

GRANDE MOSQUEE DE DJENNE : HISTORIQUE ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX LOCAUX UTILISES POUR LA RENOVATION EN 2025

Moussa THIAM^{1*}, Alpha DIBO¹, Alassane TOURE², Souleymane SIDIBE¹, Mamoutou SAMAKE³

¹Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENETP) du Mali

²Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) du Mali

³Faculté d'Agronomie et de Médecine Animale, Université de Ségou, Mali

* Courriel de l'auteur de correspondance : moussathiam88@gmail.com

RESUME

La grande mosquée de Djenné, chef-d'œuvre de l'architecture en terre crue au Mali et patrimoine mondial de l'UNESCO, fait l'objet d'un entretien annuel traditionnel fondé sur l'utilisation de matériaux locaux. Malgré son importance culturelle et technique, peu d'études scientifiques ont porté sur les propriétés géotechniques des sols utilisés pour sa rénovation. Cette étude ambitionne ainsi de contribuer à la valorisation du patrimoine bâti en terre, en alliant rigueur scientifique et reconnaissance des savoirs endogènes. Elle vise ainsi à évaluer les propriétés géotechniques des matériaux traditionnels utilisés dans le cadre de la rénovation annuelle de la grande mosquée de Djenné. Elle s'intéresse plus précisément à trois échantillons représentatifs : Le premier échantillon, est une terre argileuse naturelle dénommée KOREIDJI KATAME ; le deuxième échantillon du nom de BATAKARA et le troisième échantillon BATAKARA+Son de riz, un ajout/additif traditionnel appelé son de riz est ajouté au Batakara pour renforcer la qualité du mélange. Des essais de laboratoire ont permis de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des différents matériaux, et de classer les sols selon les normes USCS et AASHTO. Des recommandations ont été formulées pour une amélioration moderne et durable, tout en respectant les logiques/aspirations culturelles et techniques propres à Djenné. Cette étude s'inscrit ainsi dans une démarche de la valorisation des matériaux locaux adaptés aux changements climatiques alliant approche scientifique et tradition constructive pour réhabiliter les habitats traditionnels et contribuer à préserver les patrimoines bâtis en terre. Cette recherche contribue à une meilleure valorisation des matériaux locaux dans le contexte du patrimoine architectural sahélien.

Mots-clés : Djenné, géotechnique, matériaux locaux, rénovation, patrimoine, USCS, AASHTO.

ABSTRACT

The Great Mosque of Djenné, a masterpiece of raw earthen architecture in Mali and a UNESCO World Heritage Site, is subject to a traditional annual maintenance based on the use of local materials. Despite its cultural and technical importance, few scientific studies have focused on the geotechnical properties of the soils used for its renovation. This study aims to contribute to the promotion of earthen built heritage by combining scientific rigor and recognition of vernacular knowledge. It aims to evaluate the geotechnical properties of the traditional materials used for the annual renovation of the Great Mosque of Djenné. It focuses specifically on three representative samples: The first sample is a natural clay soil called KOREIDJI KATAME; the second sample is called BATAKARA; and the third sample is BATAKARA plus a traditional addition called rice bran. Laboratory tests were used to determine their physical and mechanical characteristics and to classify the soils according to USCS and AASHTO standards. Recommendations were formulated for modern and sustainable improvements, while respecting the cultural and technical logic specific to Djenné. This study is therefore part of an approach to promoting earthen built heritage, combining a scientific approach and construction tradition. This research contributes to a better use of local materials in the context of Sahelian architectural heritage.

Keywords : Djenné, geotechnics, local materials, renovation, heritage, USCS, AASHTO.

INTRODUCTION

La Grande Mosquée de Djenné, située dans la région de Mopti au Mali, est l'un des exemples les plus emblématiques de l'architecture en terre crue au monde. Inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO [1], elle illustre le savoir-faire ancestral des populations locales dans la maîtrise du matériau banco [2]. Cette technique traditionnelle repose sur un mélange d'argile, de sable, de paille et d'eau, appliqué en couches successives pour le crépissage des murs massifs capables de résister aux contraintes climatiques semi-arides de la région et aux autres intempéries affectant la façade de la Grande Mosquée [3].

L'édifice actuel, reconstruit en 1907 sur les fondations d'une mosquée plus ancienne datant du XIII^e siècle, est entretenu chaque année par la communauté lors d'une cérémonie collective appelée « le crépissage » [1]. Cet événement n'est pas seulement rituel ; il est aussi essentiel pour la conservation de la structure, car il permet de réparer les dégradations causées par l'érosion et les intempéries.

L'architecture de la mosquée, avec ses contreforts rythmiques, ses tourelles crénelées et ses poutres en bois (torons) visibles en façade, combine culture, fonctionnalité et adaptation au contexte local [4]. Elle incarne une symbiose remarquable entre la culture, le climat et les matériaux naturels, et attire de plus en plus l'attention des chercheurs en architecture durable et en géotechnique des matériaux naturels.

L'architecture en terre crue constitue une richesse patrimoniale et technique dans de nombreuses régions sahéliennes [5]. Au Mali, la Grande Mosquée de Djenné, inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO [1], en est un symbole emblématique. Sa préservation repose sur un savoir-faire ancestral mobilisant des matériaux locaux, appliqués lors d'un crépissage annuel. Cependant, dans un contexte de changements climatiques et de mutations socio-économiques, la durabilité des techniques traditionnelles est questionnée [5].

Par ailleurs avec la modernisation des sociétés, les habitudes ont considérablement changé, avec des choix des types et matériaux de construction en harmonie avec d'autres civilisations entraînant l'exploitation abusive des ressources naturelles (sable, gravier, etc.) avec son lot de conséquences sur l'homme et l'environnement [5].

Ainsi, revenir à la source pour voir les bonnes pratiques en termes de techniques et technologies pour le développement des matériaux locaux durables et écologiques, devient plus que nécessaire. Les connaissances endogènes transmises oralement sur la formulation et la mise en œuvre des mortiers en terre restent peu documentées sur le plan scientifique. De plus, la

caractérisation géotechnique des matériaux utilisés pour l'entretien de cet édifice (mosquée de Djenné) reste non documentée sur le plan scientifique [6].

Ce travail vise à palier un peu ce déficit d'informations techniques, en analysant les propriétés physiques et mécaniques de trois formulations de matériaux locaux utilisés lors du crépissage 2025 de la Mosquée de Djenné. L'objectif est double : d'une part, contribuer à la valorisation scientifique des pratiques locales, et d'autre part, proposer des pistes d'amélioration compatibles avec les exigences de conservation du patrimoine.

I. MATERIELS ET METHODES

Cadre de l'étude et Matériaux utilisés :

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la campagne de rénovation 2025 de la Grande Mosquée de Djenné (Mali), un édifice emblématique inscrit patrimoine mondial par l'UNESCO. Les essais géotechniques ont été menés au Centre National de Recherche et d'Expérimentation en Bâtiment et Travaux Publics (CNREX-BTP), à Bamako.

Les échantillons ont été prélevés sur le site de la mosquée lors du crépissage annuel 2025, événement de grande importance culturelle. L'étude s'intéresse plus précisément à trois échantillons représentatifs : Le premier est une terre argileuse naturelle dénommée KOREIDJI KATAME; le deuxième est appelé BATAKARA et le troisième échantillon est le BATAKARA mélangé au KOREIDJI KATAME plus un ajout traditionnel qu'on appelle son de riz.

Les échantillons ont été ensuite conservés dans des sacs plastiques étanches pour éviter toute perte d'humidité avant leur transfert au laboratoire.

Matériau 1 : KOREIDJI KATAME - Terre argileuse naturelle (non stabilisée)

Le premier matériau étudié est une terre argileuse naturelle, prélevée localement à Djenné dont le nom est Koreidji Katamè (photo n°01), régulièrement utilisée dans les constructions en banco à Djenné. Ce matériau provient du lit du fleuve en période de décrue et se distingue par sa couleur jaunâtre. Il est disponible en grande quantité, et reconnu par sa faible capacité à tenir la surface crépie durant la saison des pluies. Ceci limite son usage comme matériau de construction non stabilisé [7].

Photo n°01 : Matériau Koreidji Katame



Source : Moussa Thiam, août 2025

Matériau 2 : BATAKARA

Ce matériau provient d'un site différent de celui du Koreidji Katamè qui est un sol plus collant pour améliorer sa capacité de résistance face aux conditions climatiques et le nom de ce mélange qui est BATAKARA (photo n°02) [7].

Cette pratique empirique, transmise de génération en génération, vise à améliorer la résistance mécanique, réduire le retrait-gonflement et optimiser le comportement au séchage.

Photo n°02 : Image du Matériau BATAKARA prise lors du mélange



Source : Moussa Thiam, juin 2025

Matériau 3 : BATAKARA plus Koreidji Katamè avec son de riz - Terre stabilisée au son de riz.

BATAKARA plus Koreidji Katamè avec son de riz, ce matériau (photo n°03) intègre un adjuvant/additif organique : le son de riz, résidu agricole utilisé traditionnellement à Djenné. Après malaxage, le mélange est stocké dans une fosse pour fermentation durant quatre semaines ou plus, en ajoutant de l'eau régulièrement jusqu'à la prise [5].

Ce processus biologique libère des composés organiques qui agissent comme liants naturels, conférant au matériau une meilleure plasticité, la cohésion et une meilleure capacité à résister face à l'eau. Cette technique ancestrale favorise l'adhérence sur les surfaces maçonnées [8]

Photo n°03 : Matériau BATAKARA BATAKARA plus Koreidji Katamè avec son



Source : Moussa Thiam, juin 2025

Son de riz (ajout traditionnel)

Sous-produit du décorticage du riz, le son de riz (photo n°04) est composé principalement de matières organiques. Sa richesse en fibres végétales et en huiles naturelles en fait un liant efficace dans les techniques de stabilisation ancestrales [5]. Sa fermentation contrôlée dans le mélange terreux optimise ses effets liants, rendant les matériaux plus résistants face aux conditions climatiques.

Figure 4 : Le son de riz utilisé pour la stabilisation traditionnelle



Source : Moussa Thiam, août 2025

Campagne expérimentale au laboratoire

Les essais dans le laboratoire réalisés sur les trois échantillons de sols ont été faites selon les normes françaises (NF P-94). Ces essais visaient à caractériser les propriétés géotechniques de chaque matériau ; limites d'Atterberg, leur granulométrie et leur masse volumique.

La teneur en eau (NF 94-059)

Les échantillons, conservés dans des sacs étanches, ont été analysés au laboratoire. La teneur en eau a été déterminée à l'aide d'une étuve dont la température varie entre 50 à 105°C. La perte de masse a permis de calculer le pourcentage W d'eau avec la formule suivante :

$$W = \frac{m_w}{m_d} \times 100\%$$

m_w : masse d'eau évaporé ; m_d : masse de sol sec.

Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

La détermination de la limite de liquidité (LL) a été effectuée à l'aide d'un pénétromètre à cône (photo n°05). Il s'agit de mesurer la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide.

Photo n°05 : Pénétromètre à cône utilisé pour la détermination de la limite de liquidité (NF P 94-051)



Source : Moussa Thiam, août 2025

La limite de plasticité (LP), quant à elle, correspond à la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état semi-solide à l'état plastique. L'essai consiste à rouler le sol jusqu'à fissuration à un diamètre de 3 mm (photo n°06). L'indice de plasticité (IP) est ensuite calculé par la formule suivante :

$$IP = LL - LP$$

Photo n°6 : Plaque et spatule pour la mesure de la limite de plasticité des sols



Source : Moussa Thiam, août 2025

Analyse granulométrique (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique par tamisage à sec après lavage a permis de déterminer la répartition dimensionnelle des particules (photo n°07 et n°8). L'échantillon est d'abord lavé pour éliminer les fines, puis séché avant d'être tamisé à travers une série de tamis décroissants.

Photo n°07 : Échantillon de sol lavé et prêt pour l'analyse



Source : Moussa Thiam, août 2025

Photo n°1: Colonne de tamis utilisée pour le tamisage à sec.



Source : Moussa Thiam, août 2025

Masse volumique des particules solides (NF P 94-054)

La masse volumique réelle des particules solides (G_s) a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à eau (photo n°09). Cette méthode concerne uniquement les particules fines, afin de connaître sa compacité et évaluer ses caractéristiques [9].

Photo n°09 : Dispositif avec pycnomètre à eau pour la détermination de la masse volumique



Source : Moussa Thiam, août 2025

II. RESULTATS

Teneur en eau naturelle

La teneur en eau a été mesurée pour chaque échantillon (tableau n°01). Elle reflète l'humidité initiale (ou teneur en eau naturelle ou d'exploitation) des matériaux au moment du prélèvement.

Tableau n°01: Valeurs moyennes de la teneur en eau des matériaux étudiés

Teneur en eau (%) Matériaux	1	2	3	Moyenne
Matériau 1	2,04	3,05	2,34	2,48
Matériau 2	39,2	39,4	38,16	38,92
Matériau 3	40,27	39,5	36,14	38,57

Source : Moussa Thiam, août 2025

L'analyse de la teneur en eau des trois matériaux révèle des différences significatives. Le matériau 1, présente une faible teneur en eau moyenne d'environ 2,48 %, traduisant un sol sec, peu plastique et difficile à mettre en œuvre sans traitement. En revanche, les matériaux 2 et 3, correspondant à des sols ou mélanges traditionnels de sols (avec ou sans fermentation), affichent des teneurs respectives de 38,92 % et 38,57 %, ce qui reflète une meilleure aptitude au malaxage et à l'application pour le crépissage avec une forte adhérence et cohésion due aux propriétés des matériaux fins du mélange [8]. Ces observations confirment l'intérêt des

techniques locales d'amélioration des sols dans le contexte du crépissage ce qui justifie l'intérêt des maçons traditionnels pour le mélange empirique [10].

Limites d'Atterberg

Les indices de plasticité indiquent une évolution de la plasticité selon le type de traitement, le tableau 2 permet de voir les valeurs mesurées pour les trois matériaux étudiés-

Tableau n°02 : valeurs des limites d'atterberg pour les matériaux étudié

Matériaux	Limite de Liquidité (LL, %)	Limite de Plasticité (LP, %)	Indice de Plasticité (IP, %)
Matériau 1	26.55	20.16	6.39
Matériau 2	40.23	25.25	14.98
Matériau 3	48.02	33.10	14.92

Source : Moussa Thiam, août 2025

Matériau 1 : KOREIDJI KATAME

- $LL < 35 \%$ → sol de plasticité faible [11]
- $IP = 6,39 \%$ → argile peu plastique [11]

Cela confirme qu'il s'agit d'un sol argileux de faible cohésion, peu sensible aux variations d'eau, mais avec une faible capacité de déformation [11].

Matériau 2 : BATAKARA

- LL entre 35 % et 50 % → sol de Plasticité moyenne [11]
- $IP \approx 15 \%$ → Le sol est modérément plastique [11], donc plus cohésif et déformable que le Matériau KOREIDJI KATAME.

Cela reflète l'amélioration dans le comportement mécanique du premier matériau [11].

Matériau 3 : Mélange KOREIDJI KATAME plus BATAKARA avec SON DE RIZ

- LL proche de 50 % → il y a eu une augmentation de la plasticité moyenne $IP \approx 15 \%$ → plasticité similaire à celle du matériau BATAKARA, LP plus élevée que les autres, ce qui montre une augmentation de la limite de plasticité après fermentation car l'ajout du son de riz au matériau BATAKARA a considérablement impacté sa propriété mécanique.

L'ajout de sol plastique et le procédé de fermentation augmentent la plasticité, ce qui contribue à favoriser l'adhérence et la maniabilité du mélange/mortier utilisé pour le crépissage [12].

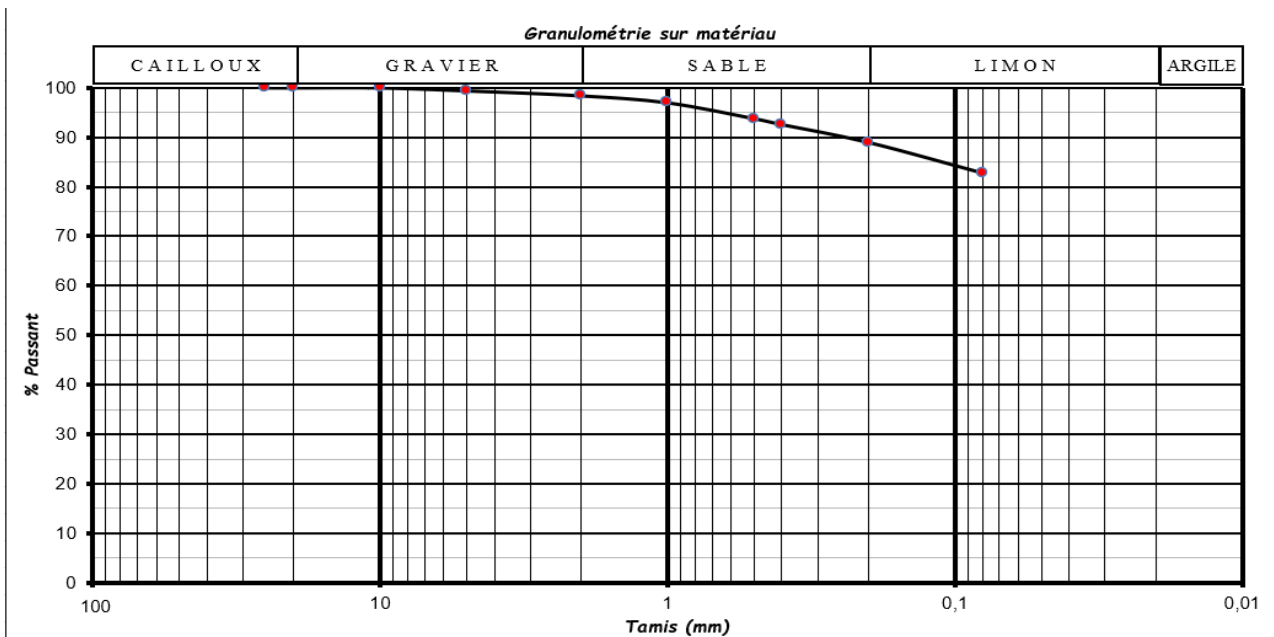
Les essais granulométriques

Les courbes granulométriques des matériaux 1, 2 et 3 ainsi que celle du son de riz sont présentées ci-dessous (Figures 10-13). Elles ont été établies à partir des données expérimentales obtenues par tamisage à sec sur les échantillons conditionnés à la température ambiante au laboratoire.

La courbe granulométrique montre que la majorité des particules du matériau 1 KOREIDJI KATAME *passent* à travers les tamis correspondant aux classes de sable et de limon (graphique n°01), avec un pourcentage très élevé (>80%) de particules fines de tailles inférieures à 80 μm .

- Le matériau 1 présente une proportion de parties fines ($d < 80 \mu\text{m}$) de 82,8 %, ce qui correspond à la propriété d'un sol très argileux. Sa courbe est globalement régulière, traduisant une granulométrie continue, mais avec une dominance des fines.

Graphique n°01 : Courbe granulométrique pour le matériau KOREIDJI KATAME

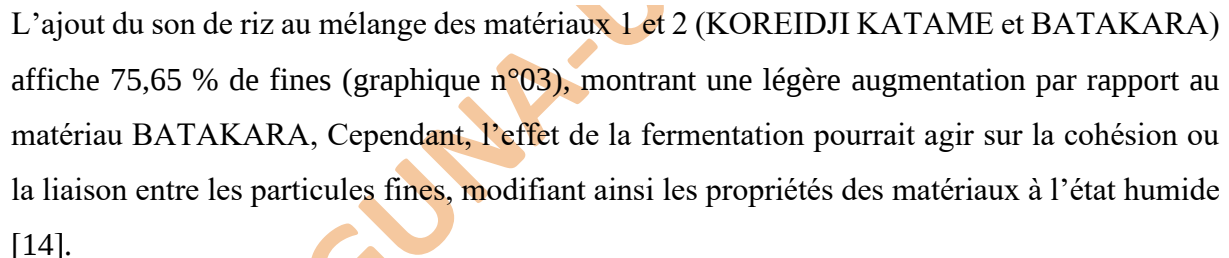


Source : Moussa Thiam, août 2025

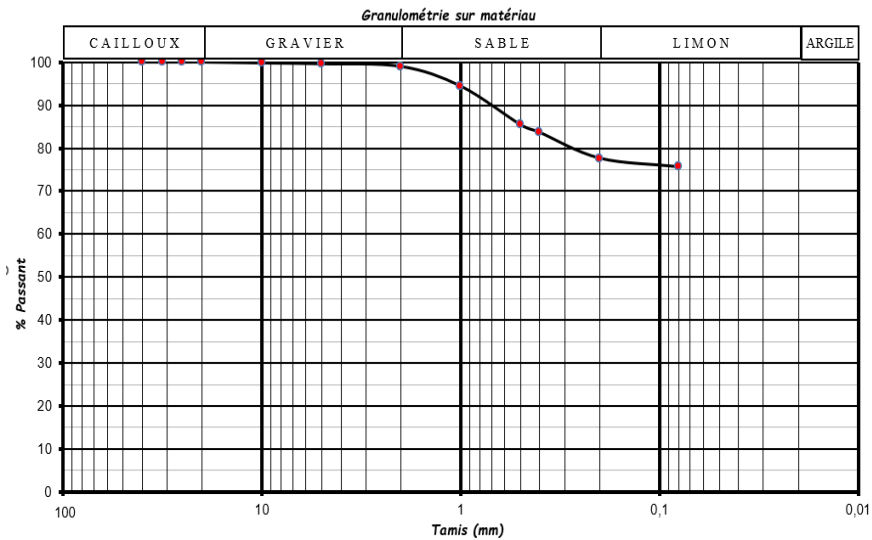
La granulométrie du matériau 2 BATAKARA présente une légère augmentation de la fraction limoneuse par rapport au matériau 1 KOREIDJI KATAME, tout en restant beaucoup plus dans le domaine du sable (graphique n°02). Il a une teneur en fines de 71,4 %, légèrement inférieure à celle du matériau 1 KOREIDJI KATAME. Cependant, les limites d'Atterberg du Batakara plus élevées ($LL = 40,23 \%$, $LP = 25,25 \%$, $IP = 14,98$) indiquent une grande capacité à se déformer sans rompre, suggérant que les fines présentes sont plus actives et contiennent des minéraux de sol très réactif. Ce comportement traduit la présence probable d'argiles plastiques, capables d'améliorer la cohésion du mélange [13]. Il s'agit donc d'un matériau plus plastique,

Source : Moussa Thiam, août 2025

Graphique n°02 : Courbe granulométrique pour le matériau BATAKARA



Graphique n°03 : Courbe granulométrique pour le matériau KOREIDJI KATAME plus

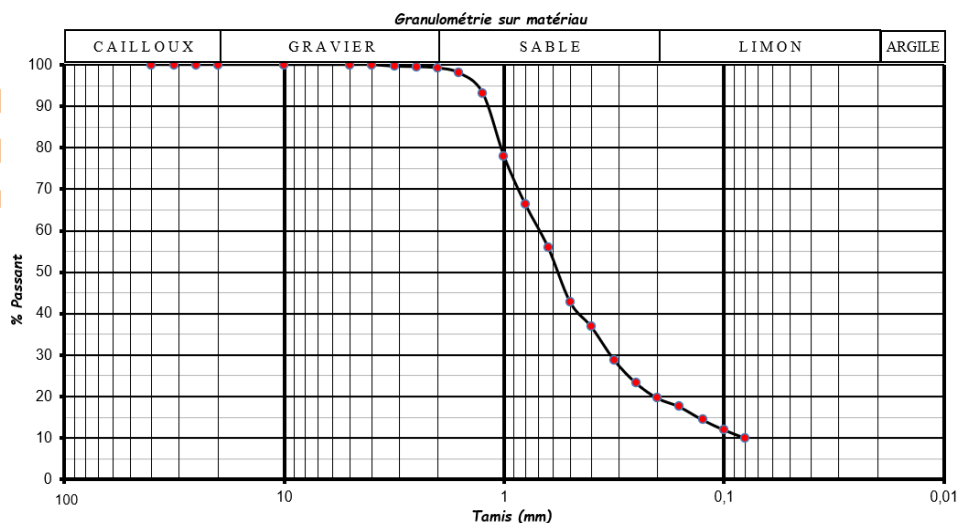


Source : Moussa Thiam, août 2025

L'analyse granulométrique a révélé que le son de riz est essentiellement composé de particules supérieures à 0.075 mm à fibres végétales, avec une très faible proportion de fines. Cette structure poreuse et fibreuse suggère une faible compacité naturelle, mais une capacité d'absorption importante [5].

La courbe granulométrique du son de riz (graphique n°04) met en évidence une distribution granulaire particulièrement fine. Elle montre que près de 100% du matériau traverse les tamis d'un diamètre supérieur à 2 mm, ce qui traduit une absence totale d'éléments grossiers de la taille des cailloux et graviers. La chute progressive de la courbe entre 1 mm et 0,1 mm traduit une forte proportion des particules correspondant aux dimensions de sable fin et de limon grossier, avec une très faible fraction argileuse.

Graphique n°04 : Courbe granulométrique pour le son de riz



Source : Moussa Thiam, août 2025

Propriétés physiques du son de riz

Le son de riz, quant à lui, présente une granulométrie hétérogène traduisant une distribution de taille de particule large avec une gravité spécifique G_s de 1,28 et une densité apparente DA de $0,364 \text{ g/cm}^3$, ce qui correspond aux propriétés d'un matériau léger [7]. Son incorporation dans les mélanges améliore la plasticité sans alourdir le matériau [7].

Cette valeur confirme que le son de riz est un matériau organique très léger, poreux, contenant une proportion significative de fibre végétale [13]. Ce qui justifie la fermentation et favorise sa tendance à la floculation en présence d'eau [7].

La densité témoigne d'une structure végétale sèche.

III. DISCUSSION DES RESULTATS

L'analyse croisée des résultats granulométriques et des limites d'Atterberg des trois matériaux révèle des différences notables en termes de consistance, de texture et de comportement géotechnique. Le matériau KOREIDJI KATAME, constitué d'un sol naturel prélevé localement à Djenné, présente une forte proportion de particules fines ($82,8 \%$ passant au tamis $80 \mu\text{m}$), mais son indice de plasticité relativement faible ($IP = 6,39 \%$) traduit une cohésion limitée [13]. Cette faible plasticité, conjuguée à une forte teneur en fines, peut affecter la durabilité du matériau face aux agents climatiques.

Le matériau BATAKARA, semble être un sol plus adapté à la condition climatique locale, avec une granulométrie dont la majorité correspond à la taille des grains fins ($71,4 \%$) et une consistance améliorée, caractérisée par son indice de plasticité de $14,98 \%$. Cela traduit une meilleure aptitude au moulage, à la mise en œuvre et améliore sa résistance mécanique une fois durci ou séché. Le matériau KOREIDJI KATAME + BATAKARA avec le son de riz, résultant du même mélange mais soumis à une fermentation avec du son de riz, présente des propriétés proches ($IP = 14,92 \%$) avec une plasticité adaptée, ce qui améliore sa capacité face à l'humidité [13].

Le son de riz utilisé dans la fermentation se distingue par une faible densité apparente ($0,364 \text{ g/m}^3$) et un poids spécifique de 1,28 ce qui lui donne les propriétés d'un ajout organique [5] [6]. Sa courbe granulométrique indique une distribution granulaire de texture très fine, qui contribue à la liaison entre les particules du sol. Ce processus de fermentation, basé sur une pratique locale ancienne, favorise l'homogénéité du mélange tout en améliorant ses propriétés de plasticité [15].

Enfin, l'approche des acteurs locaux de Djenné, combinant matériaux naturels, stabilisation et fermentation, repose sur des principes traditionnels empiriques de stabilisation justifiés scientifiquement [13]. Le matériau KOREIDJI KATAME plus BATAKARA avec le son

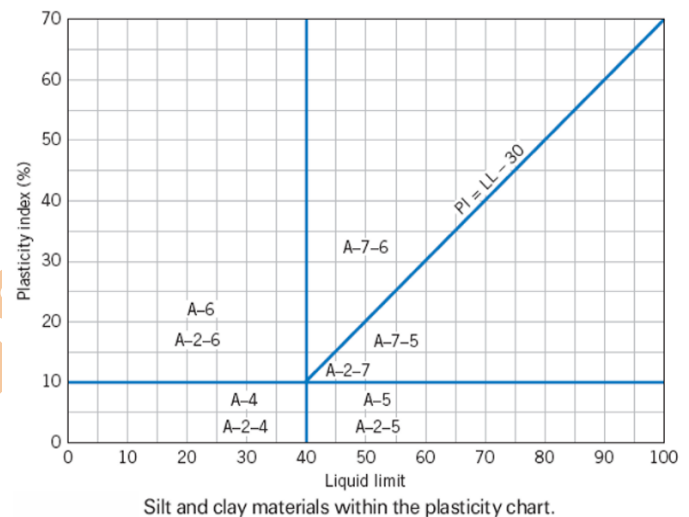
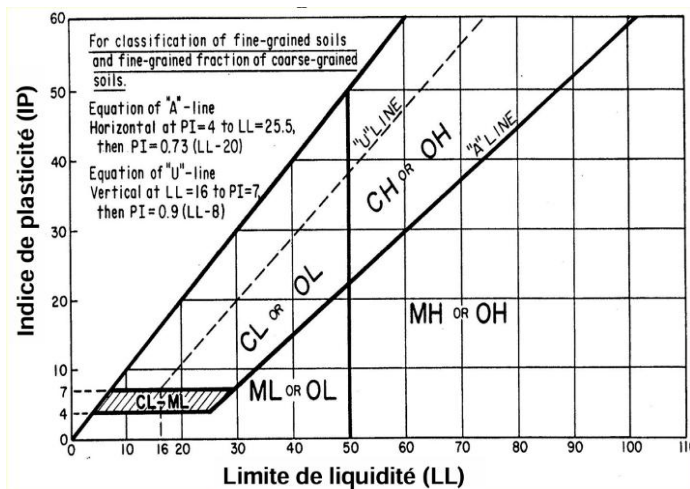
semble le plus adapté à une conservation durable du bâti en terre, à condition d'un bon contrôle du dosage et du temps de fermentation [9].

Classe des différents matériaux selon AASHTO et USCS

Afin de mieux comprendre le comportement des matériaux étudiés, une classification a été réalisée selon deux systèmes standards : le système USCS (Unified Soil Classification System) et le système AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [16]. Ces classifications se basent principalement sur le pourcentage de particules fines (passant au tamis 0,075 mm), ainsi que sur les limites d'Atterberg (LL : limite de liquidité, IP : indice de plasticité) (graphiques n°05 et 06)[16].

Graphique n°05 : Diagramme de plasticité des sols fins

Graphique n°06 : Diagramme de plasticité des sols fins



Source : Moussa Thiam, août 2025

Source : Moussa Thiam, août 2025

AASHT

Selon le diagramme USCS, et celui de la plasticité AASHTO, nous obtenons le tableau n°04 suivant :

Tableau n°04 : La classe des matériaux étudié

Matériaux	% Fines	LL (%)	IP (%)	USCS	AASHTO
Matériau 1	82,8 %	26,55	6,39	CL-ML	A-4
Matériau 2	71,4 %	40,23	14,98	CL	A-7-6
Matériau 3	75,6 %	48,02	14,92	CL	A-7-6

Source : Moussa Thiam, août 2025

L'analyse de la classification des matériaux selon les systèmes USCS (Unified Soil Classification System) et AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) permet de mieux caractériser leur comportement géotechnique. Le matériau KOREIDJI KATAME, avec une limite de liquidité de 26,55 % et un indice de

plasticité de 6,39 %, se situe dans la zone de transition entre les limons peu compressible et les argiles de faible plasticité. Il est ainsi classé CL-ML selon l'USCS et A-4 selon AASHTO, indiquant un sol limoneux sableux à faible plasticité, généralement peu sensible à l'eau [16]. En revanche, les matériaux BATAKARA et KOREIDJI KATAME + BATAKARA avec son de riz présentent des limites de liquidité nettement plus élevées (respectivement 40,23 % et 48,02 %) et des indices de plasticité avoisinant $IP = 15$ %. Ces deux matériaux sont ainsi classés CL selon l'USCS (argiles de plasticité intermédiaire) et A-7-6 selon AASHTO, caractérisant des argiles plastiques sensibles à l'humidité et potentiellement sujettes au retrait-gonflement [16]. De plus les restaurations anciennes montrent que des couches plus fines et compactes d'enduit traditionnel adhèrent mieux que des couches récentes plus épaisses et friables [7]. Cette classification confirme que les matériaux BATAKARA et KOREIDJI KATAME plus BATAKARA avec son de riz sont plus cohésifs et plastiques que le matériau KOREIDJI KATAME, ce qui influencera fortement leur comportement mécanique et leur aptitude à la stabilisation [13].

CONCLUSION

Au terme de cette étude, trois axes de recommandations sont proposés :

Valorisation et documentation des savoirs endogènes

Il est impératif de préserver et de documenter les connaissances traditionnelles liées à la préparation et à l'application (conditionnement et mise en œuvre) des matériaux locaux. Ces savoirs, transmis oralement depuis des générations, doivent être intégrés dans des cadres scientifiques afin d'assurer leur transmission et leur reconnaissance à l'échelle nationale et internationale.

Renforcement des critères de choix et de conditionnement des matériaux

Les matériaux utilisés pour la rénovation de la mosquée de Djenné doivent être soigneusement sélectionnés en tenant compte de leurs propriétés géotechniques. Des tests normalisés doivent systématiquement être réalisés pour évaluer leur aptitude à l'usage. De plus, les méthodes de conditionnement, comme la fermentation au son de riz, doivent faire l'objet d'une meilleure compréhension pour garantir/renforcer leur efficacité.

Introduction de techniques d'amélioration modernes compatibles aux réalités locales et climatiques actuelles

Face aux effets des changements climatiques, il devient pertinent d'envisager l'introduction de liants accessibles tels que la chaux et le ciment à faible dosage tout en respectant leurs compatibilités avec les caractéristiques de la terre crue. Ces améliorations doivent être validées

par des essais au laboratoire et sur site, en collaboration avec les acteurs locaux de la mosquée notamment les artisans locaux.

La présente étude s'est inscrite dans une démarche de valorisation du patrimoine culturel à travers l'analyse scientifique des matériaux locaux utilisés pour la rénovation annuelle 2025 de la Grande Mosquée de Djenné, classée au patrimoine mondial de l'UNESCO. L'objectif principal était de caractériser les propriétés géotechniques de trois matériaux utilisés dans le crépissage de l'édifice en 2025, en mettant en évidence les spécificités de chacun et les effets des pratiques traditionnelles telles que la fermentation avec du son de riz.

Les résultats des essais au laboratoire ont permis de mieux cerner les comportements mécaniques et physiques de ces matériaux. La classification selon les normes AASHTO et USCS a contribué à leur positionnement dans un cadre normatif, facilitant les comparaisons avec d'autres sols à usage de construction [9]. Par ailleurs, l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg ont révélé des différences notables entre les différents matériaux : KOREIDJI KATAME ; BATAKARA et KOREIDJI KATAME plus BATAKARA avec son de riz, avec une amélioration progressive des propriétés plastiques et cohésives, liées au processus de fermentation.

En plus de la valorisation des savoirs endogènes, cette recherche ouvre la voie à des pistes d'amélioration plus modernes par l'introduction de liants hydrauliques (ciment et chaux) tout en préservant les spécificités architecturales de la mosquée. Ces recommandations, si elles sont mises en œuvre avec rigueur, pourraient contribuer à renforcer la durabilité des interventions futures sur le site.

En définitive, cet article allie approche scientifique, sauvegarde du patrimoine, et innovation technique, dans le but de contribuer activement à la préservation durable d'un édifice emblématique du patrimoine sahélien.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIBANG BI OBAM ASSOUMOU, S. S., ZHU, L., & FRANCIS DENG, C. (2023). « A conceptual framework for achieving sustainable building through compressed earth block: A case of Ouagadougou, Burkina Faso ».In, *Circular Economy and Sustainability*, 3(2), 1029-1043.
- DE CHAZELLES C.-A., 2010, « Terre modelée et terre moulée, deux conceptions de la construction en terre ». In, CARVAIS R., GUILLERME A., NEGRE V. & SAKAROVITCH J. (dirs.), *Edifice et Artifice : Histoires constructives*. Paris : Picard, pp. 411–419.
- CORPUS DES NORMES, s.d. *Caractéristiques géotechniques des matériaux*, série NF P 94
- FALL M. (2010). *Géotechnique des sols fins : comportement et caractérisation*. Toulouse : Éditions Cépaduès, 2010.
- HOUBEN, H., & GUILLAUD, H. (1989). *Traité de construction en terre CRATerre*. 6^e édition. Marseille, Editions Parenthèses 354 p.
- JOFFROY Thierry & FANE Yamoussa, 2010, *Villes anciennes de Djenné*. Grenoble : CRATerre-ENSAG ; DNPC Mali. 36 p.
- KLEIN A. (2003). « La construction en terre crue par couches continues en Midi-Pyrénées, XVI^e-XX^e siècles : contribution à l'identification des techniques ». In, DE CHAZELLES C.-A. & KLEIN A., (dir.), *Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. 1. Terre modelée découpée ou coffrée : matériau et modes de mise en œuvre*, Montpellier : Éditions de l'Espérou, pp. 417-437.
- LAUREAU V. (2012). « Patrimoine urbain en terre au Mali : un processus de renouvellement perpétuel »,In, *fabricA* (n° 6), pp. 9-18.
- MAAS Pierre & MOMMERSTEEG Geert, 1992, Djenné : chef-d'œuvre architectural, Bamako : Institut des Sciences Humaines, Amsterdam : Institut Royal des Tropiques/ Karthala, 224 p.
- OUEDRAOGO Kouka Amed Jérémy, 2019, *Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- TOGOLA, D. C., & AL KARJOUSLI, S., 2014, *Capter les richesses du patrimoine mondial dans une ville sainte de l'islam : la problématique de la mise en tourisme à Djenné au Mali*, Via [En ligne], 4-5 | 2014, mis en ligne le 26 octobre 2014, consulté le 20 décembre 2025. URL : <http://journals.openedition.org/viatourism/946> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/viatourism.946>
- TOCKOL I. (1993). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues (Doctoral dissertation, Ecole de génie, Université de Moncton, Moncton, NB?, CA).