

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



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

HADIFI HOUDA

LAKEHAL CHAIMA

Sujet du mémoire :

Amélioration des caractéristiques de durabilité d'un enduit dans les architectures en terre crue

Soutenu publiquement le /06/2024 devant le jury composé de :

Nom et prénom.	Mr. CHIKH Abdelbaki	président.
Nom et prénom.	Mr .KERROUM Nadir	Encadreur.
Nom et prénom.	Mr. KRIM Abdallah.	Examineur.
Nom et prénom.	Mr. DJEBLI Benyagoub.	Examineur.
Nom et prénom.	Mr.Bouakkaz Khaled.	Examineur.

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Louange à Dieu tout puissant, qui nous a permis d'arriver à ce jour tant attendu. Nous remercions Allah de nous avoir accordé de l'aide et de nous avoir dotées de patience et de courage durant toute la durée de nos études

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre directeur de mémoire,

***Mr. N. KERROUM** pour sa patience, son soutien et l'aide, aussi pour ses conseils et ses orientations durant l'élaboration de ce travail.*

Nous remercions également tous les enseignants qui nous ont formées durant nos cinq ans.

*Nous adressons nos vifs remerciements au chef de Département de GÉNIE CIVIL **Mr. Rabahi**. A pour son aide et sa disponibilité.*

*Nous remercions également nos enseignants de 5ème année et plus particulièrement **Mr.serbah Hocine***

Nous remercions vivement les membres du jury d'avoir accepté dévaluer notre modeste travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous ne pourrions terminer nos remerciements sans une pensée pour tous ceux qui nous ont donné beaucoup de leur temps et ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

- *Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers, A celle qui a fait de moi l'être que je suis, ma chère mère « **Maazouza** »*
- *A mon support dans ma vie, qui m'a éduqué et mené vers la réussite, mon père « **Mohamed** »*
- *A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom « **HADIFI** ».*
 - *A tous mes amis de promotion de 5 ème année.*
- *Je dédie ce travail à tous qui ont contribué à ma réussite de près ou de loin.*

HOUDA

Dédicaces

- *Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers, A celle qui a fait de moi l'être que je suis, Ma chère mère « **HOUWARIA** »*
- *A mon support dans ma vie, qui m'a éduqué et mené vers la réussite, Mon père « **Abdel Rahmane**»*
- *A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom « **LAKEHAL** ».*
- *A mon cher mari « **AHMED** » pour sa patience et son soutien et à toute sa famille et surtout ma belle mère « **Wahiba** »*
 - *A tous mes amis de promotion de 5 ème année.*
- *Je dédie ce travail à tous qui ont contribué à ma réussite de près ou de loin.*

CHAIMA

Résumé :

De couleur ou de nature brute, lisses ou granuleux, droits ou arrondis... Les parements écologiques ont acquis une position privilégiée dans la gamme des enduits terre., ils offrent de nombreux atouts : faible impact sur l'environnement, capacité à réguler la température et l'humidité, absorption des odeurs et des bruits, respect du bâti ancien...Si l'on ajoute à cela une esthétique singulière associée à l'incroyable diversité des couleurs, des textures et des formes envisageables, l'envie d'en s'approprier chez soi devient irrésistible .

Cette étude se situe dans le domaine de la préservation du patrimoine bâti traditionnel en terre. Son but est de fournir aux professionnels un guide de réhabilitation et de restauration des constructions en terre qui forment le patrimoine architectural local. Il implique d'abord une opération de "diagnostic/remédiation" des diverses affections identifiées.

Dans le but de rétablir les traditions constructives locales en voie de disparition, nous suggérons une solution technique qui respecte les caractéristiques des matériaux locaux en terre pour chaque pathologie identifiée. De la même manière, nous n'excluons pas, dans certains cas, l'emploi des techniques et des matériaux dits « modernes », à condition de préserver l'aspect architectural local. Et l'utilisation locale de la technique de construction en terre.

Mots-clés : *Matériaux locaux ; constructions en terre ; pathologies ; restauration ; Réhabilitation ; les enduits.*

الملخص:

ملونة أو خام طبيعية، ناعمة أو محببة، مستقيمة أو مدورة... اكتسبت الطلاءات الترابية مكانة متميزة و خاصة ، في نطاق الواجهات البيئية

فهي توفر العديد من المزايا: تأثير منخفض على البيئة، والقدرة على تنظيم درجة الحرارة والرطوبة، وامتصاص الروائح والضوضاء، والحفاظ على المباني القديمة، الخ. إضافة إلى ذلك جمالية فريدة مرتبطة بالتنوع المذهل للألوان والقوام والأشكال التي يمكن تصورها، فإن الرغبة في ملاءمتها في المنزل تصبح لا تقاوم.

تقع هذه الدراسة في مجال الحفاظ على التراث الترابي التقليدي. هدفها هو تزويد المهني بدليل لإعادة تأهيل وترميم الإنشاءات الطينية التي تشكل التراث المعماري المحلي. يتضمن أو لا عملية "تشخيص / علاج" لمختلف الحالات المحددة

من أجل إعادة تأسيس تقاليد البناء المحلية التي تختفي، نقترح حلا تقنيا يحترم خصائص المواد الترابية المحلية لكل علم أمراض تم تحديده. وبنفس الطريقة، لا نستبعد، في بعض الحالات، استخدام ما يسمى بالتقنيات والمواد "الحديثة"، بشرط الحفاظ على الجانب المعماري المحلي. والاستخدام المحلي لتقنية البناء الترابي

الكلمات المفتاحية: المواد المحلية؛ البناء على الأرض؛ الأمراض؛ إعادة التأهيل؛ الطلاءات
..ترميم

Abstract

Colorful or natural or raw, soft or lovely, straight or round... Environmental facades have acquired a distinct place in the range of dirt paints and a special place in the range of environmental facades.

They provide many advantages: low environmental impact, ability to regulate temperature and humidity, absorb smells and noise, respect old buildings, etc. Adding to that a unique beauty associated with the amazing variety of colors, heights and shapes that can be imagined, the desire to fit them at home becomes irresistible.

This study is in the field of preserving traditional soil heritage. Its objective is to provide professionals with a manual for the rehabilitation and restoration of mud structures that constitute the local architectural heritage. First involves a "diagnosis/treatment" of the various specific cases

In order to re-establish the local building traditions that disappear, we propose a technical solution that respects the characteristics of the local earth materials of each identified pathology. In the same way, in some cases, we do not exclude the use of so-called "new" techniques and materials, provided that the local architectural aspect is preserved. Local use of soil construction technology.

Keywords: *Local materials; land constructions; pathologies; restoration; rehabilitation; coatings.*

Sommaire

Introduction générale.....	1
Problématique.....	3
L'objectif	3
Hypothèses.....	3
Chapitre 01 : L'enduit Terre crue	
01. Construction en terre crue.....	6
02. Enduit en domaine de construction en terre crue.	6
03. Domaine d'application des règles professionnelle "Enduits sur terre crue".	7
3.1. Le torchis.	7
3.2. La terre-paille.	8
3.3. La bauge.	8
3.4. Le pisé.	9
3.5. Les pierres maçonnées à la terre.	9
3.6. Les blocs de terre compressée (BTC).	10
3.7. L'adobe.	10
04. Principales étapes dans la réalisation d'un enduit sur terre crue.	11
4.1. LES ENDUITS DE TERRE CRUE.	11
4.2. La technique et la mise en œuvre des enduits de terre crue.	11
4.2.1. La formulation du matériau.	11
05. Différentes étapes pour réaliser un enduit sur terre crue.	12
5.1. Etudes préalables.....	12
5.2. Conditions climatiques.	12
5.3. Préparation du support.	13
5.4. Elaboration du mortier d'enduit.	13
06. Mise en œuvre de l'enduit	13
6.1. Conditions préalables.....	13
6.2. Système d'enduit.	14
A. Méthodologie.....	14
B. Types de mortiers.....	14

B.1. Enduit de terre monocouche.	14
B.2. Enduit de terre en plusieurs couches.....	15
C. Nombres de couches.....	15
D. Épaisseur.	16
E. Les armatures.....	17
E.1. Fibres ajoutées au mortier.	17
E.2. Trame de renfort.	17
07. Préconisations d'application.....	18
08. Spécifications par mise en œuvre.	18
A. Corps d'enduit.....	18
B. Enduit de finition.....	18
09. Termes et définitions.....	18
a) Terre.	18
b) Argiles.....	19
c) L'enduit.....	19
d) La fibre.....	19
e) Trame.	19
f) Armature.....	19
g) Le granulat.....	19
h) Adjuvant.	19
i) Support d'accroche.	19
j) La sous-couche d'enduit.....	19
k) Le support d'enduit.	20
l) Surface à enduire.	20
m) La structure de l'enduit.....	20
n) Système d'enduit.	20
10. Système d'enduit.....	20
A. Mécaniques.....	20
B. Hydriques.	20
C. Hygrothermiques.....	20

Chapitre 02 : Pathologies & Désordres de l'enduit.

01. Les désordres.	23
1.1- Les enduits en terre crue.	23
A. Fissures et micro fissures.	23
B. Érosion, farinage, lessivage.	24
C. Décollement de l'enduit.....	25
D. Moisissures.....	26
E. Causes externes.	27
02. Désordres spécifiques à différents supports de terre crue ou d'autres natures.	27
2.1. Pisé.	27
2.2. Terre allégée.....	28
2.3. Enduit de terre crue ancien.....	28
2.4. Panneaux de terre.....	28
2.5. Panneaux de terre crue extrudés.....	28
2.6. Enduit neuf.	28
2.7. Enduit à la chaux ou au.	28
03. Conclusion.	28
04. Traitement des pathologies liées à l'humidité.	29
4.1. Les désordres provoqués par l'humidité.....	29
4.2. Les remèdes contre l'humidité.	30
4.2.1. Installation de drain périphérique.	30
4.2.2. Traitement contre les infiltrations des eaux.	30

Chapitre03 : Traitement des enduits.

01. Introduction	32
02. Définition de la réhabilitation.	32
03. Est-ce que il est plus économique de construire ou de réhabiliter ?	33
04. La terre crue pour un environnement écologique.	35
4.1. LES AVANTAGES ÉCOLOGIQUES.	35
4.2. LES AVANTAGES TECHNIQUES DE L'HABITAT EN TERRE.....	35

• 05. Identification des facteurs de dégradation.....	36
5. 1. Facteurs naturels de détérioration.	36
5.1.1. La pluie.	36
5.1.2. Stagnation et remontées capillaires.	36
5.1.3. Termites.....	37
5.2. Facteurs humains de détérioration.....	37
5.2.1. Animaux domestiques.....	37
5.2.2. Réseaux d'eau.	37
5.2.3. Enduits et sols étanches.....	37
5.2.4. Manque d'entretien.	38
5.2.5. Pertes de savoir.	38
06. Conception du projet de réhabilitation.....	38
07. Organisation du chantier.....	39
08. Décrouitage des murs.....	39
09. Choix des terres.....	40
9.1. Préparation des mortiers et enduits.....	41
9.1.1. Mortiers.....	41
a) Mortier de pose des adobes à l'intérieur.....	41
b) Mortier de pose des adobes à l'extérieur.	41
c) Tester la cohésion d'un mortier.	41
9.1.2. Enduits.....	42
9.1.2.1. Enduits intérieurs.	42
9.1.2.2. Enduits extérieurs.	42
10. Conclusion.	43

Chapitre 04 : Matériel de recherche et méthodes expérimentales

1. Introduction.....	45
2. Origine du sol.....	45

3. Organisation des essais.....	45
3.1 Essais d'identification.....	46
3.1.1. Analyse Granulométrique à Sec Après Lavage (NF P 94-056).	46
3.1.1.1. Introduction.....	46
3.1.1.2. Définitions.	46
3.1.1.3. Objectifs et buts de l'essai.	47
3.1.1.4. Principe de l'essai.....	47
3.1.1.5. Mode opératoire Et Appareillage.....	48
3.1.1.6. Conditions de l'essai.....	48
3.1.1.7. Exécution de l'essai.	50
3.1.1.8. Expression des résultats.....	51
3.1.1.9. Coefficients d'uniformité Cu et de courbure Cc.	55
3.1.2. Analyse Granulométrique par Sédimentation (norme NF P 94-057 : 1992).	55
3.1.2.1. Appareillage.	56
3.1.2.2. Mode opératoire.	57
3.1.2.3. Expression des résultats et Tracé de la courbe granulométrique.	59
3.1.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité.	64
3.1.3.1. Introduction.....	64
3.1.3.2. Principe de l'essai.....	64
3.1.3.3. Equipements et matériaux.....	65
3.1.3.4. Détermination de la limite de liquidité.....	65
3.1.3.5. Détermination de la limite de plasticité.....	67
3.1.3.6. Expression des résultats.....	68
3.1.3.7. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	71
3.1.3.8. Traitement des sols bruts par des liants (Avec 3 % La chaux).....	74
3.1.3.9. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	76

3.1.4. ESSAI D'ÉQUIVALENT DE SABLE (norme NF p 18-598).....	78
3.1.4.1. But de l'essai.	78
3.1.4.2. Principe de l'essai.	78
3.1.4.3. Conduite de l'essai.	79
3.1.4.4. Expression des résultats.....	81
3.2. Essais chimiques.	81
3.2.1. Essai au bleu de méthylène NFP 94-068.	81
3.2.1.1. Introduction.....	81
3.2.1.2. Principe de l'essai.	82
3.2.1.3. Equipements et matériaux.	82
3.2.1.4. Procédure de l'essai.	83
3.2.1.5. Expression des résultats.....	84
3.2.2. DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN CARBONATE CaCO₃ NA-2789.....	85
3.2.2.1. Objet.....	85
3.2.2.2. Domaine d'application.	85
3.2.2.3. Principe.....	85
3.2.2.4. Préparation de l'échantillon.....	85
3.2.2.5. Appareillages et matériels utilisés.	86
3.2.2.6. Expression des résultats.....	87
3.2.3. Détermination de la de la teneur en sulfates NA-16002-5042.	87
3.2.3.1. Mode opératoire.....	87
3.2.4. Détermination de la valeur du PH NF EN 12850.	88
3.2.4.1. Comment interpréter des bandelettes de papier PH.....	88
3.2.4.2. Expression des résultats.	89

3.3. Fabrication des adobes selon la norme française XP-P13-901.	90
3.4. Organigramme pour fabrication des adobes	90
3.4.1. Fabrication des adobes+enduits.	90
3.5. Essais mécaniques.	90
3.5.1. Compression simples selon la Norme-NF-XP-P13-901	90
3.5.1.1. Résistance à la compression simple et le module d'élasticité des Formulations étudiées.	91
3.5.1.2. INTERPRETATION DES RESULTATS.	101
3.6. Les essais de durabilité.	104
3.6.1. L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977	104
3.6.1.1. Mode opératoire.	104
3.6.2. Érosion de surface.	108
3.6.3. Drip Test (Essai de goutte à goutte selon La norme NZS 4298).	108
3.6.3.1. Mesure de la profondeur d'érosion des gouttes.	109
3.6.3.2. Résultats	109
3.6.3.2. Interprétation de la durabilité.	112
Conclusion Générale	114
Références bibliographiques	

Liste Des Figures

Chapitre 01 :

Figure 1.1. La construction en terre crue.....	6
Figure1.2. technique de torchis.	7
Figure1.3. technique de terre – paille.....	8
Figure1.4. technique de bauge.....	8
Figure 1.5. Technique de pisé.	9
Figure1.6. technique de pierres maçonnées à la terre.	9
Figure1.7.technique de blocs de terre compressée (BTC).	10
Figure 1.8.technique de L’adobe.....	10

Chapitre 02 :

Figure2.1.identifier les désordres de façade.....	23
Figure2.2.micro fissure maison.	23
Figure2.3. La détérioration de l'enduit à la chaux sur un remplissage en terre paille s'est produite lorsque l'enduit est trop épais et mal dosé sur un angle exposé aux intempéries.....	24
Figure2.4. Erosion de l'enduit, absence de protection en pied de mur.....	25
Figure2.5. Décollement de l'enduit monocouche.....	25
Figure2.6. Moisissures et humidité.	26
Figure2.7. fissure mur en pisé.	28
Figure2.8. Dégradation du mur en terre sous l’enduit.....	29

Chapitre 03 :

Figure 3.1.travaux de réhabilitation.....	32
Figure 3.2.comparaison entre détruire et réhabiliter.	33
Figure 3.3. Préparation des mortiers et enduits.	41
Figure 3.4. Enduit terre crue.....	42

Chapitre 04 :

Figure 4.1. D'Aïn Bouchekif Tiaret.....	45
Figure4.2. Analyse Granulométrique des sols bruts.....	46
Figure 4.3.les opérations des l'essai granulométrique.....	47
Figure 4.4 : Appareillage pour l'analyse granulométrique par tamisage.....	48
Figure 4.5 : Différentes phases de l'analyse granulométrique par tamisage.....	51
Figure 4.6 : Courbe granulométrique(P1).	53
Figure 4.7 : Courbe granulométrique(P2).	54
Figure 4.8.l'essai de Sédimentation.	55
Figure 4.9 : Appareillage de l'essai de sédimentation.....	56
Figure 4.10 : Mode opératoire l'essai analyse granulométrique par Sédimentométrie.....	57
Figure 4.11. Densimètre au sommet du ménisque.	58
Figure 4. 12 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P1/R) (0.08mm_0.002mm)	60
Figure 4. 13 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P2/R)(0.08mm_0.002mm)	60
Figure 4. 14 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P1/R).	61
Figure 4. 15 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P2/R).	61
Figure 4.16.appareil de Casagrande.....	64
Figure 4. 17 : Equipements utilisés dans l'essai des limites d'Atterberg.	65
Figure 4.18. Répartir avec la spatule, dans une coupelle propre et sèche, une masse de pâte et l'étaler en plusieurs couches.....	66
Figure 4. 19 : Fermeture de la rainure après un nombre N de chocs.	66
Figure 4. 20 : Confection et Fissuration d'un rouleau de la pâte de diamètre de 3 mm \pm 0,5 mm .68	
Figure 4. 21. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p1).....	69
Figure 4. 22. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p2).....	70

Figure 4. 23. Abaque de Casagrande. Diagramme de plasticité et de classification des sols fins...	71
Figure 4. 24. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (ρ_1).....	75
Figure 4. 25. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (ρ_2).....	76
Figure 4.26. Processus de décantation.....	79
figure 4.27. après 20 minutes de décantation.....	80
Figure 4. 28. Essai d'équivalent de sable.....	80
Figure 4. 29 : Equipements utilisés dans l'essai de bleu de méthylène.	82
Figure 4.30 : Prélèvement d'une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre.....	83
Figure 4.31 : Vérification de l'activité du sol.	83
Figure 4.32 : Résultats d'un essai de bleu de méthylène.	84
Figure 4.33.appareil de l'essai de LA TENEUR EN CARBONATE CaCO_3	86
Figure 4.34. Résultats de l'essai.	87
Figure 4.35. Appareil de l'essai de PH.	89
Figure 4.36. Mode opératoire de la compression simple.	91
Figure 4.37. Evolution de la résistance RC pour les 5 formulations (ρ_1).	91
Figure 4.38. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (adobe brut).	92
Figure 4.39 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (Adobe brut +enduit brut).....	92
Figure 4.40. Poudre de marbre	93
Figure 4.41 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement [Adobe brut +enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)].....	93
Figure 4.42. Adobe brut + Enduit (fibre de verre surfacique).	94
Figure 4.43 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (Adobe brut +enduit (fibre de verre surfacique)	94
Figure 4.44. Enduit (fibre de paille).....	95
Figure 4.45 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement	

(Adobe brut +enduit+fibres de paille)	95
Figure 4.46. Evolution de la résistance RC pour les 5 formulations (p2).	97
Figure 4.47. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (adobe brut) (p2).	97
Figure 4.48. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement.	
(Adobe brut +enduit brut) (p2)	98
Figure 4.49. [Adobe brut +enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)] p2.....	98
Figure 4.50. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement	
[Adobe brut +enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)] (p2).	99
Figure 4.51. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement	
(Adobe brut +enduit (fibres de verre surfacique) (p2)).	99
Figure 4.52. Adobe brut +enduit (fibres de paille) p2.....	100
Figure 4.53. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement	
(Adobe brut +enduit+fibres de paille) (p2).	101
Figure 4.54. L'abrasions des 05 compositions (p1).	107
Figure 4.55. L'abrasions des 05 compositions (p2).	108
Figure 4.56. Dispositif de goutte à goutte.....	109
Figure 4.57. Adobe +enduit brut (p1).	110
Figure 4.58. Adobe +enduit brut (p2).	111
Figure 4.59. Courbe Érosion Adobe +enduit brut (p2)	111
Figure 4.60. Adobe +enduit 1/3 poudre de la masse sec) (p2).	111

Liste Des Tableaux :

Chapitre 03 :

Tableau 3.1. Présent deux possibilités d'intervention pour une maison en terre de 45 m2..... **34**

Chapitre 04:

Tableau 4. 1 : Dimensions nominales des tamis.	49
Tableau 4. 2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage (P1).....	52
Tableau 4. 3 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage (P2).....	52
Tableau 4. 4 : Classification des sols selon le diamètre équivalent des particules.....	54
Tableau 4.5 : Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation (P1/R).....	59
Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation (P2/R).....	59
Tableau 4.7.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P1).	69
Tableau 4.8.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P2).	70
Tableau 4.9.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P1).	74
Tableau 4.10.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande(P2).	75
Tableau 4.11. Valeurs de bleu méthylène.....	85
Tableau 4.12. Détermination du taux de sulfate.	88
Tableau 4.13. Mode opératoire de l'essai.....	89
Tableau 4.14.résultats de l'essai.	89
Tableau 4.15.résultats de l'essai de compression simple (p1).	96
Tableau 4.16.résultats de l'essai de compression simple (p2).	101
Tableau 4.17. Résultats de l'essai (p1).	106
Tableau 4.18. Résultats de l'essai (p2).	107
Tableau 4.19. Résultats d'essais goutte à goutte (p1).....	109
Tableau 4.20. Résultats d'essais goutte à goutte (p2).....	110

Introduction générale

Les hommes ont utilisé la terre comme l'un des premiers matériaux pour construire des habitations. La construction en terre crue a évolué au fil des siècles et les méthodes ont changé selon les époques et les régions. Dans le monde entier, la terre crue reste le matériau de base pour la construction d'une grande partie des maisons.

Le patrimoine immense, qui est aujourd'hui un peu négligé, est en danger en raison de l'ignorance de son existence et du manque d'entretien des constructions, ainsi que de l'inadaptation des techniques de réhabilitation couramment utilisées à ce matériau.

Il existe des problèmes avec les constructions neuves construites en terre crue, en particulier en ce qui concerne la sensibilité à l'eau. Cependant, la majorité des problèmes rencontrés résultent d'interventions inadéquates sur les constructions existantes.

La terre est composée d'argile, de silts, de sables, de graviers et de pierres dans des proportions variées.

Le séchage à l'air est la seule façon dont la terre durcit, pas par des réactions chimiques telles que la chaux ou le ciment. Une fois qu'elle est remise en contact avec l'eau, elle redevient plastique et flexible. Il est possible de la réutiliser sans fin tout en étant susceptible d'être exposée à une surconsommation d'eau.

La terre peut être utilisée de diverses manières en fonction de sa nature et de ses caractéristiques.

En tant que corps de mur, il s'agit d'un mur de support et de remplissage. En tant que mortier, il est utilisé pour l'enduit et le hourdage de maçonnerie.

Elle est prête à utiliser diverses méthodes qui ont été développées sur le territoire au fil du temps et qui sont toujours utilisées dans la construction neuve, la réhabilitation et la restauration. Il existe deux grandes familles :

Les constructions avec des murs en terre crue monolithique ou une ossature en bois recouverte de terre crue.

Les techniques de ces deux familles varient. Il existe plusieurs méthodes pour préparer et mettre en œuvre la terre :

La dobe (brique en terre crue), la bauge, le pisé, la terre allégée ou terre-paille, le torchis et les enduits en terre crue sont tous des exemples de matériaux utilisés.

D'autres méthodes ont été mises en place plus récemment, telles que le bloc de terre compressé (BTC), la brique extrudée et la terre coulée.

La composition des sols et la teneur en eau sont les suivantes :

En règle générale, les terres utilisées pour la construction sont généralement celles du site de construction, qui ont été prélevées dans la couche située sous la terre végétale (environ 20 à 40 cm sous le niveau du sol). Ces terres sont constituées de graviers et de cailloux, de sables, de limoges et d'argiles.

La proportion de chaque composant varie en fonction des régions géologiques d'extraction.

Certaines terres sont mieux adaptées à une méthode qu'à une autre et ne sont pas très adaptées à un autre processus.

Il est possible de modifier la composition de la terre en ajoutant des stabilisants (végétaux ou minéraux) pour réduire le retrait au séchage, par exemple, en fonction des besoins et de la qualité de la terre.

La quantité d'eau dans la terre est une autre caractéristique qui la caractérise. La quantité d'eau naturelle dans la terre est d'environ 3 %.

La terre en contact avec l'eau : Selon les techniques choisies, la terre nécessite un apport d'eau en plus ou moins grande quantité pour être façonnée. Après la mise en place de la terre, sous toute forme, il est nécessaire de sécher pour éliminer l'eau de gâchage afin que les argiles contenues puissent jouer le rôle de liant. Comme mentionné précédemment, la terre ne durcit que par séchage à l'air. Une fois remise en contact avec l'eau, elle redevient plastique et flexible.

Si l'eau pénètre dans la terre, elle devient souple et flexible. La présence d'eau sur une structure en terre, sous toute forme, peut causer des perturbations. La terre est fragilisée par l'eau malgré sa solidité et sa durabilité. [1]

Problématique :

Une des principales causes de perturbations et de dégradations est la méconnaissance du matériau, de ses limites et de ses qualités par la majorité des acteurs de la construction. Les travaux réalisés rapidement ne permettent pas un séchage adéquat, tandis que les problèmes d'eau et d'humidité, le vieillissement et le mauvais entretien sont également des sources de fissures et de corrosion, ce qui met le patrimoine architectural en danger d'effondrement en raison des perturbations causées par les conditions météorologiques et du manque d'attention.

L'objectif :

L'étude actuelle vise à la préservation du patrimoine urbain important de la région, en particulier le désert, utilisant des techniques de construction et de réhabilitation sur terrain brut.

- Les enduits en terre crue sont particulièrement importants parmi ces techniques.

En milieu sec, les enduits constitués de terre crue résistent très bien à la traction, à la poussée et à l'arrachement, mais encore moins bien en milieu humide.

Une humidité inhabituelle dans le mur en terre peut le détruire, et les animaux attirés par les sels de l'eau peuvent lécher le mur, provoquant la corrosion. Outre le fait que les briques fondent plus facilement en cas d'intempéries, les microfissures sur la façade favorisent la pénétration de l'eau dans le mur, ce qui le décompose.

- Notre objectif est d'améliorer les enduits en terre crue pour protéger les supports du sol brut endommagés et empêcher les fuites d'eau dans ceux-ci le plus longtemps possible, afin d'éviter les perturbations structurelles à moindre coût, et d'utiliser des matériaux locaux respectueux de l'environnement. Et restauration des symboles du patrimoine ancien

Hypothèses :

Amélioration, ce terme qualifie l'opération qui consiste par l'ajout d'un adjuvant à rendre les mélanges contenant de la terre moins sensible à l'eau, pour en limiter la dégradation

Les adjuvants sont de plusieurs types :

1_ ceux qui modifient la composition du matériau sans modifier son comportement physico-chimique, ils permettent une meilleure liaison des composants de la terre entre eux, ils permettent également de compenser le manque ou l'excès d'un composant par rapport aux autres, ces adjuvants peuvent être : des fibres végétales, ou animales, des sables, des graviers....

2_ ceux qui modifient la composition du matériau en modifiant son comportement physico-chimique, ils interviennent au moment du séchage de la terre en apportant une réaction chimique de prise : chaux, aérienne, chaux hydrauliques, ciments.

Chapitre 01
L'enduit Terre crue

01. Construction en terre crue :

Depuis la Préhistoire, la construction en terre crue est une méthode employée. Ce matériau naturel est composé d'eau, de sable ou de gravier, de fibres végétales et parfois de terre argileuse.

La terre est une ressource locale abondante que l'on utilise qui est saine et respectueuse de l'environnement.

Construire en terre crue est une formidable solution aux problèmes environnementaux actuels. Cette méthode durable dispose de tous les atouts nécessaires pour construire de manière plus respectueuse de la nature au fil du temps.

Présentation de différentes techniques telles que le pisé, l'adobe, la bauge ou le torchis, ainsi que de leurs avantages et inconvénients.[1]



Figure 1.1. La construction en terre crue.

02. Enduit en domaine de construction en terre crue :

Les enduits en terre sont des revêtements traditionnels utilisés dans la construction en terre crue. Ces enduits sont composés principalement de terre argileuse mélangée à des fibres végétales (comme la paille) et parfois à d'autres matériaux comme du sable, de la chaux ou des pigments naturels.

Les enduits, qu'ils soient constitués de terre crue ou de chaux, aériens ou faiblement hydrauliques, bénéficient de règles professionnelles dès lors qu'ils sont appliqués sur des supports de terre crue et sur des bottes de paille avec un remplissage isolant.

Les règles professionnelles régissent la fabrication et la mise en œuvre des enduits sur tous les supports de terre crue.[2]

02. Domaine d'application des règles professionnelles

“Enduits sur terre crue” :

Les règles professionnelles concernant la réalisation d'enduits sur des supports en terre crue montrent les méthodes courantes pour réaliser des enduits intérieurs et extérieurs visant à protéger et embellir des murs qui ont plus de 10 ans d'existence et qui ont été construits selon sept techniques différentes...

3.1. Le torchis :



Figure1.2. technique de torchis.

L'objectif est d'utiliser un matériau de remplissage composé de terre crue limono-argileuse, qui contient peu de sable et qui peut se fissurer au séchage. C'est pourquoi elle est mélangée à une fibre végétale (généralement de la paille).

Avec une humidité de 15 à 35 %, le torchis est utilisé en plastique en utilisant une structure d'accroche en bois qui se fixe solidement à la structure porteuse (colombage). Le torchis, généralement d'une épaisseur de 8 à 15 cm

3.2. La terre-paille :



Figure1.3. technique de terre – paille.

La terre-paille est un matériau de remplissage principalement constitué de terre crue argileuse liquide mélangée à de la paille. Elle est placée entre des coffrages autour de la structure en bois porteuse. Les parois extérieures mesurent environ 35 cm d'épaisseur, tandis que les parois intérieures peuvent être plus minces

3.3. La bauge :



Figure1.4. technique de bauge.

La construction en bauge, particulièrement appréciée aux XVIIIe et XIXe siècles, implique la réalisation, sous forme plastique, d'une série de couches d'un matériau porteur constitué d'un mélange de terre crue limono-argileuse et de fibres végétales. Ce genre de mélange contient une quantité d'eau allant de 15 à 30%. La construction des murs ne requiert pas forcément de coffrage. Dans ce cas, une découpe de la surépaisseur des murs sera réalisée à l'aide d'un outil tranchant, telle une houe, de manière à obtenir une bonne planéité. Selon la granularité de la terre, l'élasticité du mélange et le savoir-faire du maçon, la hauteur de chaque couche

peut varier entre 50 et 120 cm pour une largeur de mur comprise entre 50 et 80cm. Les territoires de prédilection de ce type d'ouvrages sont la Normandie et la Bretagne.

3.4. Le pisé :



Figure 1.5. Technique de pisé.

Le pisé est une technique qui se distingue par son aspect en couches uniques. Elle implique de compacter et de damer de la terre humide (avec une teneur en eau comprise entre 5 et 20%), par lits successifs, dans un coffrage sur une épaisseur pouvant aller jusqu'à 50 cm. La terre employée est souvent composée de sables et de graviers et est généralement issue du chantier (ou de ses environs). Actuellement, le pisé est abondant en Rhône-Alpes (représentant 40% du patrimoine rural), en Auvergne et en Limousin.

3.5. Les pierres maçonnées à la terre :



Figure1.6. technique de pierres *maçonnées à la terre*.

Les pierres maçonnées à la terre sont fabriquées à partir de pierres récoltées dans l'environnement proche du chantier. Ces pierres brutes, très rarement rectifiées, sont hourdées avec un mortier soit entièrement en terre crue, soit « mixte » : terre crue à l'intérieur du mur et

chaux à l'étranger. Généralement les murs construits à l'aide de cette méthode ont une épaisseur minimale de 40 cm.

3.6. Les blocs de terre compressée (BTC) :



Figure 1.7. technique de blocs de terre compressée (BTC).

Les blocs de terre compressée sont issus de la compression, dans des presses, de petits morceaux de terre tamisée humide. On démoule ensuite les blocs et les conserve jusqu'à leur utilisation, où ils seront hourdés avec un mortier. C'est une technique relativement récente qui se propage à travers le pays

3.7. L'adobe :



Figure 1.8. technique de L'adobe.

L'adobe est une maçonnerie composée de petits éléments fabriqués par moulage de terre relativement fine, principalement argileuse et limoneuse, sans cailloux ni graviers, de texture plastique. Après avoir été séchés, ils sont ensuite appliqués à l'aide d'un mortier similaire à celui des briques formées.

Cette méthode est utilisée à la fois pour la construction de cloisons (5 à 30 cm d'épaisseur) et de murs porteurs (jusqu'à plus de 30 cm). L'adobe est principalement cultivé en Aquitaine et en Midi-Pyrénées.[2]

04. Principales étapes dans la réalisation d'un enduit sur terre crue :

4.1. LES ENDUITS DE TERRE CRUE :

Les règles professionnelles s'appliquent aux enduits, qu'ils soient de terre crue ou de chaux, aériens ou faiblement hydrauliques, appliqués sur des supports de terre crue (« Enduits sur supports composés de terre crue – Règles professionnelles ») et sur des bottes de paille en remplissage isolant (« Règles professionnelles Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit »).

Ce document constitue une référence supplémentaire à la NF DTU 26.1, qui s'applique aux enduits et mortiers de ciment, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Il offre aux professionnels la possibilité de se baser sur un document composé de deux outils : les règles professionnelles et des études de cas.

Les directives professionnelles définissent les détails de la création et de l'application des enduits sur tous les matériaux de terre crue. Soixante-trois fiches d'exemples de mise en œuvre proposent une diversité de solutions qui permettent aux experts de réaliser leurs chantiers en fonction des supports et de l'effet de finition souhaité, sans nécessairement appliquer de recette.

Le paragraphe intitulé "Les désordres identifiés" se concentre principalement sur les enduits en terre crue, suivis d'une deuxième partie sur les effets de l'utilisation d'enduits ciment ou d'enduits à la chaux fortement hydrauliques sur des constructions en terre crue des différentes techniques précédemment étudiées.[2]

4.2. La technique et la mise en œuvre des enduits de terre crue :

4.2.1. La formulation du matériau :

- Terre ;
- Eau ;
- Sable en cas de terre trop argileuse.

- **Fibres** : végétales, animales ou synthétiques disponibles Localement (balles de céréales, paillettes de lin, blé, Avoine, foin, chanvre, genêts, joncs, poils d'animaux (Cochon, vache, ...), filasse, copeaux de bois, fibre de Verre, ... ;

Autres composants possibles :

- Colorants naturels ou artificiels ;
- Granulats : pouzzolane, pierre ponce, brique pilée, billes d'argile, ...
- L'adjonction de chaux aérienne (CL, DL) ou de chaux hydraulique naturelle (NHL 2, NHL 3,5, NHL 5) est envisagée pour la réalisation d'enduits sur des façades exposées aux intempéries.
- La chaux hydraulique modifie la composition et la réaction chimique de l'enduit ainsi que son comportement face au transfert de la vapeur d'eau, on parle alors de terre stabilisée.[3]

05. Différentes étapes pour réaliser un enduit sur terre crue :

5.1. Etudes préalables :

Avant d'effectuer tout enduit sur support en terre crue, il est nécessaire que l'entrepreneur effectue une visite préalable du chantier pour une bonne compréhension :

Le contexte environnemental inclut les orientations et les expositions des façades aux intempéries, les traces d'érosion, les fissures, la proximité de réserves d'eau (marée, eau souterraine, etc.), ainsi que les ouvrages déjà présents sur le chantier (trottoirs, drains, etc.). Il est également important de repérer les travaux antérieurs susceptibles de causer des désordres structurels, ainsi que l'utilisation future du mur, afin de fournir les bonnes recommandations dans son devis.

5.2. Conditions climatiques :

La mise en place de l'enduit doit être effectuée à une température comprise entre 5 et 30°C, si elle contient de la chaux, et au-dessus de 0°C, si elle contient de la terre. De même, les travaux seront évités pendant les périodes de vent, en particulier lorsque le temps est chaud et sec. Toutes ces recommandations s'appliquent aussi bien aux enduits extérieurs qu'intérieurs si ces derniers sont exposés à ces mêmes éléments (par exemple, un bâtiment qui n'est pas chauffé l'hiver).

5.3. Préparation du support :

Avant de procéder à la réalisation de l'enduit, il est essentiel que le support en terre crue soit solide, non pulvérulent, propre et résistant à la frappe. Il doit aussi ne pas présenter de problèmes d'humidité. Pour garantir ces différents points, il est possible de nettoyer le support de tout ce qui n'est pas stable. Ensuite, il sera prévu d'effectuer un renformis pour aplanir le mur avant d'appliquer l'enduit final.

Quoi qu'il en soit, afin de prévenir notamment l'éclatement ultérieur de l'enduit, des tests seront réalisés pour évaluer l'adhérence de l'enduit sur le support (terre crue, bois des colombages, etc.).

5.4. Elaboration du mortier d'enduit :

Si l'enduseur ne connaît pas parfaitement les matériaux du support et les composants du mortier, il est nécessaire de faire des essais de tensions de retrait au séchage et de résistance au cisaillement de l'enduit, ainsi que des essais et des échantillons tels que spécifiés dans les règles professionnelles.

En fonction des exigences, le mortier peut inclure du sable, de la terre, de la chaux hydraulique naturelle ou aérienne, de l'eau, éventuellement enrichis de granulats autres que le sable, de fibres végétales ou animales, de ciment rapide ou artificiel (dans une certaine mesure) et d'autres adjuvants liquides ou en poudre.[2]

06. Mise en œuvre de l'enduit :

6.1. Conditions préalables :

- Les autres structures sont protégées
- La surface est stable et saine
- La réception des supports (voir Chapitre 5 Supports et Annexes)
- Les conditions météorologiques appropriées
- Les accès sont ouverts.

6.2. Système d'enduit :

A. Méthodologie :

Il est conseillé d'utiliser la méthodologie du système d'enduit lors d'un projet d'enduit terre pour maximiser les contraintes de l'enduit et ainsi garantir sa durabilité.

Les éléments clés du système d'enduits incluent :

- Qualité et nature du support
- Qualité de l'enduit à obtenir (selon l'utilisation, la fréquentation des pièces...)
- Choix esthétiques
- Conditions de mise en œuvre.

L'analyse du système d'enduit terre définit la structure de l'enduit suivant les aspects suivants

- Types de mortiers d'enduits
- Le nombre de couches
- Les épaisseurs
- Les armatures

B. Types de mortiers :

Les éléments constitutifs des mortiers sont choisis en fonction des critères auxquels ils doivent satisfaire, ce qui permet d'appliquer différents types de mortiers s'ils sont validés selon les procédures de tests en annexe ou s'ils sont appropriés selon le fabricant, avec des consistances variables.

B.1. Enduit de terre monocouche :

Il est utilisé sur une surface rugueuse ou préparée pour l'améliorer. On peut le décrire comme un enduit de finition. Il devrait respecter la planéité du support sans changer d'épaisseur. En cas de noyage d'une trame dans l'enduit, elle est soigneusement marouflée entre deux passes.

B.2. Enduit de terre en plusieurs couches :

Une couche mince préparatoire de mortier est appliquée par projection mécanique ou manuellement afin de réguler la porosité du support et garantir l'accrochage des couches d'enduit ultérieures.

On peut également effectuer cette première couche d'accroche en utilisant une barbotine qui sera ensuite recouverte par l'enduit de corps à Fresno.

On applique le corps d'enduit sur la couche d'accroche. La mise en œuvre est effectuée en une passe ou plus, en fonction de l'épaisseur, cette couche répond aux exigences géométriques pour l'enduit final :

- Planéité, stabilité, densité
- Alignement des angles, des gorges, des arrondis, etc.

En cas de noyage d'un lattis dans cette couche, la couche est très fendue et appliquée en plusieurs couches, dont au moins une couvre complètement les lattes. Il est essentiel que l'état de surface offre une accroche adéquate pour la troisième couche. Il peut présenter de légères fissures qui ne présentent aucun décollement.

On applique la couche de finition sur un enduit de corps dont on procède au durcissement. En cas de besoin, il est recommandé d'humidifier l'enduit de corps avant de le laisser ruisseler. Le support est imperméable à la poussière.

Son application se fait sur le corps de l'enduit ou sur une surface préparée afin de la rendre rugueuse.

Il peut être utilisé comme un enduit de finition ou comme un intermédiaire entre le corps d'enduit et l'enduit décoratif.

Il est nécessaire qu'il respecte la planéité du support sans changer d'épaisseur. Il ne présente aucune fissure.

Le résultat final varie en fonction des critères requis : taloché, lissé, brossé, etc. Il est possible d'appliquer une couche de décoration supplémentaire...

C. Nombres de couches :

Il est possible d'appliquer les enduits en terre en une ou plusieurs couches. Tous les supports en terre plan et tous les supports de construction massive suffisamment

rugueux et présentant une absorption homogène sont utilisés pour appliquer l'enduit de terre monocouche, tels que le béton cellulaire, les briques poreuses, les briques silice-calcaires, les supports de construction sèche, etc. Toutefois, afin d'éviter les dangers de spectres dans certaines situations, il peut être indispensable d'appliquer l'enduit monocouche en deux fois.

On utilise des enduits de terre multicouches sur des supports non plans et sur tous les supports nécessitant un support d'enduit, tels que les roseaux, les panneaux en laine de bois et les supports mixtes.

Il est recommandé que le support d'enduit soit plus épais que l'enduit fin et, si possible, soit armé de fibres.

Mettre en place un enduit fin de terre (granulométrie jusqu'à environ 2 mm) à l'aide d'une spatule sur un support bien plan. Effectuer une mise en place homogène sans créer de surépaisseur pour prévenir les risques de fissures.

L'épaisseur de l'enduit fin reste constante et suit le support.

D. Épaisseur :

Les enduits terre ont une épaisseur variable en fonction de leurs fonctions, de leur concentration en liant et de leurs granulométries. De cette manière, sa taille peut fluctuer de quelques millimètres pour les enduits de décoration et de finition à plusieurs cm pour les enduits internes.

Afin d'obtenir une épaisseur importante, il est conseillé d'utiliser une charge à granulométrie élevée et d'ajouter de la fibre pour renforcer l'enduit. Il est essentiel de vérifier la cohérence des épaisseurs en utilisant les tests en annexe afin de garantir leur cohérence sur le support.

Épaisseurs courantes variables selon les praticiens :

- Barbotine : millimétrique
- Gobetis : millimétrique
- Monocouche : entre 5 et 15 mm en une ou deux passes
- Corps d'enduit : de 5 à 15 mm, pas de limites maximums
- Finition : 5 mm

- Décoration : 3 à 5 mm.

E. Les armatures : L'armature désigne la présence de fibres ou de trames qui empêchent l'apparition de fissures dans l'enduit. Contrairement aux enduits classiques, il est possible d'utiliser des fibres végétales et animales dans les enduits en terre, que ce soit directement dans le mortier ou sous forme de trame préalablement appliquée sur le support.

E.1. Fibres ajoutées au mortier :

Les fibres incluses directement dans le mortier ont deux fonctions, augmenter la résistance aux tensions de l'enduit et augmenter la capacité d'épaisseur du mortier. Leur sélection dépend de nombreux facteurs, ce qui mène à la réalisation d'essais avant validation pour utilisation. Il est important que les dimensions des fibres ainsi que leurs proportions soient en adéquations avec l'autre composant de l'enduit ainsi que l'épaisseur à laquelle il va être appliqué.

Type de fibres :

- Fibres végétales : fibre de paille, copeaux de chanvre ou de lin, fibres

Cellulosiques, etc.

- Fibres animales : poils de veaux, de cochons etc.
- Fibres synthétiques

E.2. Trame de renfort :

Les trames ont pour objectif de consolider l'enduit en résistant aux tensions externes et internes. En réalité, il est préférable de ne pas les fixer au bâti. En aucun cas, elles ne servent de support d'enduit.

Une passe intermédiaire d'enduits est utilisée pour insérer les trames de renforts dans l'épaisseur de l'enduit, afin qu'elles soient marouflées à la surface de l'enduit.

Il est nécessaire de déterminer leurs dimensions en fonction de la granulométrie et de l'épaisseur de l'enduit dans lequel elles seront noyées.

Ils peuvent être utilisés de manière partielle dans des zones de tension ou à risque, comme les angles, les ouvertures, les changements de support d'enduits, etc..., ou de manière complète pour réduire le risque de retrait et de fissures.

Types de trames de renfort :

- Trame minérale : trame de verre
- Trame végétale : trame de lins, toile de jute
- Grillages métalliques galvanisé

07. Préconisations d'application :

Les enduits peuvent être appliqués manuellement ou projetés mécaniquement selon l'une des méthodes suivantes :

- Monocouche
- Plusieurs couches L'enduit est projeté, tiré ou appliqué à la main ou à la machine, pour les enduits fabriqués sur place à partir de terre, un échantillon de travail doit être prélevé, pour les produits finis, respecter les instructions du fabricant.

08. Spécifications par mise en œuvre :

A. Corps d'enduit :

L'enduit peut être utilisé pour recouvrir les tuyaux et les gaines. Il est important de ne pas présenter de cassures ou de décollements du support lors des fissures de retrait possibles.

B. Enduit de finition :

Quand on obtient l'effet décoratif en projetant des granulats de gros diamètre sur le mortier frais de la couche de finition, il est important que cette couche soit d'une épaisseur adéquate pour assurer un scellement adéquat des granulats visibles.[4]

09. Termes et définitions :

a) Terre :

La terre est le résultat de la dégradation de roches primitives qui se trouvent sur le site ou ont été charriées par des processus naturels. Les gisements de terre peuvent présenter des types très variés en fonction de la région ou du lieu. La terre est composée de minéraux argileux et de sableux à caillouteux, les fractions granulométriques forment la composition minérale.

- b) **Argiles** : est le liant naturel dans la terre
- c) **L'enduit** : Mélange plastique ou mortier avec lequel on recouvre un mur ou un plafond brut, en général pour leur donner une surface uniforme et plane et éventuellement d'autres caractéristiques ; à l'extérieur, pour les protéger des intempéries et souvent constituer un parement uniforme à caractère décoratif. L'enduit peut être appliqué en une ou plusieurs couches, d'une épaisseur déterminée, et n'atteint ses propriétés définitives qu'une fois posé et durci.
- d) **La fibre** : est généralement utilisée pour renforcer les mortiers à enduire en terre. Les compétences et les utilisations dans ce domaine sont extrêmement étendues et diversifiées. À l'instar des granulats minéraux, les fibres nécessitent une spécification minutieuse dans les formules afin de les rendre plus flexibles. La paille hachée est principalement utilisée, mais également des fibres et copeaux végétaux et des fibres humaines.
- e) **Trame** : toile maillée.
- f) **Armature** : Les armatures sont des inclusions dans l'enduit qui servent à la diminution de la fissuration et donc au renforcement. Il s'agit soit de fibres incluses dans le mortier, soit de trames en fibres végétales soit de trame en fibres synthétiques incluses entre deux couches d'enduit.
- g) **Le granulat** : désigne toute partie inerte d'un mortier (anciennement appelé *agrégat). Les granulats du béton sont appelés cailloux, gravillons, sables... en fonction de leurs dimensions. On distingue les granulats roulés et les granulats concassés en fonction de leur forme. Le mot granulat désigne non seulement les minéraux, mais également toutes les matières en grains ou en petites billes qui peuvent être utilisées comme charge dans les mortiers.
- h) **Adjuvant** : tout produit qu'on rajoute pour changer les caractéristiques de l'enduit.
- i) **Support d'accroche** : Il est fixé sur la paroi à enduire et améliore l'adhérence de l'enduit ou permet à un enduit d'être autonome de la structure porteuse. Dans la construction traditionnelle, on utilise des supports métalliques (plaque de métal déployée ou treillis métalliques soudés), tandis que dans la construction en terre, on utilise généralement des panneaux ou des nattes de roseaux utilisés.
- j) **La sous-couche d'enduit** : consiste en un mortier appliqué sur un support afin de répondre à une fonction spécifique (adhérence, étanchéité...) avant de poser un

revêtement.

Elle peut se présenter sous forme liquide (couche d'accrochage, primaire), ou pâteuse (apprêt, enduit, gobetis).

- k) **Le support d'enduit** : est la paroi sur laquelle l'enduit sera appliqué. Il peut donc s'agir d'un mur porteur, d'une paroi mince (doublage, cloison,), d'une paroi verticale (mur) ou d'une paroi non horizontale (plafond, voute). Les supports représentent donc une multitude d'œuvres.
- l) **Surface à enduire** : Pour préciser la préparation d'un support (extrêmement divers) nous parlons donc de la surface à enduire qui est la « peau brute » à enduire, à couvrir par un enduit.
- m) **La structure de l'enduit** : est caractérisée par l'épaisseur totale, le nombre de couches, leur fonction, leur composition, l'armature et l'épaisseur des différentes couches. En règle générale, un enduit se compose de plusieurs couches, qu'elles soient de composition différente ou non. Il arrive parfois que l'enduit réponde aux exigences en une seule couche, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une monocouche.
- n) **Système d'enduit** : Le support à enduire + la structure de l'enduit + les qualités recherchées (objectifs du traitement de surface en fonction de l'usage et des choix esthétiques de l'usager) + les conditions d'exécution.[4]

10. CARACTÉRISTIQUES :

A. Mécaniques :

- Masse volumique ($\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$)
- Résistance moyenne à la compression ($F^b = 0,8 \text{ MPa}$)
- Résistance moyenne à la traction ($F^{btm} = 0,1 \text{ MPa}$)

B. Hydriques :

- Teneur en eau massique 1 % (entre 0,5 et 2%)

C. Hygrothermiques :

- Conductivité thermique (λ) $0,3 \text{ W (m.k)}^{-1}$

- Capacité thermique (à 20°C) ($C = 1000 \text{ J (kg. K) }^{-1}$)
- Coefficient d'absorptivité α de 0,55 à 0,65
- Résistance à la vapeur d'eau ($\mu=8$) [1]

Chapitre 02
Pathologies & Désordres de
l'enduit

01. Les désordres :

L'ignorance des Règles Professionnelles "Enduits sur supports constitués de terre crue" ne facilite pas l'utilisation des enduits à base de terre crue et peut également contribuer à la création de problèmes causés par l'utilisation d'enduits inappropriés.



Figure 2.1. identifier les désordres de façade.

1.1- Les enduits en terre crue :

Les problèmes rencontrés sur des enduits en terre crue sont souvent causés par une mauvaise préparation de l'enduit, une mise en œuvre inappropriée et un mauvais séchage. Ces problèmes peuvent se manifester de différentes manières : fissures, érosion, décollement de l'enduit ou l'apparition de moisissures.

a) Fissures et micro fissures :



Figure 2.2. micro fissure maison.

Une formulation incorrecte du mélange, avec un rapport incorrect entre le liant et la charge, entraîne une légère fissuration lors du séchage. Lorsque l'enduit est excessivement gras (avec

une charge excessive d'argile), il est possible que des fissures de retrait plus importantes se forment.

Le manque de renfort fibreux (toile de lin,) voire de lattis d'accrochage (roseau,...), peut provoquer des fissures :

- Dans les constructions en torchis et en paille, il y a des pièces de bois intégrées au mur, ce qui constitue un défaut de mise en place.
- Sur des supports hétérogènes ;
- Sur des supports mous (isolants fibreux, bottes de ...) ; paille,
- Sur des surfaces soumises à des charges élevées ou à des vibrations intenses.

Les fissures de retrait, pouvant être considérables, sont également causées par :

-L'application en couches trop épaisses ;

-Un mortier préparé avec trop d'eau ;

-Un séchage trop rapide et/ou un manque d'absorption du support : retrait de la surface vers l'intérieur ;

-Un support très absorbant : retrait de la base vers l'extérieur de l'enduit ;

-Un mortier travaillé trop profondément et trop longtemps en machine.

b) ***Érosion, farinage, lessivage :***



Figure2.3. La détérioration de l'enduit à la chaux sur un rempissage en terre paille s'est produite lorsque l'enduit est trop épais et mal dosé sur un angle exposé aux intempéries.



Figure2.4. Erosion de l'enduit, absence de protection en pied de mur.

Au moment de la création des enduits et de la mesure des ingrédients, l'absence de considération de l'orientation des façades et de leur exposition aux intempéries peut entraîner le farinage et l'érosion du revêtement.

Un enduit de terre crue exposé aux intempéries peut être érodé si aucun badigeon de finition n'est appliqué.

L'application par temps de pluie peut, quant à elle, être responsable du lessivage de l'enduit.

c) Décollement de l'enduit :



Figure2.5. Décollement de l'enduit monocouche.

Plusieurs facteurs peuvent être responsables du décollement de l'enduit. L'infiltration de l'eau entre l'enduit et la paroi peut provoquer le décollement de l'enduit sur une grande surface, laissant la paroi en terre crue au contact des intempéries. Ces raisons de trouble peuvent être regroupées dans diverses catégories :

Des défauts du support ou dans le support :

- Un support trop lisse entraîne un mauvais accrochage de l'enduit ;

- Les pièces de bois mal séchées qui se rétractent dans le mur entraînent une microfissuration à l'interface entre les matériaux, ce qui facilite l'infiltration des eaux de pluie et entraîne à terme le décollement de l'enduit.
- La corrosion de pièces métalliques intégrées au support, provoque, outre des taches, le décollement ponctuel de l'enduit, l'infiltration des eaux de pluie et l'extension du décollement du revêtement ;
- La purge des anciens enduits et des éléments instables est insuffisante.
- La présence de taches ou impuretés : suie, poussières, huile de coffrage, goudron,

Des défauts de mise en œuvre :

- Le non-respect de la quantité et de l'épaisseur de l'enduit ;
- L'utilisation d'un enduit trop serré ;
- L'humidification du support dépend de sa nature :
- Une humidification insuffisante du support absorbant empêche une bonne adhérence de l'enduit.
- En humidifiant le support non absorbant (comme la fibre de bois, les roseaux,), on forme un film qui empêche l'adhérence de l'enduit.
- En utilisant un grillage métallique d'accrochage sur le mur, l'enduit devient plus rigide.

Un mauvais séchage :

- L'application par temps très chaud, sec et venteux, Sans protection

d) Moisissures :



Figure2.6. Moisissures et humidité.

Le développement de moisissures et/ou de champignons est principalement causé par un séchage trop lent du revêtement, en particulier en raison de :

- L'utilisation pendant une période difficile (comme la fin de l'été et l'automne) ;
- Le manque de chauffage ou l'absence de chauffage en hiver ;
- Le manque de ventilation ou son absence.

Les qualités de l'enduit ne sont pas remises en question, mais cela engendre un désordre esthétique important et un risque sanitaire potentiel. Après avoir terminé le séchage, les supports sont nettoyés et le phénomène s'estompe.

La germination des graines potentielles présentes dans la terre se produit également lorsque le séchage est trop lent dans des conditions d'hygrométrie favorables. Après avoir séché la paroi, les plantules sont également sèches et disparaissent après avoir été nettoyées.

e) Causes externes :

Les enduits en terre crue peuvent également être perturbés par certains travaux annexes ou des situations spécifiques :

- Une humidité excessive lors de la construction d'une chape peut entraîner la formation de sels en pied des murs intérieurs.
- La présence d'un débord de toit insuffisant ou d'une protection contre les rejaillissements (comme le soubassement, le bardage,...) entraîne une usure prématurée des enduits.

Toutes les fuites, remontées capillaires ou entrées d'eau indésirables de toute nature sur et dans les enduits contribuent à leur dégradation et à la fragilisation des parois en terre crue qu'ils sont censés préserver.

02. Désordres spécifiques à différents supports de terre crue ou d'autres natures :

2.1. Pisé : fissures dues à un support insuffisamment sec (retrait et tassement non terminés) ;



Figure 2.7. fissure mur en pisé.

2.2. Terre allégée : fissures et défaut de séchage de l'enduit proviennent du manque de séchage du support ;

2.3. Enduit de terre crue ancien : décollement engendré par un nettoyage et une purge insuffisante des parties non adhérentes ;

2.4. Panneaux de terre crue : fissuration favorisée par le manque d'une bande de joint entre les panneaux ;

2.5. Panneaux de terre crue extrudés : gonflement et déformation provoqués par l'application d'une couche d'enduit trop épaisse ;

2.6. Enduit neuf : fissuration due à un séchage insuffisant ;

2.7. Enduit à la chaux ou au plâtre : décollement par manque de rugosité du support. [3]

03. Conclusion :

Les enduits à base de terre crue sont principalement employés à l'intérieur et ne sont donc pas exposés aux intempéries, bien que leur utilisation dans des pièces humides demande des précautions adaptées. Leur utilisation peut provoquer quelques problèmes tels que des fissures ou des décollements, mais seulement en cas de préparation défectueuse du mélange, de mise en œuvre incorrecte ou de préparation insuffisante du support.

Que ce soit à l'extérieur ou à l'intérieur, sur des supports en terre crue ou sur d'autres supports, l'application des Règles Professionnelles "Enduits sur supports composés de terre crue" vise à prévenir toute perturbation et leur divulgation plus large contribuerait à la préservation du patrimoine bâti en terre crue.

La plupart des troubles observés dans cette étude sont causés par des interventions externes ou par des causes externes. Ces raisons affectent tout le bâti ancien, qu'il soit en terre crue ou en pierre.

Ces causes ont une évolution plus rapide et peuvent être plus facilement observées sur le bâti en terre crue, qui est devenu plus sensible à l'eau et à l'humidité, en raison des caractéristiques et des capacités hygroscopiques du matériau terre.

Toutefois, le bâti en terre crue, soigneusement protégé, régulièrement entretenu et correctement rénové, peut être extrêmement résistant, peu importe la technique de construction, comme en témoignent de nombreux édifices très anciens, bâtiments communs ou monuments historiques, en parfait état.

En fin de compte, le manque de connaissances et de savoir-faire favorise le développement des désordres et sinistres.[3]

04. Traitement des pathologies liées à l'humidité :

4.1. Les désordres provoqués par l'humidité :

La présence excessive d'humidité peut compromettre la qualité des bâtiments, impacter la qualité des atmosphères intérieures, affecter le confort thermique des résidents et influencer la résistance structurelle de la construction. Les problèmes causés par l'humidité sont multiples, nous les résumons ainsi :

- o Dégradation du soubassement des murs à cause de l'application d'un enduit étanche, provoquant des gonflements, des boursouflures et l'éclatement des enduits



Figure2.8. Dégradation du mur en terre sous l'enduit.

- o Un taux élevé d'humidité modifie la résistance mécanique du matériau ;
- o Provoque un déséquilibre au niveau des échanges hygrométriques entre l'intérieur et l'extérieur ;
- o Détachement du mortier de rejointoiement ;
- o Prolifération des moisissures et des champignons qui détruisent les éléments en bois
- o Les sels présents dans l'eau provoquent des creux sur l'ensemble du mur

4.2. Les remèdes contre l'humidité :

4.2.1. Installation de drain périphérique :

Le drainage est un système permettant de réguler l'humidité aux pieds du mur. Le principe du système est de capter les eaux de pluie et de les empêcher d'atteindre la base des murs, puis de les diriger vers un drain relié au réseau des eaux pluviales.

4.2.2. Traitement contre les infiltrations des eaux :

En cas de fuite de canalisation, il faudra réparer la canalisation et procéder ensuite à une réfection de l'enduit, préférant un enduit à la chaux. En cas d'atteinte de la partie supérieure du mur, il faut procéder à une extension de la toiture. Si c'est la partie inférieure qui est concernée, il n'y aura qu'à faire une pente au sol et à enlever le dallage imperméable qui empêche l'évaporation naturelle de l'eau. Si le ruissellement des eaux de pluie a creusé une grande cavité le long du mur, celui-ci est rempli d'un mélange de terre et de paille et recouvert d'un enduit perméable à la vapeur et imperméable à l'eau. [5]

Chapitre03

Traitement des enduits

01. Introduction :

La réhabilitation des enduits en terre crue représente un défi passionnant dans le domaine de la conservation du patrimoine bâti. Ces enduits, utilisés depuis des siècles pour leurs qualités naturelles et durables, nécessitent parfois une intervention pour restaurer leur intégrité structurelle et esthétique.

Au fil du temps, les enduits en terre crue peuvent subir des dommages dus à l'usure, à l'humidité, aux intempéries ou à des interventions humaines inadaptées. La réhabilitation vise à restaurer ces enduits tout en préservant leur caractère historique et en respectant les techniques traditionnelles de construction.

Les étapes de la réhabilitation peuvent varier en fonction de l'état de l'enduit et des besoins spécifiques du bâtiment. Elles incluent souvent le nettoyage de la surface, la réparation des fissures et des dommages, le renforcement de la structure si nécessaire, et enfin l'application d'un nouvel enduit en terre crue.

Les professionnels de la réhabilitation des enduits en terre crue doivent avoir une connaissance approfondie des matériaux traditionnels ainsi que des compétences techniques pour mener à bien ce travail complexe. En plus de préserver l'aspect historique des bâtiments, la réhabilitation des enduits en terre crue contribue également à promouvoir des pratiques de construction durables et respectueuses de l'environnement.[5]

02. Définition de la réhabilitation :



Figure 3.1.travaux de réhabilitation.

Selon la charte de Lisbonne (Octobre 1995) il s'agit des « travaux visant à récupérer et à réparer une construction, une fois que toutes les anomalies constructives, fonctionnelles, d'hygiène et de sécurité accumulées au fil des années ont été résolues, et à mener à bien une modernisation visant à lui faire remplir ses fonctions de manière plus efficace, jusqu'à atteindre les exigences actuelles ».

Il s'agit d'une intervention qui vise à améliorer l'état de construction de la construction et à garantir le confort thermique, acoustique et les conditions d'hygiène des résidents en incorporant les commodités de bien-être et en veillant à ne pas altérer ses valeurs véritables (Choya et Merlin, 1988). Ainsi, à la différence du neuf, la rénovation s'intègre à l'existant d'un site spécifique.

Comme toute opération sur un bien patrimonial, la réhabilitation ne peut être réalisée efficacement qu'à la suite d'un diagnostic méthodique effectué par une équipe compétente qui aura une connaissance approfondie du bâti, de ses techniques constructives et de tous les éléments liés au système structurel. La réhabilitation abordée dans cet article est technique, elle implique une étude approfondie du bâti, la détection des pathologies, la compréhension des causes, afin de proposer des solutions appropriées.

03. Est-ce plus économique de détruire ou de réhabiliter ?

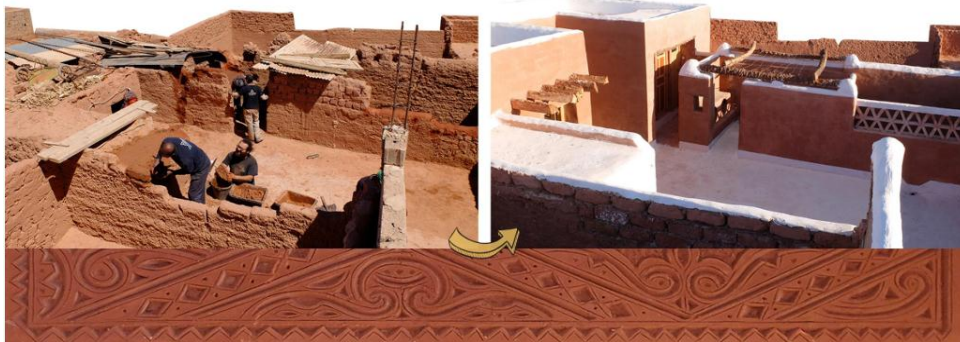


Figure 3.2.comparaison entre détruire et réhabiliter.



Désignation	Unité	Prix unitaire	Reconstruction béton		Réhabilitation terre	
			Quantité	Montant	Quantité	Montant
Travaux de démolition maison 45m ²	1 maçon-2 ouvriers	4 000 DZD	30	120 000 DZD	3	12 000 DZD
Démolition partielle des planchers et sommets de murs abimés	1 maçon-2 ouvriers	4 000 DZD		0 DZD	5	20 000 DZD
Evacuation des gravats	m ³	750 DZD	39	29 250 DZD		0 DZD
Reprise des bases de murs en maçonnerie pierres	m ³	20 000 DZD		0 DZD	0,36	7 200 DZD
Fouilles en puits	m ³	1 250 DZD	21	26 250 DZD		0 DZD
Fouilles en rigoles	m ³	1 250 DZD	3,48	4 350 DZD		0 DZD
Béton de propreté	m ³	7 000 DZD	3,65	25 550 DZD		0 DZD
Regards 40 x 40 cm	unité	7 000 DZD	2	14 000 DZD	2	14 000 DZD
Regards 60 x 60 cm	unité	14 000 DZD	1	14 000 DZD	1	14 000 DZD
Tuyaux PVC assainissement diamètre 110 mm	m linéaire	450 DZD	3,5	1 575 DZD	3,5	1 575 DZD
Tuyaux PVC assainissement diamètre 60 mm	m linéaire	350 DZD	5	1 750 DZD	5	1 750 DZD
Hérisson de pierres sèches compacté	m ²	1 800 DZD	48,35	87 030 DZD		0 DZD
Béton armé pour poteaux, poutres et chaînage	m ³	18 000 DZD	7,52	135 360 DZD		0 DZD
Plancher en tronc de palmier, tiges, feuilles et terre	m ²	2 000 DZD		0 DZD	40	80 000 DZD
Poutres IPN pour renforcer les planchers	m linéaire	2 400 DZD		0 DZD	16	38 400 DZD
Plancher en hourdis de 16 et chape de 4 cm	m ²	1 200 DZD	47,15	56 580 DZD		0 DZD
Escalier et pailasse en béton	unité	28 000 DZD	1	28 000 DZD		0 DZD
Chape sable-chaux sur les marches d'escalier	m ²	11 000 DZD		0 DZD	0,1	1 100 DZD
Maçonnerie en adobes de 15 cm (adobes 32 x 15 x 9 cm)	m ³	3 100 DZD		0 DZD	10	31 000 DZD
Maçonnerie en parpaings de 20 cm	m ³	700 DZD	105,32	73 724 DZD		0 DZD
Maçonnerie en parpaings de 15 cm	m ³	650 DZD	133,47	86 756 DZD		0 DZD
Enduit intérieur terre 3 couches - rattraper les murs	m ²	812 DZD		0 DZD	97	78 764 DZD
Enduit extérieur terre stabilisée à la chaux 1 façade	m ²	16 000 DZD		0 DZD	1,32	21 120 DZD
Enduit intérieur ciment	m ²	430 DZD	97	41 710 DZD		0 DZD
Enduit extérieur ciment projeté	m ²	400 DZD	162,35	64 940 DZD		0 DZD
Enduit extérieur ciment lisse sur une façade	m ²	430 DZD	26,35	11 331 DZD		0 DZD
Claustrat en éléments préfabriqués	m linéaire	600 DZD	6,5	3 900 DZD		0 DZD
Claustras en adobes, niches et décorations (3 jours de travail)	unité	12 000 DZD		0 DZD	1	12 000 DZD
Chappe multicouche grillagée sable-chaux sur terrasses	m ²	16 000 DZD		0 DZD	2,1	33 600 DZD
Etanchéité de terrasse	m ²	450 DZD	52,32	23 544 DZD		0 DZD
Relevé d'étanchéité	m linéaire	200 DZD	18,66	3 732 DZD		0 DZD
Gueulard (béton)	unité	600 DZD	1	600 DZD		0 DZD
Gargouilles (bois de palmier)	unité	3 000 DZD		0 DZD	3	9 000 DZD
Porte bois fabriquée sur mesure et traitée	unité	26 000 DZD		0 DZD	4	104 000 DZD
Fenêtre bois fabriquée sur mesure et traitée	unité	9 500 DZD		0 DZD	3	28 500 DZD
Porte métallique de 95 x 220 cm	unité	54 000 DZD	1	54 000 DZD		0 DZD
Porte isopleine de 84 x 210 cm	unité	10 500 DZD	2	21 000 DZD		0 DZD
Porte isopleine de 74 x 210 cm	unité	9 500 DZD	1	9 500 DZD		0 DZD
Fenêtre métallique avec persiennes 80 x 100 cm	unité	9 000 DZD	2	18 000 DZD		0 DZD
Chassis ouvrant de 50 x 50 cm	unité	4 000 DZD	1	4 000 DZD		0 DZD
Peinture murs extérieurs ocre	m ²	300 DZD	160	48 000 DZD		0 DZD
Lot électricité	lot	34 000 DZD	1	34 000 DZD	1	34 000 DZD
Lot plomberie	lot	42 000 DZD	1	42 000 DZD	1	42 000 DZD
TOTAL				1 042 431 DZD		542 009 DZD

-50%

Le tableau 3.1. Présent deux possibilités d'intervention pour une maison en terre de 45 m2.

- 1. Il a été démolit et reconstruit en béton.**
- 2. Sa restauration en utilisant des matériaux classiques.**

Les estimations reposent sur la rénovation d'une maison avec des problèmes importants, avec des murs en pente, des bases très érodées, tous les réseaux à refaire, les portes et fenêtres à remplacer et l'ensemble des murs à refaire.

Les délais de travail pour la rénovation sont calculés en fonction de la situation sur le terrain observée

Selon le tableau, la reconstruction entraîne un coût financier double. Le coût environnemental et l'impact patrimonial désastreux que représente le remplacement par du béton doivent être ajoutés à ces dépenses.

Il est donc bien plus captivant de restaurer, mais il est nécessaire de confier les travaux à des artisans expérimentés afin de garantir une réalisation impeccable avec des matériaux compatibles qui préserveront durablement le patrimoine.[6]

04. La terre crue pour un environnement écologique :

4.1. LES AVANTAGES ÉCOLOGIQUES :

Construire en terre crue a un impact environnemental faible car elle est :

- Locale ;
- Abondante ;
- Recyclable ;
- Non polluante.

La terre est une ressource abondance use. C'est la meilleure matière première naturelle. Sa composition végétale et minérale ne produit aucun déchet. En effet, les murs peuvent être dissous et recyclés ou revenir à la Terre sans nuire à l'environnement sans être mélangés à du ciment ou à toute autre substance toxique.

De plus, la terre crue possède un bilan carbone favorable car elle ne nécessite aucune fabrication. En revanche, lorsqu'elle est extraite sur place, elle nécessite peu d'énergie pour sa transformation et son transport. Une construction en béton n'utilise que 3% de l'énergie consommée.

4.2. LES AVANTAGES TECHNIQUES DE L'HABITAT EN TERRE :

La construction en terre crue présente des propriétés intéressantes :

- Une hygrométrie régulée ;
- Une excellente inertie ;
- Une très bonne conductivité thermique ;
- Un confort considérable ;
- Une protection contre le feu ;
- Une résilience remarquable ;
- Une protection contre les ondes.

Le mur en terre absorbe et restitue l'humidité de l'environnement. Les murs sont "perspirants", ce qui réduit la condensation et les moisissures. La ventilation mécanique est inutile car le foyer est imputrescible et sain.

Les murs en terre conservent la chaleur du soleil la journée pour la rendre la nuit en hiver. En revanche, en été, l'habitat conserve la fraîcheur. En réduisant la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation de la maison, cela contribue à rendre son habitat plus respectueux de l'environnement.

De plus, la mise en œuvre est plus agréable que celle du ciment et de la chaux car la terre est un matériau non toxique ni irritant, sans substances volatiles.

Les murs de terre crue sont résistants aux chocs et à la compression. Par ailleurs, l'argile est ignifuge après un incendie, les murs restent intacts.

-Parce qu'ils sont denses, les murs en terre réduisent le passage des ondes électromagnétiques : le réseau a du mal à les traverser. Pour avoir une connexion, placez un dispositif par les ouvertures telles que les fenêtres et le plafond, tout simplement.[1]

05. Identification des facteurs de dégradation :

Les constructions en terre peuvent être maintenues pendant des siècles si elles sont préservées des éléments de détérioration grâce à un entretien régulier.

Tous les facteurs mentionnés à la page suivante agissent en collaboration, c'est ce que l'on appelle l'effet domino :

5. 1. Facteurs naturels de détérioration :

5.1.1. La pluie :

Les murs de terre peuvent absorber de grandes quantités d'eau en surface avant de se désolidariser. La surface d'un mur ne peut être renforcée que par des pluies longues et répétées qui emportent de la matière.

5.1.2. Stagnation et remontées capillaires :

Le drainage est essentiel pour préserver les architectures de terre, que ce soit à l'échelle de la maison ou du quartier. La plupart des maladies causées par l'humidité sont le résultat d'un manque d'attention portée à l'écoulement des eaux. En cas de stagnation et d'infiltration de l'eau dans les sols, celle-ci remonte ensuite dans les murs et diminue leur solidité, ce qui

entraîne des érosions de surface, des cristallisations de sel ou des affaissements. Il est crucial de contrôler les écoulements de la maison vers l'extérieur afin de prévenir les conséquences de l'humidité.

5.1.3. Termites :

Les termites ont une préférence pour s'installer dans les murs en terre humide, facile à creuser. Ils sont peu fréquents dans les murs sains et secs. Toutes les sources de cellulose sont attaquées par les termites qui traversent les murs pour s'attaquer : les troncs de palmier qui supportent les planchers et les toitures, les cadres de portes.

5. 2. Facteurs humains de détérioration :

5.2.1. Animaux domestiques :

En cas de non-attaque des murs par les chèvres, poules et moutons, leurs urines, riches en sels solubles, deviennent des agents de dégradation lorsqu'elles remontent par capillarité dans les murs.

5.2.2. Réseaux d'eau :

Souvent, les dommages causés par l'humidité résultent d'une mauvaise gestion des réseaux d'eau. Un mur en eau peut rapidement être saturé par des arrivées qui fuient ou des évacuations mal gérées, ce qui peut entraîner une perte complète de sa capacité à supporter des charges. Les eaux usées contenant des urines, en particulier, contribuent à accélérer les érosions de surface en cristallisant les sels qu'elles renferment.

5.2.3. Enduits et sols étanches :

Les remontées capillaires sont aggravées par les enduits ciment et les peintures étanches qui captent l'humidité dans les murs, les rendant ainsi incapables de respirer. L'humidité excessive gonfle les fondations des murs qui perdent leur solidité. Ils ont la possibilité de se déformer ou de s'effondrer. De plus, cette humidité favorise la prolifération des termites.

Les problèmes liés à l'étanchéité des sols et des toitures sont également causés par l'utilisation de chappes en ciment et de carrelage. Les surfaces dures et cassantes ne possèdent pas la flexibilité de la terre et finissent par se fissurer, permettant ainsi l'infiltration des eaux de ruissellement. L'eau est bloquée sous la surface imperméable et ne peut plus s'évaporer. En ce qui concerne les dalles et les toitures, cela provoque l'humidification des poutres de palmier et leur dégradation par les termites.

5.2.4. Manque d'entretien :

La dégradation forte par le manque d'entretien des enduits de toitures et des drainages, l'abandon des maisons voire leur destruction volontaire. Une fois qu'une toiture s'ouvre ou qu'un mur s'effondre, l'eau entre alors dans la maison, provoquant une stagnation, des remontées capillaires et des déformations.

5.2.5. Pertes de savoir :

L'impact des matériaux industriels incite les artisans à commettre des erreurs. Au lieu de les protéger, ils favorisent leur dégradation en appliquant des traitements étanches aux murs ou toitures ou en les soumettant à des efforts de cisaillement, de flexion (balcons) ou de compression trop importants (rajout d'étages).

06. Conception du projet de réhabilitation :

Il est essentiel de trouver un équilibre entre la nature du bâtiment, son environnement et les attentes des futurs utilisateurs. Il est parfaitement envisageable de transformer une maison ancienne en un espace propre, lumineux et confortable, à condition que les matériaux utilisés ne s'opposent pas à la nature même du bâtiment.

- **Respecter la structure :**

La réalisation d'un diagnostic structurel permet de déterminer les contraintes architecturales à respecter, telles que la nécessité ou non d'ajouter un niveau supplémentaire.

Il précise également l'emplacement approprié pour ajouter des piliers de décharge ou des poutres supplémentaires afin de soulager la structure en cas de contraintes trop importantes. Certaines vulnérabilités structurelles peuvent se transformer en opportunités à saisir : Il est possible d'élargir une fissure afin de créer une porte ou un passage entre deux espaces. Il est possible d'abattre un mur partiellement effondré, puis de le recycler en briques de terre ou en enduits.

- **Garder la patine :**

Si possible, il est important de préserver les vestiges du patrimoine lors de la conception du projet de rénovation. Les réparations sont souvent accélérées par l'utilisation de matériaux industriels, mais ce choix est souvent incohérent tant sur le plan technique qu'esthétique. Il est préférable d'éviter les reprises de murs en parpaings ou l'utilisation de portes en PVC ou métal qui ne s'harmonisent pas esthétiquement avec la terre. Il est essentiel de préserver autant que

possible tout ce qui est ancien afin de préserver des vestiges historiques précieux. Il est possible de restaurer une porte en bois abîmée plutôt que de la remplacer par une nouvelle qui ne conservera jamais la même patine.

07. Organisation du chantier :

Comment faire ?

Organiser le chantier de manière adéquate en amont permet d'économiser du temps et de travailler en toute sécurité jusqu'à la fin de la construction. Les principaux points sont :

- Éliminer immédiatement les objets qui ont été conservés par les utilisateurs et qui occupent les espaces, en discutant avec le propriétaire d'un lieu de rangement temporaire ou d'une mise en déchèterie.
- Éliminer immédiatement les remblais qui se sont accumulés au fil du temps, ce qui peut alourdir les structures et/ou entraver la réalisation des travaux.
- Organiser les matériaux provenant des opérations de démolition et stocker sur place ceux qui pourront être réutilisés pendant la construction.

Effectuer une évacuation régulière des déchets non réutilisables.

- Maintenir toujours les passages libres afin de faciliter les déplacements des équipes.
- Fournir régulièrement les matériaux nécessaires au chantier (terre, bois, etc.). Il est essentiel de disposer constamment d'un mélange de terre prêt à l'emploi et d'une réserve de matériaux sur place.

Difficultés techniques :

- La préservation de la propreté du chantier nécessite une discipline réelle de chaque employé.
- Il est impératif que la gestion des stockages ne crée aucune zone de stagnation en cas de pluie.

08. Décrouitage des murs :

Pour terminer le diagnostic et l'étude de la construction, il est nécessaire de dénuder les murs aux endroits où des problèmes semblent se manifester afin d'analyser l'état de la maçonnerie et les causes de ces problèmes, ainsi que de retirer les enduits de ciment :

Comment faire ?

- Éliminer le revêtement en ciment.
- Il est recommandé de retirer les enduits en terre uniquement si des problèmes apparents ou s'ils sont trop abîmés.
- Après avoir humidifié, broser les murs.
- Collecter les déchets afin de réutiliser la terre si elle n'est pas saturée en sel.
- Déplacer les autres débris à l'extérieur du bâtiment.

Difficultés techniques :

- Assurer la vérification des réseaux électriques et mettre fin au courant.
- Prévenir la poussière et éviter tout risque d'effondrement de parties friables.
- Il est essentiel d'avoir un professionnel expérimenté à cette étape.
- Déterminer un endroit où jeter les déchets.

09. Choix des terres :

Qu'est-ce qu'une bonne terre à bâtir ?

La terre est composée de particules (cailloux, sables, limons), rassemblées par une connexion extrêmement fine : l'argile, le ciment naturel ! Il est recommandé d'avoir une terre de construction qui présente un squelette de grains de différentes tailles et un pourcentage d'argile adéquat pour les agréger en briques, mortiers ou enduits solides.

Réutilisation de terres de ruines :

Souvent, les murs en ruines sont des terres réutilisables, à condition qu'elles n'aient pas été contaminées par des déjections animales ou humaines. En revanche, réutiliser la terre de ruines permet d'économiser du transport et de nettoyer des endroits potentiellement dangereux. Cependant, il est nécessaire de tester les terres afin de vérifier qu'elles ne sont pas saturées de sel, ce qui entraînerait l'apparition d'efflorescences en surface des murs, et de les aménager en argile en fonction des besoins de terrain.

Le choix des terres qui constitueront le mélange final se fait en trois étapes principales :

- Collecte de matériaux.
- Tests de terrain.

- Tests de matériaux.

9.1. Préparation des mortiers et enduits :



Figure 3.3. Préparation des mortiers et enduits.

9.1.1. Mortiers :

a) Mortier de pose des adobes à l'intérieur :

- Réduire la taille de la terre à 2 cm, en particulier si elle provient d'une ruine contenant différents gravats. Ajoutez de l'argile humidifiée en forme de pâte.
- Incorporez une humidité élevée et laissez le mélange reposer pour stimuler l'activité des argiles (2 ou 3 jours).

Avant de l'utiliser, il est important de mélanger la terre à la houe.

b) Mortier de pose des adobes à l'extérieur :

En général, on pose les adobes avec le même mortier que pour l'intérieur. Si un mur est particulièrement exposé aux intempéries et qu'il doit être enduit à la chaux, il est envisageable d'ajouter du lait de chaux au mélange (sac de 25 kg dilué dans un baril de 100 litres) afin d'améliorer l'adhérence de l'enduit.

c) Tester la cohésion d'un mortier :

Un mortier de qualité doit être maniable facilement et assez collant pour maintenir un adobe collé contre un mur, ou maintenir deux adobes solidement collés entre elles.

9.1.2. Enduits :



Figure 3.4. Enduit terre crue.

9.1.2.1. Enduits intérieurs :

- Préparer les matériaux (terre/argile) en fonction du type d'enduit : support (20 mm), fixation (10 mm), finition (5 mm).

- Si vous disposez de paille, découpez-la en fibres courtes et mélangez-la avec de la terre mouillée.

Le mélange doit être couvert et laissé reposer pendant au moins 2 à 3 jours afin d'activer les argiles et de libérer la cellulose de la paille.

Il est recommandé d'ajouter 5 % de lait de chaux à la terre récupérée de ruines contenant des termites

9.1.2.2. Enduits extérieurs :

- Tamiser la terre.

- Préparer le sable (en cas de besoin). - Employer du sable pour les enduits blancs sur les sommets des murs et de la terre sableuse pour les enduits colorés.

- Incorporez le lait de chaux (filtré). 1 sac contenant 25kg de chaux pour chaque baril de 100 litres d'eau, jusqu'à ce que le mélange devienne un mélange plastique agréable à manipuler.

- **Tous les enduits s'appliquent sur des surfaces humidifiées.**

10. Conclusion :

Réhabiliter des bâtiments en terre crue est une démarche qui allie préservation du patrimoine, innovation technologique et durabilité environnementale. Elle permet de valoriser des techniques de construction traditionnelles tout en répondant aux exigences contemporaines en matière de confort et de performance énergétique. En surmontant les défis techniques et réglementaires, la réhabilitation de la terre crue peut jouer un rôle crucial dans le développement d'une architecture durable et résiliente. [6]

Chapitre 04

Matériel de recherche et méthodes expérimentales

1. Introduction :

Le comportement des enduits en terre crue est influencé par plusieurs paramètres essentiels, tels que la nature du sol, les liants utilisés comme stabilisants, la nature des fibres utilisées et la contrainte de compactage. Ainsi, afin d'analyser de manière adéquate les caractéristiques des enduits en terre crue, il sera nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de ses composants.

Au cours de ce chapitre, en plus de la description des matériaux, nous exposerons également toutes les formulations à étudier, ainsi que les méthodes d'essai.

2. Origine du sol :

En particulier, de la commune d'Aïn Bouchekif qui fait partie du district de Dahmouni de l'État algérien de Tiaret, deux types de terre ont été collectés pour cette étude et l'approche géotechnique expérimentale leur a été mise en œuvre.



Figure 4.1. D'Aïn Bouchekif Tiaret.

3. Organisation des essais :

Avant de commencer les essais mécaniques les échantillons, on va faire plusieurs analyses pour identification d'échantillon, nous avons réalisé un programme d'essais comprenant :

. 1. Essais d'identification
.2.essais chimiques
.3.essais mécaniques
.4. Essais de durabilité

3.1 Essais d'identification :

3.1.1. Analyse Granulométrique à Sec Après Lavage (NF P 94-056) :

3.1.1.1. Introduction :

L'essai d'identification de l'analyse granulométrique des sols est soumis à deux normes :

- Selon la norme NF P 94-056 (1996), l'analyse granulométrique par tamisage à sec après lavage est décrite. Elle s'applique aux sols dont les éléments ont une taille supérieure à 80 μm (0,08 mm). Il s'agit des composants qui forment le refus au tamis de 80 μm (0,08 mm)..
- La norme NF P 94-057 (1992) explique l'analyse granulométrique par sédimentation. Les sols concernés sont ceux dont les particules ont une taille inférieure à 80 μm (0,08 mm). Les particules passent par le tamis à une taille de 80 μm (0,08 mm).



Figure4.2. Analyse Granulométrique des sols bruts

3.1.1.2. Définitions :

En génie civil, l'analyse granulométrique par tamisage englobe toutes les opérations qui permettent de séparer les éléments constitutifs d'un échantillon de sols, de matériaux rocheux et de tout autre sous-produit industriel en utilisant des tamis de différentes dimensions. L'objectif est d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. Son application est valable pour tous les granulats dont la dimension nominale est inférieure ou égale à 100 mm, à l'exception des fillers ($0,08 \text{ mm} \leq \varphi \leq 100 \text{ mm}$).

- **Refus** : Partie du matériau retenu sur un tamis.

- **Tamisat ou passant** : Partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- **Classe granulaire** : Ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures de tamis définissant un intervalle.
- **Granulométrie** : La granulométrie est la mesure de la dimension des granulats contenus dans un lot de matière et leur répartition selon leur taille.

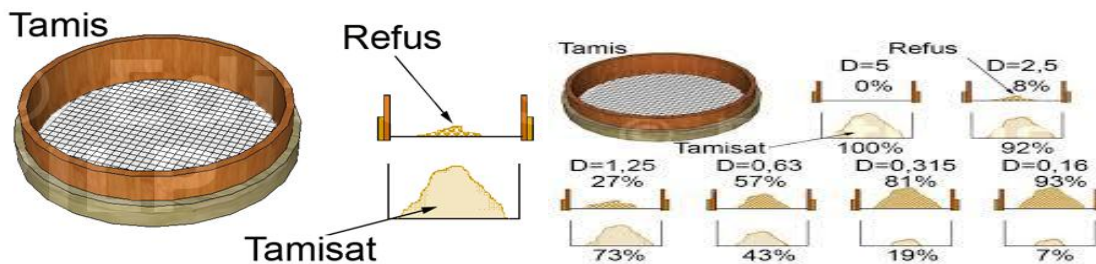


Figure 4.3.les opérations des l'essai granulométrique.

3.1.1.3. Objectifs et buts de l'essai :

L'analyse granulométrique a pour objectifs :

- Identifier la taille et les taux pondéraux respectifs des différentes familles de grains qui composent les sols afin de les décrire et les classer (en cas d'échantillons intacts ou modifiés) ;
- La détermination des classes granulométriques et la vérification des classes granulométriques imposées (cas d'échantillons reconstitués).
- L'expérience permet aussi d'évaluer les caractéristiques de drainage et la résistance à l'eau des matériaux, ainsi que leur capacité à se compacter.

3.1.1.4. Principe de l'essai :

L'essai implique la séparation des éléments agglomérés d'une masse connue d'un matériau (grains et particules) par brassage sous l'eau (voie humide). Une fois que les grains et les particules ont été séchés, il est nécessaire de diviser l'ensemble (matériau) en utilisant une série de tamis emboîtés par ordre décroissant du haut vers le bas, puis soumis à des vibrations à l'aide d'une tamiseuse. Ensuite, on ajoute la masse des refus cumulés sur chaque tamis à la masse totale sèche du matériau qui est soumis à l'essai.

3.1.1.5. Mode opératoire Et Appareillage :

L'analyse granulométrique est l'un des essais de laboratoire les plus simples à réaliser. Elle nécessite le matériel essentiel suivant :

- Un dispositif de lavage (arroseeur...)
- Une série de tamis (avec couvercles et fonds de tamis) conforme à la norme en vigueur ;
- Récipients en matériau non altérable, brosses, pinceaux,... ;
- Balances de précision ;
- Une étuve de dessiccation à température réglable.
- Une tamiseuse électrique



Figure 4.4 : Appareillage pour l'analyse granulométrique par tamisage.

3.1.1.6. Conditions de l'essai :

Avant de débiter l'essai, il est nécessaire de définir certains critères en lien avec la nature du matériau à analyser et la nature du projet à mener à bien. Grâce à ces paramètres, il est possible de mener l'essai dans les conditions optimales.

- Choix de la température de séchage :

Avant de débiter l'essai, il est nécessaire de réaliser une identification sommaire pour déterminer si le matériau à étudier peut être altéré par le processus opératoire de l'essai (par exemple : sols solubles, sols contenant des matières organiques,...). Plus précisément, les sols

non sensibles à la chaleur sont séchés à une température de 105 °C, tandis que la température de séchage ne doit pas dépasser 50 °C pour les sols sensibles. Si l'on doute de sa nature, le matériau est traité comme étant sensible à la chaleur.

- Choix de la série de tamis :

La quantité de tamis (nombre de tamis et diamètres des tamis) à considérer lors du tamisage est déterminée par la sensibilité et la précision désirées pour l'étude à effectuer. Dans le cadre d'un projet majeur, il est nécessaire d'utiliser tous les tamis situés dans l'intervalle de la série (voir tableau 01) pour effectuer le tamisage. Lorsque le nombre de tamis est élevé (un nombre considérable de tamis qu'il est impossible de faire monter sur la tamiseuse en une seule fois), il est nécessaire de procéder au tamisage en plusieurs sous-séries afin de balayer l'ensemble de la série.

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20	0.25	0.315	0.400	0.50	0.63	0.80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.3	8	10
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Tableau 4. 01 : Dimensions nominales des tamis.

- Choix de la masse du matériau :

Le matériau à utiliser pour l'analyse doit respecter diverses conditions, parfois contradictoires

- La masse du matériau à analyser doit être assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.

-Il est important que le matériau à analyser soit suffisamment léger pour assurer une durée de l'essai acceptable et éviter que les tamis ne soient trop chargés (saturés) et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse à utiliser pour l'analyse vérifie généralement la relation :

$$M = 0,2 D$$

Avec :

M : masse de l'échantillon [Kg],

D : diamètre du plus gros grain du matériau [mm].

3.1.1.7. Exécution de l'essai :

- **Phase de lavage du matériau**

- Dans le cas des sols grenus propres (sable et graviers propres), il est possible de passer directement au tamisage à sec sans aucun lavage préalable.

- Pour les matériaux contenant une partie de fines argileuses, il faut procéder par voie humide. L'échantillon est préalablement séché à l'étuve à une température suffisante pour préserver sa structure granulaire. Une fois refroidi à l'air libre, il est pesé et tamisé par voie humide. On dépose le matériau sur le tamis le plus fin de la série de tamis sélectionnée pour l'essai (en général 0,08 mm).

Mettre de l'eau sur le matériau et le brosser en le remuant jusqu'à ce qu'il ne reste sur le tamis que des particules propres.

- Collecter l'ensemble de l'eau de lavage (contenant les particules fines) provenant du lavage dans un récipient de capacité adéquate. Les particules fines restantes sont laissées décanter, siphonner l'eau et sécher pour être analysées par sédimentation (cette méthode sera abordée dans le TP suivant).

- Regrouper les éléments non désirés (sélectionnés par le tamis de lavage) dans un autre récipient et les placer à l'étuve pour séchage, puis passer à la phase de tamisage à sec.

- **Phase de tamisage à sec**

- Déposer l'ensemble du matériau séché et pesé au sommet de la colonne de tamis à maille décroissante du haut vers le bas, avec un fond de tamis à sa base ;

- Agiter la colonne de tamis manuellement ou mécaniquement à l'aide d'une tamiseuse électrique ;

- Collecter les refus de chaque tamis, les peser et les noter sur un tableau portant, les diamètres des tamis, les refus correspondants, les refus cumulés et les tamisât cumulés.

-Afin de confirmer, il est nécessaire d'ajouter tous les refus, y compris celui du fond, à la fin et de peser l'ensemble afin de le comparer à la masse initiale soumise au tamisage. Il est important de ne pas exagérer la différence (l'erreur) afin de valider l'essai. Il est important de ne pas négliger l'addition de la masse sèche de la fraction fine obtenue lors du lavage à la masse du refus correspondant au fond obtenu lors du tamisage à sec pour calculer les tamisât cumulés.



Figure 4.5 : Différentes phases de l'analyse granulométrique par tamisage.

3.1.1.8. Expression des résultats :

A la fin de l'essai, les résultats doivent être présentés sous forme de tableau et de courbe :
Les résultats du tamisage d'une masse de

- **P1 (700 grammes de matériau)**
- **P2 (500 grammes de matériau)**

Tamisée sur une série de tamis sont présentés sur le tableau 02 suivant :

Ms(P1)=700g

Tamis (mm)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisât cum (%)
5	14	02	98
4	21	03	97
2	40	06	94
1	54	08	92
0.5	66	09	91
0.4	70	10	90
0.315	80	11	89
0.2	111	16	84
0.125	143	20	80
0.08	151	22	78
Fond	154.90	22	78

Tableau 4.02 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage (P1).**Ms(P2)=500g**

M

Tamis (mm)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisât cum (%)
5	03	01	99
4	03	01	99
2	05	01	99
1	08	02	98
0.5	26	05	95
0.4	32	06	94
0.315	42	08	92
0.2	58	12	88
0.125	74	15	85
0.08	79	16	84
Fond	80.68	16	84

Tableau 4.03 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage (P2).

- Les refus sont déterminés par pesage ;
- Les refus cumulés sont calculés en %, par rapport à la masse initiale soumise au tamisage, représentant 100 % du matériau
- Les tamisât cumulés sont calculés en %, faisant une simple soustraction (100% - refus cum).

Les résultats (tamisât cumulés en fonction des diamètres des tamis) sont présentés sous forme de courbe appelée courbe granulométrique, sur une échelle semi-logarithmique.

.La courbe granulométrique correspondant est présentée sur la figure suivante :

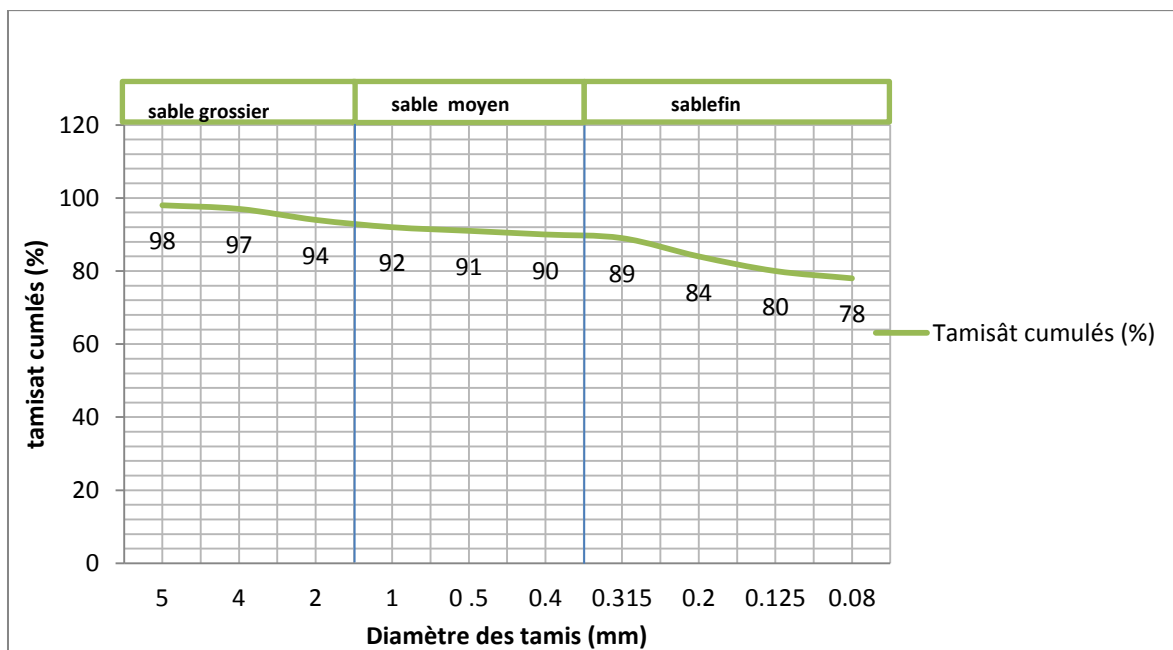


Figure 4.6 : Courbe granulométrique(P1).

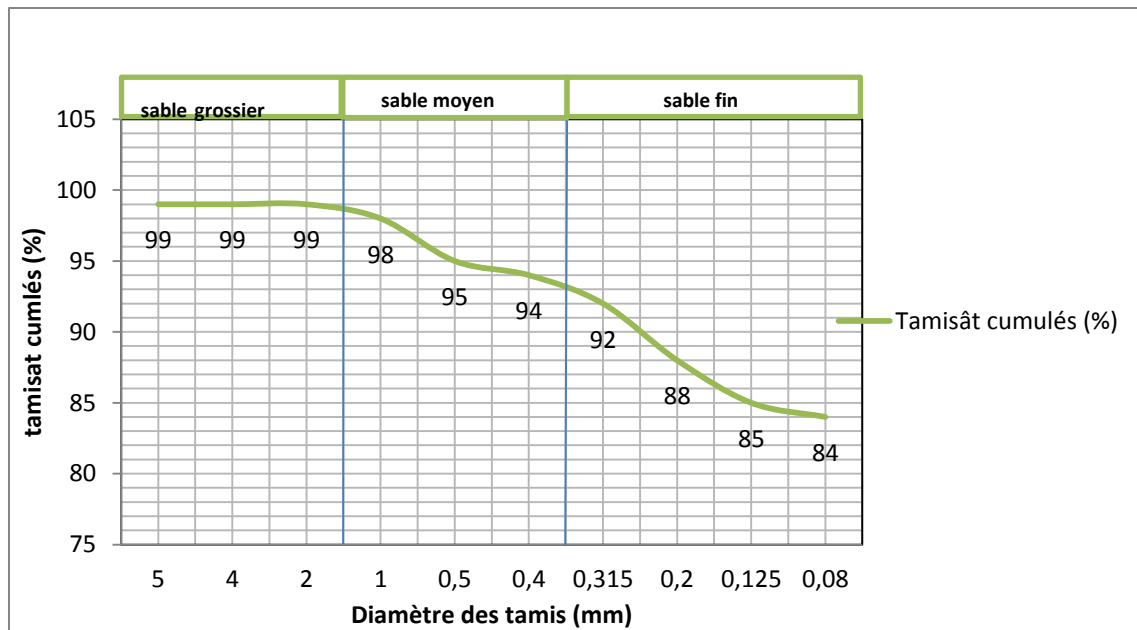


Figure 4.7 : Courbe granulométrique(P2).

La courbe granulométrique offre la première information en distinguant les différents types de sols qui constituent l'échantillon analysé (voir sur le graphe les catégories de sols que la courbe représente) ;

- En observant la courbe de plus près, on peut déduire les proportions (exprimées en pourcentage) de chaque type de sol qui compose l'échantillon. En se basant sur ces données, il devient envisageable d'attribuer une appellation au sol en se basant sur les valeurs de référence présentes dans le tableau 04.

Type de sol	Diamètre équivalent (mm)
Blocs	> 300
Cailloux	80 à 300
Gravier grossier	20 à 80
Gravier fin	5 à 20
Sable grossier	2 à 5
Sable moyen	0,4 à 2
Sable fin	0,08 à 0,4
Silt	0,002 à 0,08
Argile	< 0,002

Tableau 4. 04 : Classification des sols selon le diamètre équivalent des particules.

3.1.1.9. Coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c :

Il est nécessaire de calculer les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c avant de procéder à la classification complète du matériau analysé. Dans les sols où moins de 10% des particules passent au tamis de 0,08mm, ces coefficients sont importants ; dans les autres situations, ils sont moins intéressants.

- Le coefficient d'uniformité $C_u = D_{60} / D_{10}$: caractérise la pente de la courbe granulométrique, il permet d'exprimer son étalement.
- Le coefficient de courbure $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$: traduit la forme plus ou moins régulière de la courbe.

Avec :

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% des tamis cumulé ;

D_{30} : Diamètre correspondant à 30% des tamis cumulé ;

D_{60} : Diamètre correspondant à 60% des tamis cumulé.

3.1.2. Analyse Granulométrique par Sédimentation (norme NF P 94-057 : 1992) :



Figure 4.8. L'essai de *Sédimentation*.

Dans certaines situations, il est impossible de quantifier de manière fiable la courbe granulométrique à des tailles de grains plus petites (moins d'un millimètre) à l'aide de tamis, car les plus petites particules d'argile dans le sol forment des mottes et ne peuvent pas passer à travers les tamis individuellement. Cependant, cette section de la courbe de granulométrie peut être déterminée en utilisant une analyse par sédimentation de la fraction du sol qui passe au tamis de 80 μm . Ainsi, l'essai s'appuie sur le fait que dans un environnement liquide au

repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins varie en fonction de leurs dimensions. La relation entre le diamètre et la vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes pour les grains sphériques de même masse volumique. Par accord, cette loi est mise en œuvre pour les éléments d'un sol afin de définir des diamètres équivalents des particules.

3.1.2.1. Appareillage :

Au moins 30grammes de tamisât;

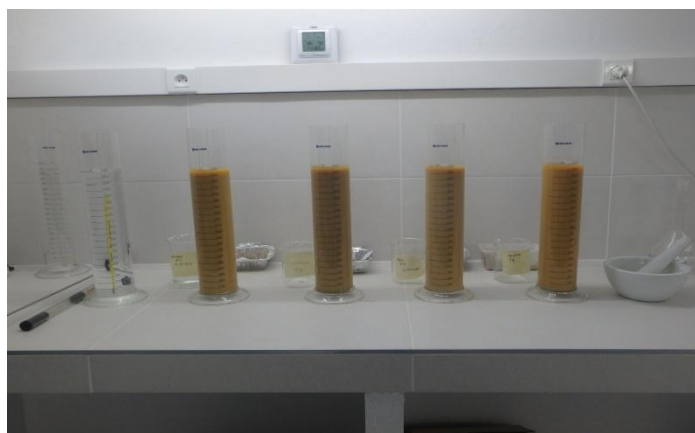


Figure 4.9 : Appareillage de l'essai de sédimentation.

- Bac en matériau non altérable.
- Balances.
- Etuve
- Agitateur mécanique
- Agitateur manuel.
- Eprouvettes d'essai.
- Eau distillée.
- Défloculant.
- Densimètre.
- Chronomètre.
- Thermomètre.

3.1.2.2. Mode opératoire :

- traiter l'échantillon de sol.
- faire passer l'échantillon au tamis de 80 μm .
- étuver le tamisat pendant 04 heures à la température 105 °C ou pendant 08 heures à la température 50 °C.
- désagréer puis homogénéiser le tamisat.
- prélever une prise d'essai de 80 g à 610g.
- Imbiber l'échantillon dans l'agitateur mécanique puis ajouter 500 cm³ d'un mélange de dispersion constitué de 440 cm³ d'eau distillée 60 cm³ de Défloculant (hexamétaphosphate de sodium).
- Disperser le mélange au moyen de l'agitateur mécanique pendant 3 mn à $v = 10\,000$ tr/mn.
- Verser la suspension immédiatement après fin de l'agitation dans une éprouvette en rinçant le récipient, l'arbre et les palettes de l'agitateur.
- Compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm³
- Verser 2000 cm³ de l'eau distillée dans un 2ème éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres.
- Agiter verticalement la suspension avec l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme.

**Figure 4.10 : Mode opératoire l'essai analyse granulométrique par Sédimentométrie.**

- Retirer l'agitateur et déclencher au même temps le chronomètre : c'est le début de l'essai.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après déclenchement du chronomètre. - Prendre les lectures depuis le début de l'essai aux temps suivants en minutes : 30s, 1min, 02,05, 10, 20, 40, 80, 4h, 24h. Cette lecture est notée « R ».
- Noter à chaque lecture la densité de la suspension et la température de l'eau trouvée dans l'éprouvette témoin.
- Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque.

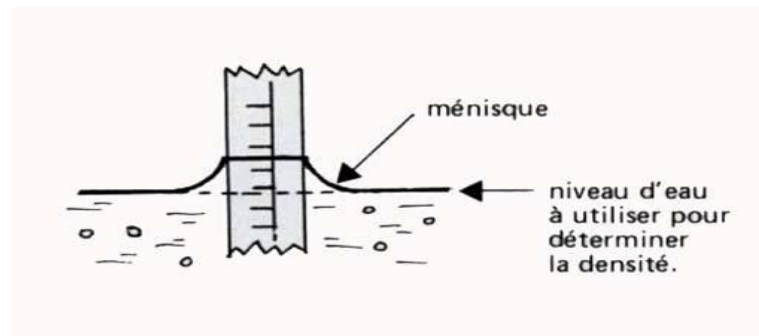


Figure 4.11. Densimètre au sommet du ménisque.

- Faire les trois premières lectures 0,5, 1 et 2 min, sans retirer le densimètre de la suspension.
- A partir de la troisième lecture, le densimètre est retiré de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette témoin. - Plonger le densimètre dans la solution au moins 30 s avant chaque mesure. - Après chaque lecture de densité, retirer le densimètre de l'éprouvette de la suspension et l'introduit dans l'éprouvette témoin.
- Prendre la lecture de la densité de la solution trouvée dans l'éprouvette témoin.

3.1.2.3. Expression des résultats et tracé de la courbe granulométrique :

Temps de lecture	R lecture densimètre	T (°C)	D (µm)	P% sur tamis 80µm	Ct
30s	1.023	25	0.061	78	1.1
01min	1.019	25	0.045	66	1.1
02min	1.015	25	0.033	53	1.1
05min	1.011	25	0.021	41	1.1
10min	1.008	25	0.015	32	1.1
20min	1.007	25	0.011	30	1.1
40min	1.006	25	0.008	27	1.1
80min	1.005	25	0.006	24	1.1
04h	1.003	25	0.003	18	1.1
24h	1.001	25	0.001	10	11

Tableau 4.5 : Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation (P1/R).

Temps de lecture	R lecture densimètre	T (°C)	D (µm)	P% sur tamis 80µm	Ct
30s	1.022	25	0.062	81	1.1
01min	1.019	25	0.045	71	1.1
02min	1.018	25	0.032	67	1.1
05min	1.017	25	0.020	64	1.1
10min	1.014	25	0.015	54	1.1
20min	1.012	25	0.011	49	1.1
40min	1.01	25	0.008	42	1.1
80min	1.006	25	0.006	29	1.1
04h	1.003	25	0.003	19	1.1
24h	1.001	25	0.001	11	1.1

Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation (P2/R).**A. Tracé de la courbe granulométrique :**

La courbe de l'analyse par sédimentation est représentée sur un graphe semi-logarithmique, dont l'axe des abscisses est en logarithme décimal qui représente les diamètres équivalents

des grains solides ; et l'axe des ordonnées est une échelle linéaire qui représente le pourcentage des fines.

(P1)

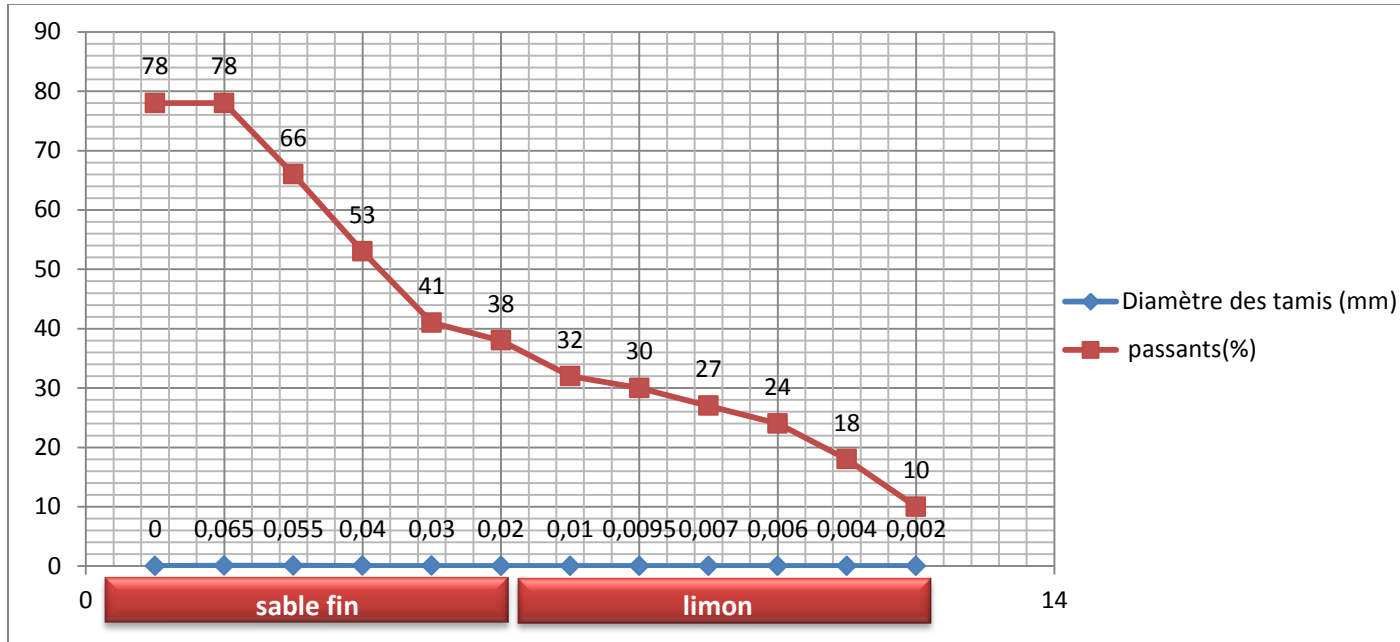


Figure 4.12 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P1/R) (0.08mm_0.002mm)

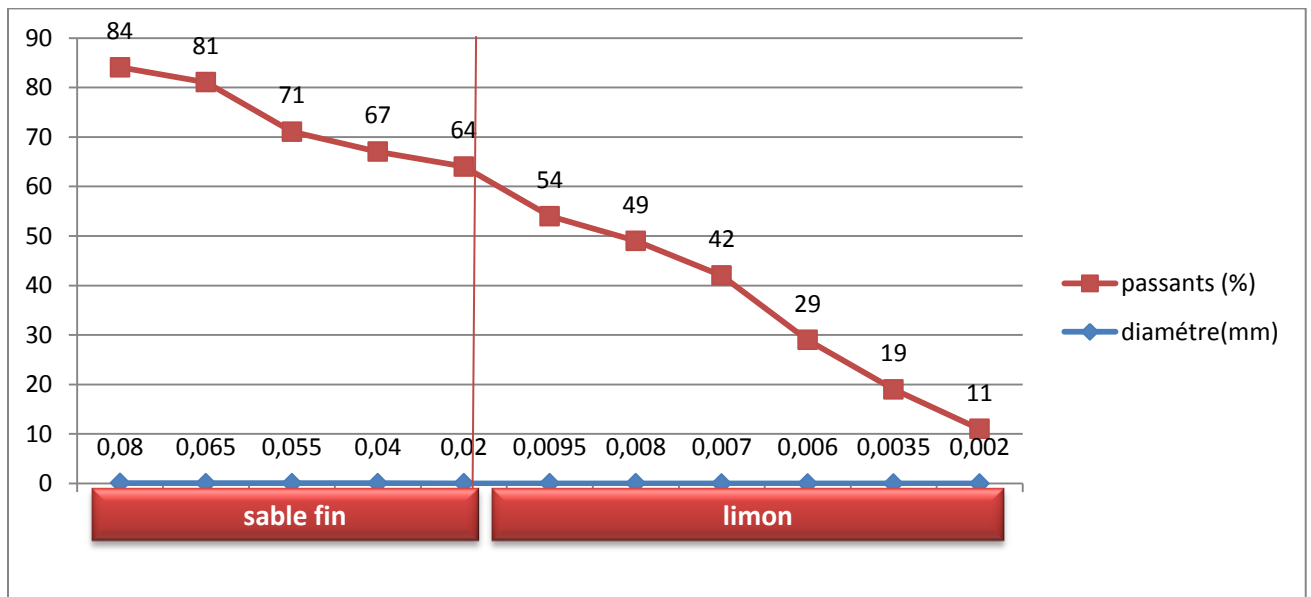


Figure 4.13 : Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation (P2/R) (0.08mm_0.002mm)

(P1)

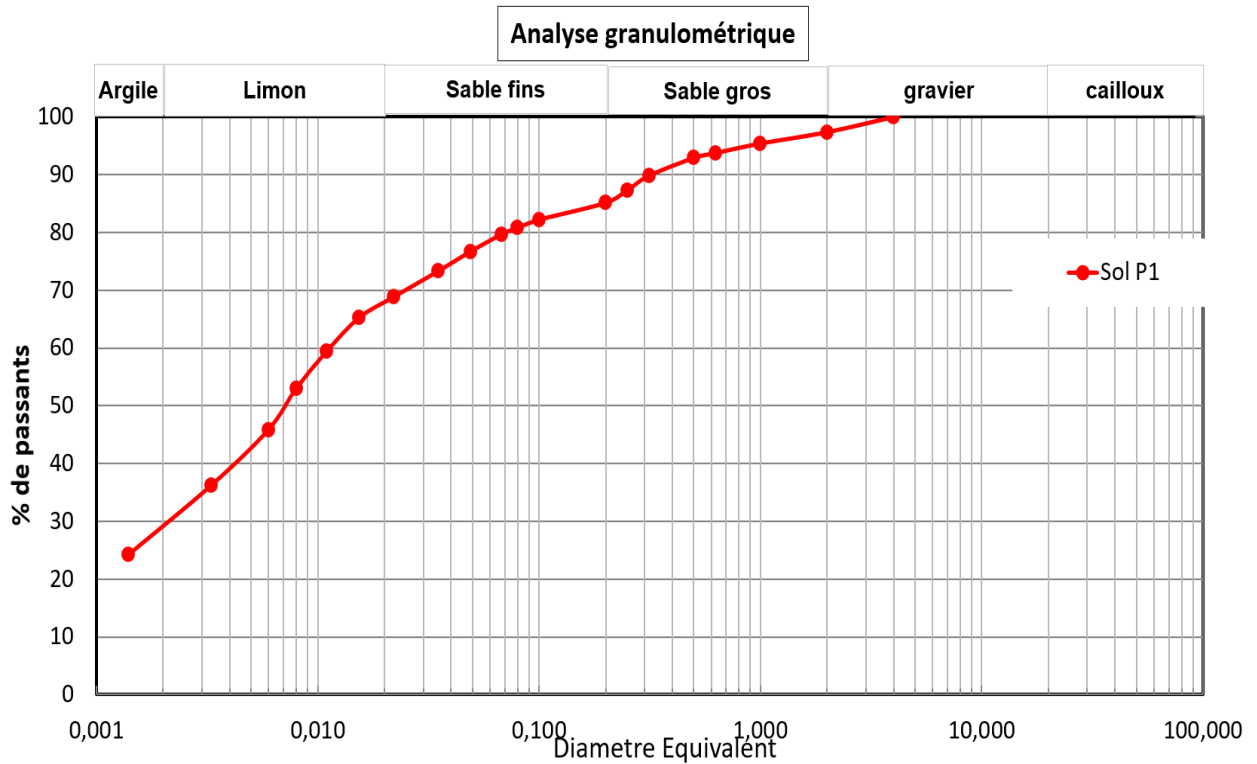


Figure 4. 14 : Courbe granulométrique de l’analyse par sédimentation (P1/R).

(p2)

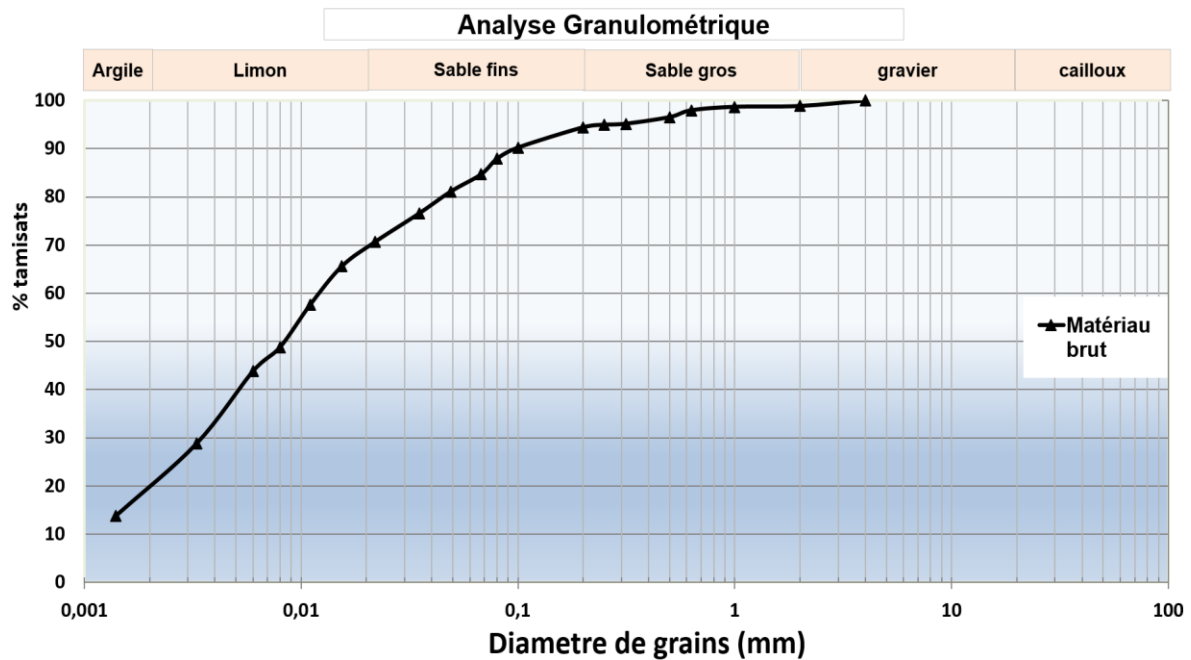


Figure 4. 15 : Courbe granulométrique de l’analyse par sédimentation (P2/R).

Les résultats de l'analyse granulométrique des matériaux P1 et P2, qui montrent la répartition des différentes fractions de particules, voici une interprétation possible :

- **Matériau P1 :**

- **Gravier : 4%**
- **Limon : 45%**
- **Argile : 25%**
- **Sable : 26%**

- **Le matériau P1** présente une distribution granulométrique où **le limon** constitue la fraction dominante, représentant **45%** du total. Cela indique une granulométrie fine à moyenne. La présence de sable est de **26%** suggère une texture relativement grossière par rapport aux fractions plus fines comme le limon et l'argile. La faible proportion de gravier (**4%**) indique une concentration limitée de grosses particules, ce qui peut influencer la perméabilité et la compacité du matériau.

- **Matériau P2 :**

- **Limon : 55%**
- **Argile : 20%**
- **Sable : 25%**

Le matériau P2 se caractérise par une dominante de limon-argileux, représentant **55%** de la composition totale. Cela suggère une granulométrie principalement fine. La proportion d'argile à 20% indique une présence modérée de particules très fines, tandis que le sable à 25% contribue à une texture légèrement plus grossière comparativement au limon et à l'argile. Cette répartition granulométrique peut influencer la plasticité, la cohésion et d'autres propriétés mécaniques du matériau.

Pour calculer C_u (Coefficient d'uniformité) et C_c (Coefficient de courbure) à partir des données granulométriques fournies pour les matériaux P1 et P2, voici les étapes à suivre :

- **Pour le Matériau P1 :**

- $D_{10}=0.0008$

- $D_{30}=0.002$
- $D_{60}=0.01$
- **Calcul du Coefficient d'uniformité (Cu) :**

$$Cu = D_{60}/d_{10}$$

$$Cu = 0.01/0.0008$$

Cu=12.5: Indique une répartition des tailles de particules relativement uniforme.

- **Calcul du Coefficient de courbure (Cc) :**

$$Cc = (D_{30})^2/d_{10} \cdot D_{60}$$

$$Cc = (0.002)^2/0.0008 \cdot 0.01$$

Cc=0.5 Indique une courbure modérée de la courbe granulométrique, avec une distribution relativement symétrique autour de la médiane

- **Pour le Matériau P2 :**
 - $D_{10}=0.001$
 - $D_{30}=0.004$
 - $D_{60}=0.015$
- **Calcul du Coefficient d'uniformité (Cu) :**

$$Cu = D_{60}/d_{10}$$

$$Cu = 0.015/0.001$$

Cu=15 Indique une répartition des tailles de particules assez uniforme.

- **Calcul du Coefficient de courbure (Cc) :**

$$Cc = (D_{30})^2/d_{10} \cdot D_{60}$$

$$Cc = (0.004)^2/0.001 \cdot 0.015$$

Cc=1.0667 Indique une courbure plus prononcée de la courbe granulométrique, avec une distribution asymétrique autour de la médiane.

Ces coefficients fournissent des informations sur la distribution des tailles de particules dans chaque matériau, ce qui est crucial pour comprendre leurs propriétés géotechniques et leur comportement dans diverses applications.

3.1.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité :



Figure 4.16. appareil de Casagrande.

3.1.3.1. Introduction :

Les sols cohésifs sont fortement influencés par la composition des phases (solide, liquide et gazeuse). Cependant, comme ces sols sont habituellement dans une phase saturée à partiellement saturée, il est souvent assez simple de définir leur état par la quantité d'eau. Une fois qu'un sol cohésif est mélangé avec une quantité trop importante d'eau, il sera un peu liquide et s'écoule comme un liquide gelé. Mais à mesure que ce liquide visqueux pseudo-liquide est progressivement séché, avec la diminution de la teneur en eau, il devient plastique. La diminution de la teneur en eau entraînera une transition du sol de semi-solide à solide.

3.1.3.2. Principe de l'essai :

Ces limites sont donc des teneurs en eau pondérales obtenus à partir des essais effectués sur la fraction de matériau passant au tamis de 400 μm . L'essai s'effectue en deux phases

(NF P 94-051 : 1993) :

- Phase 1 : Étude de la quantité d'eau nécessaire pour que la rainure effectuée dans un sol placé dans une coupelle avec des caractéristiques imposées se referme après 25 chocs répétés (en chute libre).

- Phase 2 : Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixé et confectionné manuellement, se fissure.

3.1.3.3. Equipements et matériaux :

Pour effectuer cette expérimentation, le matériel suivant est nécessaire :

- Un échantillon du sol fin tamisé à un tamis de 400 μm .
- Eau distillée
- Une coupelle de Casagrande
- Une spatule.
- Une balance.
- Une étuve.
- Des coupelles porcelaines.
- Une plaque lisse en marbre.



Figure 4. 17 : Equipements utilisés dans l'essai des limites d'Atterberg.

3.1.3.4. Détermination de la limite de liquidité :

A. Procédure de l'essai :

-Peser 6 récipients (m1), vides et secs dans lesquels des petits échantillons du sol seront placés ultérieurement afin d'en mesurer la teneur en eau.

-. Prendre 70 g du tamisat à 400 μm , malaxer afin d'obtenir une pate homogène et presque fluide.



Figure 4.18. Répartir avec la spatule, dans une coupelle propre et sèche, une masse de pâte et l'étaler en plusieurs couches.

- Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande.
- Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer, en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle et en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
- Soumettre la coupelle à une série de chocs (sous l'effet de la gravité) à la cadence de 2 tours de manivelle/sec et observez attentivement la rainure.
- . Le sol des deux côtés de la coupelle commencera à couler vers le centre. Comptez le nombre de coups, N , pour que la rainure dans le sol se referme sur une longueur de ≈ 1 cm, puis arrêter le choc et noter le nombre N de chocs correspondants.

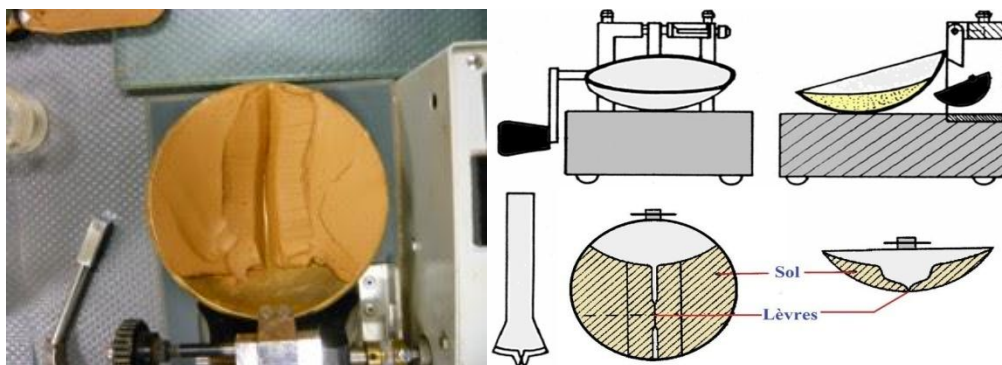


Figure 4. 19 : Fermeture de la rainure après un nombre N de chocs.

- Lorsque le nombre de chocs comptés est inférieur à 15 ($N < 15$), il est nécessaire de refaire la mesure avec un échantillon du sol plus sec et homogénéisé à nouveau. Dans cette situation, le processus de séchage pourrait être accéléré en utilisant un malaxage sous un flux d'air chaud à une température inférieure
À 50 °C.

- Lorsque N dépasse 35, on recommence la mesure en ajoutant un peu d'eau distillée à la pâte du sol. La limite de liquidité ne peut être mesurée que pour N situé entre 15 et 35.
- Prélever ≈ 5 g de pâte de chaque côté des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées) et les mettre dans les récipients pesés dans l'étape n°1.
 - Peser aussitôt les récipients contenant les prélèvements de la pâte (m2), puis les introduire dans l'étuve pour la dessiccation (m3), afin d'en déterminer la teneur en eau.
 - Il est nécessaire de nettoyer et de bien sécher la coupelle après chaque essai. Au moins 4 fois, l'opération complète est réalisée sur la même pâte, mais avec une quantité d'eau différente à chaque fois.

Remarque :

Une coupelle rugueuse est nécessaire pour les pâtes sableuses afin d'éviter la formation d'un glissement sur les parois de la coupelle. Effectivement, il est important que la fermeture de la rainure lors des chocs se produise par l'affaissement de la pâte dans sa masse plutôt que par le glissement sur la paroi de la coupelle. C'est pourquoi il est nécessaire d'augmenter le frottement en utilisant une coupelle rugueuse.

3.1.3.5. Détermination de la limite de plasticité :

A. Procédure de l'essai : On peut définir la limite de plasticité comme la quantité d'eau à laquelle une tige de sol de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre commence à se fissurer. Elle est évaluée en suivant la méthode suivante :

- Peser 4 récipients vides et secs dans lesquels des petits échantillons du sol seront placés ultérieurement afin d'en mesurer la teneur en eau.
- Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main afin d'obtenir un rouleau d'un diamètre de 3 mm et 10 cm de longueur.
- La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$.

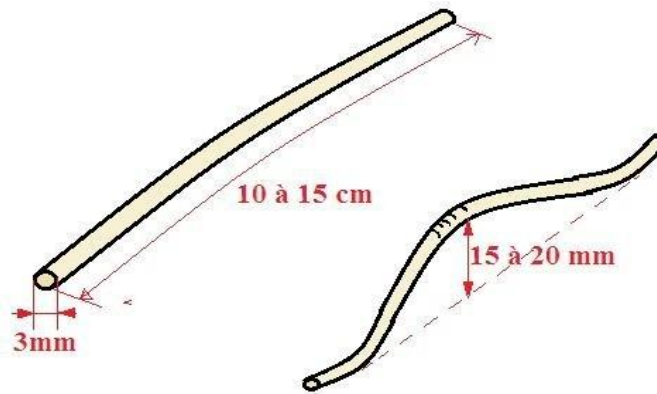


Figure 4. 20 : Confection et Fissuration d'un rouleau de la pâte de diamètre de 3 mm \pm 0,5 mm.

- Si aucune fissure n'apparaît, il faut sécher légèrement la pâte et reformer un nouveau rouleau ;
- Une fois que les fissures ont commencé à se manifester, retirer la partie centrale du rouleau et la placer dans les récipients, puis le peser immédiatement.
- Introduire ces récipients dans l'étuve afin de mesurer sa teneur en eau.
- Effectuer un deuxième essai pour une nouvelle boulette.

3.1.3.6. Expression des résultats :

a. Calcul de la teneur en mesurée :

Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (lg N, w).

N : nombre de coups ; w : teneur en eau.

La teneur en eau est calculée par la formule suivante, et cela pour chaque point de la mesure effectuée :

$$w = (m_2 - m_3 / m_3 - m_1) * 100$$

Avec :

m1 : masse des récipients vides.

m2 : masse du récipient plus la pâte du sol humide.

m_3 : masse du récipient plus la pâte après dessiccation (après séchage dans l'étuve).

Un essai de limite de liquidité, effectué sur un échantillon de sol dans le dispositif de Casagrande, a donné les résultats suivants :

(P1)=70g

Mesures n°	1	2	3
teneur en eau (%)	52.54	51.48	50.49
Nombre de coups N	18	23	28

Tableau 4.7. limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P1).

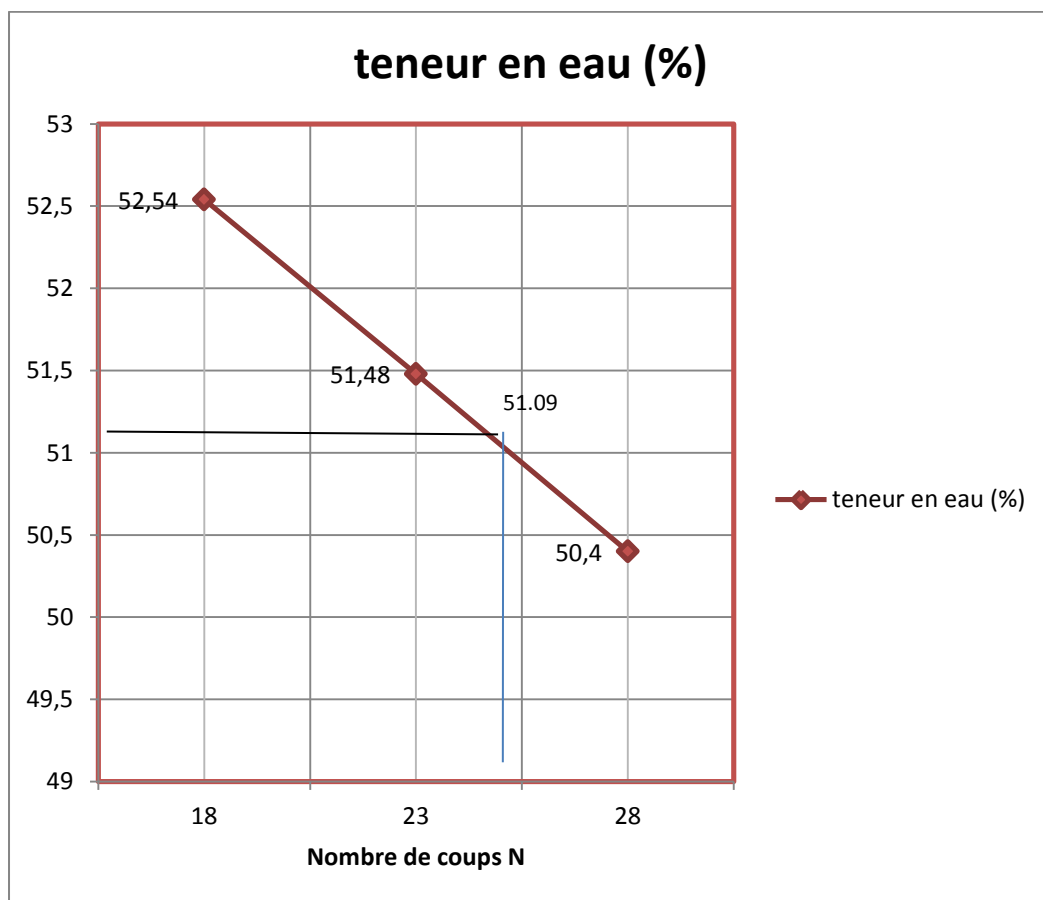


Figure 4. 21. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p1).

(P2)=70g

Mesures n°	1	2	3
teneur en eau (%)	33.42	32.43	31.47
Nombre de coups N	16	21	26

Tableau 4.8.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P2).

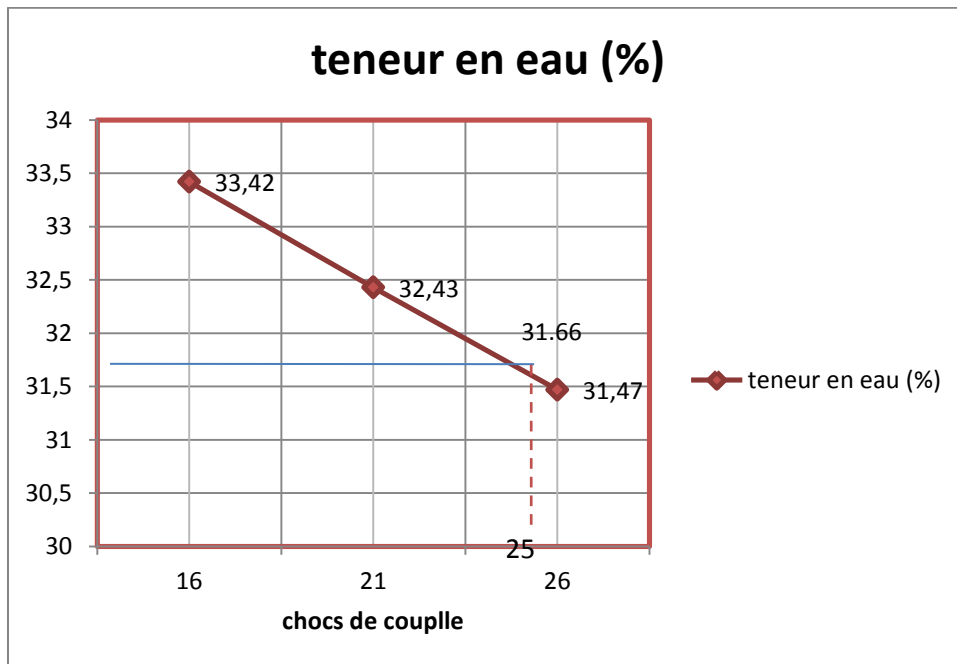


Figure 4. 22. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p2).

- Les limites d'Atterberg sont des propriétés inhérentes au sol et jouent un rôle essentiel dans les mécaniques des sols, car elles permettent de classer les sols en fonction d'un diagramme de plasticité, également connu sous le nom d'abaque de Casagrande.

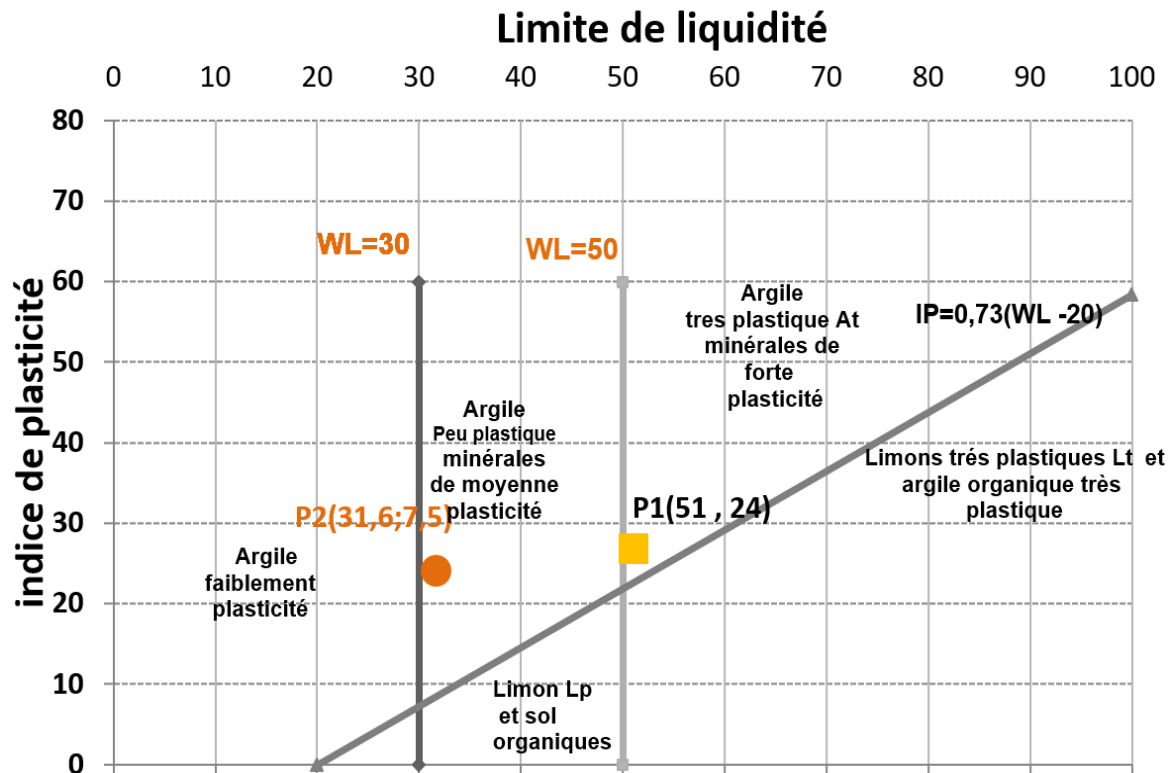


Figure 4. 23. Abaque de Casagrande. Diagramme de plasticité et de classification des sols fins.

3.1.3.7. INTERPRETATION DES RESULTATS :

Pour classifier les sols P1 et P2 et les positionner sur le diagramme de Casagrande en utilisant les valeurs de la limite liquide (WL) et de l'indice de plasticité (IP) fournies, (voir la figure ci-dessus).

✓ **Matériau P1 :**

- **WL (Limite liquide) = 51**
- **IP (Indice de plasticité) = 24**

✓ **Classification :**

- Selon le système de classification des sols basé sur la limite liquide et l'indice de plasticité :
 - **Limite liquide (WL)** de 51 indique un sol avec une certaine plasticité.
 - **Indice de plasticité (IP)** de 24 indique que le sol est modérément plastique.

Donc, le matériau P1 pourrait être classé comme un sol argileux.

Cela positionnerait le sol P1 dans la zone correspondant aux sols argileux, généralement dans la partie supérieure droite du diagramme, indiquant une plasticité modérée.

✓ **Matériau P2 :**

- **WL (Limite liquide) = 31.5**
- **IP (Indice de plasticité) = 7.5**

✓ **Classification :**

- En utilisant les mêmes critères :
 - **Limite liquide (WL)** de 31.5 indique un sol avec moins de plasticité par rapport au matériau P1.
 - **Indice de plasticité (IP)** de 7.5 indique que le sol a une plasticité faible à moyenne.

Donc, le matériau P2 pourrait être classé comme un sol limoneux ou sableux, généralement avec moins de fines et moins de plasticité.

Cela positionnerait le sol P2 dans la zone correspondant aux **sols limoneux ou sableux**, généralement dans la partie inférieure gauche du diagramme, indiquant une plasticité plus faible.

➤ **Conclusion :**

- En résumé, le matériau P1 est classé comme un sol argileux avec une plasticité modérée, tandis que le matériau P2 est classé comme un sol limoneux ou sableux avec une plasticité plus faible. Cette classification est basée sur les valeurs de la limite liquide et de l'indice de plasticité et leur position sur le diagramme de Casagrande, utilisé couramment pour caractériser les sols en géotechnique.

Pour classer les matériaux P1 et P2 selon la classification USCS (Unified Soil Classification System) en utilisant leur granulométrie, et pour discuter de la nécessité d'un traitement pour améliorer leurs propriétés, voici une approche basée sur les informations fournies :

.Classification selon l'USCS :

- **Matériau P1 :**
- **Granulométrie :**
 - 45% de limon
 - 25% d'argile
 - 26% de sable
 - 4% de gravier

Pour classer le matériau P1 selon l'USCS, nous utiliserons principalement les proportions de limon, d'argile et de sable :

- **Groupe principal :** Le matériau P1 contient une proportion significative d'argile et de limon, ce qui suggère qu'il pourrait être classé comme un sol à forte teneur en fines (Fines) dans l'USCS.
- **Sous-groupe :** En fonction des proportions de chaque fraction granulométrique :
Avec 45% de limon et 25% d'argile, le matériau P1 pourrait être classé comme un sol de type **CL** (Limite Liquide) ou **ML** (Limite Liquide Modifiée), indiquant une forte teneur en limon et en argile.

- **Matériau P2 :**
- **Granulométrie :**
 - 55% de limon
 - 20% d'argile
 - 25% de sable

Pour le matériau P2 :

1. **Groupe principal :** Avec une forte proportion de limon et une faible proportion d'argile, le matériau P2 pourrait être classé comme un sol à forte teneur en limon (L) dans l'USCS.
2. **Sous-groupe :** En fonction des proportions :

- Avec 55% de limon et 20% d'argile, le matériau P2 pourrait être classé comme un sol de type **ML** (Limite Liquide Modifiée) ou **CL-ML** dans certains cas, en fonction de la plasticité et de la distribution granulométrique spécifique.

Nécessité d'un traitement pour améliorer les propriétés :

- **Matériau P1** : En raison de sa composition avec une proportion élevée d'argile et de limon, le matériau P1 pourrait nécessiter un traitement pour améliorer sa stabilité et sa résistance. Des techniques telles que le mélange avec des matériaux granulaires ou des stabilisants chimiques pourraient être envisagées pour réduire la plasticité et améliorer la résistance mécanique.
- **Matériau P2** : Bien que le matériau P2 soit dominé par le limon avec une plasticité moindre, il pourrait également bénéficier d'un traitement pour améliorer sa compacité et sa stabilité. L'ajout de matériaux granulaires pour augmenter la résistance et la perméabilité ou l'utilisation de stabilisants pour contrôler la plasticité pourraient être nécessaires selon l'application prévue.

Conclusion :

La classification selon l'USCS permet de caractériser les sols en fonction de leur composition granulométrique et de leurs propriétés plastiques. En fonction des résultats obtenus, des traitements peuvent être recommandés pour optimiser les propriétés des matériaux P1 et P2 en vue de leur utilisation dans des applications spécifiques de génie civil ou de construction.

3.1.3.8. Traitement des sols bruts par des liants

Avec 3 % La chaux :

(p1)=67.9 g+2.1 g la chaux (3 %)

Mesures n°	1	2	3
teneur en eau (%)	51.46	50.54	49.48
Nombre de coups N	16	21	26

Tableau 4.9.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (P1).

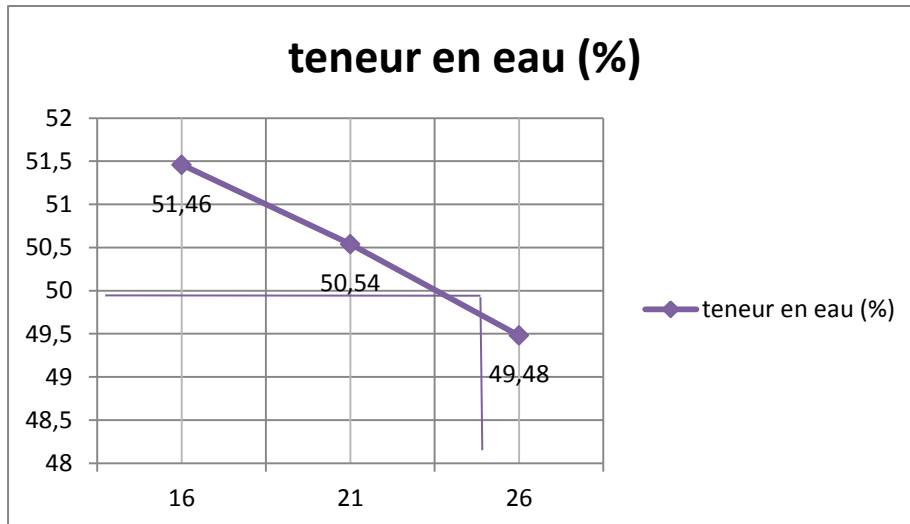


Figure 4. 24. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p1).

WL=49.07%

WP=40.48%

IP=8.86

(p2)=67.9 g +2.1 g (3%)

Mesures n°	1	2	3
teneur en eau (%)	36.62	35.60	34.58
Nombre de coups N	16	21	26

Tableau 4.10.limite de liquidité à la coupelle de Casagrande(P2).

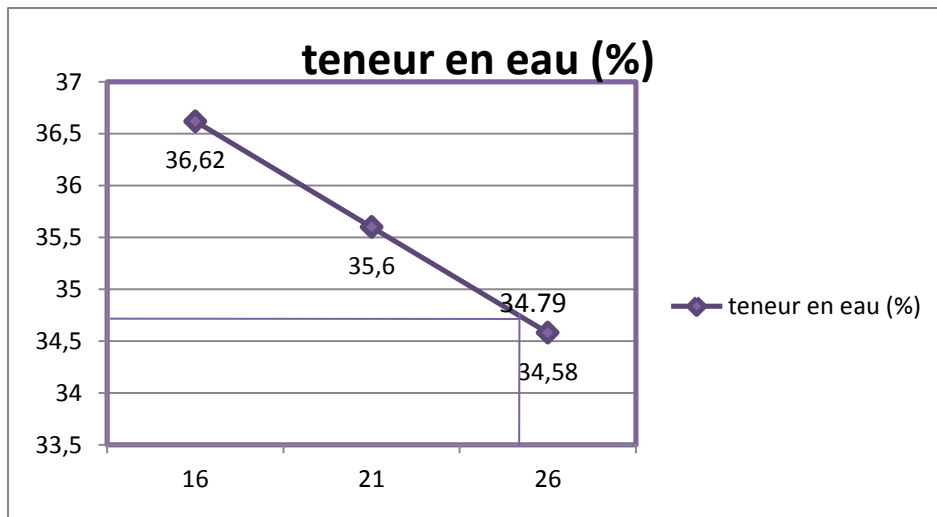


Figure 4. 25. Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande (p2).

WL=34.79%

WP=25.94%

IP=8.85

. 3.1.3.9. INTERPRETATION DES RESULTATS :

Après traitement avec 3% de chaux, les nouvelles valeurs des limites d'Atterberg pour les matériaux P1 et P2 montrent des changements significatifs.

Pour le Matériau P1 :

- Avant traitement : WL = 51, IP = 24
- Après traitement (avec 3% de chaux) : WL = 49, IP = 8.8

1. Limite Liquide (WL) :

- Avant traitement : 51
- Après traitement : 49

Une diminution de la limite liquide après traitement avec la chaux indique une réduction de la plasticité du matériau P1. Cela peut être bénéfique pour améliorer la stabilité et réduire les risques de gonflement et de retrait du sol.

2. Indice de Plasticité (IP) :

- Avant traitement : 24
- Après traitement : 8.8

Une diminution significative de l'indice de plasticité indique une réduction de la plasticité du matériau P1 après traitement à la chaux. Cela peut rendre le sol moins susceptible de se déformer sous charge et améliorer sa résistance mécanique.

Pour le Matériau P2 :

- Avant traitement : WL = 31.5, IP = 7.5
- Après traitement (avec 3% de chaux) : WL = 34.7, IP = 5.85

Interprétation :**1. Limite Liquide (WL) :**

- Avant traitement : 31.5
- Après traitement : 34.7

Une augmentation de la limite liquide après traitement avec la chaux peut indiquer une légère augmentation de la plasticité du matériau P2.

2. Indice de Plasticité (IP) :

- Avant traitement : 7.5
- Après traitement : 5.85

Une diminution de l'indice de plasticité suggère une réduction de la plasticité du matériau P2 après traitement à la chaux. Cela pourrait contribuer à améliorer la stabilité du sol et à réduire les risques de déformation.

4. Conclusion :

- Le traitement avec 3% de chaux a conduit à des changements significatifs dans les propriétés des sols P1 et P2, en particulier en réduisant l'indice de plasticité dans les deux cas. Pour le matériau P1, cela pourrait indiquer une meilleure stabilité et une réduction des risques de gonflement, tandis que pour le matériau P2, cela pourrait améliorer sa résistance et sa compacité. Ces résultats montrent l'efficacité du

traitement à la chaux pour modifier les propriétés géotechniques des sols en fonction de leurs compositions initiales.

3.1.4. - ESSAI D'ÉQUIVALENT DE SABLE (norme NF p 18-598) :

3.1.4.1. But de l'essai :

On utilise cet essai afin d'évaluer la qualité des sables, qui peut être évaluée en mesurant le pourcentage de fines présentes dans ces sables. On peut extraire des sables provenant de carrières ou de dunes ou d'oueds.

3.1.4.2. Principe de l'essai :

La fraction 0/5 mm du sable à étudier est utilisée pour l'essai. L'échantillon est lavé, conformément à un processus standardisé, puis il est laissé reposer. Après 20 minutes, on effectue les mesures suivantes :

- hauteur h1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable par la relation ci-dessous :

$$E.S = (h_2/h_1) * 100$$

- Si on mesure visuellement la hauteur du sable propre avec une règle, on parle d'E.S.V. (Equivalent de sable visuel).
- Si on utilise un piston (plus précis), on parle d'E.S. P (Equivalent de sable au Piston).
- L'essai est effectué sur 120 g de grains secs.
- Une solution lavante est utilisée pour séparer les particules fines de l'argile.
- Les matériels utilisés :
- Eprouvette graduée + balance de précision.
- Entonnoir pour introduction du sable.
- Solution lavante.
- Machine agitatrice.

- Piston pour la mesure de ES.

3.1.4.3. Conduite de l'essai :

- Remplir la solution lavante dans l'éprouvette jusqu'au premier trait.
- Évaluer la quantité de sable sec à 120 grammes dans l'éprouvette contenant la solution lavante.
- Laisser agir pendant 10 minutes afin de retirer les bulles d'air.
- Fermer l'éprouvette et laisser la machine l'agiter (90 cycles en 30s) afin de nettoyer le sable.
- Le tube laveur est tourné entre les doigts pour nettoyer les parois intérieures de l'éprouvette.
- Retirez le tube laveur et laissez-le reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration jusqu'à ce que la décantation soit terminée.



Figure 4.26. Processus de décantation.

-Après 20 minutes, il est possible de mesurer la hauteur du sable h_2 et la hauteur h_1 de l'ensemble sable plus flocculat.

- Évaluation de la hauteur h_2 lorsqu'on utilise le piston.
- Évaluation des ESV et ESP.



figure 4.27. après 20 minutes de décantation.

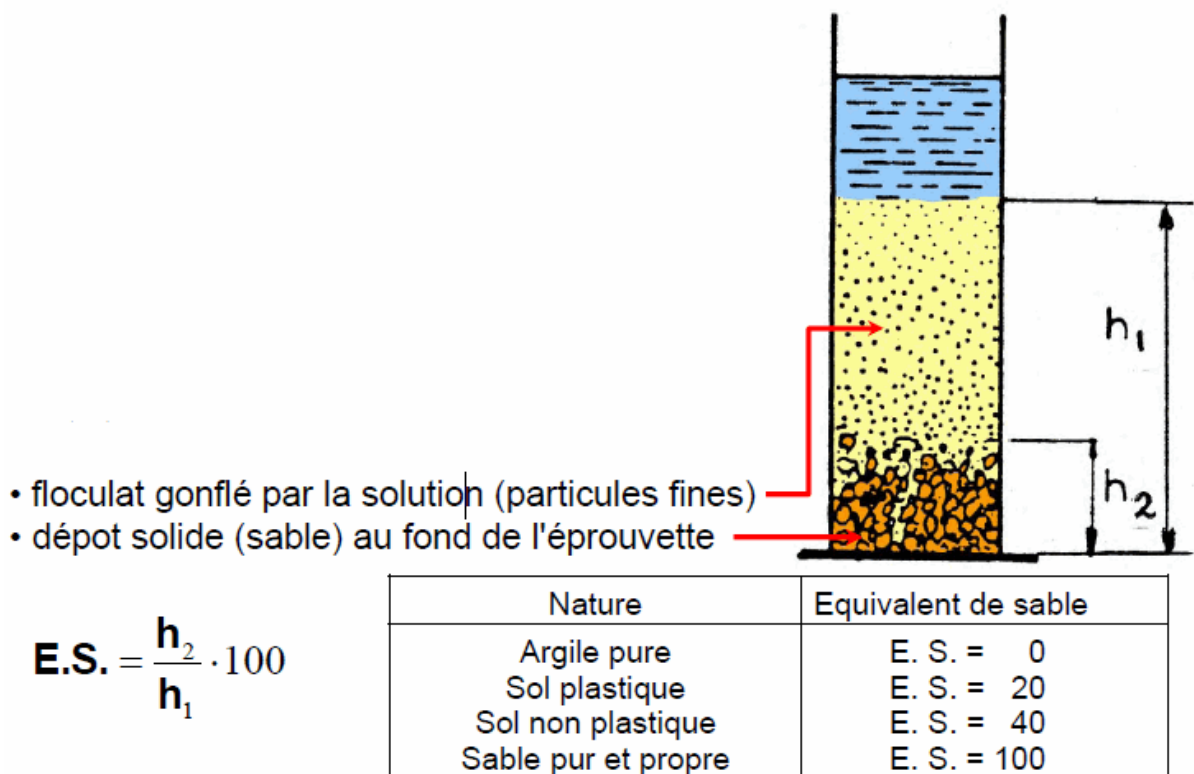


Figure 4. 28. Essai d'équivalent de sable.

3.1.4.4. Expression des résultats :

(p1):

$$h1=21.5.$$

$$h2=12.5.$$

$$E.S.V = (12.5/21.5)*100=58\% \Rightarrow \text{visual}$$

$$h2=9.5$$

$$E.S.P = (9.5/21.5)*100=44\% \Rightarrow \text{piston}$$

(P2) :

- $h1=16.5$
- $h2=7$
- $E.S.V = (7/16.5)*100 =42\%$
- $h2=4$
- $E.S.P = (4/16.5)*100 =30\%$

3.1.4.5. Classification des sables :

A travers les résultats :

$$E.S.V < 65 \text{ et } E.S.P < 60 \Rightarrow \text{sable argileux (pour les deux types)}$$

- Basé sur le tableau de (Figure 4. 26) :

-(p1) non plastique.

-(p2) un peu plastique.

3.2. Essais chimiques :

3.2.1. Essai au bleu de méthylène NFP 94-068 :

3.2.1.1. Introduction :

L'utilisation de l'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la résistance à l'eau et la composition minéralogique de la fraction argileuse d'un sol. La mesure de la surface

spécifique totale (interne + externe) des particules argileuses du sol est appelée l'essai « à la tâche ».

3.2.1.2. Principe de l'essai :

L'objectif de l'essai est de déterminer, par mesure, la quantité de bleu de méthylène qui peut être adsorbée par le matériau suspendu dans l'eau, conformément à la norme NF P 94-068 : 1998 [10]. On rapporte cette quantité en fonction directe de la fraction 0/50 mm du sol. Le bleu du sol est directement associé à la surface spécifique des particules qui composent le sol.

On effectue le dosage en ajoutant successivement des quantités de bleu de méthylène et en vérifiant l'adsorption après chaque ajout. Ainsi, une goutte de la suspension est prélevée et déposée sur un papier filtre, ce qui entraîne la formation d'une tache. Lorsqu'une auréole bleu clair persistante se forme à la périphérie de la tache, on atteint l'adsorption maximale.

3.2.1.3. Equipements et matériaux :

- Un échantillon du sol tamisé au tamis 5 mm de diamètre.
- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 10 cm³ , 5 cm³ et 2 cm³ des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à ± 1 cm³ .
- Un agitateur magnétique.
- Un récipient cylindrique (en verre, plastique).
- Une baguette de verre. • Papier filtre blanc.
- Une solution de bleu de méthylène dosée à $10 \pm 0,1$ g/l.



Figure 4. 29 : Equipements utilisés dans l'essai de bleu de méthylène.

3.2.1.4. Procédure de l'essai :

On effectue cet essai en suivant les étapes suivantes :

- 1- Préparation de la solution du Blue.
- 2- Prélever 30 g du sol sec.
- 3- La prise est suspendue dans un volume de 100 cm³ en utilisant l'agitateur pendant une durée de 5 minutes.
- 4- En utilisant le dispositif de mesure, ajouter 5 cm³ de bleu dans la suspension après 1 minute.
- 5- Déposer une goutte de suspension sur le papier filtre en utilisant une baguette de verre



Figure 4.30 : Prélèvement d'une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre.

6-Effectuer des injections successives de 5 cm³ de solution de bleu jusqu'à ce qu'une auréole périphérique bleu clair se forme. L'essai est donc considéré comme positif. Dès lors, permettre à l'adsorption du bleu de se poursuivre dans la solution et réaliser des tâches de minute en minute.

Sans ajouter de solution supplémentaire.



Figure 4.31 : Vérification de l'activité du sol.

7- En cas de retour négatif de l'essai à la cinquième tache ou avant, il est recommandé de faire de nouvelles injections de bleu avec des intervalles de 2 cm³.

8- On renouvelle ces opérations jusqu'à ce que l'essai soit toujours positif pour cinq taches successives. Après avoir terminé le dosage, on évalue le volume total (V) de la solution de bleu qui a été requise pour atteindre l'adsorption totale.

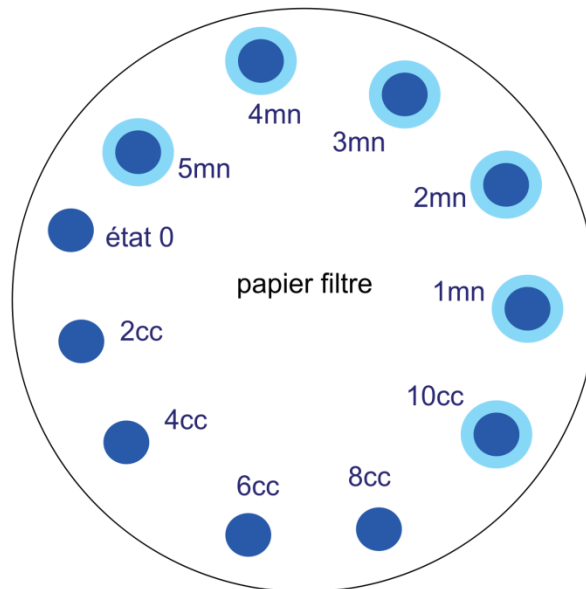


Figure 4.32 : Résultats d'un essai de bleu de méthylène.

3.2.1.5. Expression des résultats :

Le niveau de bleu, connu sous le nom de VBS et mesuré en grammes de bleu de méthylène par 100 g de matériau, correspond à la quantité de ce colorant requis pour recouvrir d'une couche mono moléculaire les surfaces internes et externes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

Pour les matériaux dont le D_{max} est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$\bullet \text{ VBS} = (m / B) * 100$$

$$\bullet \text{ VBS} = (V / m_0) * c$$

Avec :

M : masse sèche de la prise d'essai (g).

B : masse de bleu introduite (solution à 10 g/l).

On a :

$$B = V \times 0,01$$

V : est le volume total de la solution de bleu.

sol	Volume	C	Fraction	VBS
P1	55	0.98	98	1.80
P2	45	0.99	99	1.49

Tableau 4.11. Valeurs de bleu méthylène.

3.2.2. DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN CARBONATE $CaCO_3$ NA-2789 :

3.2.2.1. Objet :

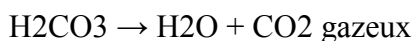
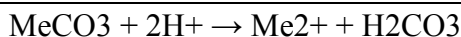
L'objectif de l'essai est d'évaluer le niveau de dioxyde de carbone (CO_2) produit par un échantillon préparé pour l'essai sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphériques connues). L'instrument utilisé est le calcimètre.

3.2.2.2. Domaine d'application :

Méthode pour évaluer la concentration en carbonate dans des échantillons de sols (y compris les sédiments), de substances utilisées sur ou dans les sols et de déchets. Cette décision est établie de manière systématique pour les matières amendantes.

3.2.2.3. Principe :

L'acide chlorhydrique est ajouté à un échantillon pour décomposer tous les carbonates présents :



On évalue le niveau de gaz carbonique émis en utilisant un appareil Scheibler et on le compare au niveau de gaz carbonique émis par du carbonate de calcium pur. Pour éviter toute correction, tous les tests sont effectués dans les mêmes conditions.

3.2.2.4. Préparation de l'échantillon : Les échantillons sont séchés à l'air libre ou dans une étuve ventilée à une température inférieure à 40 °C, On les émotte alors et on les tamise à

l'aide d'un tamis avec une ouverture de mailles de 2 mm. Si la prise d'essai est inférieure à 2 g, il est possible de broyer une partie de l'échantillon sans aucun refus afin de le passer à travers un tamis à une ouverture de mailles de 250 μm . Une partie de l'échantillon d'une taille de 2 mm sera utilisée pour évaluer l'humidité résiduelle selon les instructions.

3.2.2.5. Appareillages et matériels utilisés :

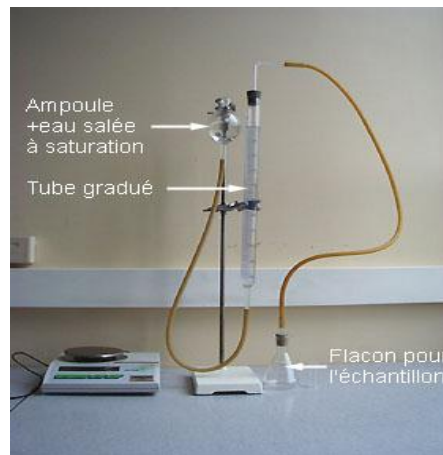


Figure 4.33. appareil de l'essai de *LA TENEUR EN CARBONATE CaCO_3* .

Le calcimètre est utilisé pour évaluer la quantité de CO_2 produite par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon de sol ou de roche.

Un calcimètre peut être fabriqué en utilisant :

- une ampoule
- un tube gradué de 100 cm^3
- un erlenmeyer de 100 cm^3 - un petit tube en verre environ deux fois moins haut que l'erlenmeyer.
- deux bouchons à 1 trou adaptés au tube gradué et à l'erlenmeyer.
- 1,5 m de feuille anglais
- une balance à 0,01g pour peser l'échantillon.
- un portoir pour le petit tube
- une grosse pince à dissection
- un peu de pâte à modeler (non attaquée par l'acide)

- une pipette graduée
- HCl assez concentré

3.2.2.6. Expression des résultats :

Nature	Teneur de calcaire (%)
P1 (Sol faiblement carbonaté)	09%
P2 (Sol haut carbonaté)	98%

Figure 4.34. Résultats de l'essai

3.2.3. Détermination de la de la teneur en sulfates NA-16002-5042 :

3.2.3.1. Mode opératoire :

- Mesure de 1 g de matière \pm mg à l'avance.
- Le placer dans un récipient de 800 ml.
- Ajouter 20 ml d'eau distillée pour diluer.
- Ajouter 10 ml de HCL concentré en agitant.
- Faire chauffer en agitant jusqu'à ce qu'il se dissoute.
- Déposer le filtrat dans un récipient de 600ml.
- Faire chauffer.
- Ajouter une solution de BaCl₂ à une teneur de 10%.
- Sélectionner un filtre sans cendres.
- Laver avec de l'eau bouillante jusqu'à ce que les chlorures soient éliminés (Essais au nitrate d'argent).
- Déposer le filtre ainsi que son résidu dans un lavabo en porcelaine préalablement nettoyé. Établir et mesurer (P1).
- Cuire au four à moufle pendant une durée de 15 minutes à une température de $950 \pm 25^\circ\text{C}$.
- Mélanger avec le dessiccateur et mesurer (P2).

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ (mg/kg)} = (\text{p2-p1}) * 0.343 * 10^6$$

Nature	Taux de sulfate SO_4^{2-} (mg/kg)
P1	Nul
P2	Nul

Tableau 4.12. Détermination du taux de sulfate.

3.2.4. Détermination de la valeur du PH NF EN 12850 :

3.2.4.1. Comment interpréter des bandelettes de papier PH :

Pour une raison ou une autre, il vous arrivera peut-être d'avoir à tester la nature, acide ou alcaline, d'un liquide. Ce test est très facile à réaliser avec des bandelettes de papier pH (potentiel hydrogène) sensible. Vous trempez une bandelette dans votre liquide quelques secondes, le papier change de couleur par réaction, vous comparez cette couleur avec celles d'un indicateur et vous avez votre valeur de pH. Simplissime

Prenez les bandelettes appropriées. La valeur centrale d'un pH est de 0 à 14,7, ce qui correspond à un milieu neutre. La présence d'un pH compris entre 0 et 6 est considérée comme acide, tandis qu'entre 8 et 14, il s'agit d'un milieu basique ou alcalin. Les kits de test les plus fréquemment utilisés évaluent le pH de 0 à 14. Toutefois, certaines bandelettes sont extrêmement sensibles et ne prennent en compte qu'une plage limitée de pH

Plongez une bandelette dans l'environnement à examiner. Il est inutile d'immerger tout, souvent la moitié de la bandelette est suffisante. Prenez l'un des bouts de la bandelette et trempez l'autre dans votre liquide. Le temps de trempage diffère selon les papiers

Grâce à ces bandelettes, il est facile de mesurer le pH de tout milieu aqueux.

Évaluez la teinte de la bandelette par rapport à l'indicateur. Les bandelettes de papier pH sont accompagnées d'un indicateur, comprenant un échantillon de couleurs correspondant à des valeurs de pH. Attachez votre bandelette à ces échantillons et identifiez la couleur qui correspond le mieux à celle-ci. Cela fait, voyez à quelle valeur chiffrée de pH correspond cette couleur

Un milieu acide produit des teintes chaudes (rouge, orange) et un milieu basique des teintes plus froides (bleu, vert).

etapes	Feuille de paillasse	Application
1	N de d'échantillon	
2	Laver le becher avec de l'eau distillée	
3	Peser 20g de l'échantillon	
4	Introduire 50ml d'eau à analyse dans le flacon	
5	Agiter la solution puis lq laisser se reposer pendant une heure	
6	Etalonner le PH metre avec la solution tampon à PH (acide)après PH(base)	
7	Après le repos,on mesure le PH avec le PH metre	
8	Prendre la température de l'échantillon de sol à analyser	
9	Prendre la lecture après stabilité de l'appqriel	
10	A la fin nettoyage complet(verrierie et paillasse)	

Tableau 4.13. Mode opératoire de l'essai.

3.2.4.2. Expression des résultats :

Notre résultat du PH sur les deux types

N ECH	PH
P1	8,2
P2	8,4

Tableau 4.14.résultats de l'essai.

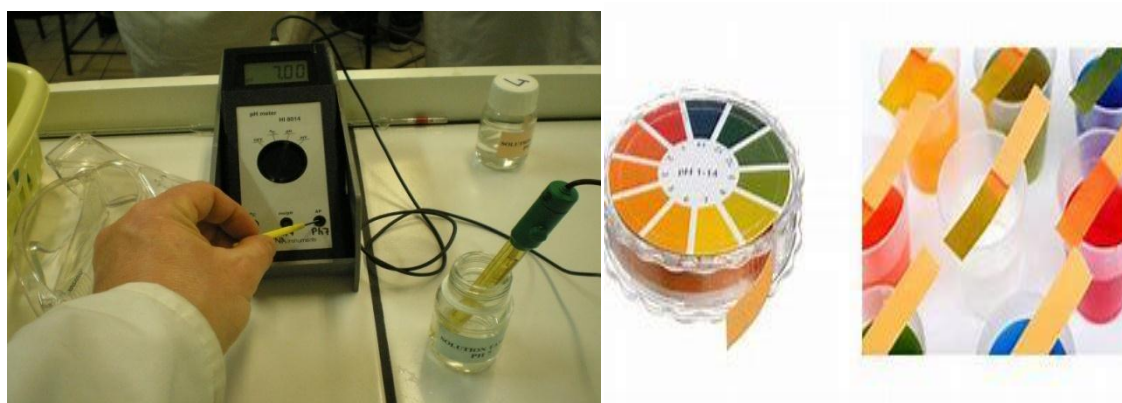


Figure 4.35. Appareil de l'essai de PH.

3.3. Fabrication des adobes selon la norme française XP-P13-901 :

La fabrication des adobes se fait dans des moules de bois séchées au soleil directement sur le sol après démoulage.

On mélange cette terre jusqu'à ce qu'on obtienne un mélange homogène à l'œil nu. Par la suite, ce mélange homogène d'eau-terre est versé directement sur le sol dans un moule en bois de dimensions 295x14x95 mm.

En utilisant les mains, on peut tasser ou pétrir ce mélange dans les coins, puis on enlève le surplus avec une réglette en bois. Finalement, on sèche les adobes à la température de laboratoire jusqu'à ce qu'ils aient une masse constante (environ 3 semaines).

3.4. Organigramme pour fabrication des adobes :

3.4.1. Fabrication des adobes+enduits_

- 1. adobe brut***
- 2. adobe+enduit brut***
- 3. adobe brut + enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec).***
- 4. adobe brut + enduit (fibre de verre surfacique).***
- 5. adobe brut + enduit (3% fibre de paille).***

3.5. Essais mécaniques :

3.5.1. Compression simples selon la Norme-NF-XP-P13-901 :

Ces tests de résistance à la compression simple (RC) sont réalisés sur des échantillons rectangulaires de 295x14x95 mm. L'objectif de la mesure de cette résistance est d'analyser l'impact des liants utilisés sur les paramètres de résistance mécanique du sol traité. Cela nous donnera l'occasion de désigner le Conséquences du sol traité.

Ainsi, nous avons évalué les capacités de compression simple des éprouvettes en ce qui concerne le sol brut sans traitement et les trois formulations proposées pour les deux types de sols utilisés, p1 et p2.

La résistance à la compression simple est calculée en utilisant la formule suivante :

$$RC = Frs$$

F_r : la valeur maximale de la force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture S : la surface de la section de l'éprouvette, (cm²).



Figure 4.36. Mode opératoire de la compression simple.

3.5.1.1. Résistance à la compression simple et le module d'élasticité des Formulations étudiées:

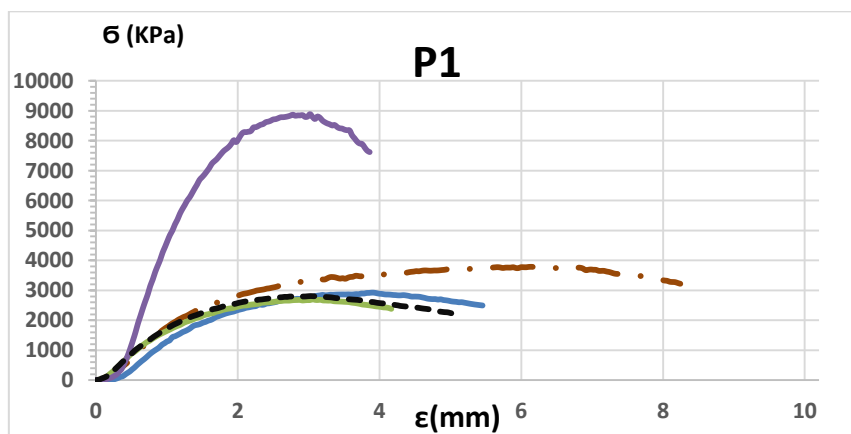


Figure 4.37. Evolution de la résistance RC pour les 5 formulations ($p1$).

- Formulation 01 : *adobe brut*.

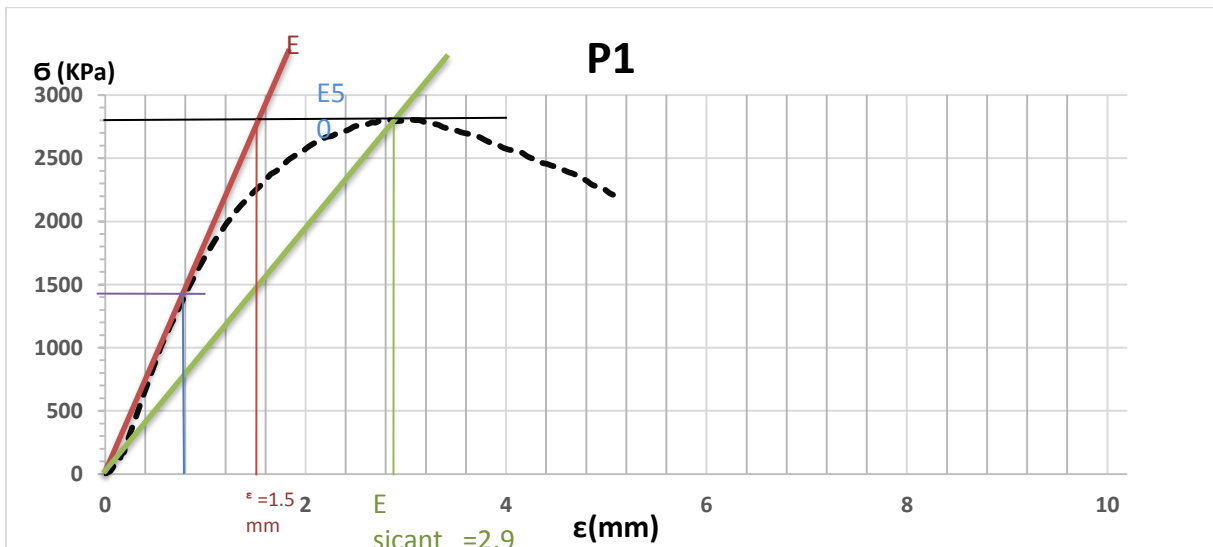


Figure 4.38. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (*adobe brut*).

- Formulation 02 : *adobe+ enduit brut*.

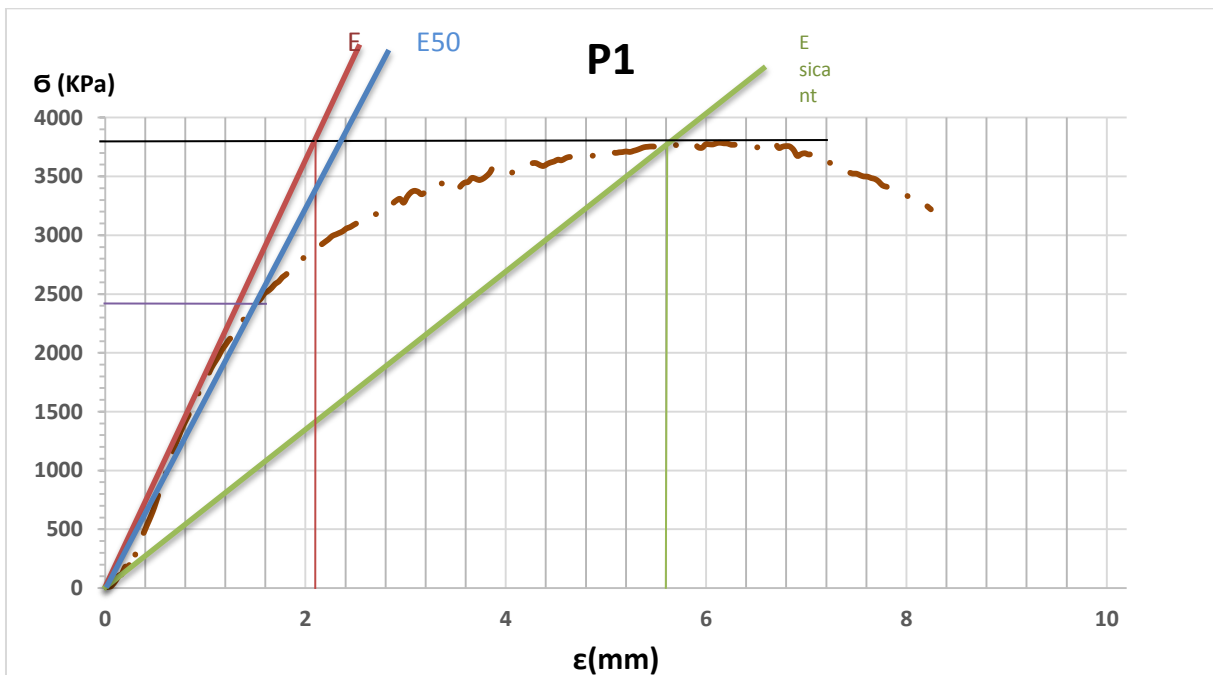


Figure 4.39 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement.

(Adobe brut +enduit brut)

- **Formulation 03: adobe brut + enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)**



Figure 4.40. Poudre de marbre.

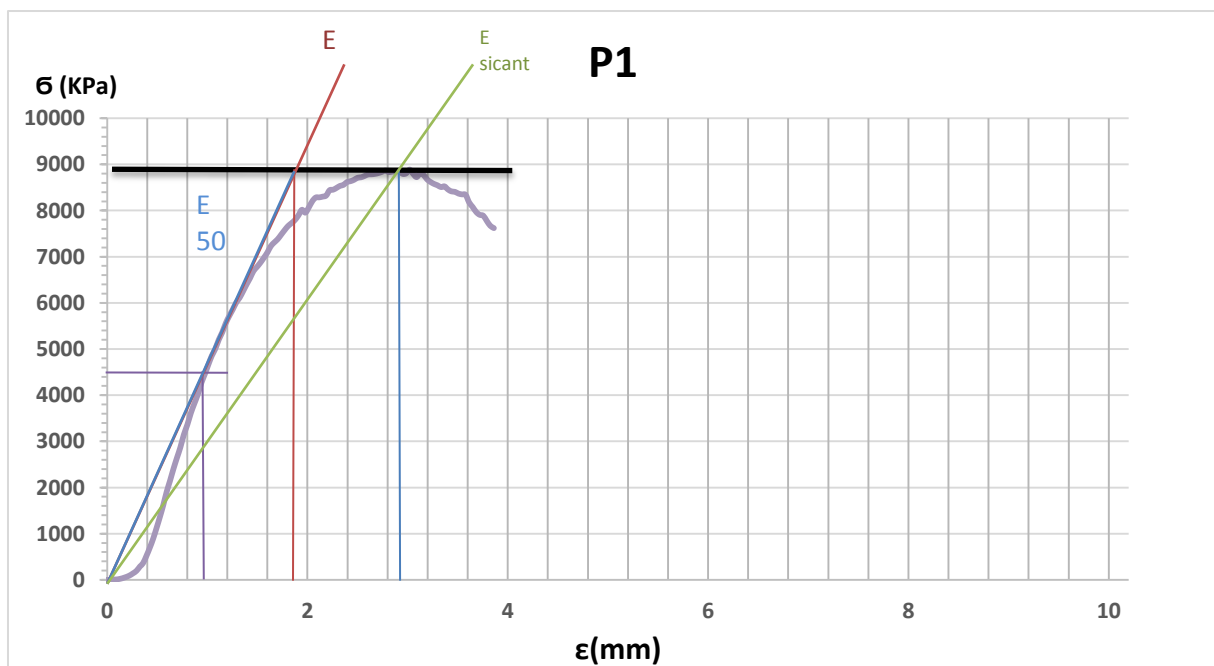


Figure 4.41 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

[Adobe brut +enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)]

- **Formulation 04 : *adobe brut + enduit (fibre de verre surfacique)***



Figure 4.42. + *Enduit (fibre de verre surfacique)*.

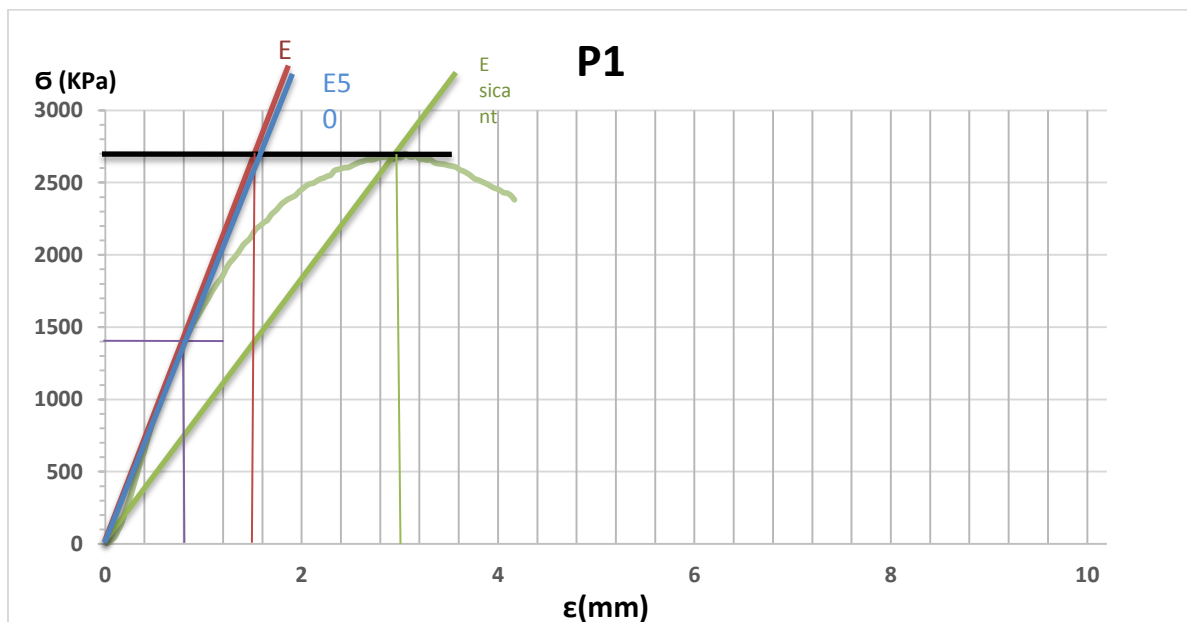


Figure 4.43 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

(Adobe brut +enduit (fibre de verre surfacique))

- **Formulation 05 : *adobe brut + enduit (fibre de paille)***



Figure 4.44. Enduit (fibre de paille)

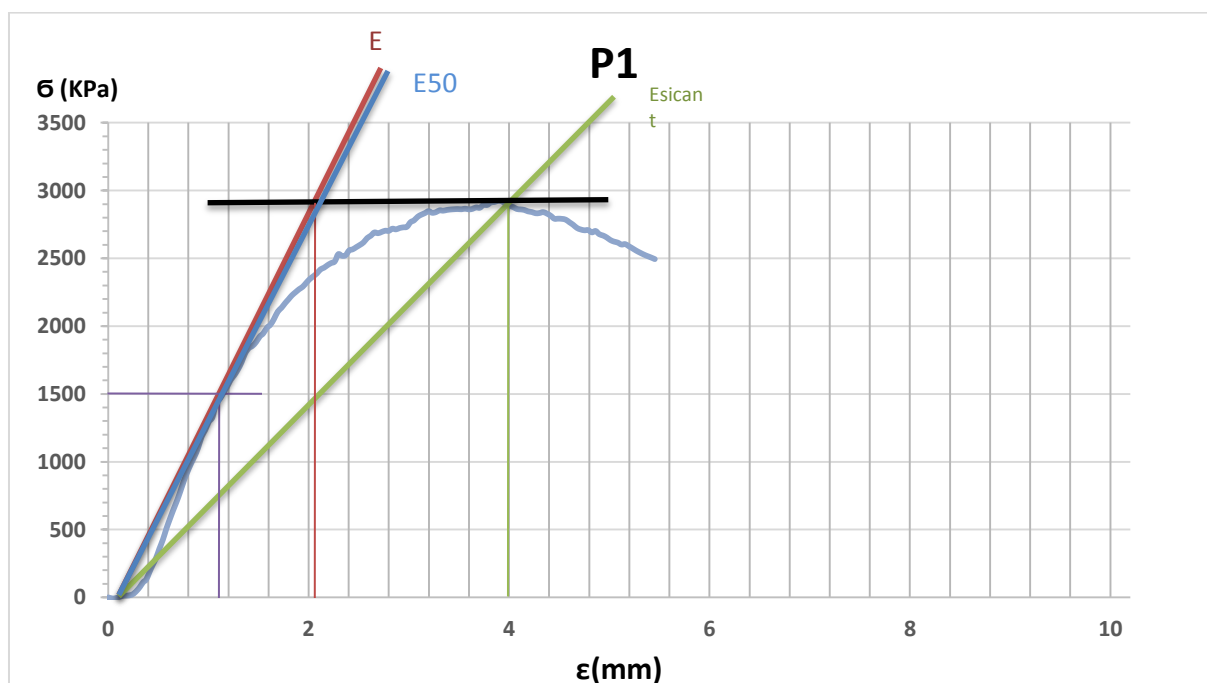


Figure 4.45 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

(Adobe brut +enduit+fibre de paille)

(p1) :

	Age	formulations	σ_{\max} (MPa)	$\sigma_{\max}/2$ (MPa)	ε	E	E50	E siccant
1	/	<i>adobe brut</i>	3.7	/	/	/	/	/
2	/		2.894	1.44	0.8	1.93	1.8	2.9
3	/		2.088	/	/	/	/	/
4	/	<i>adobe+ enduit brut</i>	4.6	/	/	/	/	/
5	/		3.855	1.927	1.5	1.835	1.2825	5.6
6	/		3.11	/	/	/	/	/
7	/	<i>adobe brut + enduit</i>	9.062	/	/	/	/	/
8	/		8.931	4.4655	0.95	4.7	4.7	2.9
9	/	<i>(1/3 poudre de marbre de la masse sec)</i>	8.8	/	/	/	/	/
10	/	<i>adobe brut + enduit (fibre de verre surfacique)</i>	3.606	/	/	/	/	/
11	/		2.813	1.4065	0.8	1.875	1.758	3
12	/		2.02	/	/	/	/	/
13	/	<i>adobe brut + enduit (fibre de paille)</i>	3.056	/	/	/	/	/
14	/		2.978	1.489	1.1	1.418	1.353	4
15	/		2.9	/	/	/	/	/
16	Moy							
17	Ecart type							

Tableau 4.15.résultats de l'essai de compression simple (p1).

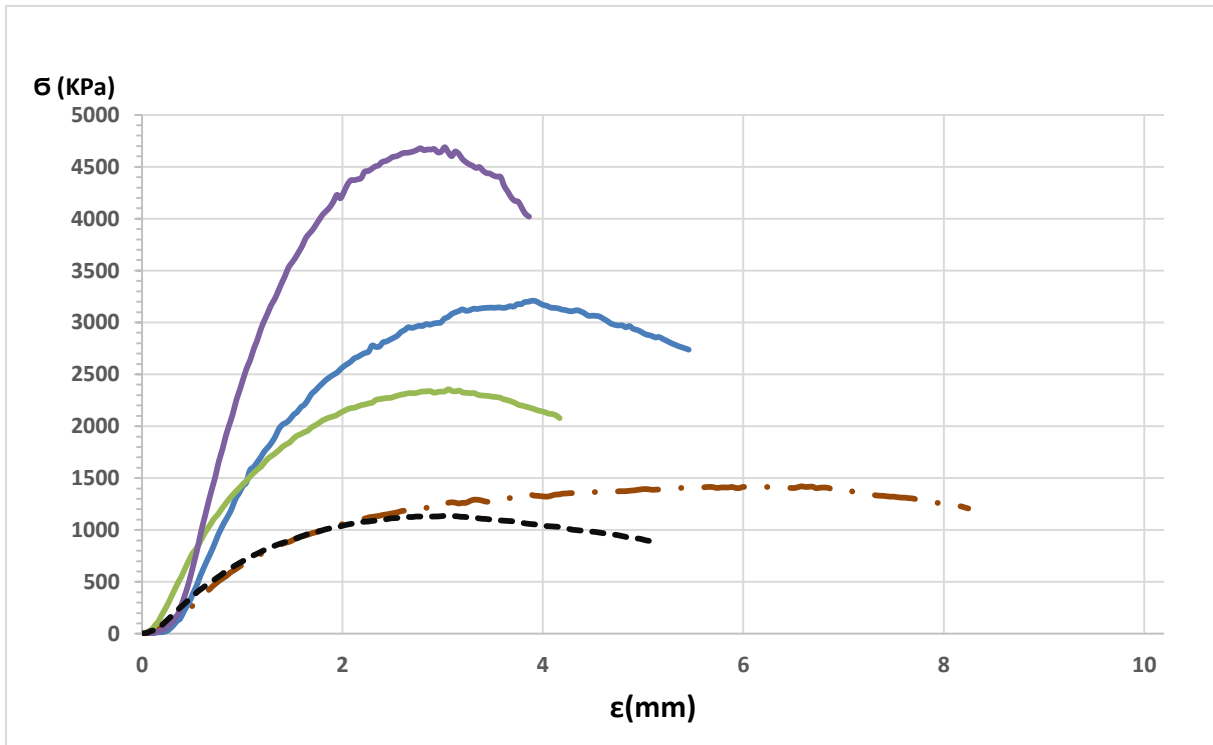


Figure 4.46. Evolution de la résistance RC pour les 5 formulations (p2).

- Formulation 01 : *adobe brut*.

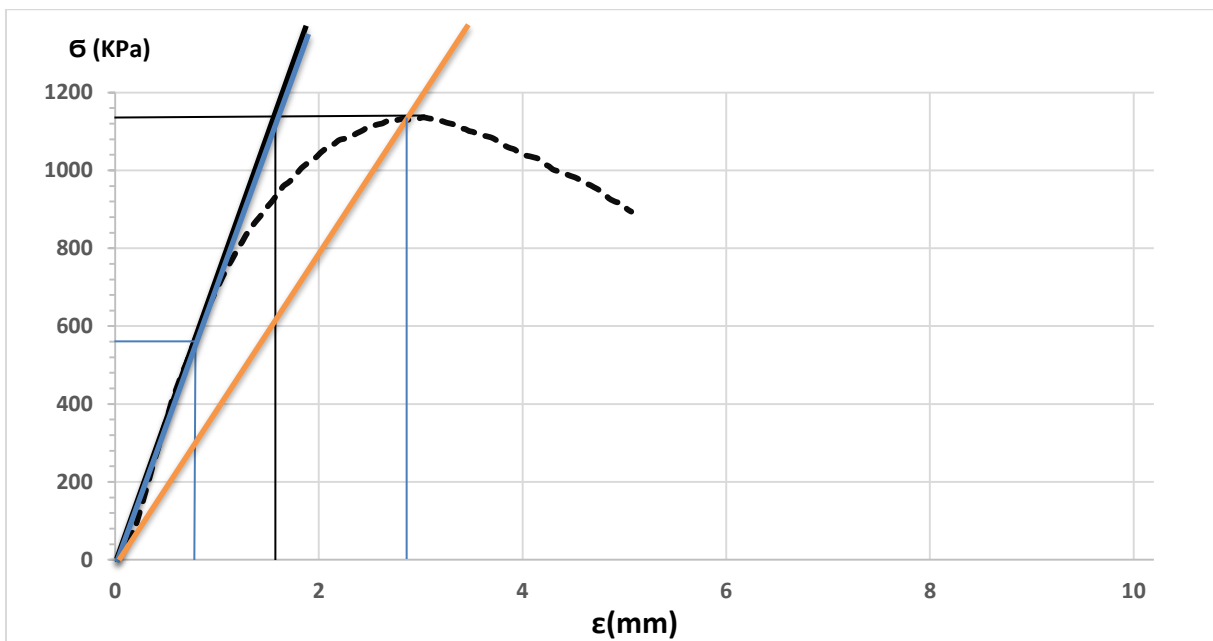


Figure 4.47. Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement (adobe brut) (p2).

- **Formulation 02 : *adobe+ enduit brut.***

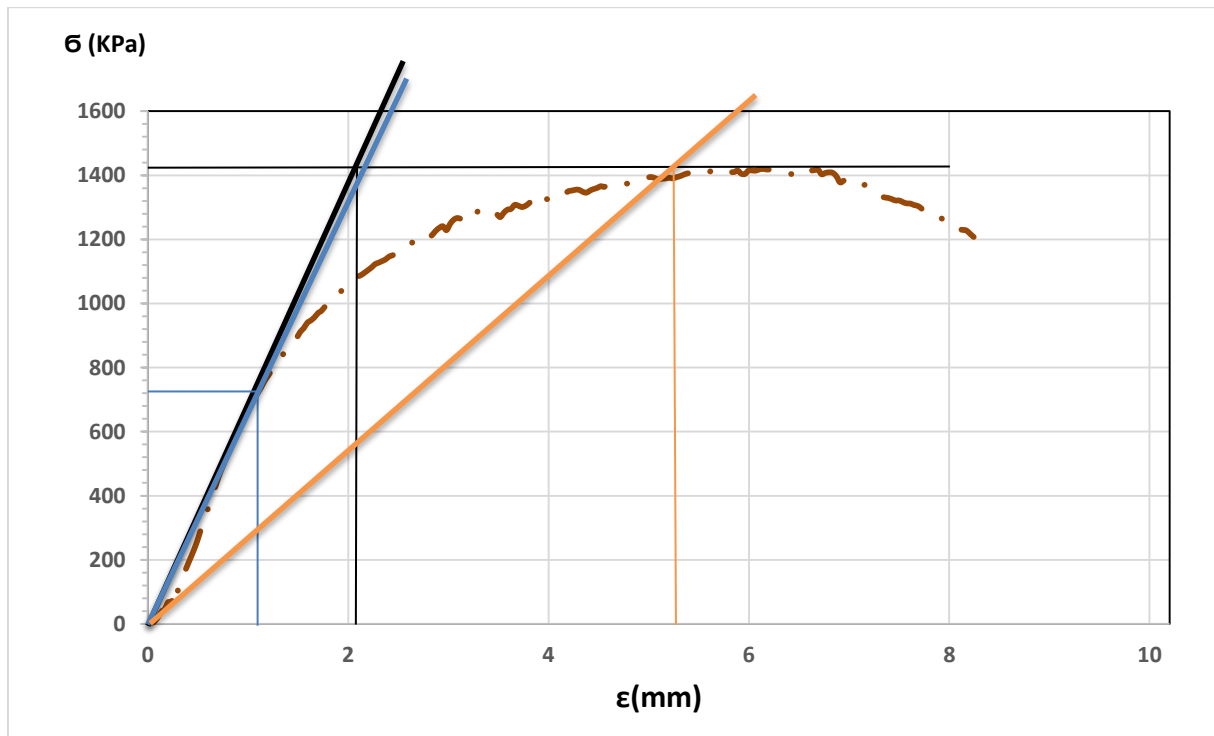


Figure 4.48 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement.

(Adobe brut +enduit brut) (p2)

- **Formulation 03: *adobe brut + enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)***

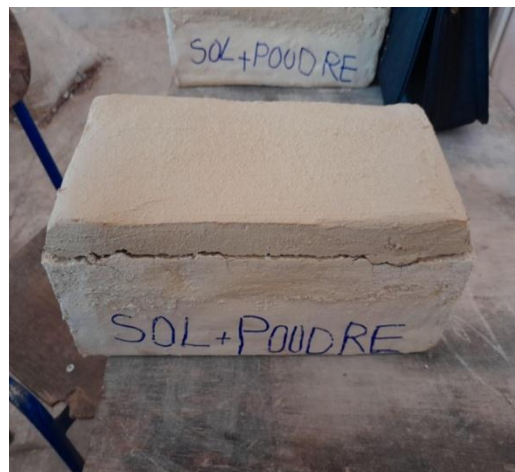


Figure 4.49. [Adobe brut +enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sec)]
p2

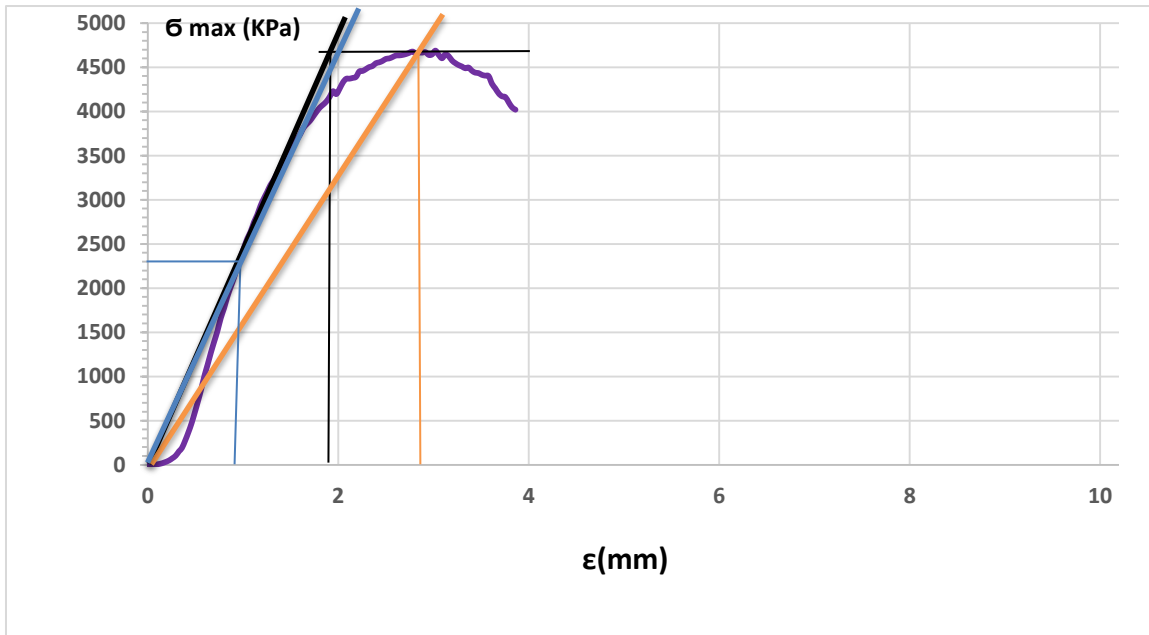


Figure 4.50 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

[Adobe brut +enduit (1/3 poudre *de marbre* de la masse sec)] (p2).

- . Formulation 04 : *adobe brut + enduit (fibre de verre surfacique)*

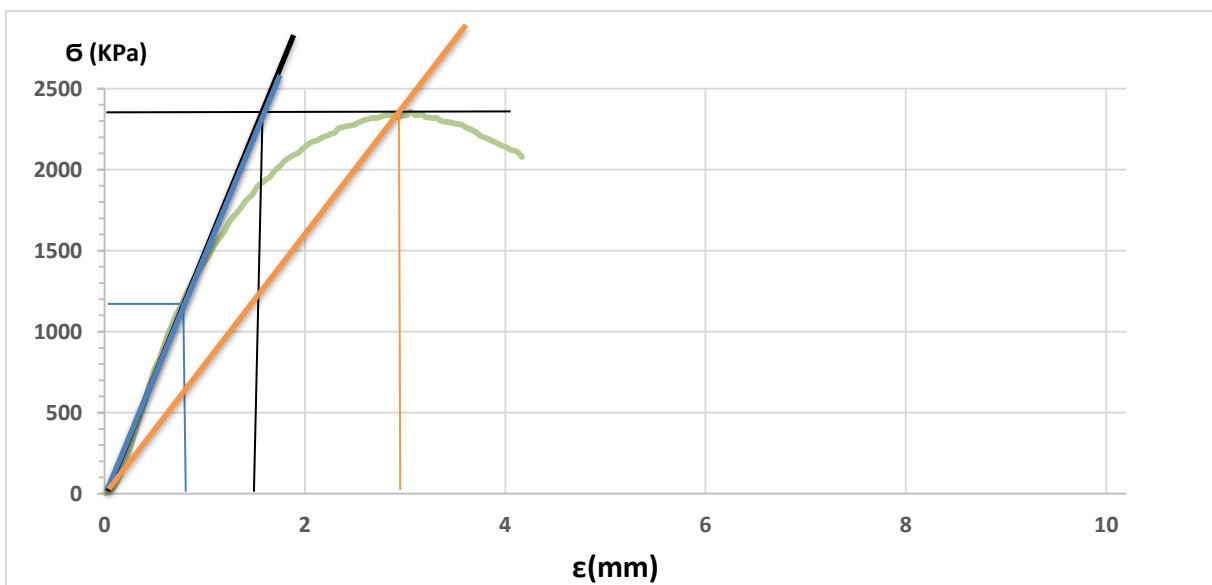


Figure 4.51 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

(Adobe brut +enduit (*fibre de verre surfacique*) (p2).

- **Formulation 05 : *adobe brut + enduit (fibre de paille)***



Figure 4.52. Adobe brut +enduit (fibre de paille) p2.

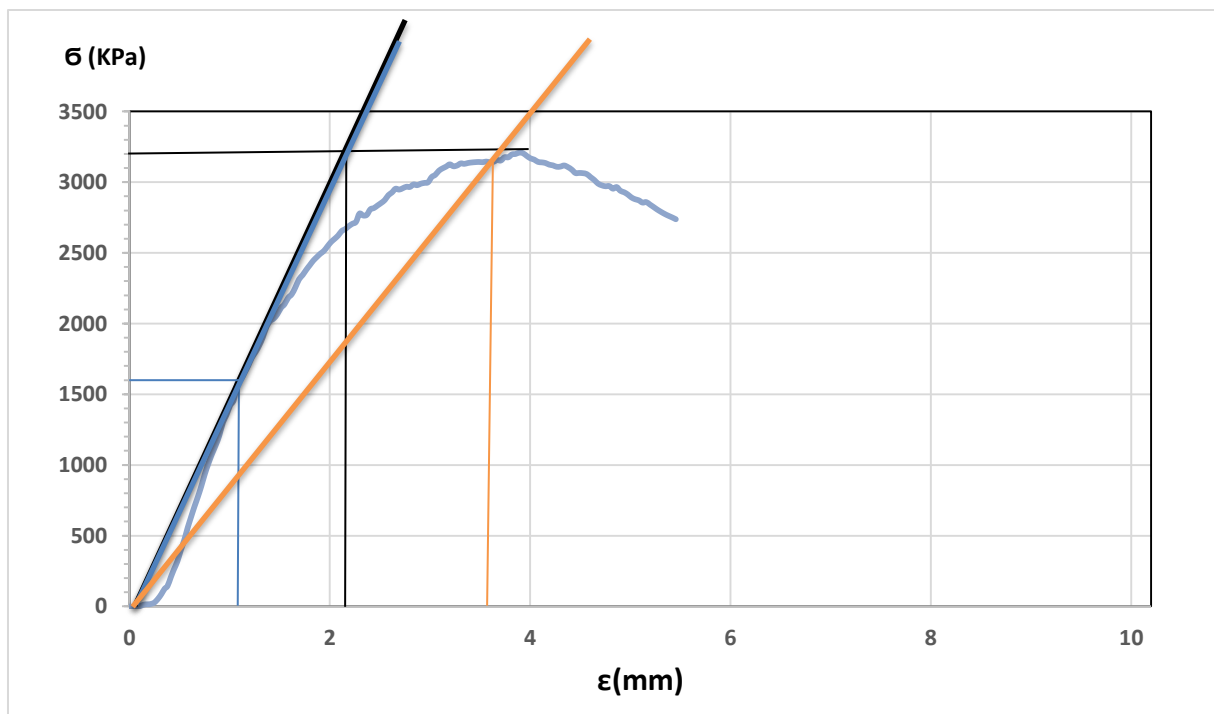


Figure 4.53 .Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement

(Adobe brut +enduit+fibre de paille) (p2).

(p2) :

	âge	Formulations	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{max}/2(MPa)$	ϵ	E	E50	E siccant
1	/	<i>adobe brut</i>	1.2	/	/	/	/	/
2	/		1.124	0.562	0.8	0.7	0.7	2.8
3	/		1.048	/	/	/	/	/
4	/	<i>adobe+</i>	2	/	/	/	/	/
5	/	<i>enduit brut</i>	1.449	0.7245	1.1	0.69	0.65	5.2
6	/		0.898	/	/	/	/	/
7	/	<i>adobe brut</i>	5.036	/	/	/	/	/
8	/	+ <i>enduit</i>	4.668	2.334	1	2.465	2.33	2.9
9	/	<i>(1/3 poudre de marbre de la masse sec)</i>	4.3	/	/	/	/	/
10	/	<i>adobe brut +</i>	3.026	/	/	/	/	/
11	/	<i>enduit (fibre de verre surfacique)</i>	2.313	1.156	1.2	1.445	0.963	2.8
12	/		1.6	/	/	/	/	/
13	/		<i>adobe brut +</i>	4.006	/	/	/	/
14	/	<i>enduit (fibre de paille)</i>	3.198	1.599	1.2	1.522	1.332	3.6
15	/		2.39	/	/	/	/	/
16	Moy							
17	Ecart type							

Tableau 4.16.résultats de l'essai de compression simple (p2).

3.5.2. INTERPRETATION DES RESULTATS :

Les résultats des différentes formulations, nous allons examiner la résistance à la compression (RC), le module d'élasticité (E), le module d'élasticité à 50% de la résistance maximale (E50), et le module d'élasticité sécant (E sécant).

Formulation 01 : Adobe brut

- **RC (Résistance à la compression) :** 2800 kPa
- **E (Module d'élasticité) :** 1.93 MPa
- **E50 (Module d'élasticité à 50% de la résistance maximale) :** 1.8 MPa
- **E sicant (Module d'élasticité sicant) :** 2.9 MPa

Formulation 02 : Adobe + enduit brut

- **RC :** 3800 kPa
- **E :** 1.835 MPa
- **E50 :** 1.2825 MPa
- **E sicant :** 5.6 MPa

Formulation 03 : Adobe brut + enduit (1/3 poudre de marbre de la masse sèche)

- **RC :** 9000 kPa
- **E :** 4.7 MPa
- **E50 :** 4.7 MPa
- **E sicant :** 2.9 MPa

Formulation 04 : Adobe brut + enduit (fibre de verre surfacique)

- **RC :** 2700 kPa
- **E :** 1.875 MPa
- **E50 :** 1.758 MPa
- **E sicant :** 3 MPa

Formulation 05 : Adobe brut + enduit (fibre de paille)

- **RC :** 2950 kPa
- **E :** 1.418 MPa
- **E50 :** 1.353 MPa
- **E sicant :** 4 MPa

Interprétation :

1. Formulation 01 (Adobe brut) :

- RC est de 2800 kPa, ce qui montre une résistance modérée à la compression.
- E, E50, et E sicant sont relativement bas, indiquant une certaine souplesse mais une faible rigidité.

2. Formulation 02 (Adobe + enduit brut) :

- L'enduit brut améliore la résistance à la compression (3800 kPa).
- E et E50 sont comparables à la formulation 01, mais E secant est beaucoup plus élevé (5.6 MPa), ce qui suggère une meilleure rigidité globale après une déformation importante.

3. Formulation 03 (Adobe brut + enduit avec poudre de marbre) :

- RC est significativement plus élevé (9000 kPa), indiquant une résistance à la compression fortement améliorée.
- E et E50 sont également plus élevés, signifiant une rigidité initiale et à mi-déformation beaucoup plus grande.
- E sicant est relativement bas comparé à RC, ce qui pourrait indiquer que la structure devient plus souple après une certaine déformation.

4. Formulation 04 (Adobe brut + enduit avec fibre de verre surfacique) :

- RC est légèrement inférieur à celui de la formulation 01 (2700 kPa), montrant une légère diminution de la résistance à la compression.
- E et E50 sont légèrement améliorés, et E sicant est un peu plus élevé (3 MPa), suggérant une amélioration marginale de la rigidité.

5. Formulation 05 (Adobe brut + enduit avec fibre de paille) :

- RC est légèrement amélioré par rapport à l'adobe brut (2950 kPa).
- E et E50 sont les plus bas parmi toutes les formulations, indiquant une moindre rigidité initiale.
- E sicant est modérément élevé (4 MPa), ce qui indique que la structure devient plus rigide après une certaine déformation.

Conclusion :

- **Meilleure résistance à la compression** : La formulation 03 (adobe avec enduit et poudre de marbre) montre la résistance à la compression la plus élevée, suggérant qu'elle est la plus durable contre les charges compressives.

- **Meilleure rigidité globale** : La formulation 02 (adobe avec enduit brut) présente le module d'élasticité sécant le plus élevé, indiquant une bonne rigidité après déformation.
- **Équilibre résistance-rigidité** : Formulation 03 montre un excellent équilibre entre haute résistance à la compression et rigidité initiale, mais sa souplesse après déformation pourrait être un compromis pour certaines applications.

Ces interprétations peuvent aider à choisir la formulation appropriée en fonction des exigences spécifiques de durabilité et de performance structurelle.

3.6. Les essais de durabilité :

3.6.1. L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977 :

En utilisant la méthode d'essai standard ASTM - D4977, les grains des surfaces des toitures minérales sont soumis à un frottement par abrasion.

Dans cette section, nous examinerons le comportement des briques échantillonnes lorsqu'elles sont soumises à un essai de vieillissement accéléré. Afin d'accomplir cela, les échantillons ont été soumis à des contraintes de frottement grâce à une brosse métallique lestée d'un fardeau.

À la fin de cette expérience, des mesures de poids seront réalisées afin de prendre en compte les éventuelles observations. L'appareil de l'essai est spécialement conçu pour effectuer le test en effectuant 50 cycles en aller et retour sur le l'échantillon, en position horizontale et en mouvement rectiligne.

3.6.1.1. Mode opératoire :

- La brosse que nous utilisons est achetée dans un magasin de quincaillerie, elle mesure 140mm de long et 30mm de large, et les poils ont une hauteur de 22 à 23 mm. Les dimensions de la brosse et les dimensions des fers plats, qui sont utilisés comme masses, ont révélé celles du bac porte-poids. La brosse est composée de 56 trous abritant chacun 24 poils raides fabriqués à partir de fil d'acier traité, avec un diamètre d'environ 0,35 mm.
Avant de commencer l'opération, une série de mesures a été prise afin de garantir une conclusion optimale des tests, telles que :

- Afin de libérer l'espace pour la mise en place de la brique échantillon, il est nécessaire de faire coulisser le bac porte-poids à l'état vide vers le haut.
 - Placer la brique sur la grande surface du plateau coulissant, qui mesure 295x140 mm.
 - Il sera nécessaire de fixer la brique sur le plateau en utilisant la vis de serrage prévue à cet effet. Il faudra également utiliser des calles parallépipédiques en bois.
 - Le bac porte-poids à l'état vide doit être coulissé vers le bas jusqu'à ce que la brosse entre en contact avec la brique.
 - Assurez-vous 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.
 - La masse des pièces de fer plat utilisées pour lester la brosse a un poids de 3 kg.
 - Assurez-vous que la surface frottée par la brosse ne se chevauche pas avec la surface de la brique.
 - Entamer les 50 cycles d'« aller et retour » en avançant le plateau à travers sa poignée.
 - Assurez-vous de vérifier l'état des composants du dispositif après chaque essai.
 - Avec un pinceau plat à poils souples, retirez les grains qui se sont détachés de l'échantillon en effectuant de légers coups.
 - Préparer l'échantillon en le pesant à 0,01 g avant l'essai et enregistrer la masse initiale sur un papier.
 - Le plateau coulissant doit être nettoyé de tout résidu et l'échantillon doit être fixé dans ce dernier avec la face sélectionnée pour être testée de la surface enduite vers le haut.
 - Il est nécessaire de vérifier visuellement et de vérifier si la surface frottée par la brosse est en contact avec la surface de la brique.
 - Mise en contact de la brosse avec l'échantillon.
 - Débuter la coulisse du plateau avec sa poignée jusqu'à ce que l'échantillon soit brossé à 50 cycles complets (50 coups allé et 50 coups retour) avec une trajectoire de la brosse parallèle à l'axe longitudinal de l'échantillon.
 - Après avoir retiré l'échantillon du plateau coulissant, il est nécessaire de le nettoyer avec un pinceau plat pour éliminer tous les grains détachés.
 - Peser l'échantillon à une précision de 0,01 g et enregistrer la masse sur un papier.
 - Le poids en grammes des grains détachés lors de l'essai d'abrasion sera calculé de la manière suivante = A – B
- Où:
- P : étant le poids des grains détachés

A = poids de l'échantillon en g, avant l'essai,

Et B = poids de l'échantillon en g, après l'essai.

(P1)

Echantillons	P : Poids de l'échantillon avant l'essai (g)	P' : Poids de l'échantillon après l'essai (g)	$\Delta p = p - p'$ (g)	$\Delta p/p * 100$	$\Delta p/s$ (g/cm ²)	Evaluation
Adobe brut	7000	6926	74	1.057	0.179	D
Adobe+enduit brut	7905	7833	72	0.910	0.174	D
Adobe+enduit+ Poudre (1/3 de la masse sèche)	7929	7919	10	0.189	0.024	D
Adobe+enduit+ Géotextile surfacique	7910	7895	15	0.189	0.036	C
Adobe+enduit+ Fibre de paille	7920	7908	12	0.151	0.029	C

Tableau 4.17. Résultats de l'essai (p1).

<i>Evaluation:</i>	
A	$\Delta P/S \leq 0.003$ =====>Excellent
B	$0.004 \leq \Delta p/S \leq 0.028$ =====>Bon
C	$0.028 \leq \Delta P/S \leq 0.051$ =====>Acceptable
D	$\Delta P/S \geq 0.051$ =====>Mediocre

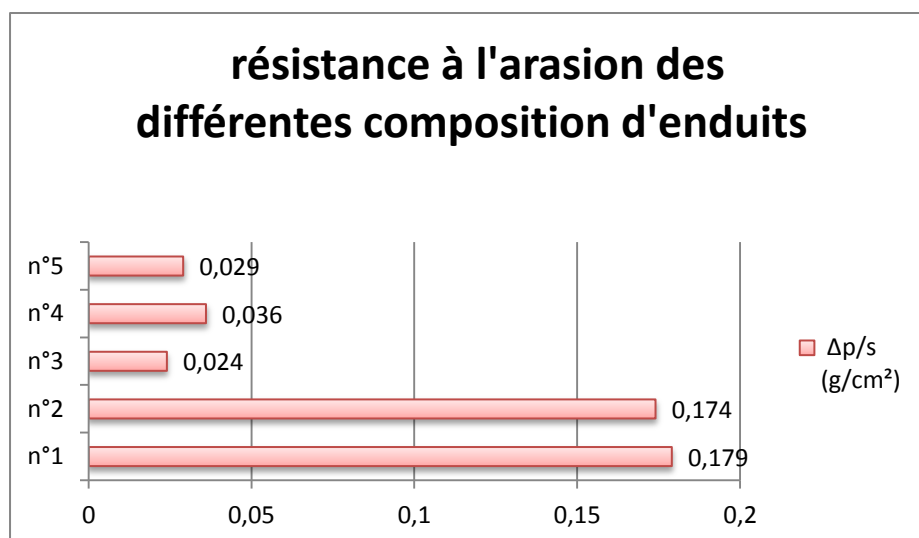


Figure 4.54. L'arasions des 05 compositions (p1).

(P2)

Echantillons	P : Poids de l'échantillon avant l'essai (g)	P' : Poids de l'échantillon après l'essai (g)	$\Delta p = p - p'$ (g)	$\Delta p/p * 100$	$\Delta p/s$ (g/cm ²)	Evaluation
Adobe brut	7000	6960	40	0.571	0.096	D
Adobe+enduit brut	7300	7275	25	0.342	0.060	D
Adobe+enduit+ Poudre (1/3 de la masse sèche)	7385	7370	15	0.203	0.036	C
Adobe+enduit+ Géotextile surfacique	7201	7179	22	0.305	0.070	D
Adobe+enduit+ Fibre de paille	7213	7193	20	0.277	0.063	D

Tableau 4.18. Résultats de l'essai (p2).

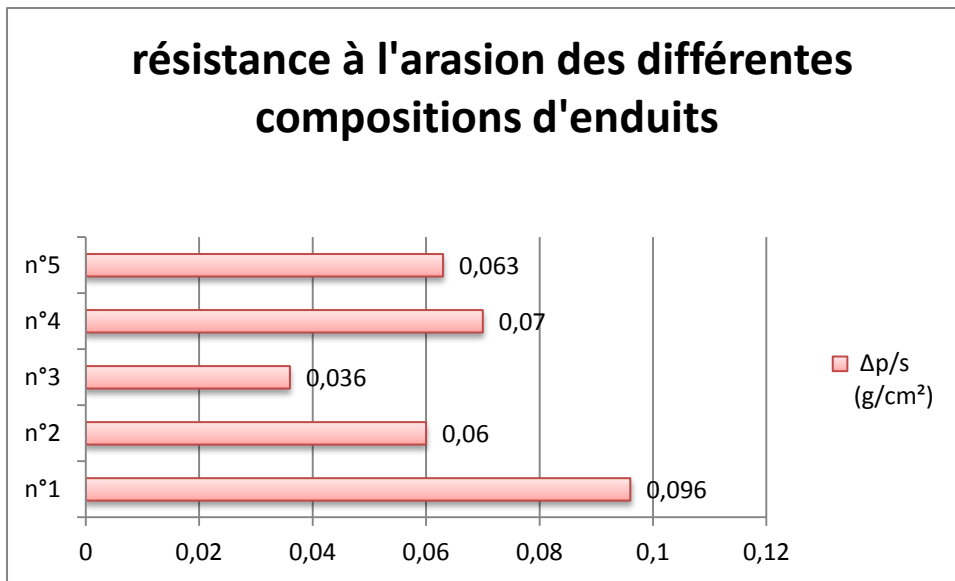


Figure 4.55. L'arasions des 05 compositions (p2).

3.6.2. Érosion de surface :

Afin d'analyser l'érosion de surface, nous avons choisi de recourir à la méthode « Essai Drip Test ». Ces appareils expérimentaux doivent être sélectionnés en fonction de la pluviométrie de la zone étudiée, qui peut être très irrégulière et inégalement répartie dans l'espace.

3.6.3. Drip Test (Essai de goutte à goutte selon La norme NZS 4298) :

Selon les normes [Norme-NZS-4298, 1998], une mèche textile de 16 mm de largeur est employée afin de générer des gouttes d'eau. Son diamètre est d'environ 6 mm et le nombre de gouttes est d'environ 14 gouttes/min. Selon le type de mèche employée, le volume total d'eau écoulée (volume) est de 100 ml, ce qui correspond à un temps allant de 20 à 60 minutes. Il est impossible de contrôler les caractéristiques de ces gouttes (fréquence et diamètre) en raison de la hauteur de chute de 400 mm par rapport à la surface inclinée (27°) de l'échantillon. Plutôt que de recourir à une mèche, nous avons opté pour la méthode suggérée par ([Weisz et al. 1995], [Heathcote, 2002], [Nguyen, 2014], [Nguyen, 2015]).

Un réservoir constitué d'une bonbonne inversée et muni d'un robinet micrométrique. Grâce à ce robinet fixé sur le bouchon fermé de la bonbonne, il est possible de réguler efficacement la fréquence et la taille des impuretés. En modifiant le diamètre de la tubulure reliée à ce robinet, on peut réguler le diamètre des gouttes. L'échantillon à tester est placé sur un portique où le réservoir est fixé. Le réservoir entraîne une charge hydraulique constante et imposée. Afin de mesurer le diamètre des gouttes d'eau souhaitées, nous avons employé un tube en plastique

souple de 4 à 5 cm de long disposant de différents diamètres. L'échantillon est disposé sur un support inclinable qui est placé dans un bac en plastique. Durant l'essai, on mesure la profondeur d'érosion causée par l'effet des gouttes sur la surface de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse.



Figure 4.56. Dispositif de goutte à goutte.

3.6.3.1. Mesure de la profondeur d'érosion des gouttes :

Lors de la procédure d'essai, la goutte à goutte sur la surface de l'échantillon se manifeste par la formation d'une canalisation. Chaque 10 minute, le pied à coulisse électronique permet de mesurer l'évolution de sa profondeur avec une précision d'environ 0,01 millimètre.

3.6.3.2. Résultats :

(P1)

Temps (min)	Érosion adobe +enduit brut	Érosion adobe +enduit 1/3 poudre de la masse sec)	Érosion adobe +enduit (géotextile surfacique)	Érosion adobe +enduit +fibre de paille (3%)
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
20	0	0	0	0
30	0	0	0	0
40	0	0	0	0
50	0	0	0	0

Tableau 4.19. Résultats d'essais goutte à goutte (p1).



Figure 4.57. Adobe +enduit brut (p1).

(P2)

Temps (min)	Érosion adobe +enduit brut	Érosion adobe +enduit 1/3 poudre de la masse sec)	Érosion adobe +enduit (géotextile surfactive)	Érosion adobe +enduit +fibre de paille (3%)
5	0.5	0	0.44	0
10	1	/	0.96	/
20	1.7	/	1	/
30	2	/	1.3	/
40	2.3	/	1.5	/
50	2.3	/	1.5	/

Tableau 4.20. Résultats d'essais goutte à goutte (p2).



Figure 4.58. Adobe +enduit brut (p2).

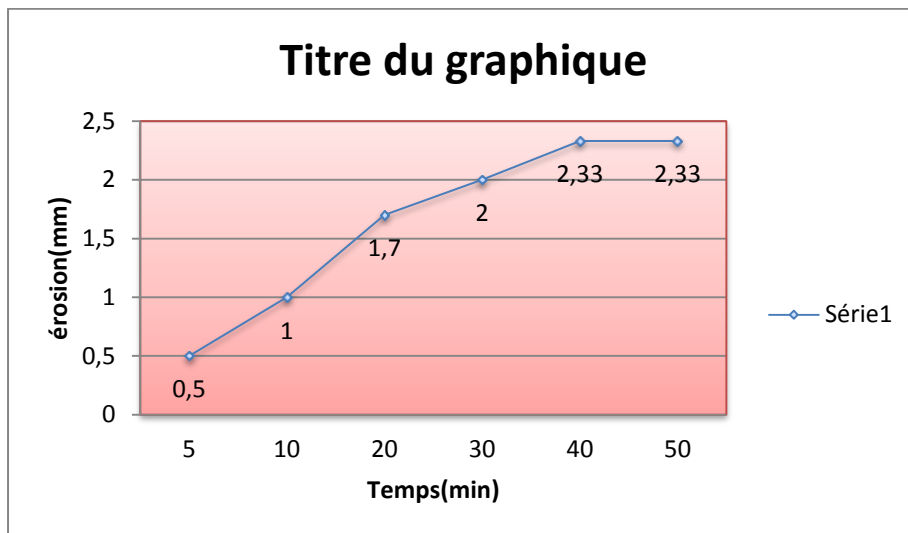


Figure 4.59. Courbe Érosion Adobe +enduit brut (p2)



Figure 4.60. Adobe +enduit 1/3 poudre de la masse sec) (p2).

- **Adobe brut + enduit (géotextiles surfacique) :**
 - L'application d'un enduit avec l'utilisation de géotextiles peut améliorer la résistance à l'érosion de l'adobe brut et. aux intempéries
 - Ce traitement pourrait également renforcer la cohésion de l'adobe en surface, ce qui peut prolonger sa durabilité en protégeant la brique contre l'usure due aux conditions climatiques et aux forces mécaniques externes comme indiqué dans l'essai d'abrasion.

- **Adobe brut + enduit (3% fibre de paille) :**
 - L'ajout de fibres de paille à l'enduit peut offrir une meilleure résistance à la fissuration de l'enduit lui-même et peut renforcer l'ensemble de la structure de l'adobe.
 - Les fibres de paille peuvent également améliorer l'isolation thermique et réduire la sensibilité de l'adobe aux changements d'humidité, contribuant ainsi à une durabilité accrue dans des conditions climatiques variables.

3.6.3.2. Interprétation de la durabilité :

- Après avoir appliqué ces traitements, la durabilité de l'adobe devrait être améliorée par rapport à l'adobe brut non traité.
- Les traitements visent à réduire la dégradation due aux intempéries, à renforcer la cohésion et à augmenter la résistance mécanique globale de l'adobe.
- La durabilité peut être évaluée en observant la résistance de l'adobe aux cycles de gel-dégel, à l'humidité, à l'érosion et à d'autres facteurs environnementaux.

En résumé, ces traitements ont pour but d'augmenter la durabilité de l'adobe en améliorant ses propriétés mécaniques et en le protégeant des conditions extérieures défavorables, ce qui devrait prolonger la durée de vie et la résistance de notre structure en adobe.

Conclusion Générale

Cette étude a permis d'analyser les propriétés granulométriques, les limites d'Atterberg, et les performances mécaniques de différents matériaux pour la fabrication d'adobes et les enduits en terre. Les résultats montrent des variations significatives en fonction des traitements appliqués.

Pour le **matériau P1**, la composition granulométrique est de 4% de gravier, 26% de sable, 45% de limon, et 25% d'argile. Cette répartition montre une dominance du limon (45%) et une proportion significative d'argile (25%), suggérant une granulométrie fine à moyenne. Cette composition influence la perméabilité et la compacité du matériau. En revanche, le **matériau P2** est constitué de 25% de sable, 55% de limon, et 20% d'argile. La forte proportion de limon (55%) et la moindre proportion d'argile (20%) indiquent une granulométrie principalement fine, affectant la plasticité et la cohésion. Pour le **matériau P1**, les coefficients sont $C_u = 12.5$ et $C_c = 0.5$, ce qui indique une répartition relativement uniforme des tailles de particules et une courbure modérée de la courbe granulométrique. Pour le **matériau P2**, les coefficients sont $C_u = 15$ et $C_c = 1.0667$, montrant une répartition assez uniforme et une courbure plus prononcée.

Les limites d'Atterberg pour le **matériau P1** sont $WL = 51$ et $IP = 24$, le classant comme un sol argileux (CL ou ML selon la limite liquide modifiée). Pour le **matériau P2**, les valeurs sont $WL = 31.5$ et $IP = 7.5$, le classant comme un sol limoneux (ML ou CL-ML).

Le traitement avec 3% de chaux montre des changements significatifs. Pour le **matériau P1**, la limite liquide passe de 51 à 49 et l'indice de plasticité de 24 à 8.8, indiquant une réduction de la plasticité et une amélioration de la stabilité et de la résistance mécanique. Pour le **matériau P2**, la limite liquide augmente de 31.5 à 34.7, mais l'indice de plasticité diminue de 7.5 à 5.85, suggérant une réduction de la plasticité et une amélioration de la stabilité du sol.

Pour les formulations d'adobe, les résultats sont variés. La **Formulation 01 (Adobe brut)** a une résistance à la compression (RC) de 2800 kPa, un module d'élasticité (E) de 1.93 MPa, un module à 50% de la résistance maximale (E50) de 1.8 MPa, et un module d'élasticité sécant (E sicant) de 2.9 MPa. La **Formulation 02 (Adobe + enduit brut)** montre une amélioration de RC à 3800 kPa, avec un E sicant beaucoup plus élevé de 5.6 MPa, suggérant une meilleure rigidité globale après une déformation importante.

La **Formulation 03 (Adobe + enduit avec poudre de marbre)** présente la résistance à la compression la plus élevée (9000 kPa), mais une souplesse accrue après déformation avec un E sicant de 2.9 MPa. La **Formulation 04 (Adobe + enduit avec fibre de verre)** a une RC légèrement inférieure (2700 kPa), avec des valeurs E et E50 améliorées et un E sicant de 3 MPa, montrant une amélioration marginale de la rigidité. La **Formulation 05 (Adobe + enduit avec fibre de paille)** a une RC légèrement améliorée (2950 kPa), les plus bas E et E50 parmi toutes les formulations, mais un E sicant de 4 MPa, indiquant que la structure devient plus rigide après une certaine déformation.

Les traitements appliqués aux adobes, qu'il s'agisse d'enduit brut, de poudre de marbre, de fibres de verre ou de paille, améliorent globalement la durabilité en augmentant la résistance à la compression et la rigidité, tout en réduisant la dégradation due aux intempéries. Ces résultats montrent que la formulation la plus adaptée doit être choisie en fonction des exigences spécifiques de durabilité et de performance structurelle, notamment dans des environnements soumis à des conditions climatiques variables. En résumé, ces traitements augmentent significativement la durabilité et la résistance mécanique des adobes, offrant ainsi des options variées pour répondre aux besoins spécifiques des projets de construction.

Références bibliographiques

- 1- **Fabriquer la ville Bas carbone (cycle terre) , Guide de conception et de construction, Vol 01 ;Mai 2021**
- 2- **Batirama , Enduits sur terre crue : les règles à connaître, publié le 07/10/2013, Consulter le 07/03/2024**
<https://www.batirama.com/article/7514-enduits-sur-terre-crue-les-regles-a-connaître.html>
- 3- **La maison St Gobain , Construction et rénovation en terre crue, Consulter le 03/04/2024**
<https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/terre-crue-construction-renovation>
- 4- **Guide des bonnes pratiques de la construction en terre, dec 2018**
- 5- **C. Benabdallah, mémoire de Master, Techniques de réhabilitation et de restauration du bâti ancien construit en terre Cas d'étude : Mausolée de Sidi Ba Youcef à Tamentit , Univ Adrar, 2018**
- 6- **[Y.Terki et al], Guide de réhabilitation de l'habitat en terre à Timimoun, Archives ouvertes, Mars 2020**