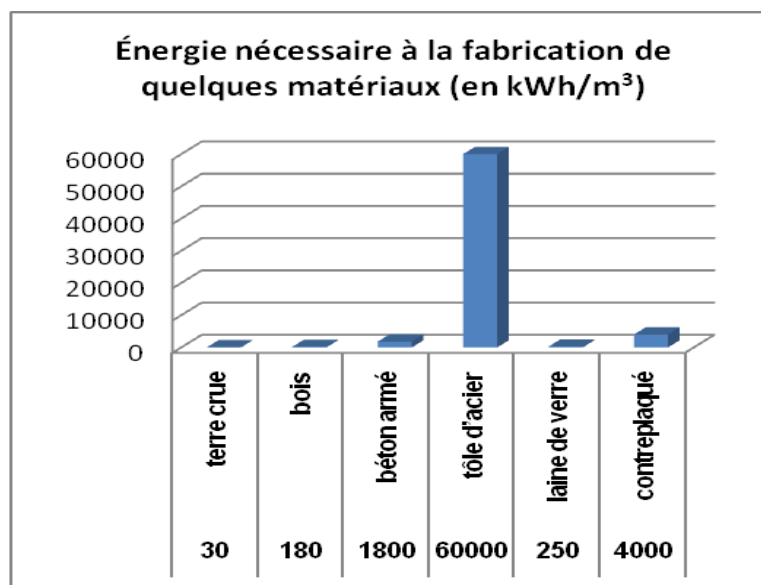


Figure 35 : Energie nécessaire à la fabrication de quelques matériaux (en kWh/m³)

Source : J.Chabanne ENSA Grenoble France 2006

C'est le cas de l'expérience initiée en Egypte par l'architecte Hassan Fathy dans les années 50 qui a construit des milliers de logements en terre en revisitant et modernisant l'architecture traditionnelle, en formant une main d'œuvre locale et en divisant par 5 le coût par rapport au béton avec un confort accru: en effet dans ces pays chauds, la terre est un climatiseur naturel, le béton, une aberration.

Pourtant ces programmes ont été arrêtés sous la pression des constructeurs en béton et des accusations de passéisme à une époque où pour ce pays en voie de développement, le béton était symbole de modernité et de sortie de la pauvreté. Mais cela aura valeur d'exemple et d'autres pays vont se lancer dans de telles expériences.

Pour relancer la filière terre dans la construction; Nous devons travailler à donner un cadre normatif pour la construction en terre comme c'est déjà le cas pour le béton armé, l'acier et le bois afin d'assurer un haut niveau de sécurité dans les constructions.

D'autre part un gros effort de formation doit être entrepris valorisant les filières technico-scientifiques dans la formation continue comme initiale pour les ouvriers, techniciens, ingénieurs, architectes. Enfin, l'aide au développement doit être consacrée entre autre au lancement de projets de construction avec des matériaux locaux dans les pays en voie de développement, Bellal (2010) [29].

2.1.6. Le rôle du changement technologique.

Les matériaux ont un rôle essentiel. Il ne faut pas se limiter à leur seule valeur d'usage mais considérer l'ensemble de leur cycle de vie, y compris le transport et le recyclage.

Dans ce domaine, la terre comme matériau cumule de nombreux avantages : son utilisation à l'état cru n'a aucune atteinte sur l'environnement en matière de gaz à effet de serre.

C'est une ressource locale dont on peut mieux la rendre financièrement accessible comparativement à d'autres matériaux qui ont connu des prix importants. Et l'innovation technique est à même de bouleverser à tout moment la hiérarchie des matériaux, le contexte d'usage étant tout aussi important, Brodhag (2006) [16]. La terre crue est sans doute le matériau de construction le plus écologique qui soit : disponible localement, très faible impact

environnemental, coût extrêmement réduit et confort souvent inégalable, à condition de savoir la mettre en œuvre. Ces techniques aussi vieilles que le monde refont aujourd'hui surface.

La terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction sans une grande dépense d'énergie. Dans la plupart des pays en voie de développement et particulièrement en Afrique, le revenu de la majorité des habitants ne leur permet de construire que des logements sociaux économiques avec des technologies socialement appropriées, Doucet (2005) [18].

Les technologies socialement appropriées sont les technologies qui sont les mieux adaptées à une région. Les pays en développement ont besoin de technologies autres que celles des pays développés, c'est-à-dire qui sont mieux adaptées à leurs ressources et à leurs besoins et qui leur donne une indépendance vis-à-vis de la facilité d'utilisation et d'entretien.

Les technologies appropriées requièrent peu de capital, utilisent les matériaux disponibles localement et nécessitent une main-d'œuvre réduite en comparaison des méthodes contemporaines. Elles sont faciles à comprendre et à reproduire, et permettent à la communauté de se les approprier en les imitant facilement au moindre besoin. Elles peuvent être adaptées à différentes régions ou à divers climats, et elles ont peu d'impact sur l'environnement, Wafer (2010) [30].

Les coûts liés à cette technologie appropriée sont bas et une légère contribution des autorités pourrait permettre une transition intelligente vers une méthode de construction durable à faible impact sur l'environnement et favorisant le renforcement de la communauté rurale, réduisant ainsi la migration vers les zones urbaines.

Les indicateurs suivants pourraient être ajoutés à l'évaluation d'une technologie de construction pour savoir si elle est appropriée (Schumacher, 1973) :

- Les matériaux utilisés sont disponibles localement et à faible coût.
- Le modèle ou plan de l'habitation est simple à comprendre et facile à répliquer.
- L'édification de l'habitation requiert peu de main-d'œuvre.
- La technique de construction peut être maîtrisée et enseignée par la communauté locale sans grande formation spécifique.
- Le cycle de vie complet de la construction minimise les impacts sur l'environnement, Wafer (2010) [30].

S'intéresser à ce matériau, c'est s'intéresser à son potentiel réel, à sa place dans la construction, à son domaine d'utilisation et aux réponses sensées qu'il peut apporter à certains problèmes actuels, Doucet (2005) [18].

Dans les limites que sont celles d'un travail d'initiation à la recherche, détailler tous ces avantages, risque de ne pas cerner finalement cet ample matériau et ce n'est pas en quelques pages de plus qu'on va tout dire sur lui.

2. 2. Matériau terre et Etablissements humains.

2.2.1. Introduction.

Au cours de la dernière décennie, partout dans le monde, plus de 200 millions de personnes par an ont été victimes de catastrophes naturelles – soit sept fois plus que les victimes de conflits. Les risques naturels deviennent des catastrophes lorsqu'ils ont une incidence sur la population et les biens qui subissent leurs conséquences dévastatrices. Ces risques sont particulièrement marqués dans les villes, bourgs et villages du monde. Des facteurs comme l'utilisation inadaptée des terrains, la conception déficiente et la mauvaise construction des bâtiments et infrastructures et un environnement de plus en plus dégradé font peser des menaces sur les établissements humains. Bien que ces menaces existent aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement, elles ont souvent une incidence plus grande et plus répétée dans les pays en développement, où la capacité institutionnelle est plus faible, se traduisant par une vulnérabilité chronique de grands pans des populations les plus démunies, Onu-Habitat (2005) [31].

En 2005, un peu plus du tiers de la population urbaine des régions en développement vivait dans des taudis. En Afrique subsaharienne, cette proportion dépassait 60 %, ce qui signifie que d'importants investissements devront être consacrés, et notamment l'accès à un logement durable. Cependant, même dans cette région, et dans d'autres où le dénuement n'atteint pas une telle ampleur, des initiatives simples, à faible coût, contribueraient beaucoup à la solution de ce problème, Onu-Habitat (2008) [32].

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

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

2.2.2. Établissements urbains et les risques naturels et environnementaux.

En plus de l'urbanisation rapide et du manque à réaliser en matière de constructions en général et en logements en particulier s'ajoute les catastrophes naturelles et environnementales qui tellement fragiles face aux risques naturels et environnementaux qui les menacent, les établissements urbains et les pauvres, partout mais plus particulièrement dans les zones urbaines, sont les plus en danger, l'absence d'infrastructures, l'absence de sécurité d'occupation, l'usage inapproprié des sols et des environnements de plus en plus dégradés laissent une grande partie des groupes humains les plus démunis dans un état de vulnérabilité chronique, Onu-Habitat (2006) [33].

2.2.3. Campagne pour un meilleur avenir urbain.

ONU-Habitat et ses partenaires lancent une nouvelle campagne mondiale pour promouvoir des villes meilleures pour tous. En cette période de crise financière, la campagne revêt une urgence particulière dans le cadre des efforts visant à réduire la pauvreté urbaine en offrant un logement accessible à tout habitant.

2.2.4. Croissance des bidonvilles.

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

croissance urbaine et de croissance des bidonvilles sont presque identiques. La nécessité d'explorer des approches innovantes pour créer des villes durables est devenue incontournable, Moreno (2007) [34].

La figure 36 montre la croissance des bidonvilles dans les pays en développement

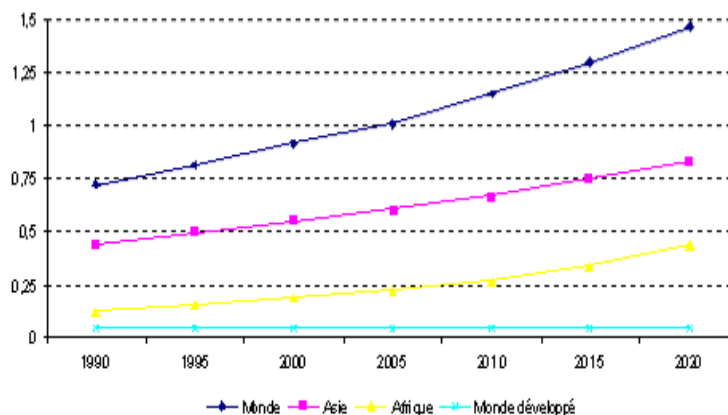


Figure 36 : La croissance des bidonvilles (en milliards d'habitants)
Source: ONU-HABITAT State of the world's cities 2010/2011

2.2.4.1. Les tendances mondiales.

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

Dans les pays en développement, près de deux milliards de personnes vivent déjà en milieu urbain. D'après les prévisions, ce chiffre devrait doubler au cours des trente prochaines années. La population urbaine représentera alors la moitié de la population mondiale. De plus, la majorité de ces nouveaux urbains feront partie des plus pauvres - résultat d'un phénomène d' "urbanisation de la pauvreté, Onu-Habitat (2003) [35].

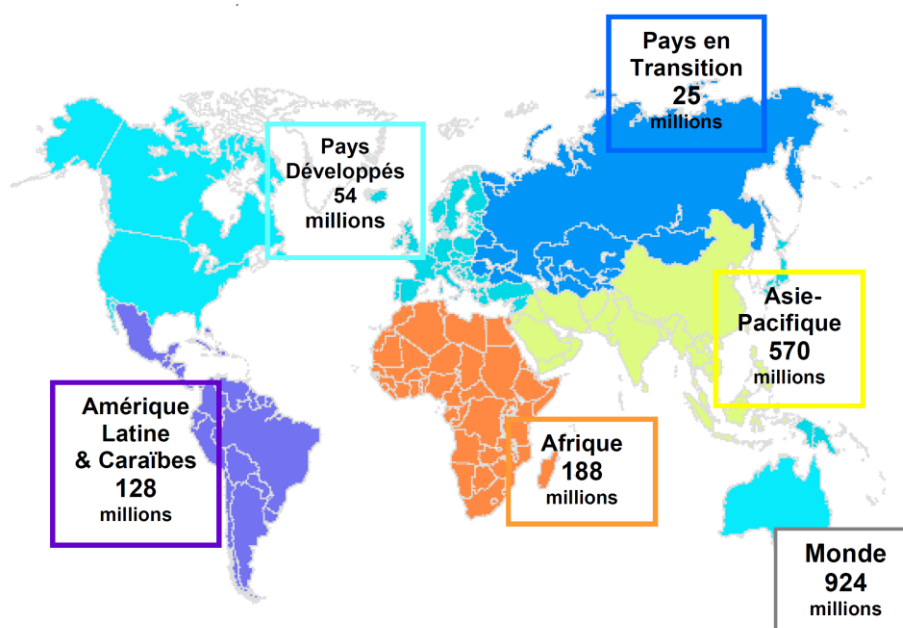


Figure 37 : La population des bidonvilles (estimations 2001)
Source : ONU-HABITAT

La croissance plus rapide dans les zones urbaines des pays en développement suggère que les problèmes associés aux bidonvilles vont s'aggraver dans ces quartiers déjà précaires. D'après les estimatifs de l'ONU-HABITAT 2001, plus de 70% de la population urbaine des Pays les Moins Avancés et des pays d'Afrique Sub-saharienne vit dans les bidonvilles, figure 37.

Ce chiffre est amené à augmenter si l'on n'intervient pas de manière conséquente par des projets d'amélioration de l'habitat, Onu-Habitat (2003) [35].

2.2.4.2. L'amélioration des taudis.

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

L'amélioration des taudis par la réalisation ou la substitution de ce qui existe par un logement décent, étant un élément clé pour atteindre la cible 11 de l'Objectif 7 des Objectifs du Millénaire pour le développement de L'ONU HABITAT d'ici à 2020, Onu-Habitat (2005) [36].

2.2.5. ONU-HABITAT: Objectifs de développement du Millénaire.

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

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

La communauté internationale a déjà pris du retard par rapport aux Objectifs de développement du Millénaire visant à réduire la pauvreté dans les villes des pays en développement. L'engagement pris au titre des Objectifs de développement du Millénaire d'améliorer les conditions de vie de 100 millions d'habitants de taudis d'ici à 2020 est compromis. Si rien n'est fait pour contrôler la tendance actuelle, le nombre de personnes vivant dans des taudis passera d'un milliard aujourd'hui à environ un milliard et demi d'ici à 2020, Onu-Habitat (2005) [36].

2.2.6. Amélioration des taudis par l'usage du matériau terre.

Parmi les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD 7) initié par les nations unies c'est de réussir, d'ici 2020, à progresser dans l'amélioration des conditions de vie dans des logements décents. Figure 38.

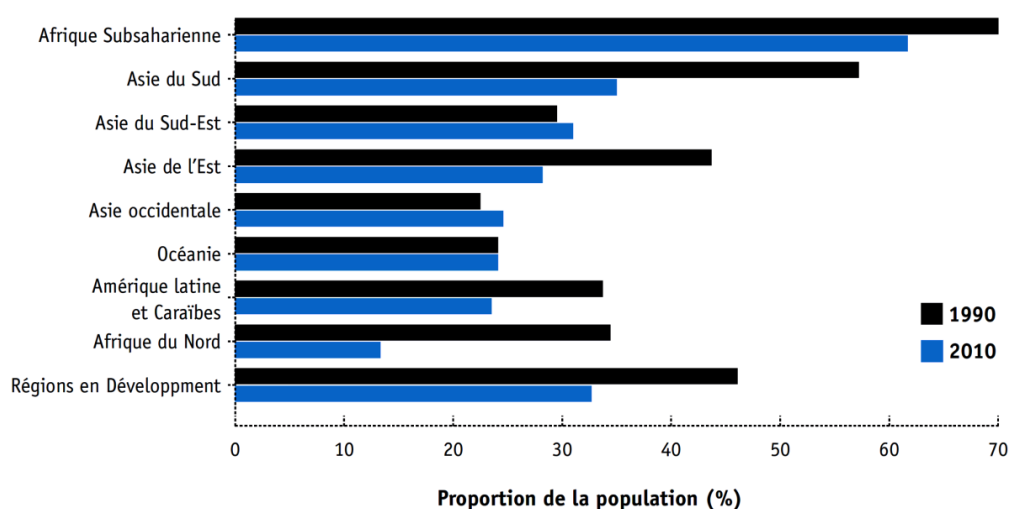


Figure 38 : Proportion de la population urbaine vivant dans des taudis, 1990 et 2010

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

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

Dans certaines régions où il existe une mémoire du risque sismique ou cyclonique intégrée dans l'inconscient collectif et donc dans les pratiques de construction, des réponses ont pu être apportées par les constructions en terre. Par exemple, sur la côte pacifique d'Amérique latine, les civilisations précolombiennes ont élaboré des réponses parasismiques en brique de terre ou en pisé. Autre exemple, à Bam, dans le sud de l'Iran, un terrible séisme a frappé la ville en décembre 2003, certaines constructions traditionnelles en terre bien construites ont remarquablement bien résisté par rapport à celles en béton. On peut considérablement améliorer les constructions en terre face à de tels risques.

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

Fondamentalement, il s'agit d'un produit naturel, disponible à pied d'œuvre, directement utilisable et qui, par conséquent ne supporte pas de frais d'achat, de transformation et de manutention. Sa mise en œuvre ne faisant appel qu'à des techniques élémentaires favorise la pratique de l'autoconstruction et de l'entraide collective et, par conséquent, une réduction très sensible des coûts, Onu-Habitat (2006) [33].

2.2.7. Un déficit chronique.

Partout dans le monde, la question du logement se pose aujourd'hui de manière aiguë. Le dernier de l'ONU- HABITAT révèle que le mal-logement touche en fait 3,4 millions de personnes dont plus d'un million privées de logement personnel et plus d'un million hébergées chez un tiers. La difficulté d'accéder à un logement ne concerne donc pas uniquement les sans domicile fixe mais aussi les classes modestes et une partie des classes moyennes. 56]

La Banque Mondiale dont on connaît le rôle prépondérant depuis des décennies dans le domaine urbain n'a réussi à loger qu'un nombre réduit de personnes dans l'ensemble des Pays en Développement, Les logements produits n'ont en vérité couvert qu'une infime partie des besoins. C'est dire que la capacité de réponse des grands opérateurs bi et multilatéraux n'est absolument pas à la hauteur des besoins (les initiatives d'origine publique en Afrique sub-saharienne n'ont jamais produit plus de 15% du parc au cours des dernières décennies et, en Asie, entre 40% et 95% des ménages suivant les pays se logent tant bien que mal, et souvent très mal, par leurs propres moyens, Le Bris (1993) [37].

La construction en terre, artisanale ou semi-industrielle (bloc de terre comprimée stabilisé, par exemple) génère du travail, crée des emplois, participe à la monétarisation des populations, conditions du développement. Tout en étant une alternative crédible au plan des investissements financiers requis pour la construction de l'habitat et des équipements des communautés, le matériau terre peut garantir l'accès à la dignité d'un logement décent à des populations qui vivent le plus souvent dans des conditions précaires et misérables (abris en matériaux de récupération d'une opulence qui les ignore). En corollaire, cette "alternative terre" peut aussi contribuer à la réduction de la dépendance énergétique et monétaire des pays du Sud vis-à-vis de ceux du Nord, composante majeure de leur dette écrasante et paralysante, Guillaud (2002) [6].

2.2.8. Conclusions.

Le développement durable est désormais un véritable enjeu de société. Il nous oblige à tourner la page de la période de la croissance mono-orientée, marquée par l'esprit du "produire plus", pour ouvrir celle du "produire mieux", et de façon plus équitable.

Un des objectifs du développement durable des territoires interpelle directement le cadre de vie bâti et plus précisément le secteur de la construction.

Le secteur du bâtiment consomme à lui seul 50 % des ressources naturelles, 40 % de l'énergie, 16 % de l'eau, et produit plus de 50 % des déchets. Les bâtiments résidentiels et tertiaires génèrent, au niveau mondial, 25 % des émissions de CO₂.

Ainsi, l'utilisation de la terre comme matériau de construction s'inscrit directement dans une préoccupation plus large, celle du développement durable, dans la lignée des principes de constructions raisonnées, d'architectures raisonnées.

Pour garantir ce "développement durable" –nouveau paradigme du III^e millénaire fondé sur une alliance globale en faveur de la protection de la biodiversité –, n'avons-nous pas l'obligation de protéger et transmettre la mémoire culturelle, véhicule de valeurs et de sens "intangibles", sans laquelle une société ne peut exister ? N'y a-t-il pas une alternative pour conserver notre héritage architectural, expression d'une communauté de valeurs universelles ? L'architecture de terre, présente sur tous les continents, ne pourrait-elle pas être essentielle à la protection et à la transmission de ces "bio et techno-diversités" culturelles des paysages aménagés par l'homme ? Ne pourrait-elle pas offrir une alternative à une transculturation constructive et architecturale homogénéisante qui pourrait bien être ravageuse ? , Guillaud (2002) [6].

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

Le matériau terre peut contribuer à améliorer les conditions d'habitat dans le tiers monde en limitant les coûts et les inconvénients d'une propension à un modernisme souvent discutable. Sur un terrain plus pratique. Enfin, la construction en terre permet de combiner l'utilisation d'une abondante main d'œuvre banale avec l'emploi de personnel semi-qualifié dans le cadre d'un système intégré de formation-production qui pourrait être très attractif pour les jeunes. D'un autre côté, la promotion de la construction en terre ouvre la possibilité d'étendre les programmes de travaux à haute intensité de main d'œuvre à certaines zones urbaines ou suburbaines dans lesquelles le sous-emploi et les problèmes d'habitat se présentent souvent d'une façon plus grave, Doucet (2005) [18].

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

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

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

Une réflexion rationnelle devra être menée sur les acquis de la science qui peuvent être utiles. Finalement, il faudra adapter ces acquis au contexte local si l'on désire qu'ils influencent positivement la tradition constructive, Doucet (2005) [18].

Chapitre 3.

Aperçus généraux, traitement et stabilisation du matériau terre.

3.1. Aperçus généraux.

3.1.1. Introduction.

La réactualisation de l'architecture de terre est une réponse aux défis posés par les problèmes du logement dans les pays du Tiers-Monde. Même si les recherches récentes ont porté la terre au niveau technique des autres matériaux de construction, elle reste d'une mise en œuvre simple, accessible au plus grand nombre, quel que soit le niveau de développement des sociétés, Houben et Guillaud (2006) [7].

La terre crue se révèle imbattable dans un domaine difficile et d'une urgente actualité : la construction respectueuse de l'environnement. Dans la recherche d'une architecture possédant de réelles qualités environnementales, peu énergivore, en ressource illimitée, ne produisant pas de déchets (la terre retourne à la terre), l'architecture de terre crue se situe alors au premier rang.

3.1.2. Diversité architecturale.

Parmi les matériaux locaux disponibles à pied d'œuvre, la terre fut, dès la préhistoire, le matériau privilégié de l'homme. Elle était alors associée au bois et aux végétaux. Son emploi s'affirmait au cours de la protohistoire, dans plusieurs régions favorables à l'implantation des communautés sédentaires. Elle conservera une place essentielle jusqu'à nos jours. L'archéologie et les nombreuses études sur les architectures vernaculaires du monde ne cessent de fournir les preuves de l'emploi permanent de ce matériau qui servait la construction d'établissements humains très divers, des hameaux jusqu'aux villes, Guillaud (2002) [6].

Sur la carte de la figure 39 on localise les régions où sont identifiées les constructions en terre.

Au début des années 1980, la population mondiale vivant dans un habitat en terre est évaluée à 30 %, soit près de 1,5 milliards d'êtres humains. Pour les seules régions en développement, il s'agit de 50 % de la population rurale et d'au moins 20 % de la population urbaine. En Inde, un recensement de 1971 montre que près de 73 % du parc d'habitat, rural et urbain, est construit en terre ; ce sont 67 millions de maisons habitées par 375 millions de personnes. Au Pérou, on observe que 60 % des habitats sont construits en adobe (brique crue moulée) ou en pisé (terre compactée en coffrages). On pourrait multiplier les statistiques pour d'autres régions du monde.



Figure 39 : Carte du monde avec localisation des diverses régions où sont connues des méthodes traditionnelles de construction en terre crue.

Source : Bâtir en terre L. FONTAINE et R. ANGER, 2009)

3.1.4. Origine.

La terre, en tant que matériau, est issue de l'érosion mécanique et chimique de la roche-mère. Cette roche se désagrège en particules minérales de dimensions variables, depuis les cailloux jusqu'aux poudres argileuses, Aedo (2003) [38].

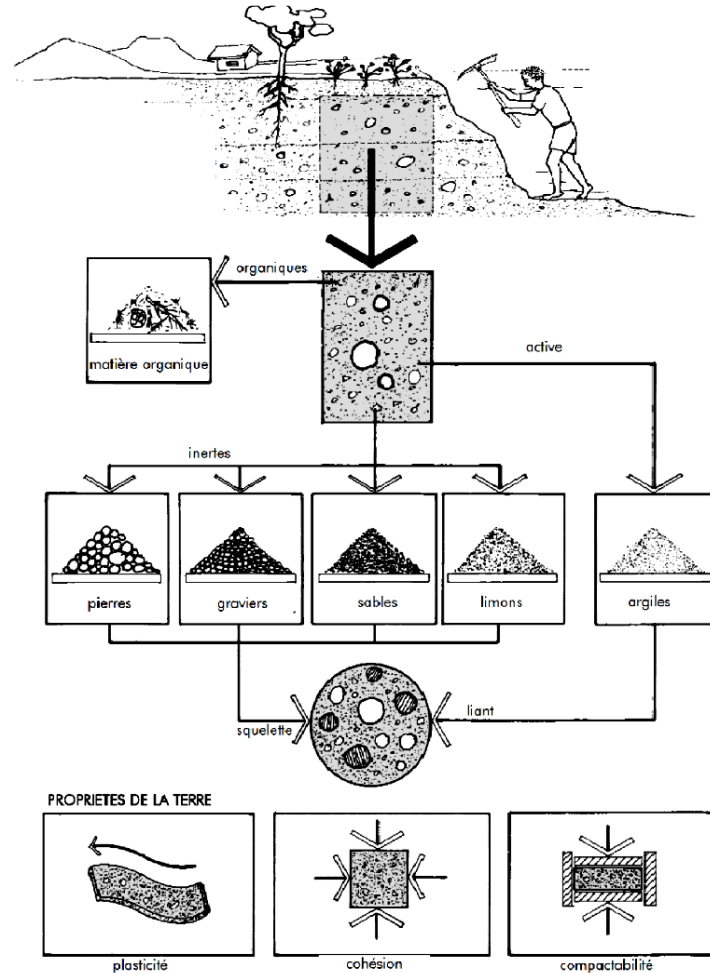


Figure 41 : Origine, propriété de cohésion.

Source : CRATerre.

Il existe différents types de terres selon l'importance des différents composants possibles :

- terre à graviers,
- terre sablonneuse,
- terre limoneuse,
- terre argileuse.

3.1.5. Propriétés.

3.1.5.1. Propriétés fondamentales.

Il convient de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont: Houben et Guillaud (2006) [7].

3.1.5.1.1. La granularité.

Granularité ou texture de la terre qui est la quantité centésimale en cailloux, graviers, sables, limons, argiles et colloïdes. Figure 41.

Encore nommée texture d'une terre, elle représente la teneur centésimale en fractions de grains différents mesurées en pourcentages. La texture d'une terre se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers : cailloux, graviers, sables et limons et par

sédimentométrie pour les fines argileuses. La classification des fractions de grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et référents aux normes (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante:

>V : Cailloux	:	200 mm - 20 mm
V : Graviers	:	20 mm - 2 mm
IV : Sables Grossiers	:	2 mm - 0,2 mm
III : Sables Fins	:	0,2 mm - 0,06 mm
II : Silts	:	0,06 mm - 0,02 mm
IIA : Silts Fins	:	0,02 mm - 0,002 mm
I : Argiles	:	0,002 mm - 0 mm

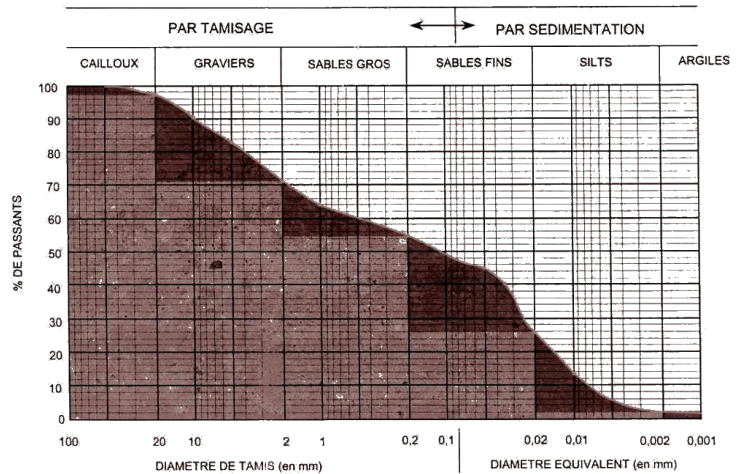


Figure 42 : Texture de la terre.

Source : CRATerre.

La représentation de la granularité d'une terre est une courbe granulométrique portée sur les diagrammes des figures 42 et 43.

3.1.5.1.2. La sédimentométrie.

C'est une épreuve qui complète l'analyse granulométrique de tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments fins inférieurs à 0,08 mm pour lesquels il n'est pas possible d'utiliser des tamis.

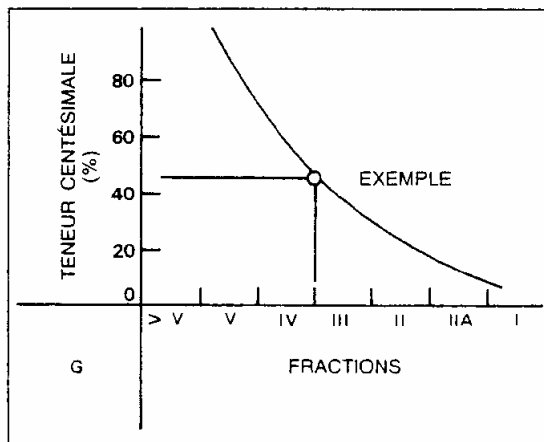


Figure 43 : La représentation de la granularité d'une terre.

Source : CRATerre.

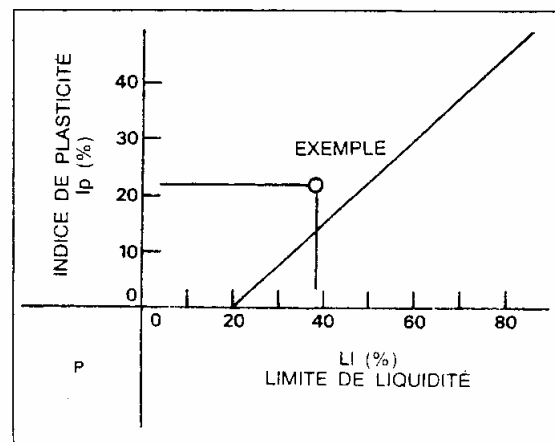


Figure 44 : Les propriétés plastiques d'une terre.

Source : CRATerre.

3.1.5.1.3. Plasticité.

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation, Houben et Guillaud (2006) [7].

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg, c'est-à-dire la consistance d'un sol variant avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbée qui enrobent les grains, Aldea et al. (1999) [39].

Elles s'effectuent sur la fraction "mortier fin" de la terre (ϕ des particules < 0,4 mm).

La quantité d'eau, exprimée en pourcentage, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommée Limite de liquidité (LI). Entre l'état plastique et l'état solide, la transition est nommée Limite de plasticité (Lp). A LI, le sol commence à

manifester une certaine résistance au cisaillement. A L_p , la terre cesse d'être plastique et devient cassante, Houben et Guillaud (2006) [7].

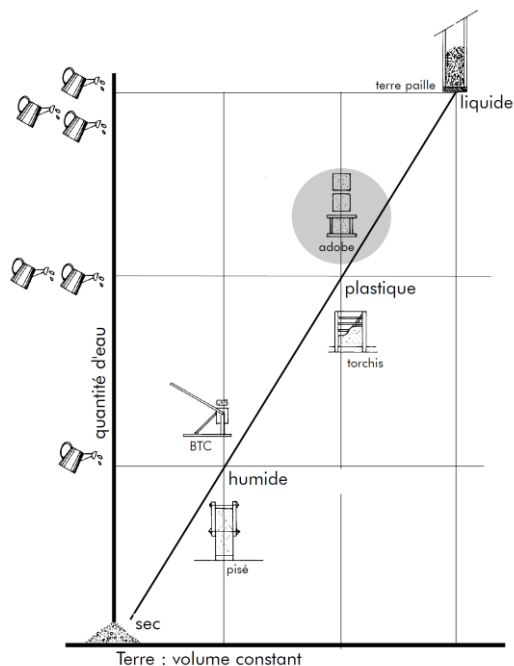


Figure 45 : états hydriques.
Source : CRATerre

L'Indice de plasticité (I_p) égal à $L_I - L_p$ précise la plage de comportement plastique de la terre.

La combinaison de L_I et de L_p précise la sensibilité de la terre aux variations d'humidité. Les propriétés plastiques d'une terre sont représentées sur le diagramme de plasticité, figure 44.

3.1.5.1.4. Compressibilité.

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser compresser au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou T.E.O.).

La compressibilité d'une terre est mesurée par l'Essai Proctor. On la représente sur le diagramme de compressibilité de la figure 45 où sont mis en relation la Teneur en Eau Optimale et la Densité Sèche Optimale, pour une énergie de compression donnée.

3.1.5.1.5. Cohésion.

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. Elle dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $0 < 2$ mm) qui lie les grains inertes entre eux.

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

La cohésion se mesure par l'Essai de Traction à l'état humide ou encore dénommé l'Essai du "8". La cohésion d'une terre est représentée sur un diagramme de résistance à la traction, figure 47.

Pour préparer l'adobe, on utilise le phénomène de la cohésion, qui fonctionne en deux phases : figure 48.

Si l'interpénétration entre les grains est telle qu'elle ne laisse pas de vides, la terre une fois sèche est capable de résister à des forces de compression de l'ordre de 3 MPa, Aedo (2003) [38].

3.1.5.2. Propriétés à caractère chimique.

Elles dépendent de la constitution chimique des composants de la terre. Parmi les éléments, les plus influents du point de vue chimique sont notamment les sels, qu'ils soient solubles ou insolubles.

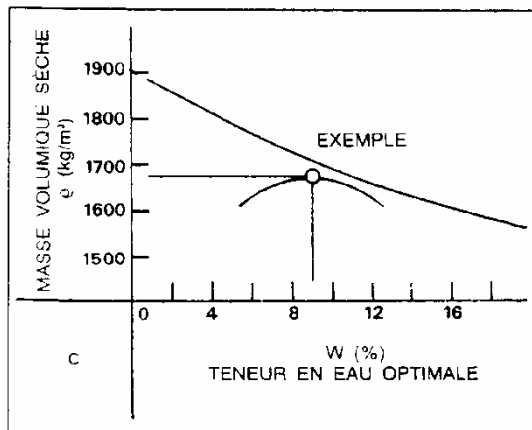


Figure 46 : Diagramme de compressibilité.

Source : CRATerre.

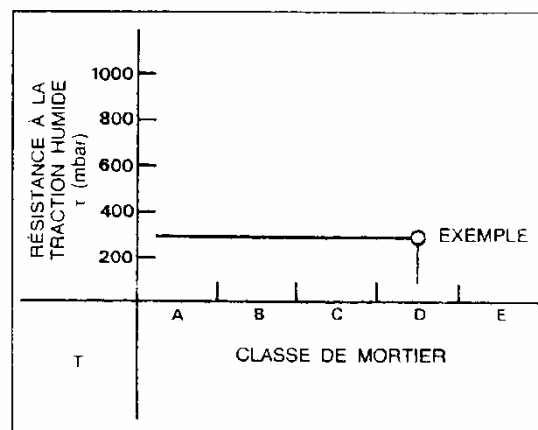


Figure 47 : Diagramme de résistance à la traction.

Source : CRATerre.

Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique des minéraux et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques: ces composants instables, en cours d'évolution chimique et biochimique, peuvent faire évoluer la structure même de la terre en produisant des précipités de différente nature.

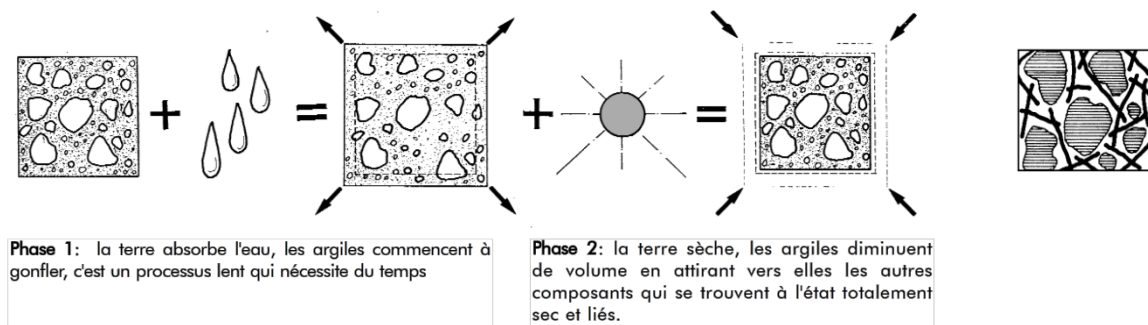


Figure 48 : Préparation de l'adobe.

Source : CRATerre.

3.1.5.3. Propriétés à caractère physique.

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'une terre pour la construction, Houben et Guillaud (2006) [7].

- *Couleur*,
 - *Ameublissement*, aptitude d'une terre à être facilement brisée..
 - *Stabilité structurale*, structure de la terre qui précise sa résistance aux agents de dégradation.
 - *Adhérence*, aptitude d'une terre, pour un certain degré d'humidité, à adhérer aux objets.
 - *Masse volumique apparente* : concerne la terre dans son ensemble et s'exprime en kg/m^3 .
 - *Masse volumique spécifique*: c'est la densité des constituants de la terre.
- Les mélanges amendés en paille sont plus légers , la masse volumique est de 300 à 1300 kg/m^3 .
- *Teneur en eau*: c'est la quantité d'eau contenue dans la terre, elle s'exprime en % pondéral.
 - *Porosité* : le volume des vides de la terre exprimé en % du volume total..
 - *Pouvoir absorbant* : propriété que possède l'argile,.
 - *Potentiel capillaire*: ou pF qui mesure la force de succion de l'eau par la terre et qui s'exprime en g/cm^3 .
 - *Diffusion capillaire*: déplacement de l'eau retenue dans la terre.

- *Perméabilité*: vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure. Elle s'exprime en cm/heure.
- *Chaleur spécifique*: quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1° C. Elle s'exprime en kcal/kg° C .
- *Surface spécifique* : permet d'apprécier l'activité chimique d'échange d'ions. Elle s'exprime en cm²/gramme.
- *Capacité totale d'échange (T)*: quantité maximale de cations de toutes sortes qu'une terre est capable de retenir..
- *Taux de saturation (V)*: c'est le rapport: somme des bases échangeables/capacité totale d'échange. On l'exprime en %: $V = S/T \times 100$..
- *Retrait linéaire*: mesure de réduction de taille d'une masse de terre argileuse façonnée après séchage qui s'exprime souvent en % par rapport à la taille initiale.
- *Résistance sèche* : résistance à la rupture transversale à l'état sec peut atteindre des valeurs très variables selon les argiles.
- *Résistance mécanique* : La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Elle fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression.

3.1.6. Identification.

Pour l'équipe de CRATerre, et suite à sa grande hétérogénéité naturelle, la terre pose des problèmes d'identification. Il est indispensable d'identifier une terre avec précision si l'on veut réaliser une économie sur la production des matériaux en terre crue et sur leur emploi en construction. Pour des travaux simples, un diagnostic d'identification basé sur l'expérience peut suffire mais l'on doit s'assurer de la concordance des signes du diagnostic, Houben et Guillaud (2006) [7].

On se souviendra que la terre est un matériau complexe et que l'identification seule n'assure pas forcément un emploi correct en construction, qu'il est aussi nécessaire de réaliser quelques essais d'évaluation des performances mécaniques du matériau de construction.

Trois étapes sont nécessaires pour identifier et classer une terre:

1^{ère} étape: identification des caractéristiques et des propriétés de base des composants de la terre qui vont influencer le comportement mécanique du matériau ; ce sont des analyses préliminaires de terrain, visuelles ou manuelles.

2^{ème} étape: on rédige une description du sol en consignait les caractéristiques et propriétés de base identifiées grâce aux analyses préliminaires. Cette information descriptive est nécessaire pour différencier la terre analysée par rapport à un groupe descriptif plus large.

3^{ème} étape: si les analyses de terrain n'ont pas permis une classification assez précise, on réalise des analyses en laboratoire ; cette démarche n'est requise que si une identification très précise est nécessaire : terres très particulières, précisions minéralogiques. On pourra alors classer la terre dans un groupe et même un sous-groupe en lui assignant un symbole de classification.

3.1.7. Classification.

3.1.7.1. Classification géotechnique.

La classification géotechnique est la mieux adaptée à la construction en terre. Elle dépend de:

- La granularité (directement)
- La plasticité (directement).
- La compressibilité (indirectement).
- La cohésion (indirectement),
- La quantité de matières organiques.

Elle est indépendante de:

- L'état hydrique de la terre;
- La densité de la terre in situ.
- Les constituants gazeux et liquides.

Tableau 6 : Classification Géotechnique d'après AASHO M 145 (USA)

CLASSIFICATION AASHO	MATÉRIAUX GRANULAIRES (35% ou moins de grains passant au tamis de 0,08mm)							MATÉRIAUX SILTEUX-ARGILEUX (plus de 35% de grains passant au tamis de 0,08 mm)			
	A-1		A-3	A 2				A-4	A-5	A-6	A-7
CLASSIFICATION DES GROUPES	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% DE GRAINS PASSANT LE TAMIS DE 2mm 0,4mm 0,08 mm	15max 30max 50 max	25max 50max -	10max 51max -	35max - -	35max - -	35max - -	35max - -	36max - -	36max - -	36max - -	36max - -
LI Ip	-		-	40max 10max	41 min 10max	40max 11 min	41min 11 min	40max 10max	41min 10max	40max 11 min	41min 11*min
PRINCIPAUX MATÉRIAUX	fragments de pierres, graviers et gros sables		sables fins	graviers et sables silteux ou argileux				sols silteux	sols argileux		
*Pour A-7-5 Pour A-7-6	Ip ≤ LI-30 Ip > L -30		N.P.=Non Plastique								

3.1.7.2. Classification pédologique.

La classification pédologique moderne prend en compte l'ensemble du profil d'un sol et met l'accent sur le processus de formation et d'évolution en s'appuyant sur:

- le degré d'évolution et de différenciation du profil,
- le mode de formation et d'altération des argiles, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.1.8. Caractéristiques.

3.1.8.1. Caractéristiques du matériau.

Lorsque la qualité du matériau terre est évoquée, la question aussitôt posée concerne sa résistance à la compression. On admet en général que la terre est un matériau lourd peu résistant à la compression.. La terre peut être considérée comme un béton maigre. La figure49 donne une représentation sur la performance des matériaux de construction à base de terre.

En poussant la comparaison avec d'autres matériaux, on peut dire que:

- Les produits en terre les plus médiocres sont peu résistants pour un poids spécifique très supérieur à celui des matériaux minéraux classiques.
- Sur toute une plage de résistance, les matériaux en terre sont comparables aux matériaux minéraux classiques.
 - La terre est capable de très hautes performances. Des études de l'I.C.A.M. de Lille (France) montrent que des produits de terre stabilisée à la chaux traités à l'autoclave (250° C à 16 atm) résistent à 900 bars à la compression. Avec un traitement à l'étuve sèche (350° C) la résistance bondit jusqu'à 2 000 bars. En effet divers procédés (compression, stabilisation, étuvage, etc.) permettent d'obtenir de très hautes résistances. Mais a-t-on besoin de telles performances? Pour des bâtiments de plain-pied ou en R + 1, la descente des charges est d'environ 1 à 2 bars. Il n'est donc pas utile d'employer des matériaux résistants à 100 bars ou plus.

Néanmoins, 1 bar ne suffit pas car d'autres problèmes s'ajoutent au seul rapport de performance d'une brique et d'une construction. Aussi admet-on un coefficient de sécurité de 20 à 30. Figure 50.

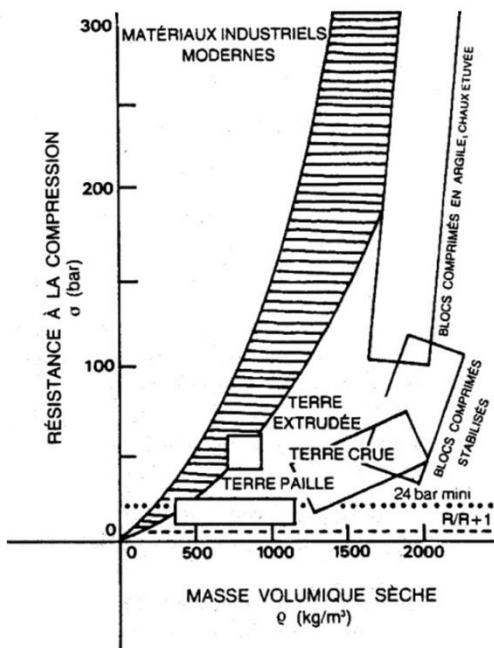


Figure 49 : Performance des matériaux de construction.
Source : CRATerre.

RÉSISTANCE A LA COMPRESSION	
1	RÉSISTANCE DEMANDÉE PAR DESCENTE DES CHARGES. 1 bar
	—maisons à 1 niveau
2	COEFFICIENT DE SÉCURITÉ x3
	—dispersion dans qualité de production
	—dispersion dans qualité d'exécution
	—accroissement accidentel des surcharges
3	COEFFICIENT DE RÉDUCTION x4
	—nature matériau
	—résistance du mortier
	—élançement du mur
	—mode de chargement
4	COEFFICIENT DE SATURATION x2
	—rapport résistance humide / résistance à sec
	TOTAL x 24
	σ 28 = 24 bar

Figure 50 : Exemple de résistance à la compression pour une maison à 1 niveau.
Source : CRATerre.

20 à 25 bars donnent une grande marge de sécurité aujourd'hui requise par la plupart des normes et lorsque la fabrication des briques est bien contrôlée, 10 à 15 bars sont un minimum absolu garantissant une bonne résistance, notamment à la manipulation, Houben et Guillaud (2006) [7].

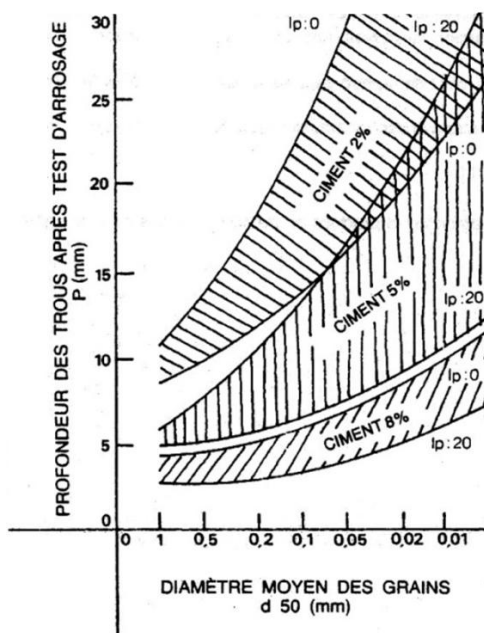


Figure 51 : Durabilité des blocs comprimés en fonction de la résistance, plasticité et texture.
Source : CRATerre.

MATÉRIAUX MODERNES SOPHISTIQUÉS	→	→
TERRE	→	→
	DURABILITÉ PRÉDITE	DURABILITÉ RÉELLE

Figure 52 : Durabilité des matériaux.
Source : CRATerre.

La deuxième qualité exigée du matériau terre est sa résistance à l'eau. Les essais classiques appliqués à d'autres matériaux (mouillage-séchage, aspersion, immersion totale ou partielle, gel-dégel, etc.) sont adoptés pour le matériau terre sans avoir été adaptés. Les résultats obtenus en laboratoire ne concordent pas toujours avec ceux obtenus dans des conditions d'exploitation réelles. Ces résultats concernent des échantillons isolés et non des murs ou des constructions en grandeur réelle.

La figure 51 montre un diagramme sur la durabilité des blocs comprimés, par l'essai d'arrosage, en fonction de la résistance, de la plasticité et de la texture du matériau.

Comparativement aux matériaux dits modernes, la durabilité réelle du matériau terre est distinctement supérieure, figure 52.

Le contexte actuel oblige à quantifier les caractéristiques de la terre. Si la valeur des chiffres est moindre pour des petites constructions individuelles, elle demeure la référence pour les organismes de décision, de financement et d'assurance, pour les architectes et les entrepreneurs. Il convient de se garder d'interprétations trop hâtives à partir de ces seuls résultats théoriques qui négligent la réalité, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.1.8.2. Caractéristiques mécaniques.

Les différentes caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7 : caractéristiques mécaniques du matériau terre. Source : CRATerre.

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES				I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDÉES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
			A	B	C	D	1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SEC À 28 JOURS *(+40% après 1 an, +50% après 2 ans)	σ_{28}	bar	> 120	50 120	20 50	ENVIR. 20	D *	C *	A *	D	C	D *	C *	B				
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION HUMIDE À 28 JOURS (24h dans l'eau)	U	bar	> 20	10 20	5 10	0 5	D	A	A	D		D	A	A				
RÉSISTANCE À LA TRACTION SEC À 28 JOURS (essai brésilien)	T	bar	> 20	10 20	5 10	0 5		B				B						
RÉSISTANCE À LA TRACTION SEC À 28 JOURS (sur baratte)	T	bar	> 20	10 20	5 10	0 5	C					C						
RÉSISTANCE À LA FLEXION SEC À 28 JOURS	T 28	bar	> 20	10 20	5 10	ENVIR. 5	C					C						
RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT SEC À 28 JOURS	T 28	bar	> 20	10 20	5 10	ENVIR. 5	D					D						
COEFFICIENT DE POISSON	μ		0 0,15	0,15 0,35	0,35 0,50	> 0,5		B				B						
MODULE DE YOUNG	E	bar		7.000 70.000				B			B	B						
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	P	Kg/m ³	> 2.200	1.700 2.200	1.200 1.700	< 1.200	B	B	A	C	C	B	B	D				
UNIFORMITÉ DES DIMENSIONS (produit fini individuel)			EXCEL.	BON	MOYEN	FAIBLE	B	B	A	C	C	D	D	A				

3.1.8.3. Caractéristiques hydriques.

Les différentes caractéristiques hydriques sont résumées dans le tableau 8.

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière.

Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art, Houben et Guillaud (2006) [7].

Tableau 8 : caractéristiques hydriques du matériau terre. Source : CRATerre.

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES				I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDEE	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUTES	VIII BLOCS CIMENT
			A	B	C	D	1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
GONFLEMENT (immersion jusqu'à saturation)		mm/m	0 0,5	0,5 1	1 2	> 2							C/D					
RETRAIT (séchage artificiel jusqu'à stabilisation)		mm/m	0 1	1 2	2 5	> 5							C					
RETRAIT DE SÉCHAGE		mm/m	< 0,2	0,2 1	1 2	> 1	B	B		B	B	C	C					
PERMÉABILITÉ		mm/sec		1 X 10 ⁻⁵				B				B						
ABSORPTION D'EAU PAR LA FACE À ENDUIRE		% (POIDS)	0 5	5 10	10 20	> 20					A		A					
ABSORPTION TOTALE		Kg/m ³	0 7,5	5 10	10 20	> 20		C	A				C	C				
SUSCEPTIBILITÉ À LA GÉLIVITÉ			PAS	PEU	SENSI- BLÉ	TRÈS SENS.	D	B	A	D	B	C	B	A/B				
SUSCEPTIBILITÉ AUX EFFLORESCENCES			TRÈS PEU	PEU	SENSI- BLE	TRÈS SENS.	B	B	A			B	B					
DURABILITÉ SOUS EXPOSITION AUX INTEMPÉRIES (simple mur sans protection)			EXCEL- LENT	BON	MOYEN	FAIBLE	D	B	A	D	B	C	A	B				

- 1) Comprimé à 20 bars.
- 2) Stabilisé à 8 % ciment Comprimé à 20-40 bars.
- 3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux Comprimé à 300 bars Etuvé à 95 % H.R. sous pression à 90° C.
- 4) Coup de sable.
- 5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume.
- 6) Comprimé à 90-95 % Proctor Standard
- 7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment.
- 8) Produits creux de 1100 kg/m³ Stabilisé au ciment 15 % min.
- 9) Double face sur claie de branches.
- 10) 600 à 800 kg/m³.
- 11) Indiquer valeurs dans votre région.
- 12) Indiquer valeurs dans votre région.

3.2. Traitement et stabilisation.

3.2.1. Réflexions de base.

Le matériau terre et la construction qui l'emploie pâtissent d'une mauvaise image. On leur reproche notamment leur faible durabilité aux intempéries. Cela est vrai pour des constructions en terre élémentaires dont la mise en œuvre est peu soignée. Cela est moins vrai pour des constructions réalisées avec des matériaux de qualité et dont la mise en œuvre répond aux règles de l'art spécifiques au matériau terre, assurant notamment sa protection.

La terre doit désormais fournir des constructions qui démontrent leur qualité, sans contestation possible. Cet objectif sera couvert grâce à une amélioration de la qualité du matériau lui-même et des techniques de mise en œuvre mais aussi grâce à une large diffusion de techniques qui réduiront manifestement la sensibilité des surfaces en terre à l'eau. A l'égal des surfaces en autres matériaux modernes les surfaces en terre doivent pouvoir recevoir des revêtements de protection répondant aux spécifications actuelles des parements. Car l'image de qualité de la terre passera par son assimilation à un matériau résolument moderne.

La nécessité de protection du matériau terre, bien avant d'être située au niveau des revêtements, demeure tributaire de la qualité du matériau, de la conception et de la mise en œuvre de la construction. Entre la stabilisation du matériau et l'emploi systématique d'enduits non érodables - orientations les plus fréquemment développées -, le registre de solutions de protection de surface est assez large pour assurer une durabilité, sans recourir à des solutions "miracle". Car aujourd'hui, sur de très nombreuses constructions observées par les experts, la stabilisation et les enduits sont encore très rarement satisfaisants et n'apportent pas toujours des améliorations durables, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.1.1. Considérations générales.

Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié. On dénombre à ce jour plus d'une centaine de produits employés pour la stabilisation des sols ou des terres à bâtir. Ces stabilisants peuvent être employés aussi bien dans la masse des murs que dans les enduits.. Les méthodes de stabilisation les plus connues et les plus pratiquées sont: la densification des terres par compression, l'armature de fibres, l'ajout de ciment, de chaux ou de bitume. Beaucoup d'autres produits existent, sont employés ou proposés, mais ils n'ont reçu que très peu d'attention et leurs mécanismes ainsi que leur efficacité sont mal connus.

3.2.1.2. Nécessite d'une protection.

Tout mur de terre doit pouvoir résister à l'humidité et à l'action directe de l'eau. Cette résistance à l'eau d'un mur de terre est avant toute chose tributaire de la qualité de la terre elle-même, de sa texture et de sa structure, de sa porosité. Elle peut être améliorée par l'apport d'un stabilisant - sous des conditions contrôlées - ou par l'emploi de revêtements protecteurs - compatibles avec le matériau.

La protection contre la pluie peut être assurée par les seules dispositions architecturales. Par contre, dans les régions où le climat est caractérisé par une pluviométrie élevée et par des pluies battantes d'inclinaison quasiment horizontale (tropiques) même occasionnelles, les revêtements protecteurs sont indispensables.

Lorsque l'on prévoit la réalisation d'un enduit, les cailloux seront ramenés en parement extérieur et le mur pourra être moins damé pour obtenir une structure légèrement ouverte. Après une première saison d'exposition au climat, les cailloux seront apparents et faciliteront l'accrochage de l'enduit Dans ce cas, le mur côté intérieur et dans son épaisseur sera fortement damé pour assurer sa résistance.

Il convient surtout de protéger les constructions contre le vent car celui-ci, associé à la pluie, peut être particulièrement corrosif, même à l'occasion de tempêtes très ponctuelles et de courte durée. Enfin, un revêtement non approprié au matériau terre ou inefficace parce que mal réalisé peut être plus néfaste que l'absence de revêtement.

3.2.1.3. Fonctions et exigences.

Les principales fonctions d'un revêtement protecteur sont la protection du mur aux intempéries et aux chocs, la prolongation de la durée de vie des murs, l'amélioration de l'aspect des murs en dissimulant les imperfections du gros œuvre et en donnant une teinte agréable - sans être pour autant un cache-misère-, l'amélioration du confort thermique. Enfin, ces fonctions ne doivent pas éluder l'exigence d'économie d'un revêtement.

Un bon revêtement protecteur doit être d'une adhérence au support suffisante sans provoquer d'arrachement de celui-ci, souple pour absorber sans fissuration les déformations éventuelles du support, imperméable à la pluie, perméable à l'eau et à la vapeur d'eau interne au mur, résistant au gel et enfin, d'aspect de teinte et de texture compatible avec les environnements locaux, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.2. La Stabilisation.

3.2.2.1. Définition.

Stabiliser la terre, c'est lui donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. C'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière.

3.2.2.2. Objectifs.

On ne peut intervenir que sur deux caractéristiques de la terre elle-même: sa texture et sa structure, Houben et Guillaud (2006) [7].

On dispose de trois possibilités d'intervention sur la texture et la structure :

- Réduire le volume des vides entre les particules: agir sur la porosité.
- Colmater les vides qui ne peuvent être supprimés : agir sur la perméabilité.
- Améliorer les Mens entre les particules: agir sur la résistance mécanique.

Selon CRATerre, les principaux objectifs poursuivis sont:

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : augmenter la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement
- Obtenir une meilleure cohésion.
- Réduire e la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau.
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser.

3.2.2.3. Principe de stabilisation.

3.2.2.3.1. Procédés.

On ombre trois procédés de stabilisation :

1. Stabilisation mécanique : c'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa résistance mécanique et sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.
2. Stabilisation physique : les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes.
3. Stabilisation chimique : la terre est ajoutée d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules et le matériau ou le produit ajouté, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules.

Cette technique a, sans cesse, progressé depuis que sont mieux connues les forces d'interaction entre les particules de sols et l'eau, Ghomari (1989) [40].

3.2.2.3.2. Moyens de stabilisation.

Pour des terres remaniées, les procédés de stabilisation sont très nombreux et la littérature a produit divers systèmes de classification. Les stabilisants peuvent être classés selon leur nature: végétale ou animale, minérale ou synthétique, etc., ou bien selon leur forme : en poudre, en fibres, en plaquettes, en pâte, liquide, etc.







Selon CRATerre, on peut simplifier la classification en dénombrant six principaux modes de stabilisation, résumés dans le tableau 9.

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

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique, Houben et Guillaud (2006) [7].

Tableau 9 : Principaux modes de stabilisation.

Source : CRATerre

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE		PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE
SANS APPORT DE STABILISANT			MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES	
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE			
		FIBRES		ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
	STABILISANTS PHYSICO CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDRO-PHOBANTS	CHIMIQUE	IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
				HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU	

3.2.3. Densification par compression ou Stabilisation physique.

C'est probablement le plus simple et certainement le plus ancestral de tous les procédés de stabilisation, il s'agit là du compactage au, moyen duquel la terre humide foisonnée et convertie en un système dense ayant des caractéristiques de stabilité et de durabilité plus grande, Ghomari (1989) [40].

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

du compactage, il y a réarrangement des grains offrant au système un moindre volume des vides. Figure 53, Ghomari (1989) [40].



Avant



Après

Figure 53 : Structure argilo-limoneuse avant et après humidification.

3.2.3.1. Méthodes de compression.

Il en existe principalement quatre :

La compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact, et la compression par pétrissage.

A chacune de ces méthodes correspond une teneur en eau optimale (T.E.O.) pour laquelle on obtient une masse volumique sèche optimale.

Le diagramme de la figure 54 montre l'influence du mode de compression sur le taux de vide.

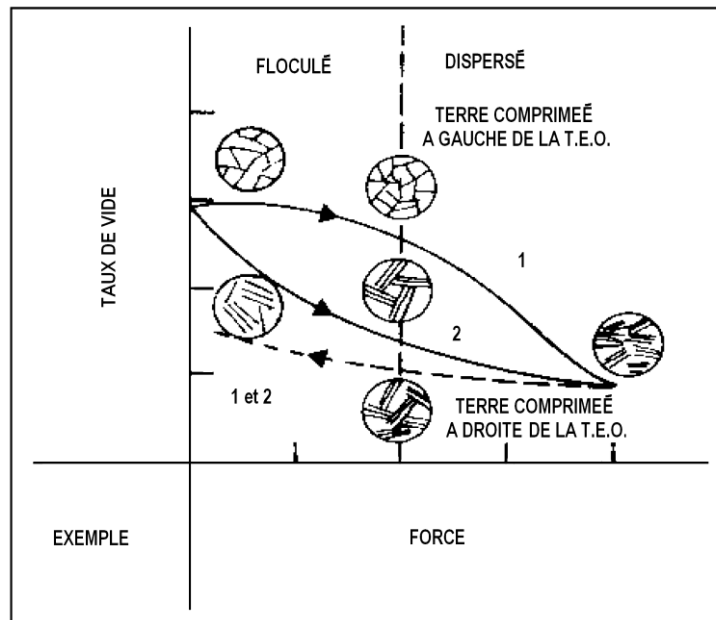


Figure 54 : Influence du mode de compression sur le taux de vide.

Source : CRATerre

Chaque méthode de compression présente des avantages et des défauts. Par exemple, le pétrissage favorise une bonne distribution des pores et une homogénéité de leur grosseur dans le produit final, contribuant à réduire sa perméabilité. Mais l'on constate que la résistance au cisaillement est moindre quand on comprime du côté humide que celle obtenue avec les autres méthodes de compression. Cette résistance est également tributaire de la texture de la terre, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.3.2. Paramètres du compactage.

1. *Energie de compactage*: quels que soient le type de terre et la méthode de compression, une plus grande énergie de compactage diminue la T.E.O. et augmente la masse volumique sèche. Mais de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des effets néfastes: laminage des blocs.
2. *Texture de la terre* : les granularités étroites ne donnent pas de fortes compacités. Par contre, les granularités étalées donnent des courbes de compactage à maxima accentués.

3.2.3.3. Effets de compactage.

On observe deux types principaux de structure des argiles selon l'importance des forces de répulsion ou d'attraction :

1. *Structure dispersée* : les plaquettes d'argile sont distantes du fait de forces de répulsion prédominantes. Elles ont tendance à être parallèles. L'état dispersé correspond à des teneurs en eau élevées, à droite de l'optimum, sur la courbe de compactage.

Le diagramme de la figure 55 montre l'influence de la teneur en eau de moulage sur la masse volumique sèche.

2. *Structure floculée* : les plaquettes d'argile se rapprochent et forment entre elles des angles importants du fait de forces d'attraction prédominantes. Pour permettre une bonne compacité alors que les forces de répulsion facilitent une mise en ordre des particules. Pour un compactage effectué dans de bonnes conditions, les effets sont une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement d'eau en ambiance humide, ainsi qu'une augmentation des résistances mécaniques initiales et à long terme du matériau :

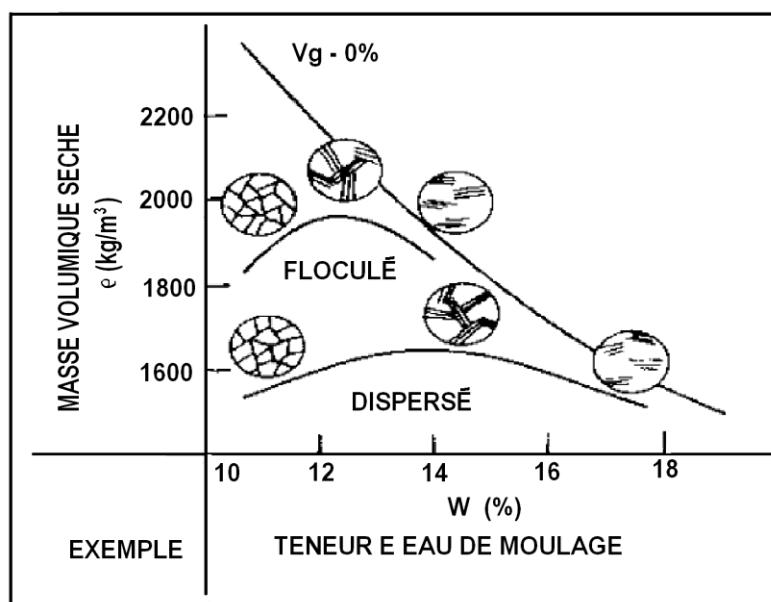


Figure 55 : Influence de la teneur en eau de moulage sur la masse volumique sèche.

Source : CRATerre

- Compressibilité :

Tant que la contrainte exercée n'excède pas une certaine valeur, un matériau à structure floculée est moins compressible qu'un même matériau à structure dispersée, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Absorption d'eau et gonflement en ambiance humide :

Ils sont plus importants pour un matériau compacté à l'état floculé et moindre pour un état dispersé.

- Compactage trop poussé :

Quand la terre approche un état de saturation, l'incompressibilité de l'eau rend illusoire, l'action d'un surcroît de compactage qui n'a alors plus d'effet sur l'arrangement des particules.

3.2.4. Densification par gradation.

3.2.4.1. Texture recherchée.

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

Pour des grains sphériques, il est possible de calculer la proportion relative de chaque fraction de grains de diamètre différent s'arrangeant en un milieu le plus dense possible. On emploie la formule de Fuller :

$$p=100 (d/D)^n.$$

p = proportion de grains d'un \varnothing donné.

d = \varnothing des grains pour la proportion p visée. D = \varnothing du grain le plus gros.

n = \varnothing coefficient de gradation.

n = 0,5 pour des grains tous sphériques.

Mais dans la terre, si les sables et les gravés sont éventuellement d'un \varnothing presque sphérique, les argiles s'en éloignent. Aussi, dans le domaine des travaux routiers où l'on emploie souvent des terres sableuses, on corrige le manque de sphéricité par un n à 0,33. En construction en terre, on prend n = 0,20 à 0,25. , Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.4.2. Correction de texture.

Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire, soit par apport de fractions faisant défaut, soit par exclusion de fractions en excès, Houben et Guillaud (2006) [7].

Figure ci-dessous.

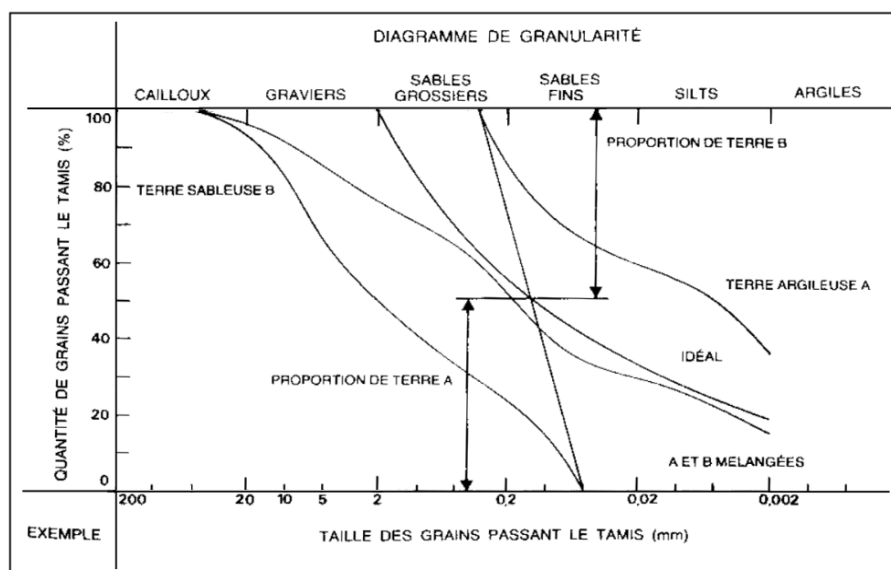


Figure 56 : correction de granularité de terre par mélange.

Source : CRATerre.

- Terre à texture discontinue :

La texture discontinue d'une terre est caractérisée sur la courbe d'analyse granulométrique. On peut en effet observer deux tracés caractéristiques.

- La courbe est plate pour une fraction de grains déterminée.
- La courbe décrit une ascension très nette pour une fraction de grains déterminée.

- Terre très sableuse ou très argileuse :

Si les terres disponibles sont très différentes et particulièrement sableuses et argileuses, il sera nécessaire de les mélanger, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.5. Les Matériaux de stabilisation.

3.2.5.1. Fibres.

- Rôles des fibres :

Les fibres permettent au matériau terre de supporter d'énormes contraintes. Figure 57.

- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres.

Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.

- Alléger le matériau. Le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.
- Augmenter la résistance à la traction ; sans doute le plus grand intérêt des fibres, Houben et Guillaud (2006) [7].

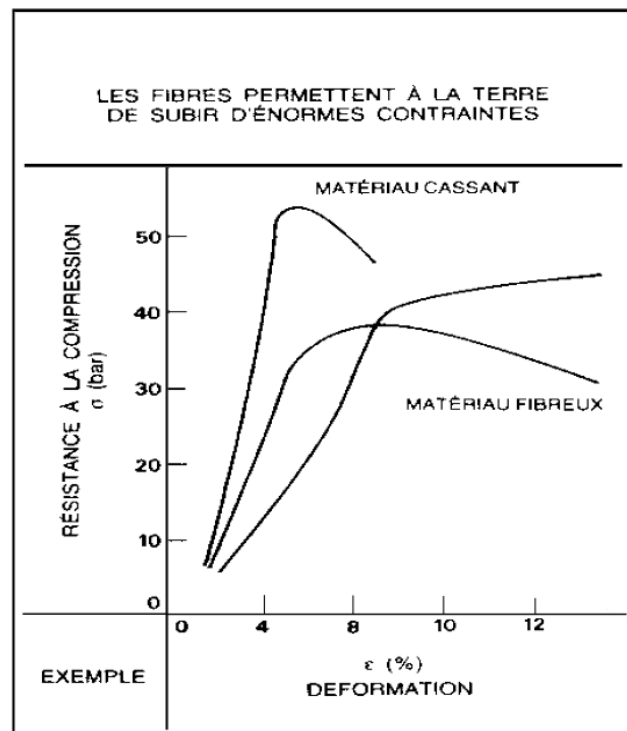


Figure 57 : Effet de la déformation sur la résistance à la compression.

Source : CRATerre.

- Mécanismes :

Les matériaux de terre renforcés de fibres possèdent un degré élevé de résistance à la fissuration et à la propagation des fissures. En effet, au niveau d'un plan de clivage potentiel, les fibres s'opposent au clivage au fur et à mesure de l'augmentation de la contrainte.

Quelques recherches laissent supposer qu'un pourrissement préalable de la paille dans la terre, durant quelques semaines, produit de l'acide lactique qui agit secondairement sur l'efficacité de la stabilisation.

- Aspects pratiques :

La résistance des blocs armés dépend de la quantité de fibres ajoutées mais il ya une quantité optimale à ne pas dépasser. On commence à obtenir des résultats satisfaisants à partir d'un dosage à 4% en volume. Des quantités de 20 à 30 kg/m³ sont très courantes. La paille est de préférence coupée en brins de 4 à 6cm, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Variétés de fibres.

- Fibres végétales: paille de toutes espèces,
- Fibres animales: poils et crins du bétail.
- Fibres synthétiques : cellophane, acier, fibres de verre.

3.2.5.2. Ciment.

Les premières tentatives de stabilisation au ciment, dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A. en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne. L'hydratation, pour une quantité d'eau suffisante, fait apparaître un certain nombre de constituants hydratés (portlandite, ettringite, sulfo-aluminate de chaux, silicate de calcium hydraté, etc...) qui offrent au mélange une résistance croissante en fonction du temps.

Il reste sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le BTC. L'ajout de ciment, figure 58, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée, entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et graviers comme dans le béton ou dans un mortier, sable-ciment.

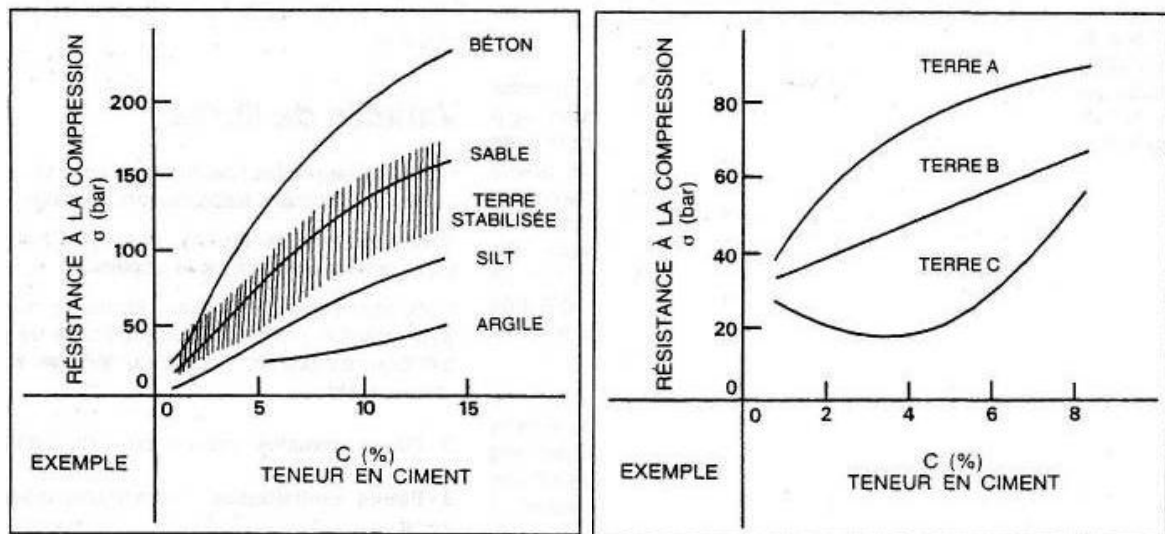


Figure 58 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression.

Source : CRAterre.

- Mécanismes de stabilisation.

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons:

- Réaction avec lui-même: formation d'un mortier de ciment pur hydraté; réaction avec le squelette sableux: mécanisme classique du mortier.
- Réaction avec l'argile selon trois phases :

1 - L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile.

La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.

2 - Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.

3 - Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

On obtient en fait trois structures mêlées:

- une matrice inerte sableuse liée au ciment;
- une matrice d'argile stabilisée
- une matrice de terre non stabilisée.

La stabilisation n'affecte pas tous les agrégats.

Une matrice stabilisée enveloppe des agglomérats composites de sable et d'argile, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Efficacité et dosage.

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. A l'état plastique, il faudrait 50% de ciment en plus pour une même efficacité. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des silts et des argiles.

Pour la terre, les dosages dépendent de sa texture et de sa structure, du mode de mise en œuvre. 6 à 12% donnent de bons résultats, certaines terres n'exigent que 3% et d'autres, au même dosage, se comportent moins bien que sans ciment.

En général, il faut au moins 6% de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. La résistance en compression reste très dépendante du dosage, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Paramètres d'efficacité.

- *Terre*: presque toutes les terres sont stabilisables au ciment.
- *Matières organiques*: elles sont reconnues comme nocives, en règle générale, une teneur en matières organiques supérieure à 1 % constitue un risque.
- *Sulfates* : ils sont très néfastes: destruction du ciment durci à l'intérieur de la terre-ciment, augmentation de la sensibilité à l'humidité des argiles.
- *Oxydes et hydroxydes métalliques* : essentiellement des oxydes de fer et d'aluminium dont la teneur est rarement supérieure à 5 % et qui n'ont alors que peu d'effet.
- *Eau* : On rejettera en principe les eaux chargées en matières organiques et les eaux salées: risques d'efflorescences. Les eaux riches en sulfates peuvent être défavorables.

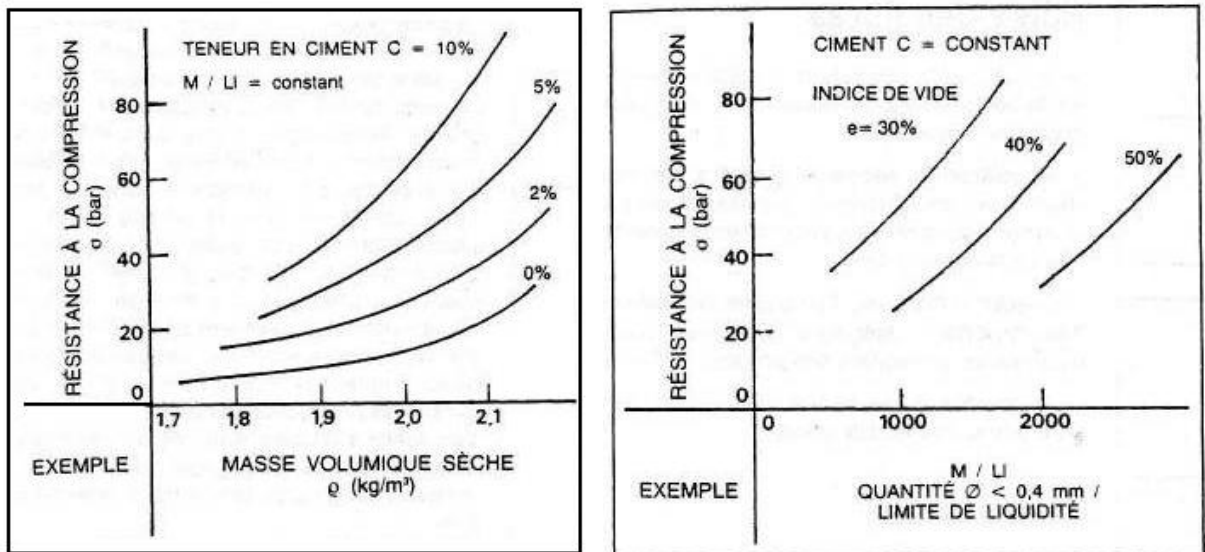


Figure 59 : Influence de la masse volumique et de la limite de liquidité sur la résistance mécanique du produit fini

- Effets.

- *Masse volumique sèche*: elle diminue pour les terres qui se compactent bien; elle augmente pour les terres qui se compactent médiocrement, Houben et Guillaud (2006) [7].
- *Résistance à la compression sèche et humide*: l'influence du ciment sur ce paramètre est fonction de la masse volumique sèche, de l'indice des vides et de M (proportion d'éléments de $0 < 0,4$ mm en %).
- *Résistance à la traction* : elle varie de 1/5 à parfois 1 / 10 de la résistance à la compression.
- *Variations dimensionnelles*: la stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait au séchage et du gonflement à l'humidification, Houben et Guillaud (2006) [7].
- *Erosion* : amélioration de la résistance des terres à l'érosion sous l'action de la pluie surtout lorsque la terre contient de gros grains.

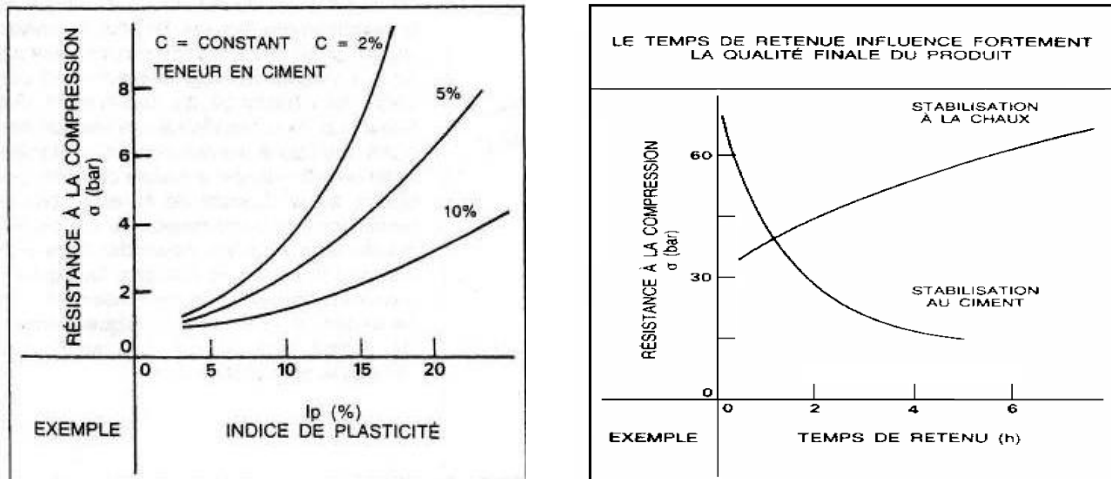


Figure 60 : Influence de l'indice de plasticité et le temps de retenu sur la résistance mécanique du produit

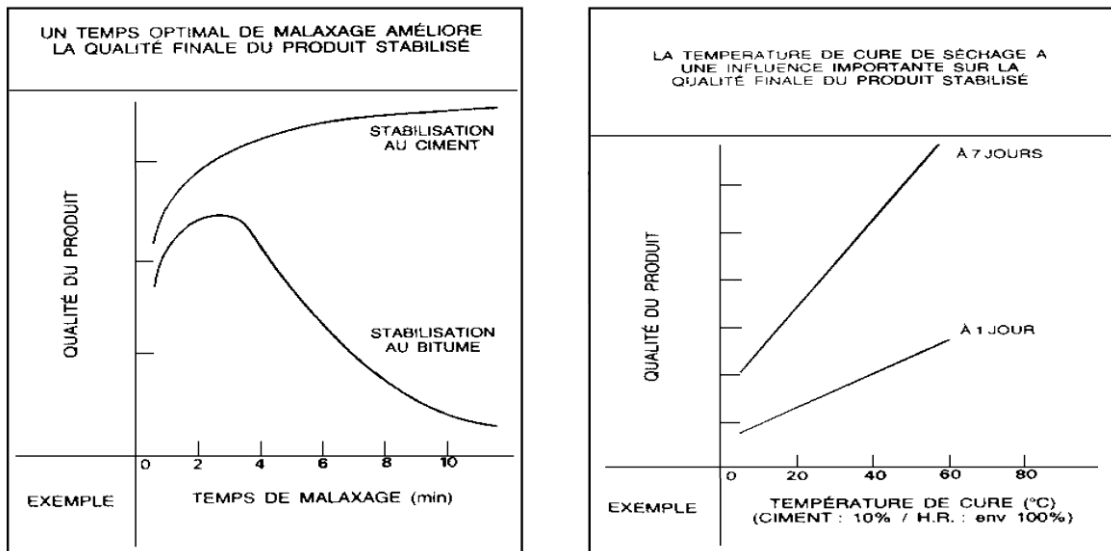


Figure 61 : Influence du temps de malaxage et la température de cure sur la qualité du produit fini.

- Mise en œuvre.

- *Pulvérisation*: La qualité d'une stabilisation au ciment exige un mélange intime des constituants.
- *Malaxage*: La bonne répartition du ciment et l'homogénéité du matériau stabilisé sont conditionnés par le malaxage
- *Moulage, mise en forme*: Le matériau sera compacté juste après le malaxage, avant le début de la prise du ciment et à une teneur en eau contrôlée, proche de l'optimum.
- *Séchage*: La résistance d'une terre ciment croît avec l'âge. Pendant cette période, le matériau sera maintenu en ambiance humide, à l'abri du soleil et en prenant garde au vent. La durée de cette cure de séchage humide augmentera la résistance du matériau.

3.2.5.3. Chaux.

- Généralités

Il semble que l'emploi systématique de la chaux pour la stabilisation des sols ait été seulement développé à partir de 1920, aux U.S.A.

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

Ainsi, depuis les années soixante du siècle passé, on redécouvre les bienfaits de la chaux pour la construction, avec le souci de rénovation du bâti ancien.

La chaux possède des caractéristiques physiques et techniques garantissant une construction saine : qui permet l'évaporation, Guillaud (2010) [41].

- son principal avantage est sa perméabilité à la vapeur d'eau de l'humidité contenue dans les murs. L'évaporation est favorisée par la chaleur du soleil et par le vent sur les façades extérieures ;
- souple et élastique, elle limite l'apparition de fissures dans les enduits ;
- elle résiste bien au gel (grâce à sa structure poreuse, l'eau peut se dilater) et aux agents atmosphériques agressifs ;
- elle a un bon pouvoir isolant (plus encore si on incorpore dans le mortier de chaux des particules de lin ou de chanvre) ;
- elle possède des propriétés antiseptiques souvent mises à profit dans les étables (on pratiquait le chaulage des murs pour les protéger des salissures, moisissures, larves d'insectes et bactéries) ;
- hygroscopique, elle participe à réguler les variations d'humidité de l'air intérieur ;
- un mortier de chaux dure des siècles, Guillaud (2010) [41].

- Mécanismes de stabilisation

Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base:

- *Absorption d'eau* : en présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur: environ 300kcal/kg de chaux vive.
- *Echange cationique*: lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations: les ions de calcium se substituent aux cations échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre, Houben et Guillaud (2006) [7].
- *Floculation et agglomération* : du fait de l'échange de cations et de l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre flocculent et s'agglomèrent. Il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.
- *Carbonatation*: la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.
- *Réaction pouzzolanique*: c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entre eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Efficacité et dosage

Pour un ajout à la terre de 1 % de chaux vive, la réaction exothermique d'hydratation assèche la terre en évacuant environ 0,5 à 1 % d'eau.

2 à 3% de chaux ajoutée provoquent immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un présage des mottes ; cette réaction est appelée point de fixation de la chaux. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6% à 12%, mais on notera que pour la chaux, il existe une quantité optimale pour chaque terre.

- Paramètres d'efficacité.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres argileuses (30 à 40% voire 70 %). Les matières organiques elles vont un peu réduire les effets de la stabilisation mais la chaux est capable d'en neutraliser une partie, Houben et Guillaud (2006) [7].

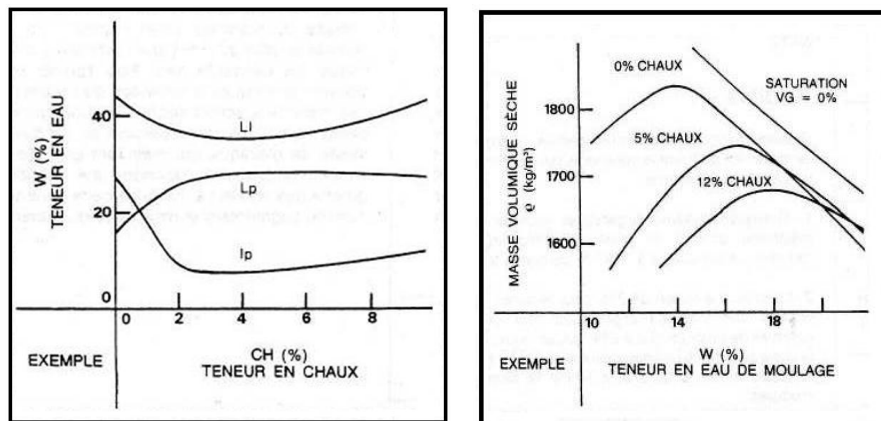


Figure 62 : Influence de la teneur en chaux sur la teneur en eau.

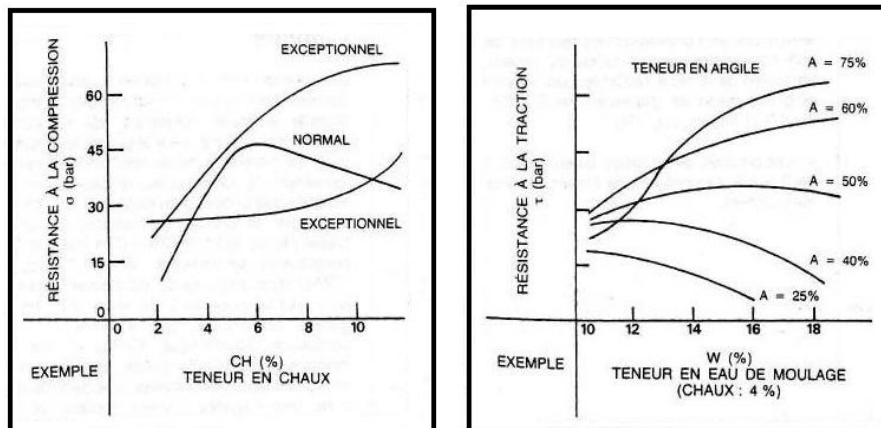


Figure 63 : Influence de la teneur en chaux sur la résistance mécanique du produit.

- Effets.

- *Masse volumique sèche*: pour une compression donnée, la chaux réduit le poids max. et élève la T.E.O., du fait de la floculation.
- *Résistance à la compression*: le dosage optimal de chaux doit être précisé par des essais préalables. R_c tend à croître avec l'âge du produit. On obtient facilement des R_c de 20 à 50 bars et 200 à 400 bars avec des procédés industriels.
- *Résistance à la traction*: elle est très influencée par la quantité et la qualité des argiles contenues dans la terre, qui réagiront avec la chaux.
- *Variations dimensionnelles*: 1 à 2% de chaux seulement peuvent réduire le retrait de 8 à 10 % jusqu'à 1 % et supprimer le gonflement. Des procédés industriels sophistiqués emploient de

hautes pressions et un traitement à la vapeur en autoclave avec des dosages allant jusqu'à 20%.

Les produits obtenus sont similaires à ceux de l'industrie silico-calcaire. La stabilisation à la chaux est particulièrement bien adaptée au procédé de moulage par compression, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Mise en œuvre

- *Pulvérisation*: Cette opération est importante et doit être effectuée avec grand soin. Plus l'argile sera finement brisée, plus la chaux sera active dans son action d'attaque de l'argile. L'opération peut être difficile car l'argile présente une forte cohésion. Une terre trop humide peut être asséchée et brisée avec de la chaux vive. La stabilisation sera efficace si au moins 50 % des agglomérats argileux sont broyés au 0<5mm.
- *Malaxage* : Il devra être très soigné pour assurer un mélange intime de la terre et de la chaux. Pour les terres très plastiques, on pourra procéder en deux étapes, espacées d'un à deux jours, qui permettront à la chaux d'ameublir les mottes ; ce procédé en deux étapes peut néanmoins réduire l'action de la chaux sur la résistance. On peut contrôler l'homogénéité du mélange en appréciant l'unité de sa teinte, aucune traînée de chaux non incorporée dans la terre ne devra apparaître, Houben et Guillaud (2006) [7].
- *Temps de retenue*: Si la mise en œuvre se fait par voie humide, le mélange peut être laissé avantageusement au repos après le malaxage. On attendra au moins deux heures pour des dosages en chaux supérieurs au point de fixation de la chaux; huit à seize heures sont préférables. L'effet est négligeable sur lamasse volumique sèche mais les résistances obtenues sont supérieures. Si l'on procède par voie plastique, on a intérêt à laisser réagir le mélange de terre et de chaux vive ou éteinte pendant plusieurs semaines. C'est notamment le cas pour les enduits qui deviennent plus onctueux et collants.
- *Compression*: La masse volumique sèche est très sensible au compactage, surtout pour des dosages en chaux élevés. La teneur en eau de compactage sera proche de l'optimum, du côté humide, après un temps de retenue suffisant du mélange (plus long pour les dosages élevés).

La réaction exothermique provoquée par la chaux vive consomme près de 1%de teneur en eau par % de chaux vive ajoutée. On corrigera donc la teneur en eau pour approcher la T.E.O. lors de la deuxième étape de malaxage, Houben et Guillaud (2006) [7].

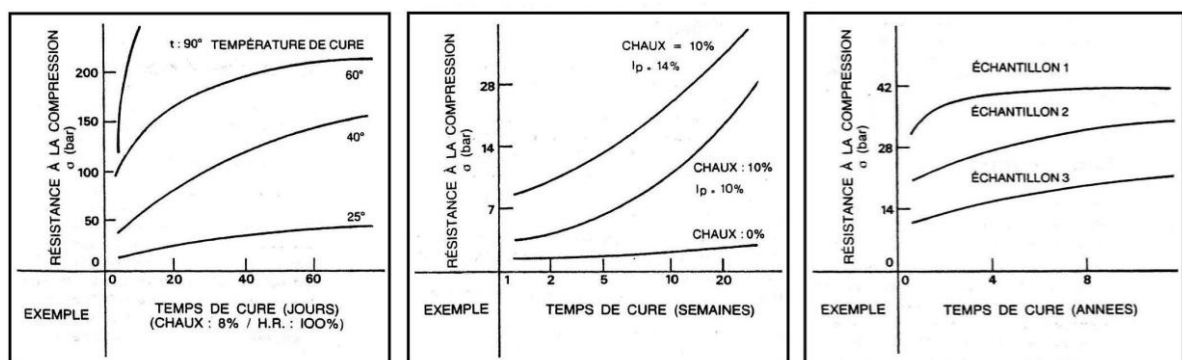


Figure 64 : Influence de temps de cure et la teneur en chaux sur la résistance à la compression.

- *Cure de séchage*: On constate une augmentation de la résistance à la compression avec l'allongement du délai de cure. Ce phénomène s'étend sur plusieurs semaines et persiste pendant de longs mois, évoluant d'autant mieux dans une ambiance chaude et humide. Les produits de terre stabilisés à la chaux peuvent être très avantageusement exposés à de hautes températures (>60°C). Une cure de séchage sous le soleil et sous un film de plastique ou sous un tunnel de tôles permet cette élévation de la température et de l'humidité relative. Des recherches menées à l'Université du Danemark ont montré que l'on obtient de très bons

produits avec une cure de 24 h en chambre de haute pression de vapeur à 60-97°C et à 100% de H.R. , Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.5.4. Pouzzolanes.

Cendres trachytiques claires et friables, riches en silicates hydratés et très répandues dans les régions volcaniques. Elles sont essentiellement constituées de minéraux silico-alumineux acides. Le mélange de pouzzolane, de chaux et d'eau conduit à la formation de produits hydratés (silicate de calcium hydraté et aluminat tétracalcique hydraté) qui à température normale se transforme en un matériau dur et compact.

3.2.5.5. Cendres volantes.

Produits issus de la combustion du charbon de lignite. Elles contiennent une prédominance de silice amorphe qui peut se combiner à la chaux pour former des liaisons stables en présence d'eau. Certaines cendres contiennent également une fraction importante de chaux vive et d'anhydrite et constituent déjà un liant hydraulique à elles seules, Ghomari (1989) [40].

3.2.5.6. Bitume.

Ce matériau nécessite un moyen de chauffage onéreux. Il a pour effet de relier entre elles les particules du matériau terre par une fine couche empêchant ainsi tout contact entre l'eau et les particules argileuses. Cet ajout diminue la résistance mécanique du matériau terre. La couleur sombre qu'il confère aux blocs traités, porte atteinte à leur esthétique.

3.2.5.7. Silicates.

Produit de terre diatomiques et minerais siliciques. Après chauffage on obtient des cendres saoudiques et de la silice. L'addition d'eau à ces derniers conduit à la formation d'un gel de silice ayant des propriétés d'étanchement, Ghomari (1989) [40].

3.2.5.8. Polymères.

Ils s'avèrent des stabilisants efficaces à des concentrations faibles de l'ordre de 1 à 2% mais leur coût excessif les rend chers en comparaison avec le ciment, la chaux et le bitume. Les polymères cationiques (polyacrilamides) ont été largement utilisés en ex U.R.S.S. et au Japon, ils se sont avérés de bons hydrofuges mais ils sont toxiques. Leur avantage réside dans leur faible poids et volume par unité de sol induisant un coût de transport minime. Ils ont l'inconvénient de nécessiter une haute technologie pour leur manufacture et aux faibles concentrations ils sont difficilement diffusables dans les sols finement poreux et sont biodégradables. Beaucoup ont été testés: vinsol naturel, les époxy, le suif, le formaldéhyde de caséine, urée, phénol et resorcinol, furfural aniline synthétique, Ghomari (1989) [40].

3.2.5.9. Amines quaternaires.

Ce sont des bases qui réagissent avec des acides forts pour donner des produits qui cristallisent sous forme de sels. Ils sont ajoutés aux ciments et aux bitumes à des concentrations de l'ordre de 5 à 10%. La technologie de fabrication est sophistiquée. Elles sont difficiles à mélanger aux sols à de faibles concentrations et sont onéreux et peu pratiques, Ghomari (1989) [40].

3.2.5.10. Résines.

Une grande partie des récents travaux de recherche s'est polarisée sur la stabilisation chimique par l'emploi de résines synthétiques, notamment dans le domaine des travaux publics. Les buts poursuivis visaient une augmentation de la résistance aux charges tout en réduisant l'épaisseur des couches de terre stabilisée. On recherchait une meilleure performance de résistance au cisaillement et une plus grande élasticité des couches de surface.

Ces buts qui correspondent aux applications de travaux publics ne sont pas nécessairement intéressants pour les applications en construction de bâtiments, sauf pour certaines surfaces horizontales: pavements, dalles stabilisées. On a pu obtenir des performances assez

extraordinaires avec la stabilisation aux résines mais il demeure un grand handicap de surcoût des procédés par rapport aux stabilisants usuels, Houben et Guillaud (2006) [7].

- Avantages : Action énergétique, prise rapide, facilité d'incorporation dans la terre du fait d'une viscosité comparable à celle de l'eau, possibilité de solidifier des sols très humides.
- Désavantages : Coût élevé, technologie de production sophistiquée réservée aux pays industrialisés, dosages de traitement souvent aussi importants que pour les stabilisants conventionnels, toxicité des produits, manipulation délicate requérant l'emploi de catalyseurs, sensibilité à l'eau et durabilité non assurées, produits biodégradables.
- Mécanismes et principes : Les résines sont constituées de molécules à longue chaîne résultant de la liaison (polymérisation) de certains agents chimiques (monomères et polymères). On peut les employer de deux façons différentes:
 - Les monomères sont ajoutés à la terre en même temps qu'un catalyseur: les réactions entre la terre et les monomères ainsi que la polymérisation sont immédiates ; c'est le cas des résines abiétiques par exemple.
 - Le polymère est formé au préalable par voie synthétique ou naturelle puis ajouté à la terre à l'état solide, en solution ou en émulsion.

Les résines agissent différemment, soit comme floculant, comme dispersant, comme acide ou liant, néanmoins la plupart des produits jouent le rôle d'imperméabilisant et ceux plus sophistiqués peuvent améliorer la cohésion de la terre, Houben et Guillaud (2006) [7].

3.2.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir essentiellement d'informations sur les différents stabilisants qui peuvent donner des propriétés irréversibles à la terre face aux contraintes physiques.

De nombreux paramètres interviennent dans le processus de la stabilisation, dépendant autant de la conception des bâtiments que de la qualité du matériau, que de l'économie du projet ou que de la durabilité.

Pour que la stabilisation soit un succès, le procédé employé doit être compatible avec ces divers impératifs.

On dénombre à ce jour plus d'une centaine de produits employés pour la stabilisation de la terre à bâtir. Ces stabilisants peuvent être employés aussi bien dans la masse des murs que dans leur surface, dans les enduits notamment.

Les deux principaux stabilisants demeurent le ciment et la chaux, objets de notre recherche pour une restauration traditionnelle et économique. Le gros consommateur de chaux est aujourd'hui le secteur de la réhabilitation.

Généralement, les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié.

Chapitre 4.

Durabilité du matériau terre.

4. 1. Aperçu des recherches antérieures sur la durabilité des murs en terre.

4.1.1. Introduction.

Les pathologies rencontrées sont inhérentes à la solubilité à l'eau de la terre crue nue. L'entretien de l'enduit extérieur est essentiel. Lorsqu'il se désagrège, la maçonnerie de terre crue subit directement l'attaque des eaux pluviales, d'où désagrégation des joints puis des briques elles-mêmes.

Pour résister à l'action érosive de la pluie, la construction traditionnelle de l'adobe est enduite d'une couche protectrice imperméable terre-chaux et ce qu'il lui assure sa protection contre l'érosion.

Une bonne partie des constructions, dont celles du Quartier z'gueg el Hadjadj, utilisant cette forme de protection subsistent jusqu'à maintenant après tant de décennies d'exposition à des pluies occasionnelles mais fortes, mais leur résistance et leur durabilité encore davantage dans le temps restent limitées.

Quand les murs sont plus exposés la majorité des terres naturelles souffre à long terme de détérioration à moins qu'un entretien régulier ne l'emporte.

Pour surmonter la faiblesse chronique de la terre quand le mur est exposé à une pluie battante, les restaurateurs optent généralement pour l'usage de stabilisateurs, le ciment ou la chaux notamment.

Il est désormais admis que les enduits stabilisés avec du ciment et/ou avec de la chaux tiennent un rôle important dans le revêtement des murs en terre dans les opérations de réhabilitation et de restauration. Bien que la durabilité de ces surfaces compte tenu des conditions d'exposition en service sous des climats arides ou semi arides soit une préoccupation majeure, elle n'a pas fait officiellement l'objet de recherches importantes. La dégradation de ces revêtements est un phénomène courant qui se traduit par une érosion des surfaces, une perte de masse, des effritements et des craquelures. Pour qu'un enduit conserve ses qualités pendant toute sa durée de vie utile, sa surface doit résister aux fluctuations climatiques. Or, les tests de vieillissement accéléré pratiqués aujourd'hui pour prédire les performances globales de ces enduits dans les conditions qui provoquent la détérioration de surface (mouillage, séchage, abrasion,...) s'avèrent encore peu nombreux. Il convient donc de multiplier des méthodes d'essais qui puissent être appliquées aux enduits pour évaluer la durabilité probable de leurs surfaces.

Le présent travail se veut un début pour une constatation de l'essai d'abrasion, appelé aussi essai de la brosse métallique, qui a été mis au point par CRATerre, mais qu'il n'a pas été publié.

4.1.2. Facteurs affectant la durabilité des murs en terre.

Le matériau terre est sujet à l'érosion. Pour W. Carazas Aedo la durabilité des matériaux de construction peut être définie comme étant la résistance à la dégradation fonctionnelle au cours du temps. La durabilité peut facilement être divisée en trois sous-sections

- a) la durabilité physique : la dégradation causée par des processus physiques tels que l'érosion ou le renversement de l'effort.
- b) la durabilité chimique : la détérioration causée par des réactions chimiques telles que la rouille de l'acier.
- c) la durabilité biologique : les détériorations causées par la rupture organique telles que le pourrissement sec du bois.

La principale cause de perte de fonctionnalité dans des parois en terre est la perte surfacique due à l'érosion (attaque physique) par la pluie poussée par le vent, et la présentation des méthodes d'essai tel que l'essai de jet australien du bulletin 5, Middleton (1952), est le reflet de cette forme de dégradation, Heathcote (2002) [42]. Selon STARKEI (1976), les érosions les plus importantes sont dues aux phénomènes météorologiques. MASTERS et al. (1987) ont établi une

liste complète de ces phénomènes (voir tableau I.1). Le matériau terre est essentiellement sensible à l'insolation, au vent, aux précipitations, à l'humidité et à la température. L'importance de ces agents varie largement avec le type de climat, la localisation géographique, l'exposition et l'architecture de la construction. Aussi, les agents climatiques sont difficiles à quantifier et à reproduire, Ghomari (1989) [40].

Dans cette recherche bibliographique, les termes de durabilité et érodabilité sont parfois utilisés de manière interchangeable, tels qu'ils sont dans la littérature, bien qu'il soit reconnu qu'érodabilité est une définition plus étroite, Heathcote (2002) [42].

En général les unités de mur en terre ayant une forte résistance à l'érosion sont résistants à la dégradation d'autres facteurs tels que la chaleur et de la pénétration statique de l'eau.

Il ya de nombreux facteurs qui contribuent à la dégradation de la surface des unités de murs en terre.

Tableau 10 : facteurs de dégradation affectant la durée de vie des matériaux de construction.

Facteurs	Type de phénomènes
Climatiques	<ul style="list-style-type: none"> • Radiation <ul style="list-style-type: none"> - solaire - nucléaire - thermal
	<ul style="list-style-type: none"> • Température <ul style="list-style-type: none"> - élevée - basse - cyclique
	<ul style="list-style-type: none"> • Constituants de l'air <ul style="list-style-type: none"> - oxygène et ozone - oxyde de carbone
	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminants de l'air <ul style="list-style-type: none"> - gaz (oxyde de soufre et de nitrogène) - brumes (aérosols, sels, acides, alcalis dissous dans l'eau) - particules (sables, poussières saleté)
	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles de gel-dégel
	<ul style="list-style-type: none"> • Vents
	<ul style="list-style-type: none"> • micro-organismes • bactéries
Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • contraintes cycliques • contraintes aléatoires • action physique de l'eau, ex : pluie, neige, verglas, grêle • action physique du vent • combinaison d'action de pluie et de vent

4.1.3. Causes de l'érodabilité.

Pour T. L. PHAM, l'érosion est définie comme étant la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'une terre sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation...), Long Pham (2008) [43].

La norme ASTM E 241-77 (1977) indique que 90% des causes de l'érosion dans les constructions sont dues à l'eau, sous toutes ses formes, Ghomari (1989) [40].

L'importance de l'érosion est liée à deux facteurs importants:

- l'érosivité : définit la puissance de l'agent ou les agents érosifs.
- l'érodabilité : traduit l'aptitude d'un matériau à être altéré par les facteurs érosifs.

Divers facteurs sont responsables de la dégradation de notre système (terre), il faut considérer ceux d'entre eux qui sont à l'origine de la destruction. Ceux-ci constituent un modèle auquel il faut se référer, en particulier si on veut mettre au point des tests ou des méthodes de

mesure caractérisant la durabilité du système. Nous citerons ceux qui nous semblent être les plus importants:

4.1.3.1. L'Humidité.

HENIN (1976) indique que pour être érodée, il faut qu'une certaine épaisseur de terre soit humide, car les gouttes d'eau bien qu'elles se pulvérisent au moment du choc, elles n'entraînent presque pas de matière terreuse si le matériau est sec. Ce qui implique que la pluie ait débuté depuis quelques temps, Ghomari (1989) [40].

4.1.3.2. La Battance.

Lorsque les gouttes de pluie arrivent sur la surface des revêtements en terre des murs, elles créent une force tangentielle d'arrachement, proportionnelle à leur énergie cinétique, brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées. Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou "splash" en anglais, déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît une formation d'une pellicule ou d'une mince croûte superficielle, continue et consistante qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance (Rousseva et al., 2002 ; Hénensal, 1986), Long Pham (2008) [43].

ELLISON cité par HENIN (1976), a étudié ce phénomène qui traduit l'érosion de la terre humide sous l'action de chocs de gouttes de pluies intenses dites "battantes". Ce mécanisme a été mis en évidence grâce à la cinématographie ultrarapide qui permet de suivre la goutte d'eau arrivant sur la masse ou elle forme un petit cratère, la goutte d'eau éclate ensuite en projetant de son point d'impact des gouttelettes chargées de particules arrachées. MIHARA cité par HENIN (1976) a montré que les gouttes de pluie orageuse pouvaient atteindre 5 mm de diamètre et tombent avec une vitesse de 9 m/s. Les spécialistes de l'érosion appellent "détachabilité" la facilité avec laquelle les agglomérats de terre se désagrègent sous l'action de l'eau; corrélativement toute surface de terre protégée échappe à l'effet mécanique de l'impact, Ghomari (1989) [40].

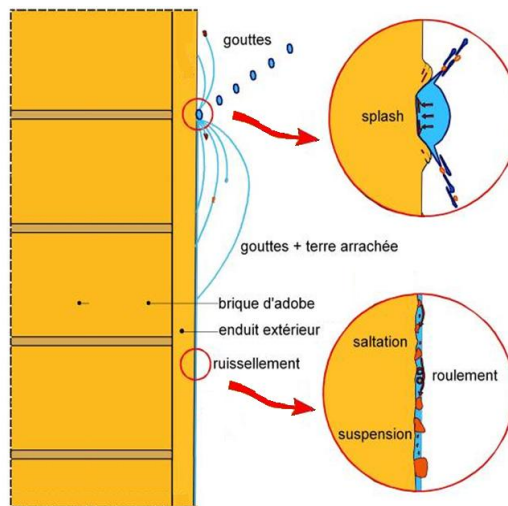


Figure 65 : Les effets de l'érosion pluviale.

4.1.3.3. Le Ruissellement.

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

Le ruissellement désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols.

Selon Guiton (1998), ce ruissellement, d'abord pelliculaire, se partage en un écoulement diffus en petits filets d'eau anastomosés (c'est-à-dire interconnectés) qui circulent entre les obstacles et un

écoulement aréolaire (de forme circulaire) en nappes formées de lames d'eau qui suivent plus ou moins la topographie. Ces filets et ces lames d'eau peuvent exercer une force de cisaillement qui arrache des particules de sol.

La battance des gouttes détache des particules du sol et les transporte dans une faible proportion tandis que le ruissellement transporte les particules de sol libres et en détache dans une faible proportion (Bradford et al. 1999). Ces deux phénomènes sont représentés sur la Figure 65. Long Pham (2008) [43].

4.1.3.4. Le Retrait de fissuration.

Le retrait est le procédé de densification d'un sol sous la pression capillaire. Durant le retrait, le volume varie tant que les forces capillaires ne sont pas équilibrées par la résistance interne du sol qu'il peut générer. Le taux du retrait dépend du pourcentage d'argile dans le sol, du type de l'argile, de l'arrangement des particules et de la capacité d'échange cationique. Son action est alors limitée aux terres relativement argileuses ayant des agglomérats de petites tailles. Au cours de leur dessiccation, ces matériaux subissent des tensions internes qui peuvent être très importantes engendrant ainsi une fissuration. HENIN (1939) a montré que ces tensions étaient le résultat d'une différence de vitesse de dessiccation entre les parties interne et externe du système, Ghomari (1989) [40].

4.1.3.5. La Dégradation chimique.

L'eau peut dissoudre plusieurs gaz présents dans l'atmosphère (Anhydride sulfurique, sulfureux et gaz carbonique) pour former des acides sulfuriques, sulfureux, carboniques qui, même dilués, peuvent altérer fortement la surface du matériau.

4.1.4. Aperçu des recherches antérieures sur la durabilité des murs en terre.

Les précédentes recherches sur la durabilité des murs en terre, se sont concentré distinctivement sur : Heathcote (2002) [42].

1. Le développement des essais afin d'établir la résistance à l'érosion des spécimens des murs en terre, et
2. Les recherches des effets des divers paramètres matériels sur la résistance de l'érosion des parois en terre.

Kevan Aubrey Heathcote décrira cette recherche et analysera certaines des données produites par d'autres chercheurs dans le but de fournir un aperçu des différents principaux paramètres relatifs à la prédiction de l'érosion des murs en terre.

4.1.5. Essais concernant la résistance à l'érosion des spécimens de murs en terre.

Les diverses méthodes d'essai employées dans la construction des murs en terre peuvent généralement être classées en trois catégories:

4.1.5.1. Essais indirects.

Ce sont des essais qui ont peu ou pas de relation avec les mécanismes de dégradation, des expériences pratiquées, de tels essais se sont avérés prédictifs et raisonnablement fiables quant à la performance du matériau sous des conditions de service.

4.1.5.2. Essais accélérés.

Ce sont des essais où l'on tente de modéliser le processus de dégradation en service, avec l'accroissement de l'intensité des facteurs de dégradation moyennant la réduction du délai.

4.1.5.3. Essais de simulation.

Ce sont des essais où l'on tente de modéliser exactement le modèle dans des conditions de service. Le Tableau 11 donne une ventilation des essais les plus communément utilisés pour l'évaluation de la durabilité des spécimens de mur en terre, sur la base des critères cités ci-dessus.

Là où les différents chercheurs se sont impliqués, ce n'est uniquement le type général de l'essai qui est affiché (la force de compression par exemple), Heathcote (2002) [42].

4.1.6. Les Essais.

Le matériau terre peut être soumis à de nombreux essais qui, pour la plupart d'entre eux, ne sont pas normalisés ou même simplement réglementés. Du point de vue technique et scientifique, il est toujours intéressant de soumettre une terre et les matériaux de construction en terre à une gamme d'analyses, de tests et d'essais la plus complète possible. Mais on ne perdra pas de vue que le but principal est de construire avec la terre et non de multiplier les procédures d'analyses ou de contrôle.

Tableau 11 : Classification des essais de durabilité relatifs aux constructions des murs en terre.

Catégorie	Source / Type	Essais indirects	Essais accélérés	Essais simulés
Essai de la brosse métallique	ASTM D559 (1944)			
	CRATerre (non publié)			
Essai d'arrosage (jet)	Cytryn (1956)			
	Wolfskill et al. (1970)			
	Jagadish & Reddy (1987)			
	Ola & Mbata (1990)			
	Spray Tests Bulletin 5 (1987)			
	Dad (1985)			
	Ogunye (1997)			
Essais de la goutte	Yttrup et al. (1981)			
	Swinbourne Uni. (1987)			
Essais de perméabilité et d'absorption	Webb et al. (1950)			
	Cytryn (1956)			
	M. N. Build. Code (1991)			
	Cartem (non publié)			
	briques séchées au soleil (1992)			
Essais de résistance	Force de compression			
	Rapport force séchage/mouillage			
Essais de dureté	Pénétrromètre			
	Pendule Scléromètre			
	surface Pulloff (arrachement)			

Selon Houben et Guillaud, on tâchera, de préférence, de limiter la procédure des analyses et des essais à son minimum nécessaire mais suffisant pour garantir dans temps, en connaissance de cause, une bonne terre des constructions bâties, .

Dans le sens de cette réflexion, le savoir-faire, l'expérience acquise, l'observation attentive des environnements construits en terre et les enseignements qui sont restitués permettent largement de réduire des procédures d'analyses fastidieuses, grandes consommatrices d'argent et de temps. Néanmoins, dans le doute, il est toujours recommandé de procéder à des essais.

Le matériau terre peut être analysé et testé au travers de six catégories d'essais, Figure 66, mais le passage dans chacun de ces filtres n'est pas toujours nécessaire. En effet, selon les terres

analysées, selon la facilité que l'on aura à les caractériser, selon les conditions de travail, selon l'expérience de l'utilisateur ou du constructeur, il sera possible d'ignorer l'une ou l'autre des catégories d'essais. Toutes les analyses, tous les tests et essais énoncés peuvent être exécutés avec un matériel sophistiqué de laboratoire autant qu'avec un matériel léger et réduit de terrain. , Houben et Guillaud (2006) [7].

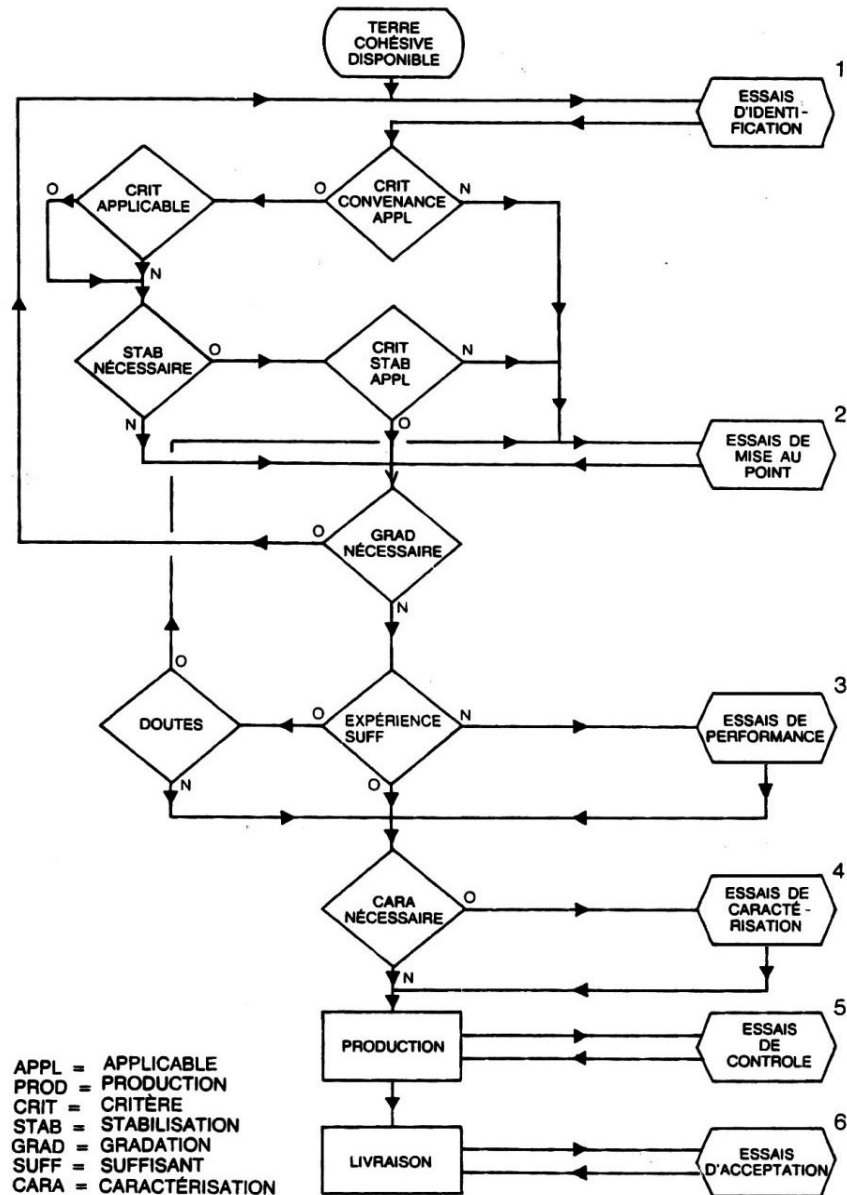


Figure 66 : Schéma de sélection des essais.

Source : CRATerre

On remarquera que beaucoup des essais énoncés sont communs à plusieurs des catégories d'essais. Il n'est pas pour autant nécessaire de répéter ces essais mais leurs résultats devront être différemment interprétés selon qu'ils se situent dans telle ou telle catégorie "Essais de mise au point", le but de l'essai de gel-dégel sera de prouver que le matériau analysé (une brique compressée stabilisée) supporte le minimum exigé de douze cycles de test, selon les conditions posées par certaines des normes les plus couramment appliquées.

Par contre, du point de vue de la catégorie "Essais de caractérisation", le matériau s'avère pouvoir supporter par exemple dix-sept cycles du test gel-dégel, démontrant ainsi une qualité supérieure qui autorise son emploi dans des conditions très dures. On constate aujourd'hui que

très peu de pays ont élaboré des normes d'analyses et d'essais spécifiques au matériau terre. On se fondera donc le plus souvent sur des normes provenant d'autres disciplines telles que: matériaux de construction en béton, revêtements routiers, etc. Ces normes ne sont pas nécessairement adaptées au matériau terre. Aussi conviendra-t-il d'adopter ces normes et de les adapter avec beaucoup de souplesse. Les résultats également seront étudiés avec indulgence car il est admis que les essais de durabilité sont extrêmement sévères et qu'ils ne correspondent souvent pas du tout aux réalités d'emploi des matériaux, sauf en quelques circonstances exceptionnelles. Quelques exemples concernant l'essai de résistance à la compression peuvent illustrer cette situation. Il en va de même pour un grand nombre des essais présentés. , Houben et Guillaud (2006) [7].

4.1.7. Essais de simulation au laboratoire

C'est à l'aide d'essais de vieillissement que l'on tente dans le domaine de la protection de sélectionner les produits conduisant à la durée de vie souhaitée des ouvrages. L'étude du vieillissement devra, Ghomari (1989) [40] :

- définir les propriétés les plus significatives pour caractériser l'évolution dans le temps des matériaux considérés,
- recommander les méthodes d'essais permettant de mieux mesurer les propriétés retenues,
- proposer un système d'expression des résultats permettant d'apprécier, tant globalement qu'en détail, le vieillissement des matériaux étudiés.

L'approche donnée par la norme ASTM E 632-78 (1982) montre le besoin d'adopter une philosophie d'ensemble, tant à l'égard de la conduite des essais que de leur interprétation en relation avec le comportement des produits en réalité. Une méthodologie d'étude du vieillissement des matériaux est montré dans la Figure 67.

En l'absence de normes internationales sur le matériau terre, les méthodes expérimentales utilisées sont dérivées de techniques d'essais employées pour d'autres matériaux (le béton, la pierre, etc..).

Les essais de vieillissement qui ont été proposés décrivent essentiellement deux aspects de l'érosion. Le premier reproduit l'effet de l'eau, liquide sur les supports et le second, est la combinaison de plusieurs facteurs importants (eau, température, insolation, vent), Didier et Ghomari (1990) [44].

Afin de simuler le comportement à l'eau seule, ou l'alternance de divers facteurs de dégradation, différentes méthodes ont été proposées :

4.1.7.1. Test d'humidification-séchage.

La procédure présentée est celle de la norme ASTM D 559 et de la norme AASHTO T 135.

Après une période de stockage de sept jours en atmosphère très humide, les éprouvettes sont immergées complètement dans l'eau, à la température de la pièce de travail, durant cinq heures. Passé ce délai, les éprouvettes sont retirées de l'eau puis séchées dans un four ou dans une étuve à la température de 71° C. Ce séchage dure 42 heures, délai au-delà duquel les éprouvettes sont retirées du four puis brossées une à une. Ce brossage est effectué à l'aide d'une brosse métallique et sert à évacuer tous les fragments de matériau affectés par les cycles de mouillage et de séchage. Le brossage est ferme et concerne chaque endroit des éprouvettes, dans deux directions (haut et bas), soit un total de 18 à 25 coups de brosse. , Houben et Guillaud (2006) [7].

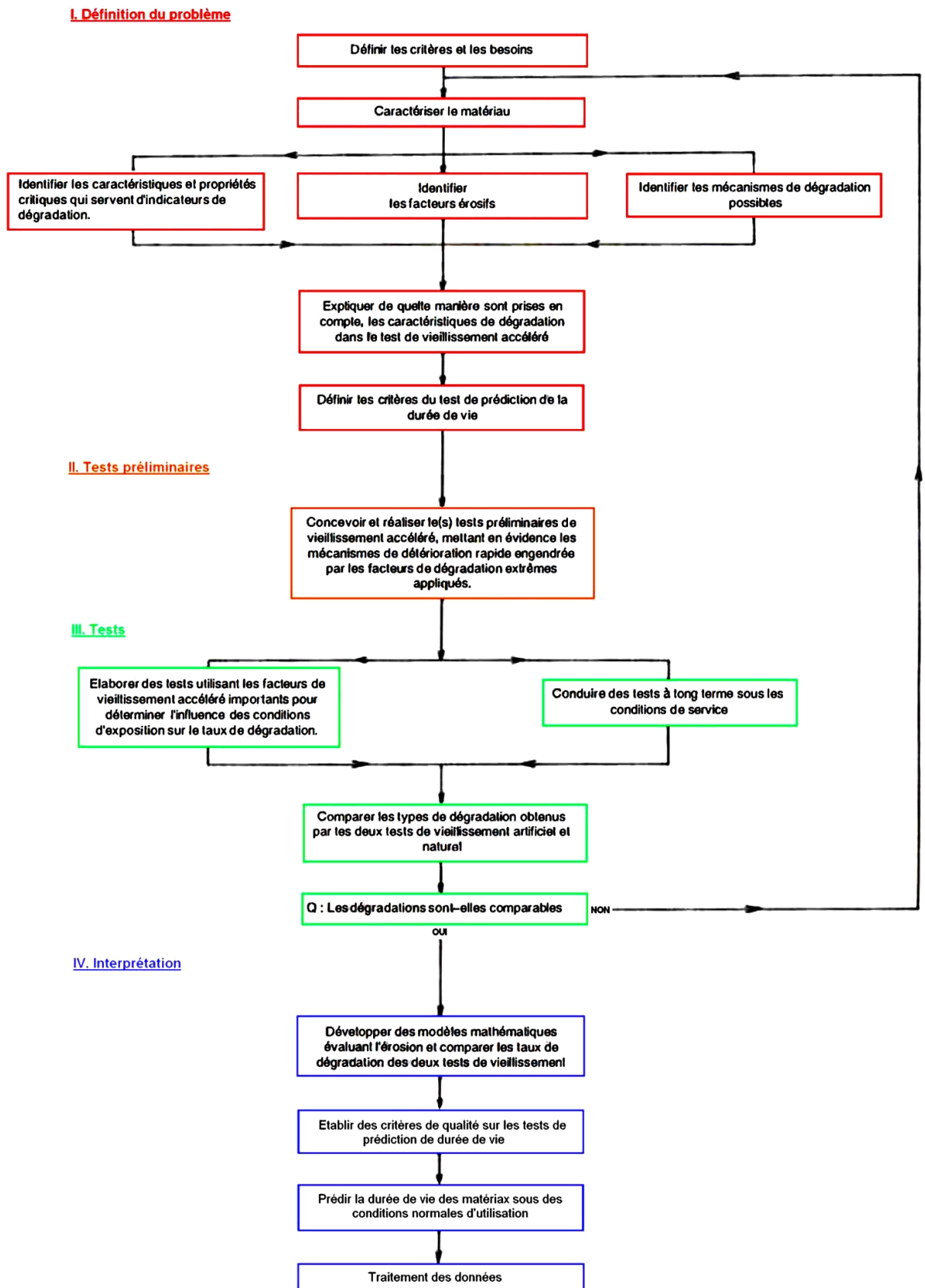


Figure 67 : Méthodologie d'étude du vieillissement des matériaux.

La force appliquée au brosseage est de l'ordre de 1,5 kg. La procédure sus-décrite constitue un cycle de 48 heures de mouillage-séchage. Les éprouvettes sont ensuite de nouveau immergées

dans l'eau et soumises à un autre cycle de mouillage-séchage. La procédure est répétée pour douze cycles.

Selon Houben et Guillaud, si le test doit être interrompu, les éprouvettes sont stockées dans le four ou dans l'étuve. Après les douze cycles de tests, les éprouvettes sont séchées à 110° C jusqu'à obtention de leur poids par rapport au poids initial. Lorsque les éprouvettes sont stabilisées à la chaux, les tests de mouillage-séchage sont effectués après un délai d'un mois. Ce test est considéré comme extrêmement sévère.

4.1.7.2. Essai de perméabilité à l'eau

Pour Aldea et al., L'essai de perméabilité à l'eau schématisé par la Figure 68 représente une version modifiée d'un essai de perméabilité à l'eau développé à Urbana-Champaign, Université de l'Illinois.

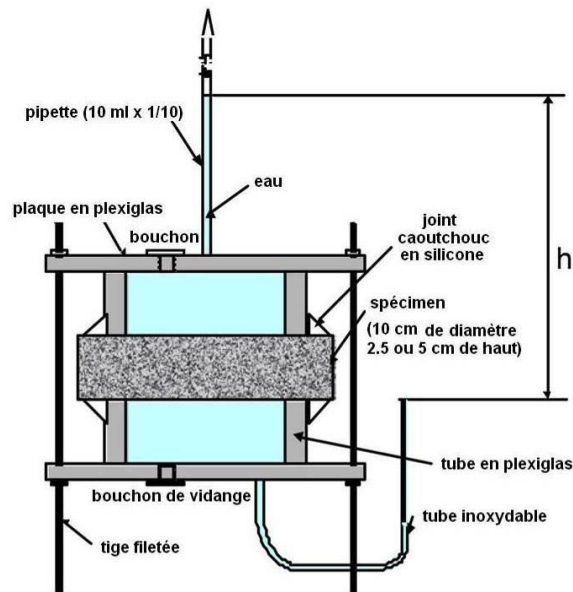


Figure 68 : Installation d'essai de perméabilité à l'eau.

Sur des échantillons fissurés, Cet essai consiste à contrôler le niveau de l'eau dans la pipette et de la remplir ensuite au niveau initial avec une seringue en mesurant l'afflux. L'installation est basée sur l'écoulement axial de l'eau à travers l'échantillon, donnant une basse pression d'approximativement 30 cm de la tête. Le changement à la tête sera enregistré à intervalles réguliers, selon l'ouverture moyenne de la fissure, et l'écoulement du temps après le début de l'essai. Le coefficient de perméabilité sera utilisé pour mesurer l'afflux de l'eau, et il sera calculé en supposant l'écoulement laminaire à travers le matériau fissuré basé sur la loi Darcy, et utilisant l'hypothèse de l'écoulement continu, Aldea et al. (1999) [39].

4.1.7.3. L'absorption d'eau (Sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique, Browne (2009) [45].

Avant les mesures de la Sorptivité, les spécimens seront préalablement conditionnés dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique 70 x 70 x 70 mm³ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la figure ci-dessous, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par une résine époxydique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps à 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes.

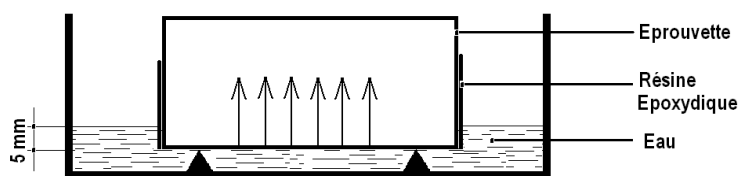


Figure 69 : Schéma du dispositif de l'essai d'absorption.

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différents mortiers, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps, Browne (2009) [45].

L'équation de ces droites a la forme : $Q/A = S \sqrt{t}$

Q : La quantité d'eau absorbée en (cm³) ;

A : La surface du spécimen en contact avec l'eau (cm²)

t : Le temps (s),

S : Le coefficient de Sorptivité du spécimen (cm/s^{1/2}).

Pour Browne, la mesure de la Sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la vitesse d'absorption des matériaux. Plus la Sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

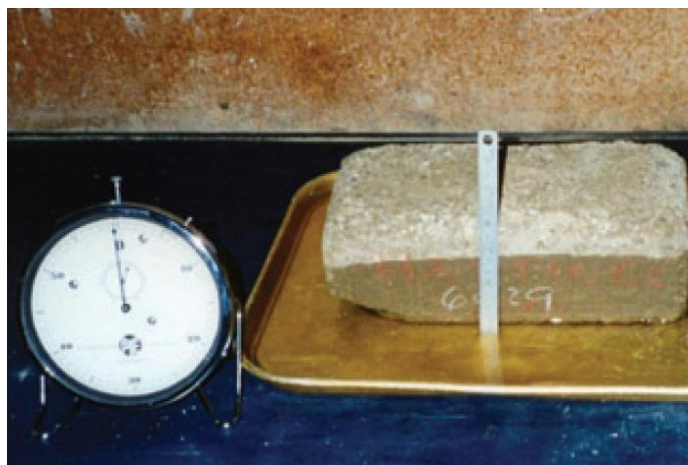


Figure 70 : Essai d'immersion de surface.

En Nouvelle-Zélande, un essai simple est différent de ceux développés en Australie considérés comme rudes et économiquement élevés (Essai accéléré de pomme de douche, cité par Morris, et avec les conseils des membres du Comité de normalisation des constructions en terre de ce pays, il a été développé l'essai de surface séchage-mouillage pour lequel la pénétration de l'humidité et les effets de surface à partir d'une seule face trempée sont observés. La brique se trouvant à 1,5 mm du fond d'un bac, et la profondeur de l'eau est maintenue à 10 mm (figure 86) la dégradation est évaluée après un certain temps fixe.

Il a été constaté qu'après quatre minutes, l'humidité a pénétré presque toute la brique terre-ciment, Morris (2006) [46].

Cet essai est rééritable en raison de son installation facile, et il y a un certain nombre de contrôles visuels empiriques qui affichent sa convenance; mais seulement un nombre limité d'essais similaires a été entrepris.

4.1.7.4. Test de gel-dégel.

Cette procédure d'essai est celle de la norme ASTM D 560 et de la norme AASHTO T 136.

Après une période de stockage de sept jours en ambiance très humide, les éprouvettes sont placées sur un matériau absorbant saturé d'eau, puis déposées dans un réfrigérateur, exposées à une température constante de -23°C max., durant 24 heures, puis retirées. Les éprouvettes sont décongelées dans une ambiance humide (100 % de H.R.) à la température de 21°C , durant 23 heures, puis retirées. Les éprouvettes doivent absorber de l'eau par capillarité (à partir du matériau absorbant) durant cette phase de décongélation. Les éprouvettes sont ensuite brossées suivant la procédure du test de mouillage-séchage. Le test est réalisé pour douze cycles de gel-dégel, chaque éprouvette étant retournée sur le matelas absorbant entre chaque cycle. Certaines éprouvettes faites en terre silteuse ou argileuse peuvent s'écailler, notamment après le sixième cycle du test. On veillera à éliminer cette écaillage afin de ne pas contrarier le, brossage. Si le test doit être interrompu, les éprouvettes sont stockées dans le réfrigérateur.

Après les douze cycles de test, les éprouvettes sont séchées dans un four à une température de 110°C jusqu'à obtention de leur poids constant. On calcule ensuite la perte de poids par rapport au poids initial. Ce test est considéré comme extrêmement sévère. , Houben et Guillaud (2006) [7].

4.1.7.5. Test d'érosion ou L'essai du vaporisateur d'eau.

Ce test simule une pluie artificielle normalisée que subit la face exposée à la pluie du bloc échantillon. L'arrosage est réalisé à l'aide d'une pompe maintenant une pression constante de 1,4 bar positionnée en amont d'une pomme d'arrosoir ou de douche de 10 cm de diamètre placée à 20 cm du bloc testé. Le jet dont la pression est contrôlée au manomètre, est maintenu durant deux heures perpendiculairement à la surface du bloc.

Ensuite, toujours selon Houben et Guillaud, on mesure les profondeurs des trous d'érosion et l'on considère la moyenne des dix-huit plus grands trous mesurés sur chaque bloc. Cette moyenne est notée : Pmm. Les résultats de ce test demeurent indicatifs. Une légère érosion ou un grêlage apparaissant sur un bloc de terre stabilisée, ne doivent pas être interprétés défavorablement.

Selon L. GUERIN cet essai est formulé différemment, la résistance à l'érosion est mesurée de la façon suivante : la brique est placée sous le jet d'un pommeau de douche pendant plusieurs heures. Le jet doit être relativement puissant, aussi faut-il une pression d'eau au pommeau de 1.4 à 1.7 kg/cm^2 , la distance du pommeau à la brique étant de 18 cm environ. Figure 71



Figure 71 : Essai d'arrosage ou de dégradation accélérée de pomme de douche.

Le jet est horizontal, et la brique est arrosée pendant deux heures. On mesure la profondeur des trous creusés par l'eau dans la brique, et on calcule la moyenne des six trous les plus profonds. On compare alors ce résultat avec le tableau suivant: Guerin (1985) [47].

Tableau 11 : résistance à l'érosion par l'essai du jet.

Pluviosité de la région	Profondeur maximale des trous ¹⁾
Moins de 500 mm/an	12 mm
Moins de 1200 mm/an	6 mm
Plus de 1200 mm/an	Pas de trous. Surface légèrement usée acceptable

(1) En supposant que les briques sont protégées des éclaboussures (mur de soubassement suffisamment haut).

La brique est arrosée par un jet d'eau puissant pendant deux heures... On mesure ensuite la profondeur des trous creusés par l'arrosage dans la brique.

Le résultat retenu est la moyenne des 10 trous les plus profonds.

Guerin note qu'il n'existe pas de relation (directe) entre la résistance d'une brique à la compression et sa résistance à l'érosion.

Selon Gresillon, il existe par contre une relation entre la résistance à ce test d'arrosage et la granulométrie de la terre : une brique résiste d'autant mieux qu'elle contient des particules plus grosses. Figure 72 . Pour Guerin, ce test permet, dans une certaine mesure, de se faire une idée de la résistance des briques à la pluie.

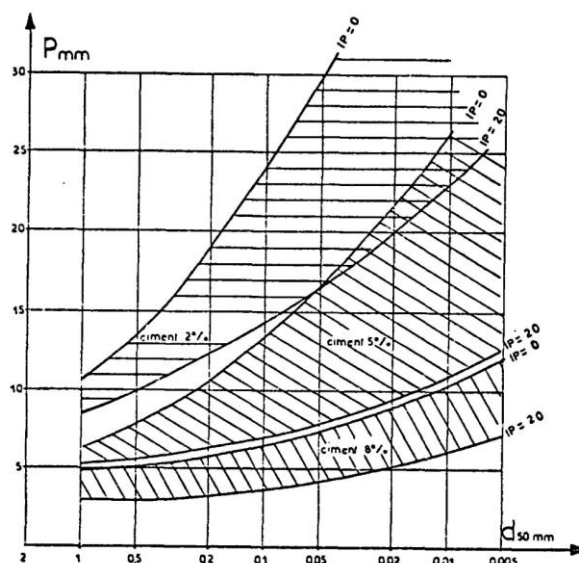


Figure 72. : Relation entre la granulométrie de la terre et la résistance à l'érosion des briques.

Il constate que plus le diamètre des particules diminue, plus la profondeur des trous augmente.

Pour l'expérimentation entreprise par Aouissi, la quasi-totalité des briques testées n'étaient presque pas abîmées. Cependant, au lieu de l'existence des trous dont on peut mesurer le diamètre et la profondeur. Des légers effritements de la surface de la brique ont été enregistrés. Ceci est dû peut être aux dimensions relativement petites des briques utilisées.

Tableau 12 : Observations enregistrées après l'application de l'essai.

N° Composition	Terre A	Terre B	Terre C	Terre D
1	-	- Effritement de la face exposée atteignant dans certains cas une profondeur de 4 mm. - Apparition dans quelques briques des légères fissures dans les angles.		
2	-	- Augmentation légère des ouvertures des fissures déjà existantes		
3	-	- Effritement de 3mm de profondeur d'une petite partie de la face exposée à l'eau.	- Léger effritement ne dépassant pas 2 mm de profondeur, - Apparition de petites fissures dans la surface.	
4		Etat parfait		
5		Etat parfait		
6		Etat parfait		
7		Etat parfait		
9	l'apparition de fissure grande ouverture.	Etat parfait		
10	Même observation que la composition précédente.	Etat parfait		

Par conséquent, pour quantifier la durabilité des briques, il a été choisi la méthode de la mesure de l'eau absorbée par ces dernières en effectuant des pesées, juste avant et après l'essai.

Cette procédure étant justifiée car elle permet d'asseoir l'une des fonctions essentielles du corps de l'enduit appliqué au support terre, qui est de faire écran à l'eau en phase liquide. De l'autre côté, le support terre se comporte particulièrement bien lorsqu'il est en équilibre hygrométrique avec l'atmosphère. Par conséquent, le corps d'enduit sera avantageusement fait d'un matériau perméable à l'eau en phase vapeur. Les observations ainsi que les résultats enregistrés sont résumés dans le Tableau 12

Le premier constat déduit de l'analyse des résultats est que la quantité d'eau absorbée par les briques ne semble pas être influencée d'une manière appréciée par la nature de terre

Ce qui a permis de conclure plus tard, après comparaison des quantités d'eau absorbée par les échantillons, que cette absorption d'eau des différentes terres, dépend essentiellement de la nature de l'enduit utilisé et que suite aux essais de durabilité le seuil de saturation des terres n'était pas atteint.

En termes d'absorption d'eau, les enduits assurant le plus efficacement la fonction d'écran à l'eau en phase liquide sont donnés par ordre croissant d'absorption d'eau dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Classement des enduits en fonction des quantités d'eau absorbées.

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N° de composition	4	5	7	6	11	10	3	2	1

Les enduits conduisant à un parfait état après l'essai sont donnés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Enduit assurant l'intégralité des briques après l'essai de durabilité.

Terre	Composition de l'enduit					
A	4	5	6	7	-	-
B, C et D	4	5	6	7	8	10

Pour les autres enduits, ne figurant pas dans le tableau 5-5, les éprouvettes ont été soit effritées soit fissurées, conséquence de ce test de jet.

En effet, parmi tous les enduits utilisés, les enduits à base de chaux uniquement semblent avoir une performance qui est manifestement insuffisante: perméabilité relativement grande à l'eau en phase liquide entraînant l'effritement et la fissuration des éprouvettes. Cette mauvaise performance peut être attribuée au fait que le sable est plus apte à être stabilisé par le ciment.

Par conséquent, les enduits à base de chaux et ciment sont de loin les meilleurs en terme de fonctions essentielles exigées pour un corps d'enduit: faire écran à l'eau en phase liquide et sauvegarder l'intégrité des briques. Les compositions 4, 5, 6 et 7 se classent en tête de liste, en termes d'imperméabilité à l'eau et conduisent à un parfait état après l'essai de durabilité.

D'autre part, les enduits à base de terre se situent entre les enduits à base de chaux et ceux à base de chaux et de ciment en terme de perméabilité et conduisent à un état parfait de la brique après l'essai de durabilité.

Les compositions de l'enduit qui peuvent être considérées, comme appropriées pour les terres utilisées dans cette expérience sont montrées dans le Tableau 15.

Tableau 15: Composition des enduits retenus.

1 ^{ère} couche		2 ^{ème} couche		3 ^{ème} couche		Les 3 couches	
CH/S	C/S	CH/S	C/S	CH/S	C/S	CH/S	C/S
0,75	0,062	0,75	1,25	0,75	0,125	0,5	0,18

4.1.7.6. Test de la goutte d'eau.

Cet essai consiste à soumettre un échantillon de terre compactée à l'impact répété de gouttes d'eau et à mesurer le temps de sa totale dégradation.

Le banc d'essai conçu et réalisé au laboratoire Géotechnique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, est un bâti doté d'un plateau mobile et de 5 vanes réglables en hauteur. Ces

vannes sont alimentées en continu à l'aide d'un réservoir à niveau d'eau constant, la charge étant égale à 2,5 m. Cinq échantillons peuvent être ainsi testés en parallèle. La mesure du temps de délitage (T_d) est rendue automatique grâce à des cellules photorésistances, sensibles à la lumière. Ces dernières sont placées dans des supports et reliées à un chronomètre, Didier et Ghomari (1990) [44].

Avant le début du test, les échantillons sont placés sur les supports contenant les cellules. Le chronomètre est enclenché au moment où les échantillons, placés chacun sous une vanne, reçoivent la première goutte d'eau. Lorsque l'échantillon est érodé sur sa hauteur, celui-ci se rompt et laisse passer la lumière qui est alors captée par la cellule. Cette dernière réagit instantanément en arrêtant le compteur ou le temps reste affiché. Figure 73.

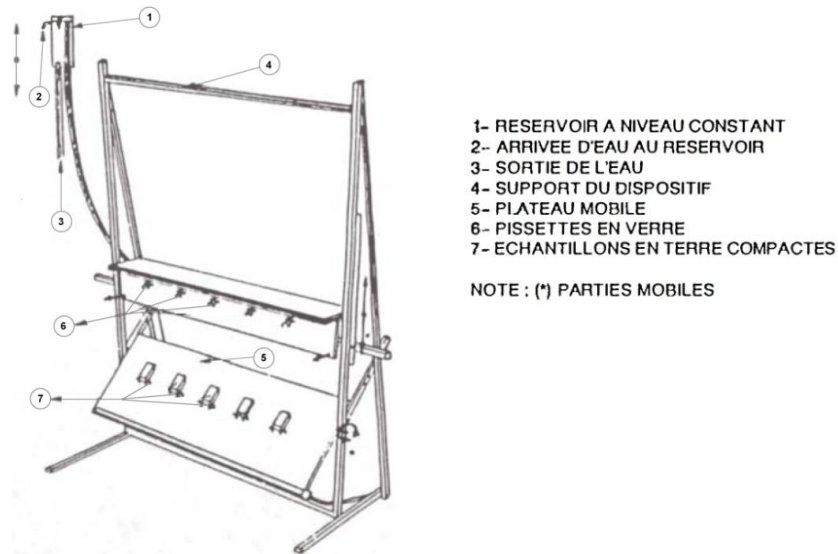


Figure 73 : Dispositif de l'essai de la goutte d'eau.

Selon Didier et Ghomari, le banc d'essai permet de faire varier les 3 paramètres suivants :

- hauteur de chute de la goutte (jusqu'à 1,5 m),
- fréquence d'impact (fonction de la charge hydraulique et de l'ouverture de la vanne),
- angle d'inclinaison de l'échantillon à tester (0 à 45 °).

Browne cite un autre essai similaire dit essai "Geelong" (normes Nouvelle-Zélandaise) qui a été utilisé pour faire couler goutte à goutte, l'eau à un rythme contrôlé sur des blocs d'échantillons d'une hauteur de 400mm, comme le montre la Figure 74 ci-dessous:

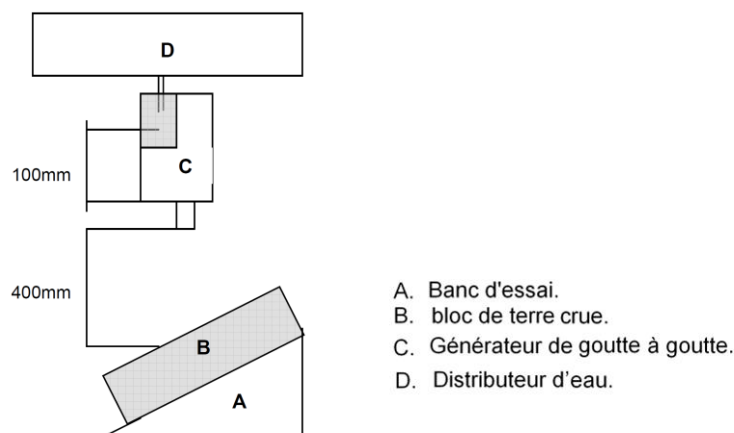


Figure 74: Geelong banc d'essai.

Des tests ont été effectués à Solent University (Southampton) sur des échantillons enduits en adoptant différents traitements de surface par l'application de divers revêtements ; Le support des ces échantillons était en terre ordinaire stabilisée à la chaux et au ciment.

Noix de coco, coton, lin, huiles végétales, beurre de karité, graisses animales, poils de chèvre, cendres et sable ont été tous utilisés comme traitement aux revêtements d'enduit appliqués aux blocs destinés à l'essai, Browne (2009) [45].

4.1.7.7. Test d'abrasion.

Les blocs testés sont secs. Une brosse métallique lestée d'un poids de 6 kg est utilisée pour frotter la face exposée à la pluie (en fonction de l'appareil de maçonnerie prévu). Un aller et retour de la brosse constituent un cycle d'abrasion; le brossage est répété pour 50 cycles. La mesure consiste en un pesage du matériau détaché par le brossage. Le poids sec de ce matériau est rapporté au centimètre carré de surface brossée afin d'obtenir un test indépendant de la forme et de la taille du bloc. , Houben et Guillaud (2006) [7].

Les blocs stabilisés au ciment et au bitume sont testés à 28 jours, ceux stabilisés à la chaux, à trois mois.

L'essai du vaporisateur d'eau (ou essai de la pomme de douche) tente de simuler des conditions dans des régions pluvieuses et humides. Dans les régions sèches et arides, l'érosion pourrait se produire naturellement sous l'action abrasive du vent de sable. Plusieurs types d'essai de la brosse ont été développés pour reproduire ces conditions. Ils impliquent l'application d'un nombre déterminé de coups de brosse avec une brosse métallique ou en nylon, ou toutes autres matières abrasives, W.E.P. (1985) [48].

Selon le World Employment Programme (W.E.P.), aucune recommandation ferme n'a été spécifiée ou établie quant à la détermination de la résistance d'un bloc de terre stabilisé sous l'action abrasive du naturel vent de sable.

L'essai ASTM D559 de la brosse métallique est sans doute l'essai le plus largement reconnu pour tester la durabilité de la terre stabilisée au ciment, il a été développé suite à des recherches sur l'usage du mélange terre-ciment comme matériau de pavage (revêtement sol), Heathcote (2002) [42].

L'ASTM D559 a été mis au point vers la fin de la seconde guerre mondiale comme méthode d'essai séchage-mouillage des mélanges compactés terre-ciment (ASTM, 1944). Il a été développé pour déterminer la quantité minimale de ciment requise dans le mélange terre-ciment afin d'atteindre un degré adéquat de dureté pour une éventuelle résistance aux intempéries du site (ASTM D559-section 3).

Dans cet essai, le sol stabilisé est compacté en trois couches, à une teneur en humidité optimale contenu dans des moules de 102 mm de diamètre et de 116 mm de hauteur. Chaque couche est compactée par 25 coups de batteur (dame) de 50 mm de diamètre (pesant 2,5 kg), tombant d'une hauteur de 300 mm, Heathcote (2002) [42].

Après compactage les spécimens sont conservés durant 7 jours dans une atmosphère de forte humidité, puis immergés dans de l'eau du robinet pendant une période de 5 heures.

Les spécimens sont ensuite placés dans un four à 71°C pendant 42 heures puis retirés.

Les spécimens ont alors subi deux coups fermes sur toutes les surfaces à l'aide d'une brosse à crins métalliques pour enlever toute la substance détachée lors du cycle séchage-mouillage. La brosse métallique, semblable à celle des bouchers, comporte 50 groupes de dix brins chacun, chaque brin a pour dimensions 50 mm par 1.6 mm par 0.46 mm.

Le coup ferme correspond à une pression de 13 Newtons et de dix-huit à vingt verticaux coups de brosse sont nécessaires pour couvrir les côtés de l'échantillon deux fois et quatre coups sont nécessaires pour chaque extrémité. Toujours, Selon Heathcote, Douze cycles de mouillage-séchage sont réalisés et à la fin de l'essai, la perte en poids est déterminée comme un pourcentage du poids sec original. Ce test est largement utilisé dans le domaine des constructions des routes. La "Portland Cement Association" (1956) a fournit des indications quant aux limites de la perte de

sols considérés comme acceptables pour les différents types de terre dans la construction de routes, allant de 7% pour les terres argileuses à 14% pour les terres granulaires.

En Afrique du Sud, Webb et al. (1950) ont effectué des essais sur des briques de terre compressée stabilisée et des briques cuites au moyen d'une modification de la norme ASTM D559 et ont conclu que les briques de terre faites à partir de sol approprié sont équivalentes aux briques cuites courantes de moyenne qualité. Un résumé de leurs résultats est montré dans le Tableau 16 ci dessus, où la valeur de 12 cycles (compatible à l'exigence d'ASTM D559) a été linéairement interpolée des valeurs de Webb et al pour 10 et 15 cycles.

Tableau 16 : Résultats de Webb et al. (1950).

Description de l'échantillon	Perte de Poids en % (Interpolée pour 12 cycles)
Sols argileux avec 6% de ciment	43
Sols argileux avec 12% de ciment	23
Sol moyen avec 6% de ciment	21
Sol moyen avec 12% de ciment	3.4
Sol sablonneux avec 6% de ciment	3.3
Sol sablonneux avec 12% de ciment	0.5
Brique courante de mauvaise qualité	5.5
Brique courante de qualité moyenne	0,6
Brique courante de bonne qualité	0

En 1958, Fitzmaurice a réalisé une étude détaillée sur l'état existant de la terre des murs des bâtiments des Nations Unies (Fitzmaurice, 1958). Dans son étude détaillée pour les propriétés de stabilisation de la terre, et afin de tester cette terre stabilisée il a utilisé l'essai ASTM D559 de la brosse métallique.

Sur la base de ses observations pour l'état des bâtiments, Fitzmaurice a exposé des lignes directrices pour la perte maximale en poids qui devrait être considérée comme acceptable en ce qui concerne cet essai .Tableau 17, Heathcote (2002) [42].

Tableau 17 : limites de Perte en poids suggérées par Fitzmaurice (1958).

Type d'aménagement	Perte en poids	
	En tout climat	En climat sec (<500 mm de pluie par an)
Constructions permanentes	<5%	<10%
Constructions rurales	<10%	<10%

Bien que considérée par Walker (1995), comme étant une mesure sévère de la résistance de la durabilité des parois en terre, l'essai de la brosse métallique a l'avantage d'être une norme ASTM spécifiquement liée à la durabilité des mélanges terre-ciment. L'essai a été adopté pour des normes de bâtiment en terre au Kenya (UNCHS, 1989) et en Inde (norme Indienne 1725, 1960), sachant que récemment le composant brosse métallique ait été omis des essais en Inde (Reddy et Jagadish, 1995), Heathcote (2002) [42].

Le principal inconvénient de l'essai de la brosse métallique est la durée exigée pour son exécution (24 jours) associé à cela les dépenses qu'il génère. Les problèmes secondaires sont la possibilité de variations dans les résultats en raison de l'application incohérente de la pression sur la brosse.

Au début des années 50 du siècle passé, la “British Standards Institution” a introduit un nouvel essai chimique pour une pierre de grès afin de déterminer sa résistance à l’abrasion.

Dans cet essai, huit échantillons de bloc (chacun 100 × 150 × 25 mm) sont horizontalement translétés en aller et retour sous huit sauteurs statiques contenant du sable fin.

Le sable frictionne contre la face supérieure de chaque échantillon (qui est en contact avec la face inférieure de chaque sauteur) donnant ainsi une augmentation à une action abrasive.

A des intervalles fréquents, chaque échantillon est pesé pour déterminer continuellement le total de la matière détachée. Cette perte de poids est un bon indicateur de la résistance au frottement d'un produit, W.E.P. (1985) [48].

Selon le World Employment Programme, La Figure 75 montre des résultats d'une succession d'essai abrasif sur différents échantillons de terre stabilisées et non stabilisées, ainsi qu'un échantillon de mortier sable/ciment. Ces essais donnent une indication claire des qualités relatives d'abrasion des différents échantillons et prouvent qu'une terre stabilisée possède de bonnes caractéristiques de frottement.

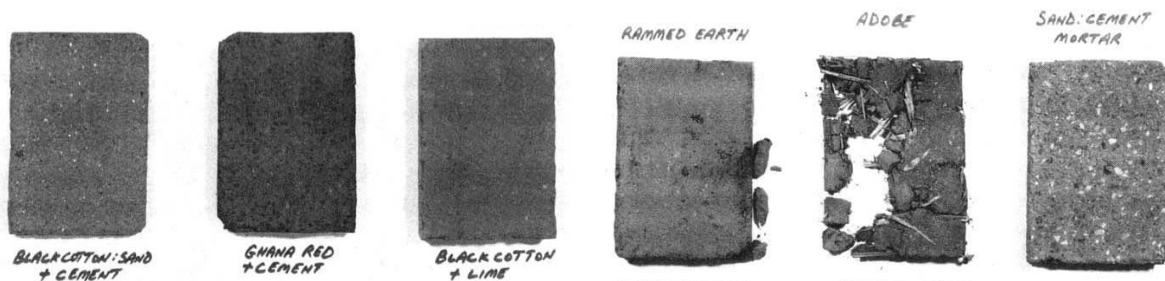
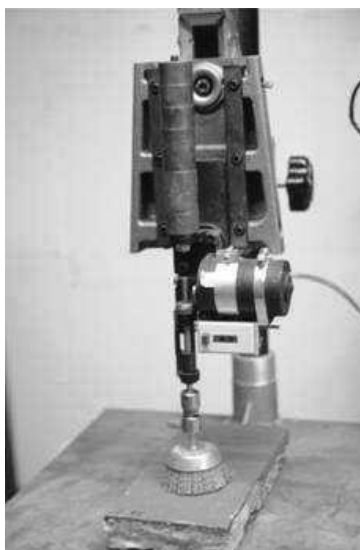


Figure 75 : Résultats de l’essai d’abrasion sur les différents échantillons.

Des procédures d’essais ont été développées par Gernot Minke, à l’Université de Kassel, afin de mesurer la stabilité du matériau à la pluie, et à l’abrasion.

Il est arrivé à la conclusion que les surfaces en terre grasse, comme les enduits en terre et les sols en terre battue sont sensibles à l’abrasion. Un dispositif d’essai a été développé pour mesurer cette résistance à l’abrasion : Une brosse dure en plastique est mise en rotation sur la surface de l’échantillon sous un poids de 2 kg. Figure 76.

Tableau 18 : Quantité des grains détachés après l’essai des différents échantillons.



N°	Echantillon: Mortier de terre	Abrasion en g						
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
1	CA	0.7						
2	CLF	0.2						
3	E						3.2	
4	EF					2.5		
5	HAF	0.1						
6	HU	0.1						
7	LF	0.0						
8	M3			1.3				
9	M4			1.5				
10	NHF	0.3						
11	NSF	0.3						
12	RG	0.5						
13	TM					2.3		
14	TMF					2.4		
15	TO	0.3						

Figure 76 : Dispositif d’essai de la résistance à l’abrasion d’enduit de terres.

Après 20 cycles de frottements de la brosse, la quantité de grains détachés est enregistrée. Le Tableau 18 montre les résultats de l'essai des 15 différents enduits de terre disponibles sur le marché allemand, Minke (2005) [49].

La méthode de l'essai ASTM C 1629 a été utilisée pour déterminer le niveau de contribution du système "Duroplex" sur la performance des deux compagnies de fabrication de composants de bâtiments industrialisés, "Georgia-Pacific" et "National Gypsum boards" lorsque ces deux fabricants ont opté pour ce procédé "Duroplex" comme option de contrôle de qualité, la phase de finition notamment, ASTM-D4977 (2003) [50].

ASTM C 1629 est subdivisé en plusieurs tests normalisés visant chacun à évaluer les caractéristiques du produit, l'essai à l'abrasion de surface (ASTM D mis à jour 4977) en est un parmi ces tests.

Initialement cet essai a été conçu pour évaluer les composants de bâtiments sortant d'usine, les toitures à surfaces minérales notamment, et déterminer la qualité d'adhérence à l'asphalte des grains de la surface de revêtement d'un échantillon de ce type de toiture, d'après la norme ASTM-D4977.

Il a été adapté avec l'ajout d'un poids de 25 livres (11,4 kg) pour pouvoir mesurer la résistance à l'abrasion des panneaux muraux. Une brosse métallique est appliquée en rotation sur toute la surface du panneau. La défaillance est enregistrée en fonction du nombre de rotations nécessaires pour causer une usure caractérisée par une marque d'une profondeur de 1,016 mm.

Plus le nombre de rotations est élevé, meilleure est sa résistance à l'abrasion.

Adapté encore une fois cet essai est utilisé pour mesurer la capacité d'une surface d'un panneau en gypse de résister aux égratignures et aux éraillures en le soumettant à 50 cycles aller-retour (déplacement rectiligne horizontal) d'une brosse métallique, d'après toujours la norme ASTM-D4977.

La profondeur de l'abrasion est alors mesurée et les résultats sont résumés dans un tableau de classifications 1, 2 ou 3 tels que définis par cette norme ASTM D 4977. Tableau 19.

Tableau 19 : mesure de la profondeur de l'abrasion.

Niveau de Classification	Profondeur maximale d'abrasion
1	3.2 mm
2	1.5 mm
3	0.3 mm

Cette méthode d'essai est censée s'appliquer aux matériaux neufs sortant d'usine et ne peut être appliquée aux matériaux qui ont été exposés aux intempéries, ASTM-D4977 (2003) [50].

4.1.7.8. Essai d'érosion en canal ("Hydraulic Flume Test")

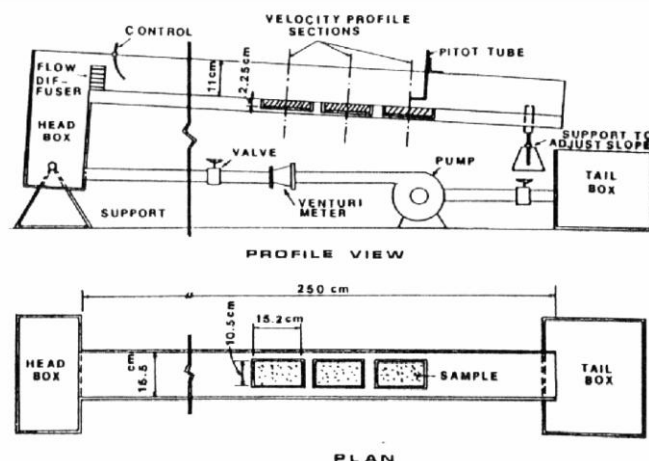


Figure 77: Schéma de l'appareillage de type canal. (Shaikh et al, 1988)

L'essai consiste à faire écouler le fluide sur la surface de l'échantillon. Le schéma de l'appareillage est montré dans la Figure 77. La force de traction est calculée par la mesure de vitesse d'écoulement. Le taux d'érosion est défini comme la pente de la courbe de masse érodée avec le temps. La masse érodée est la différence entre la masse sèche avant et après l'essai, Long Pham (2008) [43].

4.1.7.9. Essai d'érosion par cylindre tournant ("Rotating Cylinder Test").

Ce type d'essai a été développé initialement par Moore et Masch (1962). Le dispositif utilisé pour le "Rotating cylinder test" est identique à celui d'un rhéomètre classique. L'essai consiste à mettre en rotation le cylindre extérieur en maintenant fixe, le cylindre intérieur qui contient l'échantillon de sol. Figure 78.

Plus tard, avec l'amélioration de l'appareillage (Chapuis 1986a, 1986b ; Chapuis et Gatien, 1986), cet essai a permis de réaliser des expériences sur des sols intacts et des sols reconstitués. Il a permis également de mesurer précisément le taux d'érosion, Long Pham (2008) [43].

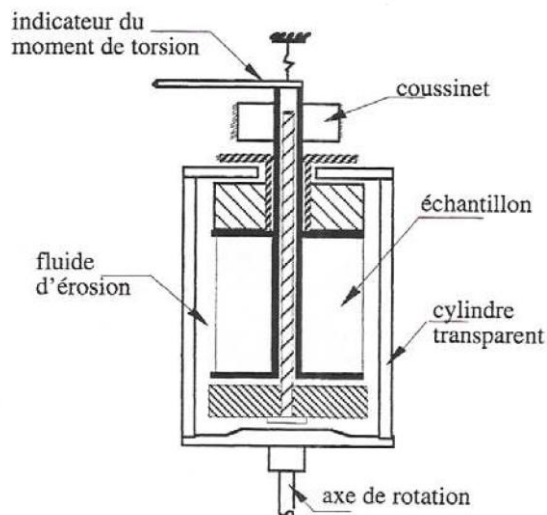


Figure 78 : Schéma de l'essai d'érosion par cylindre tournant. (Tarog, 2000)

4.1.7.10. Essai d'érosion par jet d'eau ("Jet Erosion Test").

Des recherches plus spécifiquement dédiées à l'érosion ont démarrées dans les années 80 et des essais d'érosion au moyen de jet ont été mis au point pour étudier le phénomène d'érosion de surface du sol. Dans ces essais, la surface du sol est attaquée par des jets d'eau perpendiculairement à la surface.

Lors d'essais de ce type, Moore et Masch (1962) ont mesuré la résistance à l'érosion du sol en mesurant la perte de masse du sol toutes les 10 minutes et en estimant la moyenne de la profondeur de lessivage. Ils ont trouvé que la profondeur de lessivage varie en fonction de quelques paramètres tels que la distance entre le jet et le sol, le diamètre du jet, la vitesse de l'injection, le temps.

L'érodimètre à jet mobile LCPC est issu d'un schéma daté de 1983 (Hénensal, 1983).

L'objectif était de disposer d'un appareil d'étude de l'érosion hydrique essayant de faire intervenir à la fois l'impact des gouttes de pluie et le transport par ruissellement. Une première version de l'appareil a été fabriquée en 1984 et testée en 1985.

De forme rectangulaire (5,2x10x27 cm), il comportait 7 gicleurs démontables disposés régulièrement et un réservoir.

Les travaux de Hénensal et Duchatel (1990) ont porté sur la sensibilité à l'érosion de différents types de terre.

Il a étudié l'influence de la pente, du compactage, du produit de traitement sur la résistance à l'érosion. Ces travaux ont pour objectif de corréliser la sensibilité à l'érosion externe du sol à des paramètres mesurables en laboratoire tels que la valeur au bleu méthylène, l'activité, la texture et la pente (Hénensal et Duchatel, 1990 ; Hénensal, 1993). Figure 79, Long Pham (2008) [43].

Un érodimètre à jet central fixe a été développé en 1985 par le service de Fort Worth du ministère de l'agriculture des États-Unis d'Amérique (USDA) (REMR, 1985). Le protocole expérimental consiste à envoyer un jet sous une pression de 140 kPa et de mesurer le volume de sol érodé toutes les 5 minutes et ce pendant 30 minutes. Ensuite les courbes volume érodé en fonction du temps sont tracées..

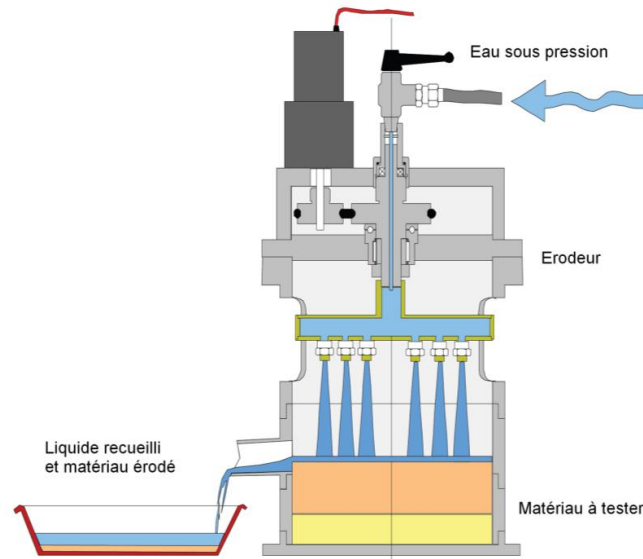


Figure 79 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre LCPC (Henensal et al., 1987) et variation de l'érodabilité en fonction de la texture (Hénensal et Rampon, 1994).

En 1990, Hanson de l'Agricultural Research Service du même ministère a proposé un appareillage au principe identique mais disposant d'une chambre fermée, l'a breveté en 1993 et fait normaliser en 1995 (Hanson, 1992 ; 1993 ; ASTM D5852-95, Hanson et Cook, 2004).

Le schéma de l'appareillage est montré dans la Figure 80. La géométrie de l'appareil de l'ARS est assez similaire à celui du LCPC. La chambre dans laquelle se passe le phénomène d'érosion est submergée par l'eau à contrario de celui du LCPC où l'évacuation est au niveau de la partie plane de l'éprouvette (Hénensal et Duchatel, 1990).

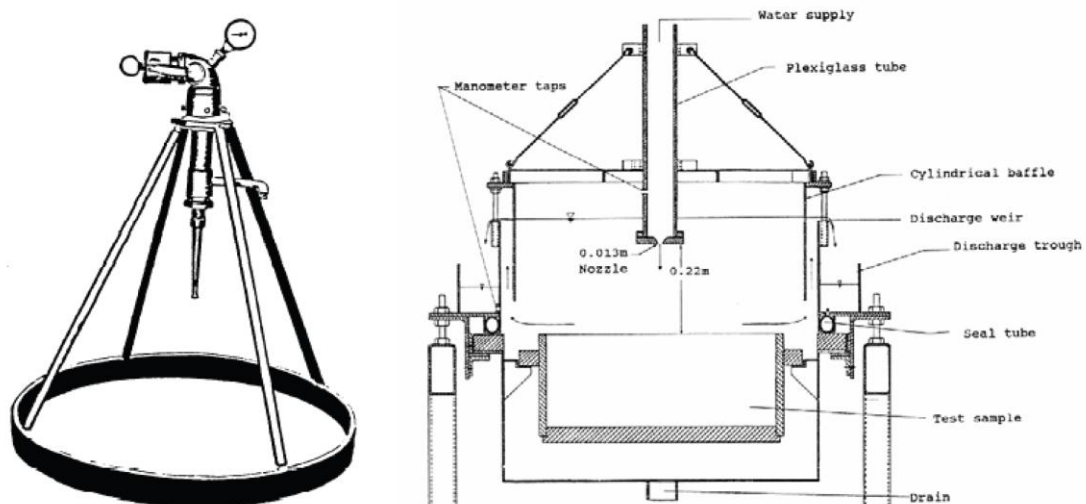


Figure 80 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre USDA (REMR, 1985) et ARS (Hanson, 1992).

4.1.7.11. Simulateurs de pluie et de ruissellement.

L'essai avec simulateur de pluie est plus spécifiquement adapté à l'étude de l'érosion pluviale (Warlouzel, 1999). Les planches réalisées en laboratoire permettent plus rapidement de réaliser des simulations de pluie ou ruissellement en conditions contrôlées. La planche dépasse rarement une surface de 1m², toutefois une longueur plus grande permet d'observer un écoulement hypodermique mieux établi. Le simulateur de pluie sera placé plusieurs mètres au-dessus de la planche. Ce simulateur doit fournir une pluie constituée de gouttes. Figure 81).

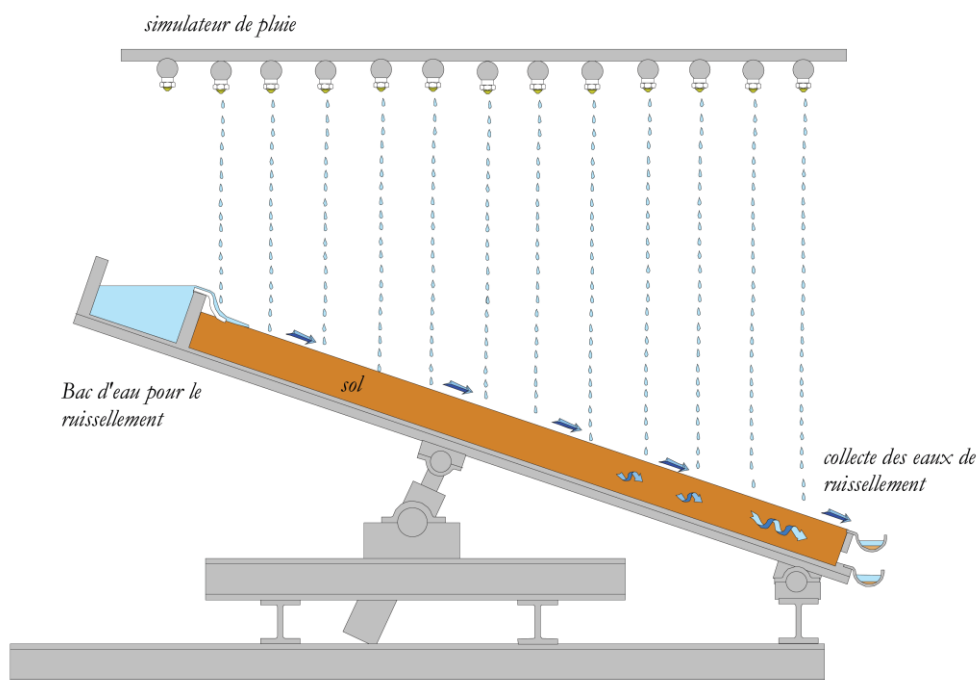


Figure 81 : simulateur de pluie (Warlouzel, 1999).

Le laboratoire permet plus facilement d'appliquer des critères d'acceptation qualitatifs. Il est plus facile de recueillir les eaux de ruissellement dans un réceptacle totalisateur et de mesurer le volume solide érodé. Les mêmes mesures qu'in situ sont effectuées à l'aide de débitmètres et de fûts:

- pluviométrie,
- ruissellement,
- matière solide érodée.

Toutefois, ces essais sont critiquables sur plusieurs points: la distribution temporelle variable est remplacée par une pluie constante, la pluie reconstituée est monogranulaire alors que la pluie est naturellement étalée.

4.1.8. Essais de vieillissement naturel.

Beaucoup de matériaux de construction, comportant des produits à base de terre stabilisée, subissent des changements physiques et chimiques quand ils sont exposés à l'extérieur pour une longue durée.

Plusieurs essais de courte durée sur site et des essais en laboratoire (tels que ceux décrits précédemment) ont été inventés pour simuler l'action du climat.

Cependant, les essais d'exposition à long terme pour lesquels des blocs de construction en terre stabilisée d'origine et de composition connue sont soumises à des conditions climatiques naturelles, sont des méthodes plus fiables pour évaluer la durabilité de ces matériaux. Malheureusement, peu d'essais de ce genre a été effectué sur des blocs de terre stabilisée comme c'est un matériau de construction relativement nouveau, W.E.P. (1985) [48].

L'intérêt d'une expérimentation sur le terrain est de soumettre les échantillons en terre (murets, panneaux, briques,...) à des conditions naturelles de vieillissement, Laurent et al. (1985) [51].

Le comportement des enduits, dans le temps, est observé sur des murets exposés aux conditions atmosphériques naturelles. Il convient de veiller à une bonne orientation des murets par rapport aux pluies et aux vents dominants. Ce test a été pratiqué en plusieurs pays mais c'est au Sénégal et aux U.S.A. qu'il a été réalisé à grande échelle et a fait l'objet d'une analyse après plusieurs dizaines d'années. Néanmoins, l'interprétation concerne davantage le comportement de murs de clôture que celui de murs d'habitations : pas d'étude de migration de vapeur qui affecte le plus les enduits. , Houben et Guillaud (2006) [7].

Les murets ont une surface exposée minimale de 1 m². Ils sont soumis aux plus fortes sollicitations climatiques de la région. Ils sont couverts d'un chapeau étanche débordant de 10 cm, muni d'un larmier. Les murets sont isolés du sol par un soubassement haut d'au moins 25 cm et pourvu d'une barrière anticapillaire. L'enduit arrive jusqu'à 2 cm du chapeau et jusqu'au soubassement sans les toucher. Un an au minimum mais plutôt deux à trois ans sont nécessaires pour tirer les premières conclusions qui ne tiendront pas compte des désordres subis par les arêtes des murets.

4.1.8.1. L'expérience de Middleton.

– Descriptif du processus

Middleton (1952) construisait en 1949 de nombreux murs d'essai de terre damée à la station expérimentale "Commonwealth Experimental Building" à Sydney. Ces expériences ont démontré, qu'après 43 ans d'exposition, les conditions climatiques ont eu un effet spectaculaire sur la durabilité des panneaux de test, Heathcote (2002) [42].

La Figure 82 montre les faces nord et sud de l'un des panneaux Middleton en terre damnée indiquant clairement la prédominance de la pluie poussée par le vent du sud de Sydney.



Face Nord



Face Sud

Figure 82 : Panneaux de terre damée à la Station Expérimentale.

En même temps que les constructeurs professionnels identifiaient le potentiel de la terre comme matériau de construction, des codes standards de travail se dirigeaient vers les performances en fonction des spécifications. Des présentes exigences des codes pour les essais de durabilité des constructions en terre ont été élaborées dans certaines localités et ne sont pas aisément copiables dans des régions où les conditions climatiques sont très différentes.

Selon Heathcote, pour satisfaire les exigences des codes basés sur les performances, il est nécessaire de comprendre l'effet des paramètres climatiques sur la durabilité des murs en terre et

de mettre au point une méthode permettant de déterminer la performance des spécimens dans le laboratoire qui pourrait être liée à la performance dans la réalité.

Ce concept "état limite" signifie que, contrairement à d'autres matériaux, où la résistance à l'érosion est fixe (comme les briques en terre cuite), la conception des murs en terre offre au concepteur la possibilité de mieux correspondre la résistance à l'érosion du matériau, avec la prise en charge climatique. Heathcote (2002) [42].

4.1.8.2. Murets Dreyfus.

Ces murets ont été construits en 15 rangées, Figure 83, orientées Nord-Sud et suffisamment écartées les unes des autres pour que les murets ne se protègent pas mutuellement. Par ailleurs, une disposition à des intervalles réguliers en quinconce, permet une égale exposition des faces Est des murets au soleil et aux pluies apportées par les vents d'Est dominants.



Figure 83: Vue générale vers l'Ouest des "murets Dreyfus" (CEREEQ, décembre 1984, Laurent et al. (1985)).

– La fabrication des murets :

Chaque muret (60 x 20 x 100 cm) est constitué de 5 lits de un bloc et demi hourdés d'un mortier contenant en volume :

- 1 partie de ciment,
- 3 parties de latérite tamisée,
- 7 parties de sable de mer.

Le socle est en béton et chaque muret est protégé par un chapeau débordant. Ce chapeau n'était pas muni de larmier lors de leur réalisation, ce qui a entraîné des pathologies importantes. Ceci fut corrigé une année plus tard, Laurent et al. (1985) [51].

– Les différentes protections testées :

Parmi les 147 murets prévus, 16 sont restés non enduits à titre de témoins.

Sur les autres, 3 types de protections ont été essayés :

1. des peintures (28 murets),
2. des badigeons (26 murets),
3. des enduits, dont :
 - épais lissés (40 murets),
 - tyroliens (37 murets).

On se limite dans cette lecture au dernier type de protection, sujet de notre contribution, les enduits en l'occurrence.

Huit compositions d'enduits ont été utilisées, mélangeant dans des proportions variables ciment et/ou chaux pour le liant, sable et/ou latérite pour l'agrégat : Tableau 20

Tableau 20 : Composition en partie volumique des 8 compositions d'enduits utilisées.

Type d'enduit	Composition en partie volumique			
	Ciment	Chaux	Sable	Latérite
1	1	0	7	3
2	2/3	1/3	7	3
3	0	1	7	3
4	1	0	7	0
5	1	0	10	0
6	3/4	1/4	7	0
7	1/2	1/2	7	0
8	3/4	1/4	10	0

– *Élaborations d'une grille d'évaluation de l'état des murets :*

Des observations ont chaque fois donné lieu à une notation qualitative globale (0→10) de l'état apparent de chaque muret assortie de brefs commentaires décrivant les pathologies constatées.

Pour cela, il fallait construire une fiche d'évaluation de l'état des murets, aussi objective et complète que possible, correspondant à trois critères essentiels : , Laurent et al. (1985) [51].

- 1° fournir un outil de terrain facilement exploitable ;
- 2° permettre une classification des pathologies observées ;
- 3° aboutir à une quantification de la gravité des défauts relevés.

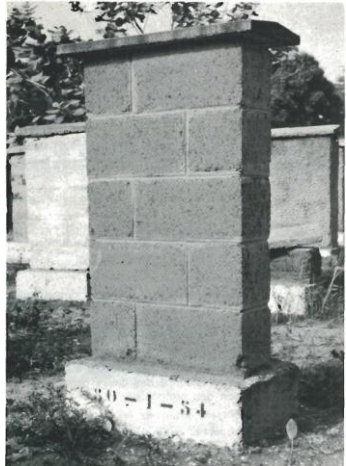



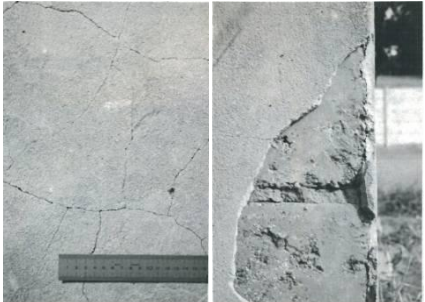
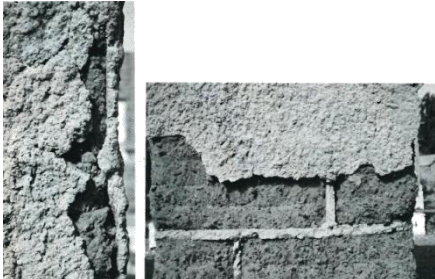
La fiche élaborée comprend deux volets principaux :

- le premier concerne le support : sa nature et les pathologies éventuellement relevées (épaufures, destruction, fissuration, érosion, infiltration). Cette partie est évidemment la plus importante dans le cas des murets non protégés ;
- le deuxième décrit la protection utilisée (si elle existe) et détaille les défauts que l'on aura pu observer selon 4 types principaux :
 - 1) défauts d'aspect : ils n'altèrent pas en eux-mêmes la qualité de la protection mais modifient son aspect extérieur. Il peut s'agir d'apports de matière adhérent à la surface, salissures de taches ou efflorescences, apparaissant à la surface d'un enduit, généralement à la suite de phénomènes de fissuration/infiltration ou d'attaques d'origine biologique liées à la présence d'eau (mousse, moisissures , champignons) ;
 - 2) défauts d'adhérence : classés suivant un ordre croissant de gravité. L'adhérence de la protection est caractérisée en testant si l'enduit "sonne creux". Pour un badigeon, ce défaut équivaut plutôt à un "cloquage". Dans le cas où la protection a disparu par endroits, on parlera de "décollements". On a distingue, pour ce défaut, les faces principales (Est et Ouest) des faces latérales et arêtes Nord et Sud ;
 - 3) érosion : ce facteur s'est révélé assez délicat à caractériser quantitativement. On s'est généralement contenté d'une description qualitative de "l'usure" observée ;
 - 4) fissuration : répertoriées suivant leurs caractéristiques géométriques et dimensionnelles. Le "microfaiçage" se traduit par des fissures très fines (< 1 mm) en réseau serré. On parlera de "macrofaiçage" lorsqu'il s'agit de fissures plus larges dans un réseau plus lâche (maille de dimension > 10 cm). Enfin, les "grandes fissures sont des fissures larges d'aspect linéaire, Laurent et al. (1985) [51].

Pour Laurent et al., la quantification de l'étendue d'un défaut a été rendue possible grâce à l'adoption d'une échelle de mesure graduée de 0 à 3 :

- 0 : signifie l'absence de défaut sur la totalité de la surface observée ;
- 1 : correspond à la présence d'un défaut sur moins de 10 % de la surface ;
- 2 : défaut présent sur plus de 10 % et moins de 50 % de la surface ;
- 3 : plus de 50 % de la surface présente le défaut considéré.

Tableau 21 : Résumé des constats et des pathologies des murets.

Murets non enduits "témoins"	Murets revêtus d'enduit épais lissé	Murets revêtus d'un enduit tyrolien
<p style="text-align: center;">Face Est</p>  <p><i>Illustration de la bonne tenue des murets non protégés fortement stabilisés (ici 80 kg/m³ de ciment)</i></p>	 <p><i>Les enduits épais lissés, même assez fortement dosés, présentent de nombreuses pathologies : défauts d'adhérence, faïençage, efflorescences.</i></p>	 <p><i>Les enduits tyroliens sont sensiblement plus adhérents que ceux appliqués à la truelle, mais présentent également un faïençage marqué.</i></p>
<p>CONSTAT</p> <ol style="list-style-type: none"> une érosion de la surface des blocs plus ou moins marquée, due vraisemblablement au ruissellement de l'eau, aggravée par deux facteurs principaux : <ul style="list-style-type: none"> – l'état de surface des blocs, – les éventuels défauts de stabilisation. Les murets non enduits, même fortement stabilisés, sont dans un état général plus médiocre que celui des murets réalisés une année plus tard, dû à l'excès de granulats entre 10 et 15 mm de la latérite utilisée à l'époque, provoquant un mauvais état de surface. les chapeaux utilisés ne réduisaient pas efficacement le ruissellement. La mauvaise stabilisation de quelques blocs, probablement imputable à un défaut de malaxage, provoque une dégradation accélérée. les murets non enduits, présentant un bon état de surface à l'origine, bien protégés et assez fortement stabilisés sont dans un état quasi parfait. 	<p>CONSTAT</p> <ol style="list-style-type: none"> aucun revêtement ne présente une adhérence totalement satisfaisante. la l'influence couplée de la mise en œuvre et des caractéristiques "mécaniques" des enduits testés ; appliqués en une seule couche épaisse (jusqu'à 20 mm), assez fortement dosés en ciment, ces enduits possèdent une raideur trop importante, entraînant une accumulation de contraintes à l'interface enduit/support lorsque la surface des murets est soumise à des sollicitations thermiques ou hydriques. 2 types extrêmes de pathologie peuvent alors apparaître : <ul style="list-style-type: none"> – si la cohésion de l'enduit est élevée, il se détache du support. L'enduit sonne "creux", et une fois détaché il "travaille librement" sauf aux arêtes, et il serait tombé sous l'effet de son propre poids ; – si, par contre, l'adhérence de l'enduit sur son support est bonne, l'enduit peut se faïencer. 	<p>CONSTAT</p> <ol style="list-style-type: none"> Les pathologies observées ne sont pas fondamentalement distinctes de celles des enduits épais. Par contre, la mise en œuvre étant différente, les mêmes défauts n'entraînent pas les mêmes conséquences : de par sa morphologie due à la projection — état de surface rugueux, épaisseur variable et faible par endroit, "amorces" de fissures — un enduit tyrolien aura plus tendance qu'un enduit épais de même dosage à se faïencer en préservant l'adhérence. Par contre, s'il y a une perte d'adhérence, le décollement s'opérera plus facilement puisque la cohésion propre de l'enduit, due à sa structure, n'est pas excellente. Ces hypothèses sont justifiées par le fait que l'adhérence moyenne des enduits tyroliens constatée sur le terrain, semble légèrement supérieure à celle des enduits épais. Toutefois, les résultats obtenus sont trop inégaux pour pouvoir recommander l'utilisation systématique d'enduits tyroliens.
<p>Pathologie des murets non enduits</p>  <p><i>Les conséquences d'un défaut de stabilisation sur un muret non protégé</i></p>	<p>Pathologie des enduits épais lissés</p>  <p style="display: flex; justify-content: space-around;"><i>Macrofaïençage</i> <i>Décollements</i></p>	<p>Pathologie des enduits tyroliens</p>  <p style="display: flex; justify-content: space-around;"><i>Fissuration/éclatement aux arêtes</i> <i>Décollement</i></p>

Cette échelle peut paraître assez arbitraire et laisse une part d'incertitude dans réévaluation expérimentale de retendue d'un défaut. Néanmoins, elle a permis ultérieurement d'opérer des classements par des méthodes d'analyse statistique afin de préciser l'influence des divers paramètres sur l'état de conservation des protections.

Tous les murets ont été examinés à la même période en appliquant la grille d'évaluation précédemment décrite. Le Tableau 21 résumera le constat et la pathologie des murets.

– Analyse des résultats d'observation :

Elle est située à deux niveaux :

- dans un premier temps, les “tendances fortes” observables directement sur le terrain de l'expérience ont été relevées ;
- dans un deuxième temps, on a cherché par des méthodes statistiques d'analyse de données à préciser l'influence des différents paramètres sur la tenue et la durabilité des enduits.

a. “tendances fortes” observables sur le terrain

Un premier fait s'impose à l'observateur : plus de 30 ans après leur fabrication, sans aucun entretien et soumise aux agressions climatiques sur toutes leurs faces, la quasi-totalité des murets est “toujours debout Seuls 6 murets ont été détruits, apparemment à la suite d'accidents. Cela confirme bien qu'il est possible de concevoir un habitat en terre stabilisée d'une durabilité suffisante.

Il reste maintenant à déterminer dans quelle mesure une éventuelle protection améliore cette durabilité. Pour cela, il importe d'analyser en détail l'état des murets par type de protection : Laurent et al. (1985) [51].

Codifications des défauts suivant l'échelle :

- 0 : défaut absent,
- 1 : défaut présent sur moins de 10 % de la surface,
- 2 : défaut présent sur moins de 50 % de la surface,
- 3 : défaut présent sur plus de 50 % de la surface.

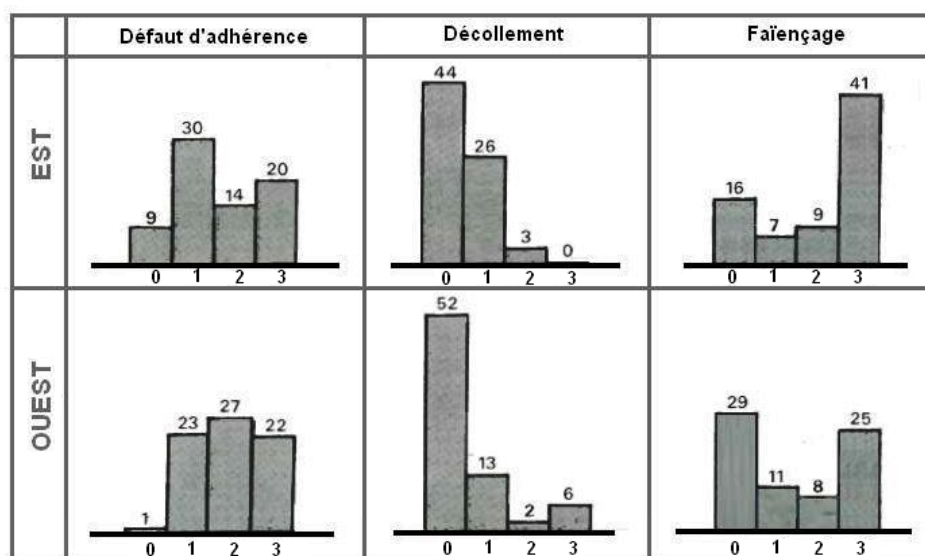


Figure 84 : Présentation synthétique de l'état des murets recouverts d'un enduit épais ou tyrolien.

Une fois définies et décrites les pathologies observées, il était important, pour Laurent et al., de déterminer quels facteurs favorisent, ou défavorisent, leur apparition. Une recherche a été entamée quant à l'évaluation de l'influence, sur l'état de conservation des murets, des données définissant le support et l'enduit.

A la suite des observations de terrain, l'état d'un muret était objectivement caractérisé à l'aide de "critères de qualité" définis par référence à la fiche d'évaluation et quantifiés sur l'échelle précédemment décrite pour la face Est et la face Ouest : Laurent et al. (1985) [51].

Adhérence, décollement, faïençage.

Après un codage approprié de ces paramètres pour les 73 murets revêtus d'un enduit, il a été possible d'évaluer leurs interactions mutuelles, à l'aide d'outils statistiques adaptés : analyse des correspondances multiples.

Cette méthode, d'une part, permet d'objectiver et/ou de relativiser les hypothèses issues de l'observation et, d'autre part, fait ressortir les informations que la complexité de l'expérience (12 paramètres !) pouvait masquer.

Les principaux résultats obtenus peuvent être synthétisés dans le tableau 22 :

Tableau 22 : Principaux résultats obtenus.

Nature de l'influence	Informations de l'expérience
dosage en ciment du support	L'adhérence progresse faiblement lorsque l'on passe d'un support dosé à 40 kg/m ³ à un support dosé à 60 kg/m ³ et semble nettement meilleure pour 80 kg/m ³ .
dosage en chaux du support	Les supports stabilisés à la chaux présentent un comportement globalement moins bon, vis-à-vis de l'adhérence, que ceux stabilisés au ciment. Le dosage ne paraît pas avoir une grande influence. Le mélange chaux/ciment à faible dosage, dans le support, a donné de mauvais résultats.
dosage en ciment de l'enduit	L'augmentation du dosage en ciment de l'enduit semble avoir un effet positif faible sur l'adhérence. Signalons, tout de même, que seuls deux dosages de liants ont été testés (rapport liant/agrégats en volume) : 10 % et 14,3 %.
dosage en chaux de l'enduit	Elle ne peut être observée isolément : à chaque dosage en ciment correspond un seul dosage en chaux restant, de toute façon, assez faible. On n'obtiendra pas, ici, d'indication sur le comportement d'enduits ne contenant que de la chaux ou sur des bâtards plus fortement dosés en chaux qu'en ciment.
pourcentage de latérite dans l'enduit	Il semble y avoir une corrélation entre faibles faïençages et présence de latérite dans l'agrégat de l'enduit.
la mise en œuvre de l'enduit	Les enduits tyroliens sont globalement plus adhérents mais aussi plus décollés que les enduits épais lissés.

En conclusion, sur le plan pratique, deux principaux enseignements sont à retenir de cette expérience :

— les blocs de terre stabilisée relativement dosés présentent une durabilité tout à fait satisfaisante sans la moindre protection. Il importe toutefois de réaliser un bon état de surface externe pour limiter l'érosion et de s'assurer d'une fabrication régulière ;

— les enduits "classiques" épais ou tyroliens ne sont pas bien adaptés aux supports en terre stabilisée. Leur adhérence est meilleure sur des supports fortement dosés en ciment : plus le support ressemble à un béton et plus les méthodes classiques de protection de ce matériau conviennent. Ce résultat est de peu d'intérêt sur le plan pratique car, dans ces conditions, l'avantage économique de l'utilisation de la terre risque de disparaître, Laurent et al. (1985) [51].

Il ressort aussi de l'ensemble des résultats, qu'il est pratiquement impossible d'éviter une dégradation progressive d'un mur sans protection superficielle même s'il est stabilisé à des dosages élevés. Ces murets servent dans une certaine mesure de démonstration des performances de la construction en terre. N'DONG (1981) recommande l'utilisation d'une terre qui ne comporte pas un excès de gros élément et l'exposition aux intempéries d'une face suffisamment lisse, sur laquelle l'eau aura moins d'action, pour espérer une bonne tenue dans le temps, Ghomari (1989) [40].

4. 2. Recherche expérimentale et analyses ds résultats.

4.2.1. Introduction

Une construction à z'gueg el Hadjadj est constituée de murs d'adobes mais aussi d'enduit qui sert de revêtement pour ces murs en briques. Les phénomènes de dégradation de la bâtisse se considèrent dans le couple adobe – enduit, et par conséquent dans la convenance de leurs compositions. La compatibilité des enduits avec les adobes demeure un facteur principal dans la restauration et la conservation des constructions en terre, car un enduit incompatible avec son support favoriserait la rapide dégradation de celles-ci.

Cette partie est consacrée à l'observation du comportement des briques enduites face à un programme expérimental qui consiste à étudier au laboratoire la tenue à l'eau : le test de séchage–mouillage et le test de remontée capillaire ainsi que l'essai de vieillissement accéléré complémentaire: l'essai d'abrasion.

Ces tests seront complétés par un autre essai, celui de l'adhérence, pour voir la compatibilité des enduits avec leurs supports.

4.2.2. Contexte général de l'étude.

Cette partie sera consacrée à la présentation du programme des essais, et à l'exposition des résultats commentés.

L'intérêt de la recherche est de peaufiner encore d'avantage un choix approprié de la composition d'enduit pour une durabilité prolongée de ces constructions en adobe : choisir le revêtement adapté qui s'ajuste le plus avec son substrat.

Selon M. OLIVIER, pour évaluer l'action de l'eau sur le matériau terre, il existe deux types d'essais :

- les uns permettent d'étudier la capacité de résistance du matériau à l'érosion,
- les autres essais caractérisent les variations de comportement générées par l'absorption d'eau par remontées capillaires ou par immersion.

Les essais par immersion sont en général réalisés sur des matériaux "stables", c'est à dire qui ne se désagrègeront pas par cet essai (bétons, graves traitées, mortier sable- ciment,...). Ce type d'essai est très défavorable avec les sols, surtout lorsqu'ils sont non traités, car, se réalisant sans confinement, on aboutit inévitablement à une destruction quasi-instantanée des éprouvettes. D'autre part, que ce soit sous forme de remblais ou de mur en terre, ce matériau est rarement soumis à ce type de sollicitation (immersion sans confinement), Olivier (1994) [52].

Pour l'essai d'abrasion, les échantillons vont subir ce test afin de voir le frottement de la brosse métallique lestée du poids sur leurs revêtements. A la fin de cet essai, des mesures de poids seront effectuées pour apporter les éventuelles observations.

Selon CRATerre, pour pouvoir réaliser ce test d'abrasion, les échantillons utilisés doivent respecter un certain intervalle de temps après leurs confections : les blocs stabilisés au ciment et au bitume sont testés à 28 jours, ceux stabilisés à la chaux, à trois mois.

Pour notre cas d'étude, cette condition est vérifiée, puisque tous les échantillons entrepris ont une durée d'existence supérieure à dix années.

Pendant cet essai, on enregistrera l'érosion de surface conduisant à une perte de masse qui va être interprétée ultérieurement.

Des échantillons de dimensions 290x140x90 mm, dotés de leurs revêtements qui ont des épaisseurs plus ou moins variables selon l'application de l'enduit, ont subi 50 cycles d'aller & retour. Le frottement est réalisé avec une brosse métallique chargée d'un poids de 6,00kg. Ce type de test a pour but de simuler expérimentalement le vieillissement des revêtements enduit par les simples conditions naturelles (action de la pluie, du vent, du soleil).

Cette méthode d'essai s'avérera-t-elle fiable ?, une question à laquelle on essaiera de répondre en conclusion.

Nous nous sommes également intéressés à un essai d'adhérence pour voir la compatibilité des enduits avec leurs adobes.

4.2.3. Enduits utilisés dans les essais.

L'enduit appliqué aux briques échantillons a été exécuté en trois couches, la première couche variant de 2 à 4 mm d'épaisseur, composée de sable fortement dosé en liant, appliquée directement sur le support, la deuxième couche de 8 à 20 mm réalisée à partir d'un mélange de liant et de sable ayant une grosseur plus petite que celle utilisée dans la 1^{ière} couche, la 3^{ème} couche d'aspect est composée essentiellement de sable fin et d'un dosage relativement faible de liant, son épaisseur varie de 5 à 8 mm, Aouissi (2000) [53].

Deux types d'enduits ont été pris et utilisés dans cette étude :

- 1- Enduits traditionnels sans la terre,
- 2- Enduits traditionnels avec la terre.

Dans ce qui suit, Aouissi a donné la composition en volume de chaque variante d'enduit utilisé.

Elle a désigné par:

- SG : sable gros
- SM : sable moyen
- SF : sable fin
- CH : chaux
- CT : ciment
- Te : terre

La composition de chaque variante d'enduit testée est faite à partir des composants cités ci-dessus :

Composition N° 1

- 1^{ière} couche: 1 SG + 1 CH
- 2^{ème} couche: 2,5 SM+1 CH
- 3^{ème} couche: 3,5 SF + CH

Composition N° 2

- 1^{ière} couche: 1 SG + 1CH
- 2^{ème} couche: 1,5 SM + 1CH
- 3^{ème} couche: 2 SF + 1CH

Composition N° 3

- 1^{ière} couche: 1 SG + 1 CH
- 2^{ème} couche: 1,5 SM + 1CH
- 3^{ème} couche: 2 SF+CH+1/8 CT

Composition N° 4

- 1^{ière} couche: 2 (G + M +F) + 1,5 CH + 1/8 CT
- 2^{ème} couche: 2 S (M + F) + 1,5 CH + 1/4 CT
- 3^{ème} couche: 2 SF + 1,5 CH + 1CT

Composition N° 5

- 1^{ière} couche: 2 SG + 1 CH + 1/8 CT
- 2^{ème} couche: 2 SM+ 1/2 CH + 1/4 CT
- 3^{ème} couche: 2 SF + 1/4 CH 1 /2 CT

Composition N° 6

- 1^{ière} couche: 3 SG + 2 CH + 1CT
- 2^{ème} couche: 6 SM + 2 CH + 1 CT
- 3^{ème} couche: 8 SF + 2 CH + 1 CT

Composition N° 7

- 1^{ière} couche: 3 SG + 2 CH + 1CT
- 2^{ème} couche: 6 SM + 2 CH + 1 CT
- 3^{ème} couche: 6 SF + 2 CH + 1 CT

Composition N° 8

- 7 CH + 1 CT + 14 sables

Composition N°9

- 1^{ière} couche: 1 Te + 1SG + 1 CH
- 2^{ème} couche: 1/2Te+1 SM + 1/2 CH +1/8CT
- 3^{ème} couche : 1 SF + 1/4CT

Composition N°10

- 1^{ière} couche: 1Te 1 SG + 1 CH
- 2^{ème} couche: 1/2Te+ 1 SM + 1CH + 1/8 CT
- 3^{ème} couche: 1 SF + 1CH 1/2 CT

4.2.4. Programme des essais.

Le tableau 23 résume le programme des essais :

Tableau 23 : Programme des essais.

N°	Désignation de l'essai
1	Méthode d'essai standard de séchage-mouillage (ASTM D 559)
2	Méthode d'essai "Essai de Capillarité" ou de "remontée capillaire".
3	Méthode d'essai standard de frottement par abrasion ASTM - D4977
4	Essai d'adhérence EN 1015-12 : Détermination de l'adhérence des mortiers d'enduits durcis appliqués sur supports.

4.2.4.1. Essai de séchage-mouillage.

4.2.4.1.1. Spécifications générales.

– *Champ d'application.*

C'est un essai de vieillissement accéléré qui permet d'obtenir des indications sur la durabilité du matériau dans le temps.

L'objectif est de connaître dans un délai court, le comportement du bloc soumis à des cycles répétés comprenant des conditions de conservation sévères.

– *Résumé de la méthode d'essai.*

La procédure présentée est celle de la norme ASTM D 559 et de la norme AASHTO T 135

. Les éprouvettes sont immergées complètement dans l'eau, à la température de la pièce de travail, durant cinq heures. Passé ce délai, les éprouvettes sont retirées de l'eau puis séchées dans un four ou dans une étuve à la température de 71° C. Ce séchage dure 42 heures, délai au-delà duquel les éprouvettes sont retirées du four puis brossées une à une. Ce brossage est effectué à l'aide d'une brosse métallique et sert à évacuer tous les fragments de matériau affectés par les cycles de mouillage et de séchage. Le brossage est ferme et concerne chaque endroit des éprouvettes, dans deux directions (haut et bas), soit un total de 18 à 25 coups de brosse. , Houben et Guillaud (2006) [7].

La force appliquée au brossage est de l'ordre de 1,5 kg. La procédure sus-décrite constitue un cycle de 48 heures de mouillage-séchage. Les éprouvettes sont ensuite de nouveau immergées dans l'eau et soumises à un autre cycle de mouillage-séchage. La procédure est répétée pour douze cycles.

– *Signification et utilisation.*

La brique enduite sera soumise à des cycles répétitifs de mouillage et séchage. La perte en poids du bloc, exprimée en pourcentage, à l'issue de ces cycles sera utilisée comme critère de durabilité.

– *Dispositif.*

- Etuve ventilée réglable à 71°C,
- balance de précision à 0,05 % du poids du bloc sec,
- récipient à fond plat, permettant l'immersion totale de l'échantillon, contenant de l'eau potable,
- peau de chamois ou linge non absorbant.
- une brosse métallique.

– *Les éprouvettes de l'essai.*

Pour des raisons de restriction du nombre des échantillons disponibles sur place, seulement 3 types d'enduits traditionnels, tous en 3 couches, vont être testés, il s'agit particulièrement des compositions 1, 9, et 10.

Les briques destinées à l'essai, stockées dans un endroit abrité dans une des salles du laboratoire et vieilles de plus de 10 années, seront examinées dans des conditions normales du laboratoire à une température de 23± 2°C.

Ensuite ces échantillons vont subir les essais suivant les spécifications notées précédemment.

– *Préparation du Dispositif.*

- stocker le bloc pour une période de sept jours en atmosphère très humide.
- Essuyer le bloc afin d'éliminer toute poussière et irrégularités collées au bloc.
- Etuver le bloc à 71°C jusque poids constant après chaque immersion.

– *Procédure*

- immersion totale de l'échantillon dans l'eau pendant 5 heures (la température du laboratoire),
- retrait de l'éprouvette de l'eau,
- séchage dans une étuve à la température de 71° C pendant 42 heures,
- retrait de l'éprouvette de l'étuve,
- brossage de 18 à 25 coups d'une force de l'ordre de 1,5 kg, à l'aide d'une brosse métallique en évacuant tous les fragments de matériau affectés par les cycles de mouillage et de séchage,
- La procédure sus-décrite représente un cycle soit 48 heures de mouillage-séchage,
- répétition de la procédure pour douze cycles.

– *Procédé d'interprétation.*

- Calculer la perte en poids en pourcentage entre le poids sec avant et après les cycles (P),
- A la fin de ces cycles les désordres suivants peuvent apparaître : effritement, perte de poids, érosion superficielle; ils seront à consigner sur la feuille de résultat.

4.2.4.2. Essai de remontée capillaire.

Afin de se rapprocher des conditions réelles d'utilisation du matériau terre, nous avons préféré l'exécution d'un essai de remontée capillaire, qui est plus représentatif de l'action de l'eau lors de la remontée capillaire dans des murs (accumulation d'eau de pluie en pied de mur,...).

Cette partie est consacrée à l'observation du comportement des briques enduites face à un essai de remontée capillaire. Pour ce faire, ces échantillons vont subir des immersions partielles dans un récipient rempli d'eau.

Des pesées seront faites à des intervalles de temps variables en fonction de la vitesse d'absorption d'eau.

4.2.4.2.1. Spécifications générales.

– *Champ d'application.*

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la vitesse d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

– *Résumé de la méthode d'essai.*

L'essai d'absorption d'eau est destiné donc à déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité. Cet essai consiste à mesurer l'accroissement de la masse de l'éprouvette placée dans un récipient dont le niveau d'eau est maintenu à 5 mm au dessus de la face inférieure de l'éprouvette. Il permet ainsi de déterminer la vitesse d'absorption d'eau des blocs en terre en fonction du temps et on en déduit le temps au bout duquel l'éprouvette est saturée en eau.

– *Signification et utilisation.*

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes enduites, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. La pente de la droite qui s'ajuste le mieux avec les points expérimentaux en fonction de la racine carrée du temps

v_t , représente le coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats sont exprimés en g/cm^2 pour chaque temps v_t ,

– *Dispositif.*

- *Le mécanisme de l'essai.*

Les éprouvettes préalablement séchées sont placées verticalement dans un bac en plastique contenant de l'eau sur de petits supports suivant le schéma indiqué à la Figure 85, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un ruban adhésif imperméable sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps à 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180 et 240 minutes.

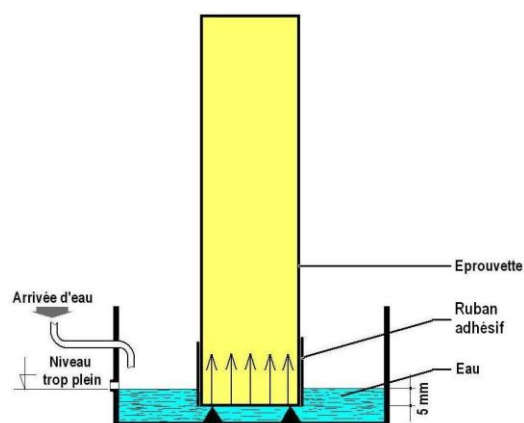


Figure 85 : Schéma du dispositif de l'essai d'absorption.

- *La balance de pesage.*

Balance de marque KERN sera utilisée dans le pesage des échantillons conformément aux exigences suivantes:

- Poids maximal admissible 12100g.
- Variation $d = 0,1g$.



Figure 86: Balance de précision 0.1 g.

– *Les éprouvettes de l'essai.*

Les briques destinées à l'essai, stockées dans un endroit abrité dans une des salles du laboratoire et vieilles de plus de 10 années, seront examinées dans des conditions normales du laboratoire à une température de $23 \pm 2^\circ C$.

Pour cet essai, cinq types d'enduits traditionnels vont être testés "sable, chaux, ciment", dont deux à base de terre. Ces enduits en 3 couches ont été appliqués aux adobes paillés de 29x14x9 cm.

Ensuite ces échantillons vont subir les essais suivant les spécifications notées précédemment.

– *Préparation du Dispositif.*

Les échantillons seront placés verticalement dans un récipient étanche à l'eau sur les deux supports conçus à cet effet.

Pour éviter l'infiltration de l'eau par les cotés latéraux de l'échantillon, un ruban adhésif étanche sera prévu sur tout le pourtour de la brique.

La balance électronique décrite dans le paragraphe dispositif sera utilisé pour l'ensemble des mesures effectuées. Avant chaque pesée la base de l'échantillon sera essuyée par un chiffon humide. Ces opérations sont effectuées le plus rapidement possible et poursuivies jusqu'à saturation de la brique.

– *Procédure*

Avant d'entamer l'essai, les spécimens seront pré-conditionnés en les séchant dans l'étuve à environ 105°C, jusqu'à une masse constante.

Ils seront ensuite pesés, puis mis en contact avec de l'eau à une profondeur de 5 mm.

La petite surface de l'échantillon (la face immergée) sera mesurée et enregistrée. Le gain de poids sera lui également mesuré à plusieurs moments sur une période de 13 heures 20 minutes (typiquement 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180 et 240 minutes).

– *Procédé d'interprétation.*

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différentes briques, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps.

L'équation de ces droites a la forme : $Q / A = S \sqrt{t}$

Q : La quantité d'eau absorbée en (cm³) ;

A : La surface du spécimen en contact avec l'eau (cm²)

t : Le temps (s),

S : Le coefficient de Sorptivité du spécimen (cm/s^{1/2}).

4.2.4.3. Essai de résistance à l'abrasion.

Basé sur l'essai : ASTM - D4977, Méthode d'essai standard de frottement par abrasion, des grains des surfaces des toitures minérales.

Cette partie est consacrée à l'observation du comportement des briques enduites face à un essai de vieillissement accéléré. Pour ce faire, ces échantillons ont subi des contraintes de frottement par une brosse métallique lestée d'un fardeau.

A la fin de cet essai, des mesures de poids seront effectuées pour apporter les éventuelles observations.

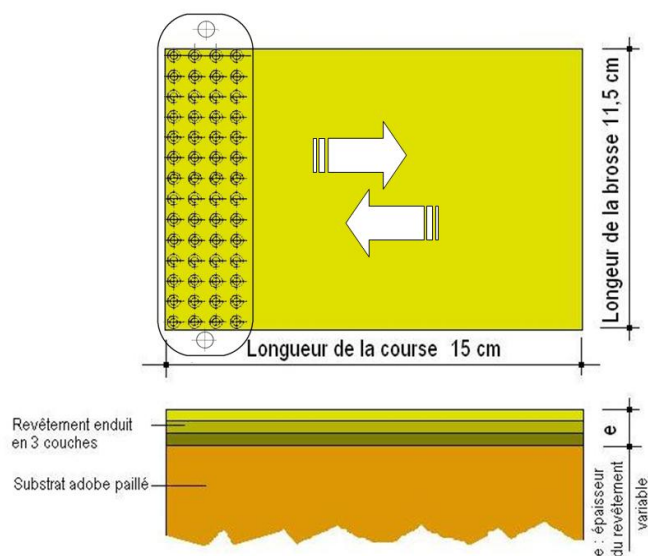


Figure 87: Résistance à l'abrasion : Surface brossée.

4.2.4.3.1. Spécifications générales.

– *Champ d'application.*

Cette méthode d'essai se veut une disposition pour déterminer la résistance des revêtements, des enduits traditionnels appliqués à des adobes en terre paillée, provoqué par frottement ; Et leurs comparaisons, en fonction des différents types de compositions employées. Elle consiste à déterminer la masse des grains détachés de la surface d'enduit en terre suite à une série de frottements par une brosse métallique lestée d'un poids de 6 kg. L'ampleur de l'adhérence est évaluée en pesant le total de grains qui se sont éliminés de l'échantillon et devenus détachés.

– *Résumé de la méthode d'essai.*

Une brosse de poils métalliques, immobilisée horizontalement et chargée verticalement d'un poids de 6 kg, est utilisée pour frotter la surface de l'échantillon suite au déplacement rectiligne en "va et vient" de l'échantillon sur une course de 150 mm. Le poids de la quantité des grains détachés est estimé par pesée suite à cet essai d'abrasion.

– *Signification et utilisation.*

Cette méthode d'essai est utilisée pour déterminer la qualité du revêtement des échantillons des briques d'adobe enduites. Les résultats obtenus nous renseignent, par une analyse comparative, sur l'efficacité de ces revêtements.

– *Dispositif.*

• *L'appareil de l'essai.*

L'appareil de l'essai, Figure 88, est conçu pour réaliser le test en assurant horizontalement, et en mouvement rectiligne, 50 cycles en aller et retour sur l'échantillon.

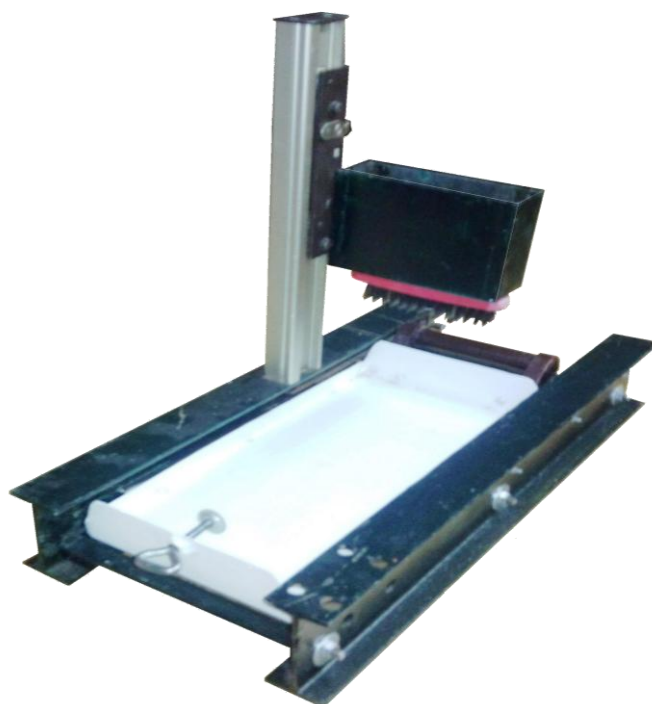


Figure 88: Resistance à l'abrasion : Dispositif de l'essai.

L'appui de l'assemblage de la brosse (bac métallique porte-poids complet) sur l'échantillon a une masse descendante de 6000 ± 5 g; la longueur de la course est de l'ordre de 150 ± 2 mm.

2 profilés métalliques, des IPE 100 de 600 mm chacun, servent de support pour le dispositif.
Figure 89

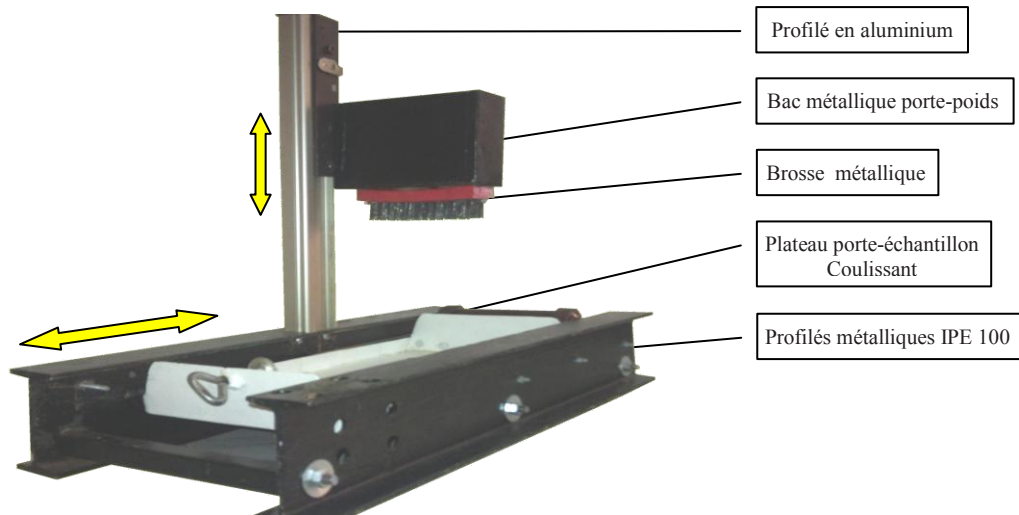


Figure 89 : Composants du dispositif expérimental.

Ces profils sont assemblés par 3 tubes carrés de 20x20x220 mm de manière à intégrer un plateau coulissant entre les 2 IPE, sur des rails dotés de roulements lubrifiés.

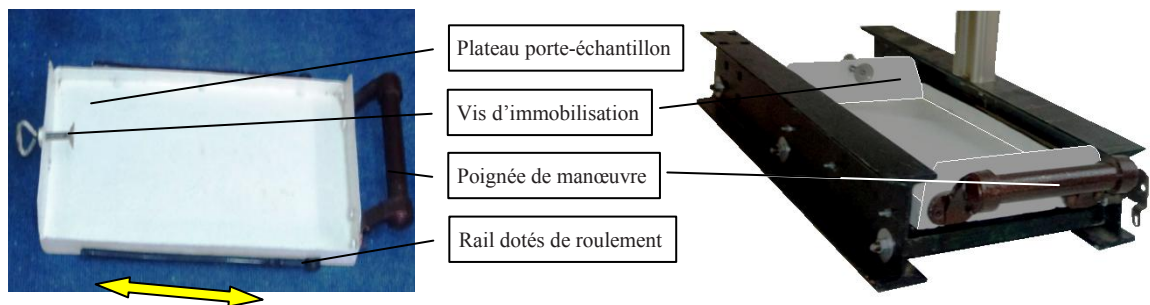


Figure 90 : Dispositif expérimental : Plateau porte-échantillon coulissant.

Le plateau en acier de 400 mm de long par 20 mm de large porte à un de ces 2 pignons une poignée de manœuvre destinée à faire le déplacement horizontalement rectiligne du plateau (le va et vient), et à l'autre pignon, une vis de serrage et d'immobilisation de l'échantillon voir figure.....

Le socle en IPE porte sur un de ces cotés, un agencement rectangulaire en tube aluminium de 50x 30 haut de 400 mm sur le quel est conçu un mécanisme coulissant verticalement grâce à des petits roulements, sur ce mécanisme, doté d'un procédé de freinage, est fixé un bac métallique porte-poids (pour la masse de 6000 g) de 55x155mm et de 100 mm de hauteur sur lequel est fixé une brosse à poils métalliques.

Le procédé de freinage facilite l'immobilisation du mécanisme porte "poids et brosse" lors de l'introduction ou le retrait de l'échantillon du bac coulissant.

La masse de 6kg est assurée par des pièces métalliques en fer plat de 50x150x5mm au nombre de 18.

Le poids de chaque pièce est de 294g, leur poids total est alors de 5292g.

Sachant que le mécanisme pèse 690g, une masse de 18g a été ajoutée pour atteindre en fin de compte un poids de 6000g, le poids recommandé pour effectuer cet essai. Figure120

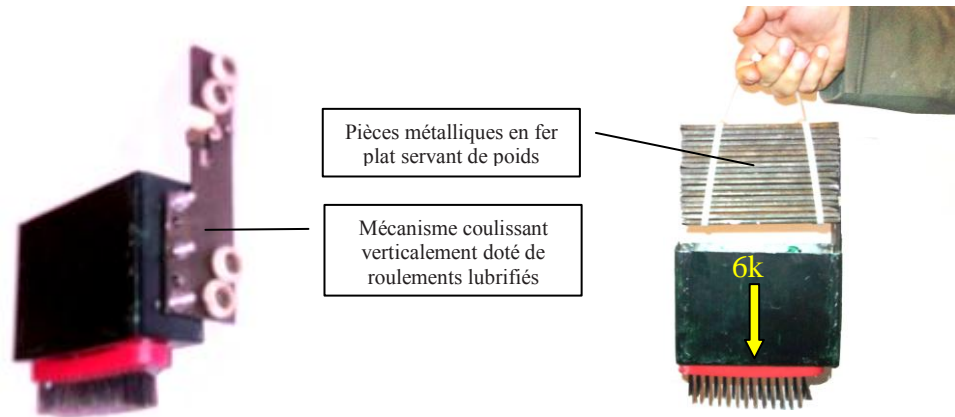


Figure 91 : Dispositif expérimental : le mécanisme porte-poids (6kg).

La longueur de la course est de 150 mm, assurée par 2 butées fin de course, fixées sur le socle du dispositif. Figure 92.

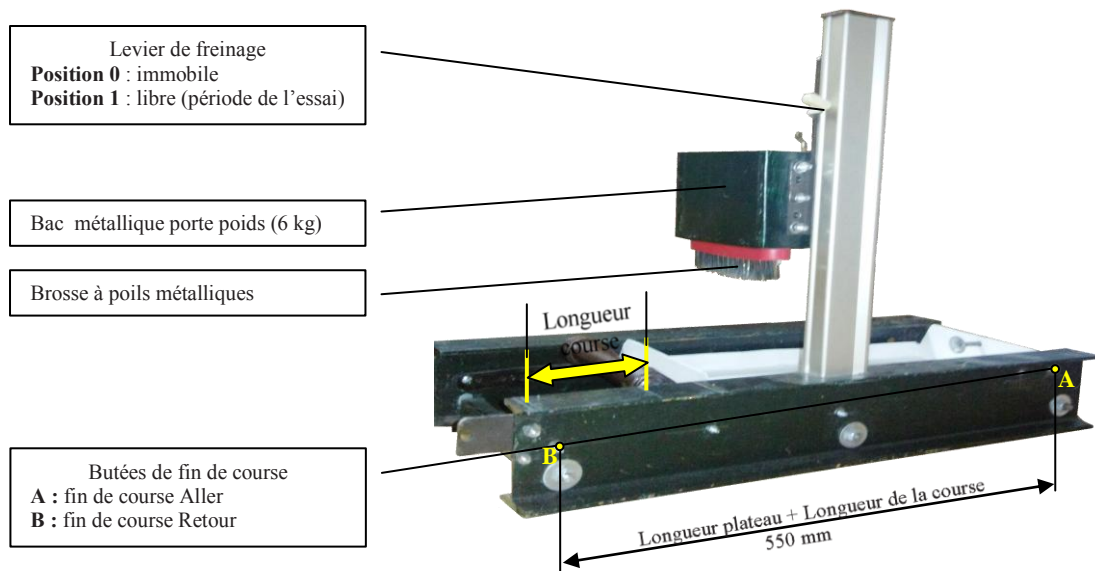


Figure 92 : Dispositif expérimental : Longueur de course (150 mm).

La brosse utilisée est procurée à partir d'un magasin de quincaillerie, elle a 140mm de long et 30mm de large, la hauteur des poils varie de 22 à 23 mm

Ce sont les dimensions de la brosse et les dimensions des fers plats, utilisés comme masses qui ont engendré celles du bac porte-poids.

La brosse comporte 56 trous (4 files de 14) contenant chacun 24 poils raids réalisés à partir de fil d'acier traité, le diamètre du poil est de l'ordre de 0.35 mm de.

Le dessin de la brosse est montré dans la Figure 93.

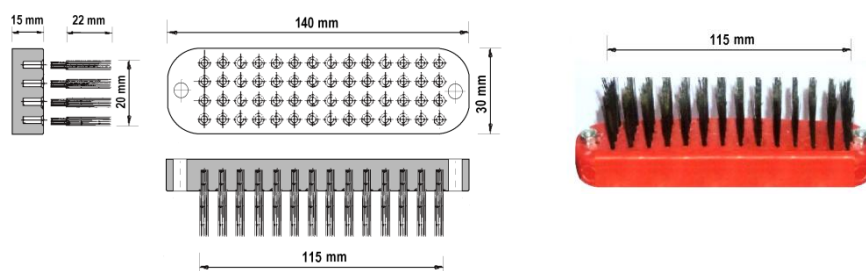


Figure 93 : Brosse utilisée pour l'essai.

- *La balance de pesage*

Balance de marque KERN sera utilisée dans le pesage des échantillons conformément aux exigences suivantes:

- Poids maximal admissible 12100g.
- Variation $d = 0,1g$.



Figure 94 : Balance utilisée pour le pesage.

- *Les éprouvettes de l'essai.*

Pour cet essai, neuf types d'enduits traditionnels vont être testés "sable, chaux, ciment", dont deux à base de terre. Ces enduits en 3 couches, sauf pour la composition n°8 qui est en monocouche, ont été appliqués aux adobes paillés de 29x14x9 cm Voir Fig. ci-dessus.

Ensuite ces échantillons vont subir les essais suivant les spécifications notées précédemment (Voir Spécifications générales de l'essai abrasion).

Des essais sur des adobes paillés sans revêtement (substrat en terre dépourvu d'enduit) seront réalisés afin de discerner la différence de la résistance à l'abrasion lorsque des enduits stabilisés leurs sont appliqués,

Le substrat des échantillons des briques prévus pour cet essai a pour dimensions 290x140x90 mm, par contre les échantillons dotés éventuellement de leurs revêtements ont des dimensions plus ou moins variable selon l'application de l'enduit, sachant que ce dernier enrobe entièrement le substrat. Le sens de la longueur sera le même que celui de l'appareil. La surface de 150 x 115 mm frottée par la brosse sera exécutée sur la surface de 290x140 mm de l'adobe, figure124.

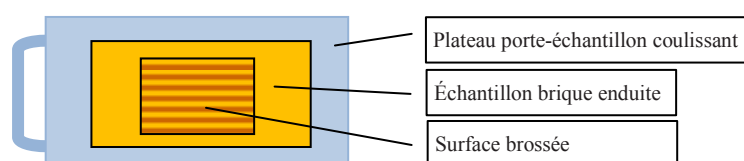


Figure 95 : Dispositions de mise en place de l'échantillon.

Les briques destinées à l'essai seront examinées dans des conditions normales du laboratoire à une température de $23 \pm 2^\circ C$, sachant que ces échantillons sont stockés dans un endroit abrité dans une des salles du laboratoire un peu plus de 10 années.

- *Préparation du Dispositif.*

Avant de lancer l'opération, une procédure de dispositions a été effectuée pour faire achever dans des bonnes conditions les tests, il s'agit notamment de :

- faire coulisser le bac porte-poids à l'état vide vers le haut afin libérer l'espace pour la mise en place de la brique échantillon.
- introduire la brique dans le plateau coulissant en la posant sur sa grande surface de 290x140 mm tel que mentionné dans la figure
- immobiliser la brique sur le plateau par la vis de serrage prévue à cet effet, des calles parallépipédiques en bois seront nécessaires.

- faire coulisser le bac porte-poids à l'état vide vers le bas jusqu'au contact de la brosse avec la brique.
 - S'assurer que tous les poils de la brosse ont presque la même longueur et que le plan formé par les extrémités des poils est bien parallèle à celui de la brique.
 - introduire dans le bac porte-poids la masse constituée par les pièces de fer plat pour lester la brosse de son poids de 6 kg.
 - S'assurer du chevauchement de la surface frottée par la brosse par rapport à la surface de la brique.
 - commencer les 50 cycles d' "aller et retour" en coulisant le plateau par sa pognée.
 - vérifier après chaque essai l'état des composants du dispositif.
- *Procédure.*
- En utilisant un pinceau plat à poils souples, enlever les grains dégagés de l'échantillon avec des légers petits coups.
 - Peser avant l'essai, l'échantillon à 0,01 g près et enregistrer sur un papier la masse initiale.
 - Nettoyer le plateau coulissant de tout résidu et fixer l'échantillon dans ce dernier avec la face choisie pour être testée de la surface enduite vers le haut. (Contrôler visuellement et s'assurer du chevauchement de la surface frottée par la brosse par rapport à la surface de la brique.
 - Placez la brosse en contact avec l'échantillon.
 - Commencer à coulisser le plateau par sa pognée jusqu' à ce que l'échantillon soit brossé 50 cycles complets (50 coups aller et 50 coups retour) avec une trajectoire de la brosse parallèle à l'axe longitudinal de l'échantillon.
 - Retirer l'échantillon du plateau coulissant, et nettoyer doucement à l'aide d'un pinceau plat l'échantillon de tous grains détachés.
 - Peser après l'échantillon à 0,01 g près et enregistrer sur un papier la masse.

– *Procédé d'interprétation.*

Le poids en grammes de grains qui se sont détachés dans l'essai d'abrasion sera calculé comme suit:

$$P = A - B \quad P \text{ étant le poids des grains détachés}$$

Où:

A = poids de l'échantillon en g, avant l'essai, et

B = poids de l'échantillon en g, après l'essai.

4.2.4.4. Essai d'adhérence (pull-off test).

Appelé aussi test de quantification de l'adhérence ou test de rupture entre deux matériaux. Cet essai est utilisé afin de fournir des renseignements sur les propriétés d'adhérence des différents enduits sur leurs substrats. Il peut être effectué par traction, par flexion et/ou par cisaillement direct ou indirect [Ohama], Nicot (2008) [54].

Notre cas d'étude considère l'essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test.

4.2.4.4.1. Spécifications générales.

Basé sur la norme EN 1015-12.

La force d'adhérence est mesurée comme la contrainte maximale de traction par charge directe perpendiculaire à la surface du mortier d'enduit appliqué sur un support. La force de traction est appliquée sur une pastille de traction définie, collée sur la surface d'essai du mortier. La force d'adhérence est le rapport entre la charge de rupture et la surface correspondante.

– *Champ d'application.*

Détermination de la force d'adhérence entre le substrat en terre paillée et les différents enduits.

Les informations suivantes sont rapportées:

- La force de la résistance à la traction en N des spécimens.

- Le point de rupture avec respect de l'interface entre l'enduit et le substrat d'adobe.

- *Résumé de la méthode d'essai.*

L'essai consiste à mesurer à l'aide d'un extractomètre avec lequel on arrache une pastille (50 mm) de la surface d'enduit découpée au préalable à l'aide d'une carotteuse sur une profondeur un peu plus supérieure à celle de l'enduit.

Selon P. Nicot, un disque métallique, sous forme de pastille, complété par une tige filetée sera collé par la suite sur l'enduit afin de pouvoir exercer un effort de traction à l'aide d'un dispositif d'arrachement et mesurer la force d'extraction.

- *Signification et utilisation.*

Cet essai et le traitement des résultats sont rapides à effectuer. On en déduit la force à l'arrachement et on définit le mode de rupture pour chaque essai.

La rupture peut être cohésive dans le support ou dans le mortier ; elle peut être aussi adhésive, c'est-à-dire suivant l'interface ; ou mixte, à la fois cohésive et adhésive.

Pour ce type d'essai, pour qu'un produit testé soit considéré conforme aux prescriptions, il faut une proportion plus importante de rupture cohésive dans le support, Nicot (2008) [54].

- *Dispositif.*

- *L'outil carotteur.*

L'outil carotteur est un trépan de 50 mm de diamètre monté sur une carotteuse, un tube rond tournant, entraîné par un moteur électrique à une vitesse réglable, on découpe une surface circulaire de l'enduit, à une profondeur suffisante, pour délimiter la zone de la mesure d'adhérence.

Cet appareil, tel que montré dans la Figure 96, est destiné habituellement pour le matériau béton.

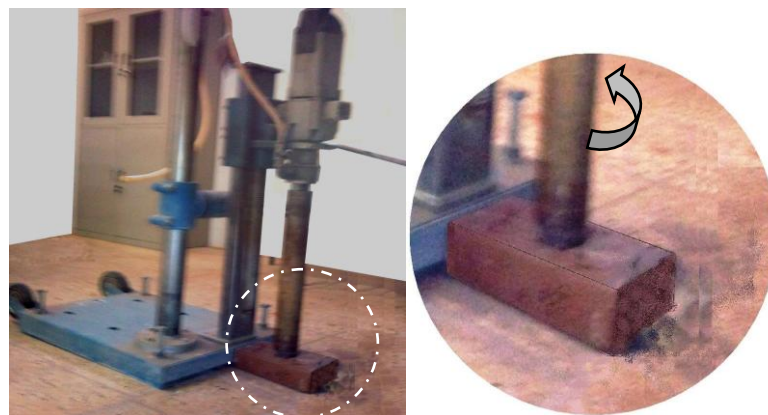


Figure 96 : Dispositif de carottage.

Le tube carotteur doit pénétrer l'échantillon en traversant tout le revêtement et s'enfoncer dans le substrat dans les environs de 5mm de profondeur, Figure 97.

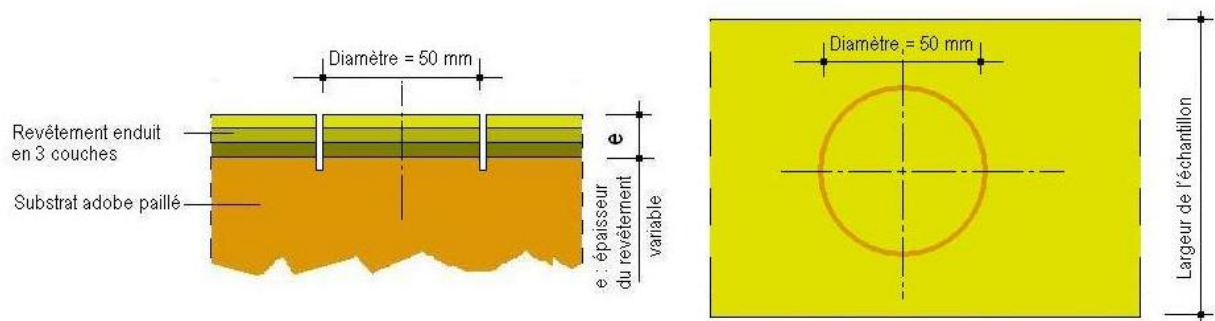


Figure 97 : Carottage des spécimens.

- *Dispositif d'arrachement.*



Figure 98 : Dispositif d'arrachement : L'Extractomètre.

Sur la surface ainsi découpée, une pastille métallique du même diamètre est collée avec un adhésif rapide de marque ALTECO 3-TON QUICK EPOXY, disponible sur le marché.

La colle ALTECO est composée de 2 tubes : un tube A résine, et un tube B durcisseur, les 2 pâtes et pour des quantités identiques seront mélangées et bien remuées, ensuite appliquées sur la pastille métallique pour être enfin coller à l'échantillon. Pour un collage parfait le temps recommandé est de 60 minutes et plus. Sur cette pastille est fixée une rotule mâle venant se loger dans la rotule femelle située à la base de l'axe central de l'appareil d'essai d'adhérence.

L'essai d'adhérence consiste à exercer sur la rotule mâle un effort de traction normal à la surface de la pastille. On obtient ainsi la valeur d'adhérence (en daN) de l'enduit sur son support, si la rupture a lieu suivant le plan de contact.



Figure 99 : Collage de la pastille à l'échantillon.

Durant l'opération les échantillons seront examinés dans des conditions normales du laboratoire à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Tous les spécimens ont été préparés pour cet essai.

- *Les éprouvettes de l'essai.*

Les mêmes échantillons employés dans l'essai d'abrasion précédent, seront utilisés cette fois-ci pour l'opération de carottage, mais l'usage sera sur la deuxième face de l'échantillon, celle qui n'a pas été brossée.

Neuf types d'enduits traditionnels vont être testés "sable, chaux, ciment", dont deux à base de terre.

Ensuite ces échantillons vont subir les essais suivant les spécifications notées précédemment dans spécifications générales de l'essai d'adhérence.

L'opération du test sera envisagée dans des conditions normales du laboratoire à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

- *Préparation du Dispositif.*

Après l'opération de carottage, une fois les échantillons préparés, une pastille métallique de forme cylindrique et de 50 mm de diamètre, appartenant au dispositif d'arrachement, doté d'un

boulon de fixation à son extrémité supérieure, sera collée à la zone carottée de l'échantillon, figure 100.

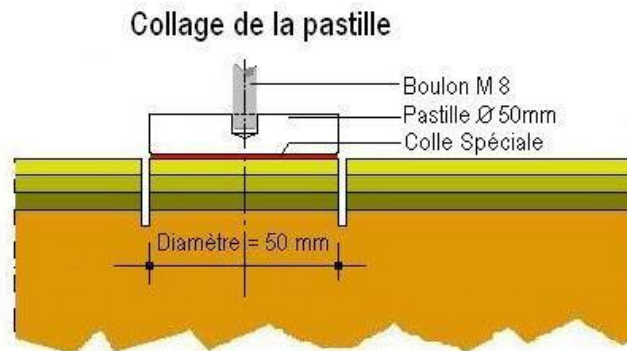


Figure 100 : Collage de la pastille à l'échantillon.

Avant de lancer l'opération, des dispositions ont été effectuées pour faire achever dans des bonnes conditions le test, il s'agit notamment de :

1. s'assurer du mélange approprié pour des quantités identiques des 2 pâtes.
2. s'assurer de la bonne application de la colle sur la pastille métallique.
3. s'assurer du temps recommandé (plus de 60 minutes) pour un collage exemplaire (pour gagner du temps 3 pastilles métalliques ont été utilisées parallèlement)

– *Procédure.*

Les spécimens ont été testés au laboratoire du département génie civil de l'Université de Laghouat.

Chaque échantillon sera placé dans le dispositif d'essai, finement centré et attaché à ce dernier par un boulon M8 à tête sphérique, une manivelle prévue sur l'appareil sert pour exercer l'arrachement de la pastille de l'échantillon, en arrachant séparément les spécimens. La force d'arrachement enregistrée sur l'indicateur à aiguille, générée par la manivelle pour séparer l'enduit du substrat, sera ensuite lue et enregistrée. Figure 101 ci-dessous.

Il est à rappeler que cet appareil de test est destiné au matériau béton.



Figure 101 : Mise en place de l'échantillon dans le dispositif d'essai.



Figure 102 : Exécution de plus d'un carottage sur la même brique.

Source : www.bbri.be/antenne_norm/beton/fr

8. Interprétation

Le pull-off test dépend de nombreux facteurs et ces derniers peuvent perturber la mesure de l'adhérence. L'épaisseur et le diamètre du disque métallique, la distance entre les carottages (carottages effectués sur la même brique, Figure 102, la profondeur de carottage, la vitesse de mise en charge, le nombre d'essais, la perpendicularité de la traction et la cohésion du support sont autant de facteurs qui peuvent influencer les résultats [Courard], Nicot (2008) [54].

Pour P. Nicot, l'inconvénient avec un essai de ce type est le fait que l'on ne caractérise pas forcément l'interface, puisque la rupture peut être cohésive dans le support ou dans le mortier. La conséquence principale est alors la grande dispersion des résultats et le nombre important d'essais à réaliser.

La force d'adhérence f_u calculée à 0.05 N/mm² près:

$$f_u = F_u / A$$

Où

f_u : la force d'adhérence [N/mm²]

F_u : la charge de rupture [N]

A : la surface d'essai de l'éprouvette cylindrique [mm²]

4.2.5. Interprétation.

4.2.5.1. Essai de séchage-mouillage.

Après immersion des 3 éprouvettes (compositions 1, 9, et 10.) pour une durée de 5 heures dans l'eau. Passé ce délai, les éprouvettes se sont désagrégées dans l'eau, où il a été constaté des grandes fissures sur chacune des spécimens.

Les enduits stabilisés au ciment et/ou à la chaux ne se sont pas abimés directement suite à leur contact prolongé de 5 heures avec l'eau, mais c'est plutôt le substrat adobe – terre paillée non traitée – qui a finalement cédé devenu totalement mouillé, et qui s'était décomposé dans le bac.

En conclusion, ce test s'est montré comme extrêmement sévère. Il ne semble pas être convenable pour une prédiction sur la résistance à l'eau de ces types d'échantillon.

4.2.5.2. Essai de remontée capillaire.

Le Tableau 24 donne les quantités d'eau absorbées par les échantillons en fonction du temps.

Tableau 24 : Quantités d'eau absorbées par les échantillons en fonction du temps.

Temps (mn)	Quantité d'eau absorbée (g/cm ²)				
	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7
0	0	0	0	0	0
5	0,042	0,02	0,013	0,017	0,02
10	0,073	0,03	0,026	0,028	0,029
20	0,096	0,036	0,031	0,033	0,033
40	0,136	0,054	0,05	0,052	0,051
60	0,153	0,07	0,053	0,061	0,055
90	0,194	0,083	0,066	0,072	0,06
120	0,215	0,096	0,078	0,087	0,066
180	0,238	0,124	0,096	0,094	0,07
240	0,25	0,143	0,108	0,102	0,072
300	0,264	0,144	0,113	0,105	0,075
400	0,268	0,146	0,116	0,108	0,077
500	0,27	0,148	0,119	0,11	0,08
600	0,278	0,149	0,126	0,113	0,085
700	0,286	0,15	0,126	0,115	0,088
800	0,296	0,151	0,126	0,117	0,09

La Figure 103 présente l'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du dosage de l'enduit en ciment et en chaux pour différentes durées d'immersion.

On constate pour la composition n°7, où les 3 couches contiennent du ciment, que la quantité d'eau absorbée par capillarité demeure la plus faible. Ce phénomène peut s'expliquer probablement par le fait que le ciment contribue à réduire la porosité de l'enduit.

Comparativement à l'ensemble des échantillons, la composition n°3 absorbe une quantité d'eau importante. Ce phénomène est contraire à celui observé avec le dosage en ciment. Il peut s'expliquer par le fait que, et d'après P. Maurenbrecher et al., le mortier à teneur importante en chaux (2 à 3 fois plus de chaux que de ciment en volume) est plus poreux qu'un mortier de ciment. La porosité globale de l'enduit étant plus élevée, la tendance à absorber l'eau est donc plus importante.

Pour les compositions n°4, n°5 et n°6 leurs tendances sont plus voisines de la composition n°7

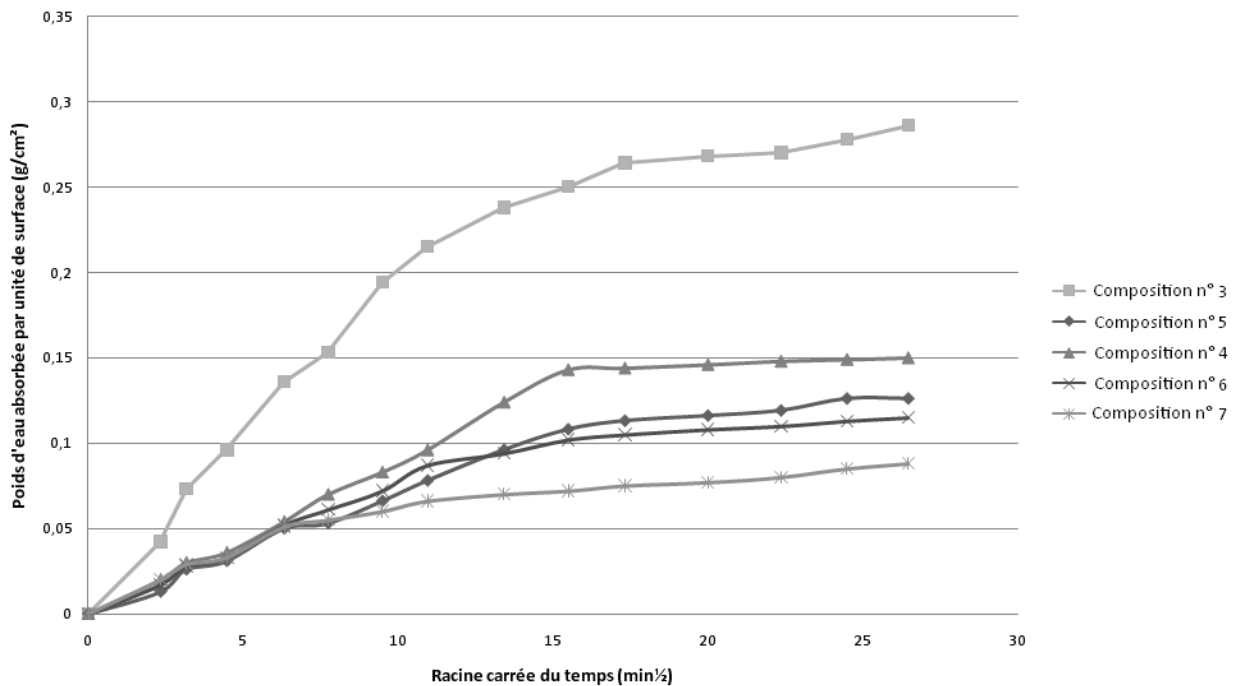


Figure 103: Variation de la quantité d'eau absorbée par unité de surface dans le temps.

Nous remarquons pour les échantillons des compositions n°4 et n°5, la tendance d'un pouvoir d'absorption capillaire est presque identique avec un temps de saturation respectivement égal à 400 et 600 mn sachant que pour 2 volumes de ciment, la 3^{ème} couche de la composition n°4 contient 3fois de volume de chaux que celle de la composition n°5, cette similitude est due peut être aux dosages différents des autres couches (la 1^{ère} et la 2^{ème}).

4.2.5.3. Essai de résistance à l'abrasion.

Cet essai de résistance à l'abrasion a permis d'évaluer le degré de la force de cohésion conférée aux enduits par le biais des différentes formulations. Le coefficient de la résistance à l'abrasion est mesuré en g/cm², le poids des grains détachés lorsque l'enduit sera soumis à une série de brossage de 50 cycles "aller et retour" sous un poids de 6kg, cette quantité dégagée sera rapportée à la surface brossée.

Durant le déroulement des essais aucune complication n'a été rencontrée quant à l'adhérence des enduits à leurs substrats (aucun décollement visible).

Le seul essai pratiqué sur un morceau d'enduit dépourvu de son substrat est celui ramené du site z'gueg el Hadjadj, et ce dernier n'a pas été finalement une contrainte puisque l'essai était exclusivement exécuté sur la surface de l'enduit, indépendamment de la forme et de la taille de

l'échantillon à tester. Les seuls problèmes rencontrés sont ceux de son ajustement, de son adaptation et de son immobilisation dans le dispositif de l'essai.

Les résultats de l'essai sont affichés dans le tableau ci-dessous).

Tableau 25 : Résultats de l'essai à l'abrasion.

Type d'enduit	P : Poids de l'échantillon avant l'essai (g)	P' : Poids de l'échantillon après l'essai (g)	ΔP (g) = P - P'	$\frac{\Delta P}{P} \times 100$	$\frac{\Delta P}{S}$ (g/cm ²)	Evaluation
Echantillon A Substrat adobe ramené du site	4875,2	4755,6	119,6	2,453	0,693	
Echantillon B Enduit ramené du site	1702,4	1693,6	8,8	0,517	0,051	D
Composition N°2 1 ^{ère} couche: 1SG+1CH 2 ^{ème} couche: 1,5 SM+1CH 3 ^{ème} couche: 2 SF+1CH	4021	4013,5	7,5	0,187	0,043	C
Composition N°3 1 ^{ère} couche: 1SG+1CH 2 ^{ème} couche: 1,5 SM+1CH 3 ^{ème} couche: 2SF+CH+1/8CT	5841,1	5835,1	6	0,103	0,035	C
Composition N°4 1 ^{ère} couche: 2(G+M+F)+1,5CH+1/8CT 2 ^{ème} couche: 2S(M+F)+1,5CH+1/4CT 3 ^{ème} couche: 2SF+1,5CH+1CT	5687,3	5686,9	0,4	0,007	0,002	A
Composition N°5 1 ^{ère} couche: 2SG+1CH+1/8CT 2 ^{ème} couche: 2SM+1/2CH+1/4CT 3 ^{ème} couche: 2SF+1/4CH+1/2CT	3720	3719,3	0,7	0,019	0,004	A
Composition N°6 1 ^{ère} couche: 3SG+2CH+1CT 2 ^{ème} couche: 6SM+2CH+1CT 3 ^{ème} couche: 8SF+2CH+1CT	3400	3398,6	1,4	0,041	0,008	B
Composition N°7 1 ^{ère} couche: 3SG+2CH+1CT 2 ^{ème} couche: 6SM+2CH+1CT 3 ^{ème} couche: 6SF+2CH+1CT	3848,4	3847,3	1,1	0,029	0,006	B
Composition N°8 Monocouche : 7CH+1CT+14sables	4600,2	4598,3	1,9	0,041	0,011	B
Composition N°9 à base de terre 1 ^{ère} couche: 1Te+1SG+1CH 2 ^{ème} couche: 1/2Te+1SM+1/2CH+1/8CT 3 ^{ème} couche: 1SF+1/4CT	5668,1	5667,5	0,6	0,011	0,003	A
Composition N°10 à base de terre 1 ^{ère} couche: 1Te+1SG+1CH 2 ^{ème} couche: 1/2Te+1SM+1CH+1/8CT 3 ^{ème} couche: 1SF+1CH+1/2CT	5797,7	5797,1	0,6	0,010	0,003	A

Evaluation

- A Excellent $\leq 0,003$ g /cm²
- B Bon de 0,004 g /cm² à 0,028 g /cm²
- C Acceptable de 0,028 g /cm² à 0,051 g /cm²
- D Médiocre $> 0,051$ g /cm²

L'enduit de la composition n°4 dont la couche d'aspect est composée de : 2SF+1,5CH+1CT affiche la meilleure résistance à cet essai d'abrasion avec 0,002g/cm², suivi par les enduits à base de terre des compositions 9 et 10 dont les dernières couches sont composées de 1SF+1/4CT et 1SF+1CH+1/2CT avec chacun 0,003g/cm². Comparativement au enduits précédemment cités, les enduits des compositions n° 3 dont la dernière couche est composée de 2SF+CH+1/8CT et n°2 dont la dernière couche est composée de 2 SF+1CH montrent une très faible résistance avec respectivement 0,035 g /cm² et 0,043 g /cm², quant à l'enduit ramené du site, ce dernier produit la résistance la plus basse avec 0,051 g /cm². (Voir le graphique ci-dessous).

Et c'est constamment la composition n°4, qui avec l'ajout de ciment dans la composition des couches d'enduit était nécessaire pour assurer une bonne adhésion de ce dernier au support terre et qui rentre dans les dosages appropriés des liants recommandé par F. Aouissi. Tableau 26.

Tableau 26 : Dosage des liants utilisés dans l'enduit approprié.

Dosage	1 ^{ère} couche	2 ^{ème} couche	3 ^{ème} couche
Chaux/Sable	0,75	0,75	0,75
Ciment/Sable	0,062	0,125	0,50

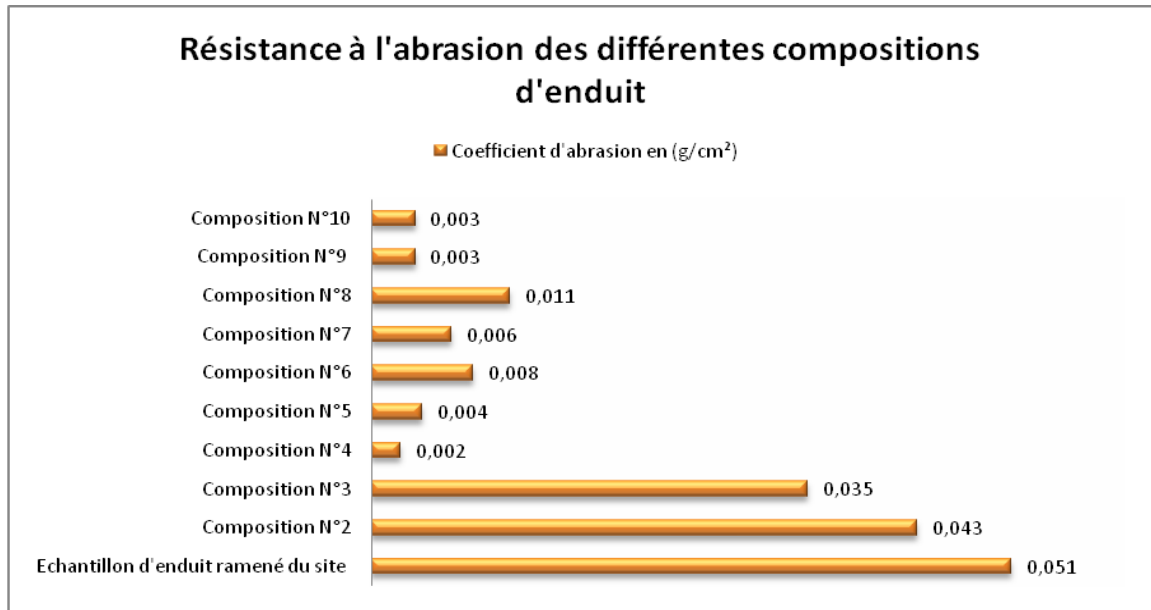


Figure 104: Résistance à l'abrasion des différents enduits.

Comparé à son substrat, l'échantillon d'enduit ramené du site affiche une résistance à l'abrasion de 13,6 fois supérieure, car l'adobe testé ne présente aucune stabilisation chimique visible à l'exception de quelques brins de pailles et quelques impuretés, contrairement à son enduit qui est de composition différente de couleur blanchâtre avec la présence d'une couche de badigeon sur la face d'aspect.

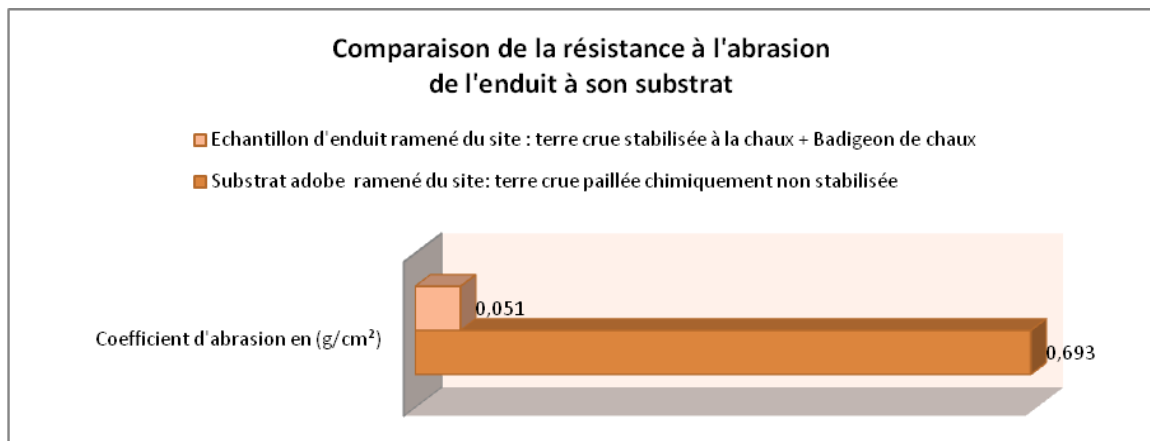


Figure 105: Comparaison de la résistance à l'abrasion de l'enduit à celle de son support.

En conclusion, le coefficient d'abrasion de tous les enduits, dont la dernière couche est composée de ciment et de sable fin, a enregistré des meilleurs résultats ; contrairement aux enduits des compositions n°2 et n°3 qui ont affiché des coefficients différents, cela est dû probablement, à l'existence en petite quantité de ciment (composition n°3) ou bien, de son absence totale de la composition (composition n°2).

Aussi, comme on le peut constater, la présence de la chaux en quantité croissante dans les compositions, influe continuellement sur la croissance de ce coefficient.

Pour l'enduit, l'utilisation de chaux, additionnée de très peu de ciment (1/10) permet de rendre l'enduit plus résistant et donc capable de résister aux intempéries, sans pour autant bloquer les

circulations de vapeur d'eau à travers le mur, ni être trop rigide et conserver ainsi l'homogénéité des caractéristiques rhéologiques transversales du mur, Olivier (1994) [52].

4.2.5.4. Essai d'adhérence (pull-off test)

Durant l'exécution du carottage, et avant que le trépan rotatif n'atteigne le support adobe, des ruptures ont eu lieu suivant des plans situés dans l'enduit.

Le carottage s'est montré comme extrêmement sévère pour ce type de matériau et ce malgré l'usage de différentes vitesses de la carotteuse (de la plus rapide à la plus lente).

Sur les 9 échantillons prévus pour l'essai d'adhérence, 2 seulement ont réussi difficilement l'examen du carottage, la composition n° 2 et la composition n° 9 ainsi qu'un 3^{ième} qui n'était initialement pas prévu dans le programme des essais, c'est l'échantillon de la composition n°11, l'enduit qui est appliqué au support terre paillée est un enduit industriel.

Selon F. Aouissi, il s'agit d'un produit fini de couleur grise à base de ciment, de sable fin et de résine en poudre, au quel on ajoute de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte plastique très collante qui a été appliquée sur les quatre faces de la brique. Lors de son application F. Aouissi a constaté que quel que soit le type de terre, l'enduit en question, dont le séchage n'a duré que 48 heures sans aucune apparence de fissure, présente une adhérence excellente sur les faces de la brique. Contrairement aux compositions utilisées dans la fabrication des enduits sans terre et à base de chaux, qui décidément, elles ne semblent pas avoir réussi à surmonter le problème d'adhésion au support, vu les fissures constatées dans quelques briques après application de la troisième couche de l'enduit.

Lors de l'essai d'arrachement pour les 2 échantillons des compositions n°2 et n°9, les pastilles collées ont tendance à s'arracher des briques très rapidement (ruptures suivant des plans situés dans l'enduit), Ceci ne nous a pas permis de tirer la moindre conclusion, sauf peut être que l'extractomètre est beaucoup plus indiqué pour les bétons à ciment que pour le matériau terre.

Pour l'échantillon n°11, et suite à l'effort de traction exercé sur la pastille, la rupture s'est faite suivant un plan situé dans le support et la valeur enregistrée sur le manomètre de l'appareil est de 0,2 KN (200 N), ce qui nous donne une force d'adhérence $f_u = 0,102 \text{ N/mm}^2$.

En conclusion, ce test s'est montré non prédictif. Le dispositif de l'essai ne semble pas être adapté pour le matériau terre.

4.2.6. Conclusions

Des 4 essais pratiqués, il y a la méthode d'essai de la résistance à l'abrasion qui s'est avérée convaincante, contrôlable et reproductible. Il est aussi important de noter que le classement des matériaux en fonction de leurs performances dans cet essai nous renseigne sur leur durabilité en service basée sur la réalité du terrain, et peut servir à fournir rapidement des informations prédictives sur la surface et la qualité des enduits stabilisés au ciment et/ou à la chaux ou d'autres matériaux semblables.

La durabilité des constructions en terre reste une préoccupation permanente quel que soit l'endroit où elle édiflée et Il existe un besoin pour une approche d'essai qui soit simple et peu coûteuse.

La complexité des échantillons prises pour ce programme d'essais, réside dans la diversité des composants de l'enduit et la diversité des 3 couches appliquées au support.

Pour les essais d'absorption capillaire et d'adhérence, un enduit homogène en 3 couches pourrait donner des résultats plus concluants.

L'essai de séchage-mouillage est recommandé surtout pour des échantillons traités en masse et en surface.

Conclusions.

Conclusions, recommandations et perspectives.

L'architecture de terre, en qualité et quantité, constitue un patrimoine de haute valeur culturelle et universelle.

Présente sur tous les continents, elle témoigne d'une remarquable diversité et d'une grande richesse d'expressions créatives des savoirs et savoir-faire locaux en matière de construction.

La terre, disponible localement, sa transformation requiert peu d'énergie et les occupants de ces ksour et de ces quartiers historiques pratiquent déjà l'art de construire, selon des techniques ancestrales, un type d'habitat original et millénaire ; Mais, laissées à l'abandon, ce patrimoine est menacé par les intempéries et tombe en ruine, au risque de disparaître à jamais du paysage local et du patrimoine national.

Les architectures de terre crue offrent des avantages dans la perspective du développement durable destiné à préserver la capacité de soutien de la terre et améliorer la qualité de vie par l'accès à un écohabitat responsable. D'autant que le secteur du bâtiment est aujourd'hui consommateur d'environ 50 % des ressources matérielles.

Le coût social est également important à considérer, alors que le chômage des populations augmente. La construction en maçonnerie de terre peut générer plus de travail.

Opter pour ce matériau, c'est repenser à la fois globalement et localement l'emploi des ressources de la planète, en associant terre, eau et soleil dans un véritable défi technique, culturel, social, économique et environnemental.

C'est défendre le droit de mettre en œuvre un matériau de construction naturel et écologique, abondant, facilement disponible et accessible au plus grand nombre, afin de permettre aux plus démunis de bâtir leur habitat « avec ce qu'ils ont sous les pieds ».

C'est promouvoir les ressources locales, à la fois humaines et naturelles, améliorer les conditions de vie, valoriser la diversité culturelle et maintenir les systèmes d'entraide sociale pour la construction et l'entretien du cadre bâti.

Pour pouvoir espérer à des portées de succès et réussir le pari de l'innovation et de relever le défi majeur d'une architecture éco-responsable dans tous les pays de la planète, il faut

- faire éliminer tous les blocages dus à la réglementation et aux normes qui peuvent être inadaptées à ce matériau et à son usage ;
- favoriser la formation de professionnels pour la construction contemporaine et traditionnelle, la restauration et la conservation du patrimoine en terre crue ;
- approfondir la recherche scientifique sur la matière, le matériau, les techniques de production, la conservation du patrimoine et l'architecture contemporaine afin d'améliorer la qualité du logement ;
- enseigner l'architecture de terre comme une discipline à part entière, en particulier dans les écoles d'architecture, et d'ingénieurs.

L'architecture issue de ce matériau n'est pas toujours construite sous des latitudes climatiques clémentes. Dans beaucoup de pays, la terre doit subir les rigueurs du froid et des intempéries.

L'emploi des enduits pouvait être limité aux parties les plus exposées des édifices. Mais la vision directe de la terre connote défavorablement le matériau, le dotant en maints esprits d'une image de pauvreté.

La protection de surface est indispensable surtout quand la conception architecturale néglige les systèmes de protection élémentaires (soubassement et débord de toiture par exemple), ou lorsque le savoir-faire est trop peu élaboré. [15]

Les façades érodées de constructions anciennes demandent un ragréage et la pose d'un enduit adapté,

L'amélioration des propriétés mécaniques de la tenue à l'eau d'une terre médiocre passe parfois par une stabilisation avec un liant bien dosé, de chaux ou de ciment.

Le mieux serait un enduit à base de chaux et de quantité inférieure en ciment comme on a vu dans les 2 expérimentations de durabilité l'essai de pomme de douche et celui de l'abrasion par la brosse métallique où l'enduit de la composition n°4 s'est montré convenable

L'autre qualité de l'enduit demeure sa composition adaptée à celle du mur, chose qu'on n'a pas pu vérifier pour des commodités d'adaptation de dispositifs.

Les essais de laboratoire actuellement utilisés dans ce domaine sont, en quelques sortes, empruntés à la Géotechnique. Ils restent insuffisants et trop diversifiés. Ainsi, l'essai de compression simple, le plus courant est utilisé avec une multitude de procédures différentes. [1]

Le recours à des méthodes standards de préparation des échantillons, d'analyses et d'essais s'avère ainsi indispensable, les conditions d'essais, le matériel d'essai et la présentation des résultats doivent également être uniformisés.

Nous espérons que ce modeste travail a ouvert une piste sur un des différents type d'essais de durabilité du matériau terre, l'essai à l'abrasion notamment.

A travers cet essai on a essayé de prétendre les conditions climatiques érosives sévères.

Le matériau terre qui grâce à l'amélioration de ses propriétés toutes confondues participera d'abord à préserver et restaurer notre patrimoine architectural. Les différentes tentatives de réhabilitation, si elles ont permis une meilleure évaluation technique et économique, démontrent que les efforts doivent encore être poursuivis afin de dépasser les limites actuelles de la terre et développer d'autres filières de production dans le bâtiment. Il y a, à ce propos, nécessité d'une collaboration entre les différents organismes qui se sont lancés dans ce processus pour un meilleur transfert du savoir-faire et la réussite de tout programme de construction.

Le présent travail à travers ses chapitres a présenté une investigation théorique sur ce matériau comme produit architectural dans toutes ses étendues à savoir :

Patrimoine, développement durable et bioclimatisme, et solution à une crise mondiale de logements, dans l'espoir d'améliorer les conditions de vie de pas mal de pauvres par une habitation décente.

Toutefois il en demeure que plusieurs autres aspects qui, à notre humble avis nécessitent des éclaircissements et pourquoi pas des investigations pour compléter et enrichir encore d'avantage nos connaissances.

Le travail réalisé dans cette thèse est essentiellement pré-expérimental. C'est une première étape d'initiation essentielle pour les travaux de recherche concernant la durabilité du matériau terre en général et les enduits mis en œuvre en particulier. La maîtrise des connaissances de la morphologie des enduits de revêtement et de leurs comportements hydrique et érosif, ainsi que l'observation du vieillissement artificiel des matériaux et la comparaison avec les altérations rencontrées en condition naturelle, sont essentielles afin de mieux cerner l'évolution en œuvre de ces matériaux et d'intervenir efficacement dans le choix des traitements de restauration ou des enduits de substitution. D'autres expérimentations plus poussées seront nécessaires et indispensables à l'évaluation et la prédiction à long terme de ces travaux de restauration et de conservation de notre patrimoine national en terre.

Les bases techniques et scientifiques de la construction en terre commencent désormais à être établies dans une littérature spécialisée. Plusieurs pays commencent à publier leurs normes, qui permettent aux professionnels de construire de nouveau en terre. Bien qu'ils restent encore très traditionnels dans beaucoup de régions, les modes de production des matériaux et les techniques de construction en terre ont aussi beaucoup évolué.

La recherche fondamentale sur la matière « terre » et sur ses propriétés de cohésion, ouvre sur la perspective concrète de mise au point des futurs bétons écologiques de terre coulée, déjà expérimentés.

Une nouvelle pédagogie se fait jour, destinée aux architectes et ingénieurs, fondée sur l'heuristique de l'expérimentation à échelle grandeur réelle.

Tout cela contribue, au fil des ans, à la définition d'un nouveau périmètre scientifique et éducatif, d'une nouvelle discipline, celle de l'architecture de terre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. HADJ KADDOUR : Quelques notes sur Laghouat. Musée communal de Laghouat 2008.
- [2] B. BENELHADJ et AL. : Étude de requalification d'un ancien tissu urbain de Laghouat, Quartier Ben Badis. Exposé: - Université Amar Telidji de Laghouat 2006.
- [3] M. SARIANE et M. BEZTOUT: Etude sur le développement de l'écotourisme au niveau des sites de Taghit et Oglat Ed Daira. Projet relatif à la conservation de la biodiversité et la gestion durable des ressources naturelles. Programme des nations unis pour le développement, projet n° Alg/00/G35/A/1G/99 ;
- [4] OTHMANI ZOHRA : Croissance urbaine, processus et forme d'urbanisation d'une oasis : cas de l'oasis de Laghouat. Thèse de magister, EPAU Alger juin 2000.
- [5] ABA SADKI : Urbanisme et dégradation de l'habitat traditionnel des oasis du sud-est marocain, l'exemple des ksour du Tafilalt. Inspection Régionale des Monuments Historiques et des Sites, Meknès Maroc. 2009. <http://www.archi-mag.com>.
- [6] HUBERT GUILLAUD : Architecture de terre, un patrimoine d'avenir .Magazine du CNRS n° 63 pp15-18, mars-mai 2002.
- [7] H. HOUBEN et H. GUILLAUD : Traité de construction en terre. CRATerre Editions Parenthèses 2006 Marseille ISBN 2- 86364-161-1.
- [8] DAVID GELARD : Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. 2005.
- [9] REDA CADI : Laghouat se penche sur son patrimoine. Journal la tribune du 18-11-2009. <http://www.latribune-online.com>.
- [10] Journal Officiel Algérien : Lois et décrets exécutifs relatifs aux procédures de classement des monuments et sites historiques, sauvegarde et mise en valeur des secteurs sauvegardés. <http://www.joradp.dz>.
- [11] YASSINE OUAGANI : La politique de sauvegarde et ses outils. Méthode RehabiMed Un nouveau contexte culturel. Col-legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona, Espagne. 2007 ISBN : 84-87104-74-6.
- [12] KOENRAAD VAN BALEN : Méthodologie de la conservation et de la restauration des monuments en terre. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture. Adobe 90 Preprints. Las Cruces, New Mexico, U.S.A., October 14-19, 1990.
- [13] N. ARIOGLU et S. ACUN: A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters. A staging system approach ITU, Architecture Faculty, Taksim, Istanbul, Turkey. Building and Environment Elsevier 0360-1323 2005.
- [14] CONSORTIUM CORPUS : Architecture Traditionnelle Libanaise. CORPUS Levant 2004 <http://www.meda-corpous.net>.
- [15] PASCAL ODUL : Pathologie humide de constructions en terre méthodologie de diagnostic. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture. Adobe 90 Preprints. Las Cruces, New Mexico, U.S.A. 1990.
- [16] EL ARBI ERBATI : L'architecture de terre dans le Maroc saharien, Description des géographes et apport de l'archéologie. Faculté des lettres et Sciences humaines, Rabat, Série colloques et séminaires n°80 Rabat. 1999.
- [17] CHRISTIAN BRODHAG : Faire face aux défis du développement durable. Revue Constructif n°15 - Octobre 2006 <http://www.constructif.fr>.
- [18] ALEXIS DOUCET : La terre crue pour un autre développement, La technique de construction en terre crue adaptée aux contraintes techniques et au contexte culturel d'une communauté. Thèse de diplôme d'ingénieur civil architecte, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2005.
- [19] Mission Interministérielle pour La Qualité des Constructions Publiques : Constructions publiques, architecture et "HQE". MIQCP Avril 2003 <http://www.archi.fr>.

BIBLIOGRAPHIE

- [20] ROMAIN REMAUD : Petit parcours dans l'Histoire. Revue Constructif n°23 - Juillet 2009 <http://www.constructif.fr>.
- [21] BERTRAND LEMOINE : Le bâtiment, reflet ou expression d'une civilisation. Revue Constructif n°15 - Octobre 2006 <http://www.constructif.fr>.
- [22] ALAIN CIEKANSKI : Réflexions sur les démarches, les techniques, les pratiques, les exemples pour réduire notre impact écologique, réinventer un urbanisme durable. Eco-Construction Ecoquartiers. Juillet 2008 <http://www.amisdela terre.org>.
- [23] ABDELHAKIM HAMDANE : Construction durable, "Holcim Foundation for Sustainable Construction". Journal le matin du 20/11/2007. <http://www.lematin.ma>.
- [24] DOMINIQUE GAUZIN-MÜLLER, Extrait du dossier de l'Exposition pour un habitat éco-responsable, Cité de l'Architecture et du Patrimoine écologique, Stuttgart avril 2009.
- [25] JULIEN COULOMBEL, MYLENE DUQUENOY et OLIVIER TERRONES : Manifeste pour le droit de construire en terre crue. Construire en terre crue. Europe et Environnement. Novembre 2010.
- [26] M. EL KADIRI : Matériaux locaux et construction en terre. Pour une réussite du programme national de revalorisation. Revue Marocaine du Génie Civil, n° 23. janvier 1989.
- [27] FRANÇOISE JADOUL : La Terre est notre maison. Construire, rénover, habiter en respectant l'Homme et l'environnement. Éditions Luc Pire et Réseau Eco-consommation 2002.
- [28] LUCIE CONTEVILLE et CYRIELLE DEN HARTIGH : Les éco-matériaux en France, Etat des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements. Les Amis de la Terre. Synthèse. mars 2009.
- [29] AMAR BELLAL : La terre crue: un écomatériau d'avenir, une alternative au "tout béton". Journal l'Humanité Dimanche du 2 Décembre 2010 <http://www.humanite.fr>.
- [30] RICHARD-PHILIPPE WAFER : L'adobe, une solution durable pour la construction d'habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili. Essai expérimental pour une maîtrise en environnement. Centre universitaire de formation en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Octobre 2010.
- [31] ONU-HABITAT : Les principaux enjeux, Une vue d'ensemble. Conférence des ministres africains sur le logement et le développement urbain. Bureau régional pour l'Afrique et les pays arabes. Durban Afrique du Sud. Février 2005 <http://www.unhabitat.org>.
- [32] ONU-HABITAT : Message du Secrétaire Général à l'occasion de la Journée mondiale de l'habitat. Nations Unies. Octobre 2008 <http://www.unhabitat.org>.
- [33] ONU-HABITAT : La rançon urbaine, catastrophes naturelles et environnement, et restauration durable. K0651678-R. Nations Unies. Juin 2006 <http://www.unhabitat.org>.
- [34] EDUARDO LOPEZ MORENO : Faire face à une urbanisation galopante et chaotique. Revue Constructif n°16-Février 2007 <http://www.constructif.fr>.
- [35] ONU-HABITAT : Progrès dans la Réalisation des Objectifs du Millénaire, Améliorer sensiblement la vie de 100 millions d'habitants des bidonvilles. Guide pour l'Evaluation de la Cible 11. Observatoire urbain mondial. Nations Unies. Avril 2003 <http://www.unhabitat.org>.
- [36] ONU-HABITAT : Le défi des taudis et la fourniture de logements. Atteindre les Objectifs de développement du Millénaire. Conférence des ministres africains sur le logement et le développement urbain. Durban Afrique du Sud. Février 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [37] EMILE LE BRIS : Le logement, une marchandise impossible. Article, Droit de cité. Histoires de Développement n°22. juillet 1993, p. 40-48. ISSN 0990-915X.
- [38] WILFREDO CARAZAS AEDO : ADOBE, Guide de construction parasismique - MISEREOR Editions CRATerre Maison Levrat, Parc Fallavier, Villefontaine France.
- [39] C-M. ALDEA, S. P. SHAH and A. KARR: Permeability of cracked concrete. Scientific Report. Materials and Structures, pp 370-376 Vol. 32. 1999.
- [40] FOUAD GHOMARI : Matériau en terre crue compactée. Amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de Doctorat, INSA Villeurbanne. France, 1989.
- [41] HUBERT GUILLAUD : Construire en terre. Revue les cahiers techniques du bâtiment, N° 295 mars 2010. <http://www.groupemoniteur.fr>.
- [42] KEVAN AUBREY HEATHCOTE: An investigation into the erodibility of the earth wall units. Thèse de Doctorat, University of Technology Sydney, 2002.
- [43] TUAN LONG PHAM : Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées Paris, 2008.
- [44] GERARD DIDIER et FOUAD GHOMARI : Méthodologie d'étude au laboratoire de la tenue à l'eau du matériau terre. I.N.S.A. Département Génie Civil – Villeurbanne. France.
- [45] GORDON BROWNE: Stabilised interlocking rammed earth blocks: alternatives to cement stabilisation. Proceedings of the 11th International Conference NOCMAT, pp 5-7. Bath UK, 2009.
- [46] HUGH MORRIS: Earth Construction, Research, and Opportunities. Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project Colloquium. Los Angeles, 2006.
- [47] LAURENT GUERIN : Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue. Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics. Projet PNUD-OIT INT/81 /044, 1985.
- [48] World Employment Programme, International Labour Office: Manufacture of Stabilised Soil Blocks. Small-Scale. ISBN 92-2-105838-7, 1987.
- [49] GERNOT MINKE: Building with earth, 30 Years of research and development at the University of Kassel. CESB 07 PRAGUE Conference Session, 2005.
- [50] NORME publiée sous la dénomination ASTM-D4977: méthode standard d'essai de frottement par abrasion des grains des surfaces des toitures minérales. <http://bzwxw.com>, 2003.
- [51] J.-P. LAURENT, M. RUBAUD et D. N'DONG : la durabilité des protections sur terre stabilisée, l'expérience des "murets Dreyfus". CSTB, Etudes et Recherche. Cahier 2022. 1985.
- [52] MYRIAM OLIVIER: Le matériau terre, Compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre. Thèse de Doctorat. I.N.S.A. – LYON, 1994.
- [53] FATIMA AOUISSI : Comportement physique et mécanique de l'adobe paillé. Thèse de magister, Université Amar Telidji de Laghouat, 2000.
- [54] PIERRE NICOT : Interactions mortier-support: éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier. Thèse de Doctorat. Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.