

Caractérisation Du Sol Et Evaluation Des Performances Mécaniques Et Thermiques Des Murs En Terre : Cas D'une Maison Traditionnelle Malagasy

^{1,1}RANDRIANTIANA Jean Charlin, ^{1,2}TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, ^{1,3}RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, ^{1,4}RAJAONARISON Eddie Frank

¹Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d'Antananarivo

Corresponding Author : RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa., tantely.andriamanantena0880@gmail.com



Résumé: Dans le contexte de la valorisation de l'habitat traditionnel en terre, cette étude vise à caractériser le sol utilisé et à évaluer les performances mécaniques et thermiques des murs afin d'apprécier leur aptitude à une conception durable. La caractérisation géotechnique montre une valeur de bleu de méthylène supérieure à 8, indiquant un sol très argileux, susceptible de présenter une forte cohésion mais également une sensibilité importante aux variations hydriques. Les plages de poids volumique des sols argileux se situent approximativement entre 13 et 22 kN/m³, tandis que leur teneur en eau peut varier d'environ 10 à 90 % selon leur plasticité et leur état. La classification selon la teneur en CaCO₃ permet de distinguer les domaines argileux, marneux et calcaires. L'analyse mécanique met en évidence une concentration des sollicitations au pied du mur, où la contrainte combinée atteint environ 0,15 MPa. Sur le plan thermique, pour un mur de 0,40 m, un écart de température de 25 °C conduit à un flux compris entre environ 32,0 et 41,4 W/m² lorsque la conductivité varie de 0,512 à 0,663 W/m·K. Ces résultats soulignent l'importance d'une caractérisation couplée pour orienter le dimensionnement et la protection des murs.

Mots-clés : sol argileux ; caractérisation géotechnique ; comportement mécanique ; performance thermique ; habitat traditionnel.

Abstract: In the context of promoting traditional earthen housing, this study aims to characterize the soil used and to evaluate the mechanical and thermal performance of the walls in order to assess their suitability for sustainable design. Geotechnical characterization reveals a methylene blue value greater than 8, indicating a highly clayey soil, which may exhibit strong cohesion but also significant sensitivity to variations in water content. The bulk density ranges of clayey soils are approximately between 13 and 22 kN/m³, while their water content may vary from about 10% to 90%, depending on their plasticity and condition. Classification based on CaCO₃ content makes it possible to distinguish clayey, marly, and calcareous domains. Mechanical analysis highlights a concentration of stresses at the base of the wall, where the combined stress reaches approximately 0.15 MPa. From a thermal perspective, for a 0.40 m-thick wall, a temperature difference of 25 °C results in a heat flux ranging from approximately 32.0 to 41.4 W/m² when thermal conductivity varies from 0.512 to 0.663 W/m·K. These results emphasize the importance of coupled characterization to guide the design and protection of earthen walls.

Keywords: clayey soil; geotechnical characterization; mechanical behavior; thermal performance; traditional housing.

1. INTRODUCTION

La construction en terre constitue une solution particulièrement intéressante dans le contexte actuel de recherche de matériaux à faible transformation, disponibles localement et compatibles avec les principes de conception bioclimatique. Dans plusieurs régions de Madagascar, les matériaux locaux occupent historiquement une place importante dans l'habitat, tandis que la conception de l'enveloppe, l'épaisseur des parois, la toiture et les ouvertures participent directement au confort intérieur. Les travaux consacrés à une habitation représentative des Hautes Terres ont notamment montré que l'utilisation raisonnée des

matériaux locaux et l'amélioration passive des différentes composantes du bâtiment peuvent contribuer à améliorer les conditions thermiques intérieures [1]. Cette approche justifie l'intérêt porté aux maisons traditionnelles en terre, dont l'amélioration doit cependant préserver les principes constructifs locaux tout en répondant aux exigences contemporaines de stabilité et de performance thermique. La performance d'un mur en terre dépend en premier lieu des caractéristiques du sol qui constitue sa matrice. La nature et l'activité de la fraction argileuse influencent fortement la cohésion, la plasticité, la sensibilité à l'eau ainsi que les phénomènes de retrait et de gonflement. La valeur de bleu de méthylène constitue à cet égard un indicateur permettant d'apprécier la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol. La méthode d'essai correspondante est notamment décrite dans la norme NF P94-068, qui définit le principe de mesure de la capacité d'adsorption du bleu de méthylène par le matériau [2]. Pour les terres destinées à la construction, cet indicateur doit être interprété conjointement avec le poids volumique et la teneur en eau, puisque l'état de densification et l'humidité conditionnent également le comportement de la paroi. La composition minéralogique représente un autre paramètre important. La présence de carbonate de calcium peut modifier la nature du matériau, sa plasticité et certains mécanismes de cohésion. La norme NF P94-048 fournit une méthode de détermination de la teneur en carbonate par calcimétrie et propose également une classification indicative des matériaux suivant leur pourcentage massique en carbonate [3]. La caractérisation simultanée de la fraction argileuse, de la teneur en eau, du poids volumique et du contenu en CaCO_3 permet ainsi d'établir une première lecture du comportement géotechnique de la terre avant son intégration dans les analyses structurelles et thermiques. L'état hydrique revêt une importance particulière pour les murs en terre. Bui et al. [4] ont montré expérimentalement que la variation de la teneur en eau influence la résistance à la compression, le module d'élasticité et le coefficient de Poisson de la terre compactée. Cette dépendance implique qu'une paroi ne peut être caractérisée uniquement à partir de propriétés mécaniques déterminées dans un état sec de référence. L'exposition à l'humidité, les cycles saisonniers et les différences de teneur en eau au sein de l'épaisseur peuvent modifier la rigidité et la capacité résistante du matériau. Les travaux de Jaquin et al. [5] montrent également que la résistance de la terre non stabilisée est étroitement liée aux mécanismes propres aux sols non saturés, notamment à la succion. Ces caractéristiques géotechniques conditionnent directement la réponse mécanique du mur. Sous l'effet du poids propre, des charges transmises par la toiture et des actions latérales, la paroi développe des contraintes de compression et de flexion dont la combinaison peut produire des zones plus sollicitées, notamment vers sa partie inférieure. L'identification de ces zones est indispensable pour apprécier la stabilité du système, orienter l'épaisseur du mur et déterminer les secteurs nécessitant une attention particulière en matière de compactage, de protection contre l'humidité ou de renforcement. La performance thermique constitue parallèlement une fonction essentielle de l'enveloppe en terre. Les travaux de Cagnon et al. [6] ont montré que les matériaux terreux possèdent des propriétés hygrothermiques susceptibles de contribuer à la régulation de l'humidité intérieure et au comportement thermique des bâtiments grâce notamment à leur inertie. Hall et Allinson [7] soulignent également que la réponse hygrothermique de la terre compactée dépend de sa composition, de sa structure poreuse et de son état hydrique. La conductivité thermique ne doit donc pas être considérée comme une constante indépendante du matériau ; ses variations influencent directement le flux de chaleur traversant le mur et, par conséquent, la capacité de l'enveloppe à limiter les échanges thermiques entre les ambiances intérieure et extérieure. Dans ce contexte, la présente étude, intitulée « Caractérisation du sol et évaluation des performances mécaniques et thermiques des murs en terre : cas d'une maison traditionnelle Malagasy », vise à établir une relation cohérente entre les propriétés géotechniques de la terre et le comportement fonctionnel de la paroi. L'objectif consiste plus précisément à caractériser le sol à travers la valeur de bleu de méthylène, le poids volumique, la teneur en eau et la teneur en carbonate de calcium, puis à évaluer la distribution simplifiée des contraintes mécaniques dans le mur et la sensibilité des transferts thermiques aux variations de conductivité. Cette approche permet de disposer d'une base de caractérisation indispensable au dimensionnement ultérieur, au renforcement du matériau et à l'amélioration de la durabilité et du confort de l'habitat traditionnel.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les matériels et méthodes retenus ont été organisés de manière à assurer une caractérisation cohérente du sol et à relier ses propriétés géotechniques aux réponses mécanique et thermique du mur étudié. La démarche repose sur l'exploitation d'échantillons représentatifs de la terre utilisée pour la construction, complétée par les caractéristiques géométriques du prototype de maison traditionnelle et par des calculs analytiques destinés à évaluer les sollicitations dans la paroi. Les prélèvements de terre sont conservés dans des récipients ou sachets identifiés afin de limiter toute modification importante de leur état avant les

déterminations de laboratoire. Les principales grandeurs retenues sont la valeur de bleu de méthylène, le poids volumique, la teneur en eau et la teneur en carbonate de calcium, auxquelles sont associées les dimensions du mur, sa masse volumique et ses propriétés thermiques. La caractérisation de l'activité argileuse est fondée sur la valeur de bleu du sol. Le matériel nécessaire comprend notamment l'échantillon de terre préparé, une solution de bleu de méthylène de concentration connue, un dispositif de dosage, un récipient d'agitation, un agitateur ainsi qu'un papier filtre permettant de réaliser les contrôles successifs par tache. Le principe consiste à ajouter progressivement la solution de bleu de méthylène à une suspension contenant la fraction étudiée jusqu'à l'apparition du critère caractéristique correspondant à la saturation des surfaces argileuses. Cette démarche reprend le principe de l'essai à la tache décrit par la NF P94-068 [8], qui permet d'apprécier la quantité et l'activité de la fraction argileuse présente dans le matériau. Cette référence étant aujourd'hui indiquée comme annulée par l'AFNOR, elle doit être citée dans le mémoire comme référence méthodologique correspondant au protocole utilisé et non comme norme actuellement en vigueur. La valeur obtenue a ensuite été confrontée aux plages usuelles de classification afin d'interpréter le caractère du sol. Dans le cas étudié, une VBS supérieure à 8 conduit à retenir un caractère très argileux, information essentielle pour la suite de l'analyse en raison de la sensibilité potentielle de cette terre aux variations hydriques. Le poids volumique est déterminé à partir de la masse et du volume représentatif d'un échantillon. Le matériel nécessaire comprend principalement une balance de précision, des récipients de pesée et des dispositifs permettant d'évaluer les dimensions ou le volume de l'échantillon. La démarche est cohérente avec les principes de l'ISO 17892-2 [9], qui prévoit plusieurs méthodes de détermination de la masse volumique apparente des sols, notamment par mesures géométriques, immersion dans un fluide ou déplacement de fluide. Dans la présente étude, les valeurs ont ensuite été converties et comparées à des plages indicatives exprimées en poids volumique afin de situer le matériau par rapport aux argiles molles, argiles raides et autres catégories de sols. Cette étape est particulièrement importante pour l'évaluation de la masse propre du mur et des contraintes verticales générées dans sa partie inférieure. La teneur en eau est obtenue à partir d'échantillons pesés avant et après séchage. Le dispositif comprend une balance suffisamment précise, des récipients résistants à la chaleur et une étuve permettant de maintenir les éprouvettes à une température contrôlée jusqu'à stabilisation de leur masse. La procédure est fondée sur le principe de séchage à masse constante décrit dans l'ISO 17892-1 [10]. Cette norme définit la détermination de la teneur en eau comme une méthode de laboratoire utile à la classification et au contrôle des sols naturels ou remaniés. La teneur en eau obtenue est ensuite comparée aux domaines caractéristiques de différents sols afin d'apprécier l'état hydrique de la terre étudiée. Cette information doit être interprétée conjointement avec la VBS et le poids volumique, car l'humidité influence directement le comportement d'une matrice fortement argileuse. La teneur en carbonate de calcium est évaluée à l'aide d'une méthode calcimétrique. Le dispositif correspondant comprend un calcimètre, une balance, l'échantillon préalablement préparé et les réactifs nécessaires à la réaction permettant de quantifier la fraction carbonatée. La NF P94-048 [11] décrit le principe, l'appareillage, la préparation de l'échantillon, les mesures ainsi que l'expression de la teneur en carbonate ; son annexe informative prévoit également une classification des matériaux selon leur pourcentage massique en carbonate. L'exploitation de ce résultat permet de différencier les domaines argileux, argilo-marneux, marneux et calcaires et complète ainsi l'interprétation de la composition minérale du sol. Après la caractérisation géotechnique, l'évaluation mécanique est conduite à partir de la géométrie du mur et des caractéristiques physiques retenues. Les dimensions de référence comprennent notamment la hauteur, l'épaisseur et la longueur de la paroi ainsi que les données relatives aux charges permanentes et aux sollicitations latérales. Les contraintes verticales sont appréciées en considérant l'accumulation progressive du poids du matériau vers le pied du mur, puis une composante de flexion est introduite pour représenter l'effet simplifié d'une action latérale. Les deux contributions sont comparées et combinées afin d'identifier les zones les plus sollicitées de la paroi. Cette procédure permet d'obtenir une lecture qualitative et quantitative de l'évolution des contraintes suivant la hauteur sans prétendre remplacer une modélisation non linéaire complète. La prise en compte de l'état hydrique dans l'interprétation mécanique est particulièrement importante. Bui et al. [12] ont montré expérimentalement que la teneur en eau modifie les caractéristiques mécaniques de la terre compactée, notamment sa résistance et sa rigidité. Jaquin et al. [13] ont également mis en évidence le rôle de la succion dans la résistance de la terre non stabilisée, ce qui confirme que le comportement mécanique d'une paroi en terre ne peut être considéré comme totalement indépendant de son humidité. Ces éléments ont conduit à interpréter avec prudence les valeurs de contraintes obtenues et à considérer les résultats comme représentatifs des hypothèses matérielles et hydriques adoptées. Dans le cas étudié, la combinaison simplifiée des sollicitations conduit à une contrainte maximale proche de 0,15 MPa au pied du mur, ce qui identifie clairement la partie inférieure comme la zone nécessitant la plus grande attention en matière de compactage et de

protection hydrique. L'analyse thermique est réalisée à partir de l'épaisseur du mur, fixée à 0,40 m, et de plusieurs valeurs de conductivité thermique représentatives de la plage étudiée. Les conductivités considérées sont comprises entre environ 0,512 et 0,663 W/m·K, avec une valeur intermédiaire voisine de 0,587 W/m·K. Plusieurs écarts de température entre les faces de la paroi sont appliqués afin d'étudier la sensibilité du flux thermique lorsque les conditions extérieures deviennent plus sévères. Les résultats sont calculés pour chaque combinaison d'épaisseur, de conductivité et d'écart de température, puis représentés graphiquement afin d'identifier l'évolution de la transmission thermique. Cette méthode d'interprétation est cohérente avec les travaux de Cagnon et al. [14], qui ont montré que les matériaux en terre présentent des propriétés hygrothermiques dépendantes de leur structure et de leur état, et que leur comportement doit être apprécié conjointement à leurs caractéristiques physiques. Hall et Allinson [15] ont également souligné l'importance de la caractérisation hygrothermique des matériaux en terre compactée, notamment en ce qui concerne les transferts thermiques et l'influence de l'humidité. Dans les hypothèses retenues, lorsque l'écart de température atteint 25 °C, le flux thermique varie approximativement de 32,0 W/m² pour la conductivité la plus faible à 41,4 W/m² pour la conductivité la plus élevée. La comparaison met ainsi en évidence l'intérêt d'une faible conductivité pour réduire les échanges de chaleur à travers l'enveloppe. L'ensemble des résultats est finalement regroupé dans des tableaux de données afin d'assurer leur vérification et leur comparaison. Les valeurs géotechniques sont d'abord classées suivant leur nature et leur unité, puis les paramètres du mur sont associés aux calculs mécaniques et thermiques. Les représentations graphiques sont produites à partir des différentes plages de valeurs afin de visualiser la classification du sol, l'évolution des contraintes et la sensibilité du flux thermique. Cette démarche permet ainsi d'établir une continuité entre les propriétés mesurées ou retenues pour la terre et les performances calculées de la paroi. Elle fournit une base méthodologique pour les analyses ultérieures portant sur le renforcement organique, la durabilité et l'adaptation du système constructif aux variations climatiques.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1- Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène (VBS) et identification de son caractère très argileux

Dans le cadre de la conception écologique des murs en terre armés par des matériaux organiques, la caractérisation de la fraction argileuse du sol constitue une étape essentielle, car elle conditionne directement le comportement hydrique, la cohésion, la plasticité ainsi que la sensibilité du matériau aux variations climatiques. La valeur de bleu du sol (VBS) constitue à cet effet un indicateur pertinent de l'activité de la fraction fine et, indirectement, de l'importance des minéraux argileux présents dans la terre. La figure ci-dessous présente la classification indicative des sols en fonction de leur VBS et permet de situer le matériau étudié par rapport aux différentes classes texturales susceptibles d'être rencontrées dans la construction en terre.

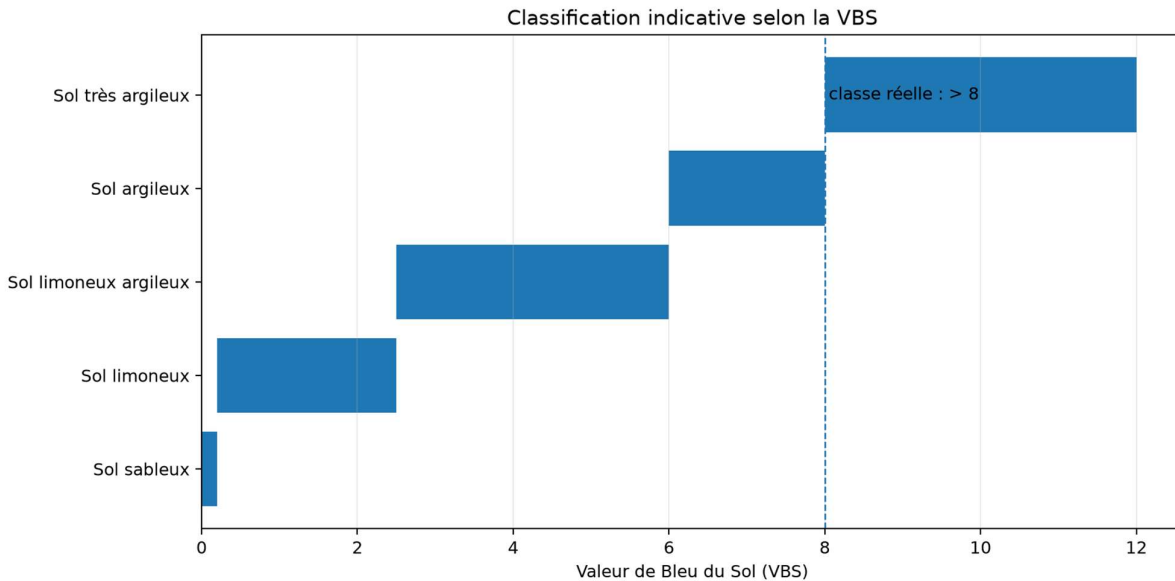


Figure 1 : Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène (VBS) et identification de son caractère très argileux

Source : Auteur 2026

Interprétation

La classification représentée montre une augmentation progressive du caractère argileux avec la valeur de VBS. Les sols sableux correspondent aux valeurs les plus faibles, comprises approximativement entre 0 et 0,2, traduisant une très faible activité de la fraction fine et une capacité limitée de rétention d'eau. La classe des sols limoneux s'étend ensuite approximativement de 0,2 à 2,5, tandis que les sols limoneux argileux occupent l'intervalle compris entre 2,5 et 6. Lorsque la VBS se situe entre 6 et 8, le matériau est classé comme sol argileux, ce qui témoigne déjà d'une présence importante de particules fines actives. Au-delà du seuil de VBS = 8, le sol entre dans la catégorie des sols très argileux. Dans le cas étudié, la classe réelle indiquée sur la figure correspond précisément à une VBS supérieure à 8, ce qui permet de caractériser la terre comme fortement argileuse. La représentation graphique prolonge cette dernière classe jusqu'à une valeur de 12 à des fins de visualisation, mais le résultat à retenir est essentiellement le dépassement du seuil de 8 et non une valeur exacte égale à 12. Cette valeur élevée de VBS traduit une forte activité de la fraction argileuse et laisse prévoir une capacité importante d'adsorption et de rétention de l'eau. Une telle caractéristique peut être favorable à la construction en terre en raison de la cohésion naturelle qu'elle confère au matériau, les particules argileuses jouant un rôle de liant entre les grains de plus grandes dimensions. Elle peut ainsi contribuer à améliorer la tenue du matériau à l'état sec et favoriser la mise en forme des éléments constitutifs des murs traditionnels en terre. Toutefois, une proportion élevée d'argile constitue également un facteur de sensibilité vis-à-vis des variations de teneur en eau. Les cycles d'humidification et de séchage peuvent provoquer des phénomènes de gonflement, de retrait et, à terme, l'apparition de fissurations lorsque ces variations dimensionnelles sont insuffisamment maîtrisées. Cette observation revêt une importance particulière dans le contexte du changement climatique appliqué à l'habitat traditionnel Malagasy. Une augmentation de la variabilité des épisodes pluvieux, des périodes de sécheresse ou des alternances plus marquées entre conditions humides et sèches pourrait accentuer les sollicitations hydriques auxquelles sont soumis les murs en terre. Avec une VBS supérieure à 8, le matériau étudié est potentiellement plus réactif à ces fluctuations d'humidité qu'un sol présentant une VBS comprise, par exemple, entre 2,5 et 6. Le comportement du mur ne dépend donc pas uniquement de sa résistance mécanique initiale, mais également de sa capacité à conserver sa stabilité dimensionnelle au cours des cycles climatiques successifs.

2- Plages indicatives du poids volumique des principaux

La figure suivante présente ainsi les plages indicatives de poids volumique associées à plusieurs catégories de sols et de matériaux géotechniques, exprimées en kN/m^3 . Cette représentation permet notamment de comparer les domaines caractéristiques des matériaux argileux avec ceux des sols granulaires, des matériaux organiques et des formations rocheuses, afin de disposer d'un référentiel pour l'analyse des terres destinées à la construction traditionnelle Malagasy.

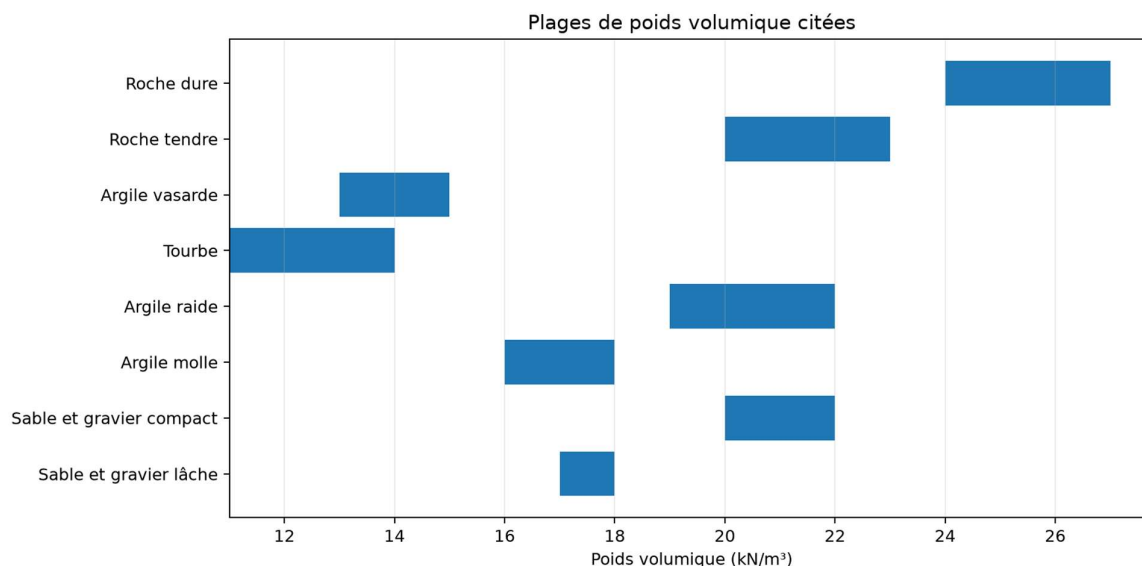


Figure 2 : Plages indicatives du poids volumique des principaux

Source : Auteur

Interprétation

Les valeurs représentées mettent en évidence une variation relativement importante du poids volumique selon la nature et l'état du matériau. Les valeurs les plus faibles sont associées à la tourbe, dont le poids volumique est compris approximativement entre 11 et 14 kN/m^3 . Cette faible valeur peut être attribuée à sa forte teneur en matière organique, à sa porosité élevée ainsi qu'à sa faible densité solide. L'argile vasarde présente également des valeurs relativement faibles, comprises entre 13 et 15 kN/m^3 , correspondant à un matériau généralement caractérisé par une teneur en eau importante et une structure peu compacte. Ces ordres de grandeur illustrent l'influence de la porosité et de l'état hydrique sur le poids volumique apparent des sols fins. Pour les sols argileux, une augmentation nette du poids volumique apparaît avec l'amélioration de leur consistance. L'argile molle se situe dans une plage d'environ 16 à 18 kN/m^3 , alors que l'argile raide présente des valeurs sensiblement plus élevées, comprises entre 19 et 22 kN/m^3 . L'écart entre ces deux catégories traduit notamment les différences de compacité, de teneur en eau et d'organisation interne des particules. Une argile présentant un poids volumique proche de 20 à 22 kN/m^3 peut ainsi correspondre à un matériau relativement dense et compact, tandis que des valeurs proches de 16 kN/m^3 témoignent généralement d'un état plus lâche ou plus humide. Dans le contexte de la construction en terre, cette distinction est particulièrement importante puisque la densification influence directement la résistance mécanique, la porosité et les transferts d'humidité à travers les parois. Les matériaux granulaires présentent également des différences liées à leur degré de compacité. Le sable et gravier lâche se caractérise par un poids volumique compris approximativement entre 17 et 18 kN/m^3 , tandis que le sable et gravier compact atteint des valeurs comprises entre 20 et 22 kN/m^3 . Ainsi, le compactage peut conduire à une augmentation du poids volumique de plusieurs kN/m^3 en réduisant le volume des vides présents entre les grains. Cette observation présente un intérêt direct pour la fabrication des murs en terre, car l'énergie et la méthode de compactage constituent des paramètres susceptibles de modifier significativement la densité finale du matériau, et par conséquent ses propriétés mécaniques et hygrothermiques. Les formations rocheuses occupent

logiquement les plages de poids volumique les plus élevées de la figure. Les roches tendres présentent des valeurs d'environ 20 à 23 kN/m³, alors que les roches dures atteignent approximativement 24 à 27 kN/m³. Le maximum représenté, proche de 27 kN/m³, est ainsi nettement supérieur aux valeurs rencontrées pour les terres argileuses. Cette comparaison montre que les matériaux en terre possèdent généralement un poids propre inférieur à celui des matériaux rocheux massifs. Pour les murs d'une maison traditionnelle Malagasy, une telle caractéristique peut constituer un avantage en limitant les sollicitations gravitaires transmises aux fondations, sous réserve que la réduction du poids volumique ne résulte pas d'une porosité excessive susceptible d'affaiblir le matériau. Dans le cas particulier d'un sol identifié précédemment comme très argileux, avec une VBS supérieure à 8, les plages relatives aux différentes consistances des argiles constituent des références particulièrement pertinentes. Selon son état hydrique et son niveau de compactage, un tel matériau peut évoluer vers des poids volumiques appartenant à des domaines sensiblement différents. La comparaison entre l'argile vasarde, comprise entre 13 et 15 kN/m³, l'argile molle, comprise entre 16 et 18 kN/m³, et l'argile raide, comprise entre 19 et 22 kN/m³, montre que le comportement d'une terre argileuse ne peut être interprété à partir de sa seule minéralogie. Sa teneur en eau et son état de densification jouent également un rôle déterminant. Pour la construction, l'objectif consiste donc à atteindre une structure suffisamment compacte pour assurer la résistance et la stabilité, tout en conservant une porosité compatible avec les performances hygrothermiques recherchées. L'incorporation de matériaux organiques dans la matrice terreuse est également susceptible de modifier le poids volumique du composite. Les fibres végétales possèdent généralement une masse volumique apparente plus faible que celle de la matrice minérale ; leur introduction peut donc conduire à une réduction du poids volumique global du matériau lorsque leur dosage augmente. Dans une démarche d'écoconception, cette diminution peut être recherchée pour obtenir des murs plus légers et potentiellement améliorer certaines performances thermiques. Elle doit néanmoins être maîtrisée, car une diminution excessive de la densité peut s'accompagner d'une augmentation de la porosité et, selon la formulation, d'une réduction de la résistance à la compression. L'optimisation du composite terre-fibres doit donc rechercher un équilibre entre légèreté, résistance mécanique, capacité de déformation, isolation thermique et durabilité. La problématique devient particulièrement importante dans une perspective de changement climatique, puisque le poids volumique d'une terre n'est pas totalement indépendant de son état hydrique. Les alternances entre périodes de fortes précipitations et épisodes de sécheresse peuvent modifier la teneur en eau des murs et entraîner des variations de masse, de retrait et de gonflement, particulièrement dans le cas d'une terre fortement argileuse. Un matériau situé initialement dans un état dense comparable au domaine des argiles raides, soit approximativement 19 à 22 kN/m³, peut présenter un comportement différent lorsque sa teneur en eau varie fortement. La stabilité du mur doit par conséquent être évaluée conjointement à sa sensibilité à l'humidité, et non uniquement à partir d'une valeur nominale de poids volumique. Ces plages de référence montrent finalement que, pour la conception écologique des maisons traditionnelles Malagasy, le poids volumique constitue à la fois un indicateur de compacité et un paramètre d'optimisation du matériau. Les valeurs allant d'environ 13 à 22 kN/m³ pour les différentes catégories d'argiles fournissent un domaine de comparaison particulièrement utile pour caractériser la terre étudiée. Associées à la VBS supérieure à 8, aux propriétés mécaniques, à la teneur en eau et au dosage en renfort organique, elles permettent d'orienter la formulation vers un matériau suffisamment dense et résistant, mais également léger, durable et adapté aux sollicitations climatiques futures.

3- Plages indicatives de teneur en eau des principaux types de sols

La teneur en eau constitue un paramètre essentiel dans la caractérisation des terres destinées à la construction, puisqu'elle influence directement leur plasticité, leur compactage, leur retrait et leur comportement mécanique. La figure suivante présente les plages indicatives de teneur en eau associées à différents types de sols, permettant de situer le comportement hydrique des matériaux argileux par rapport aux sols granulaires et organiques.

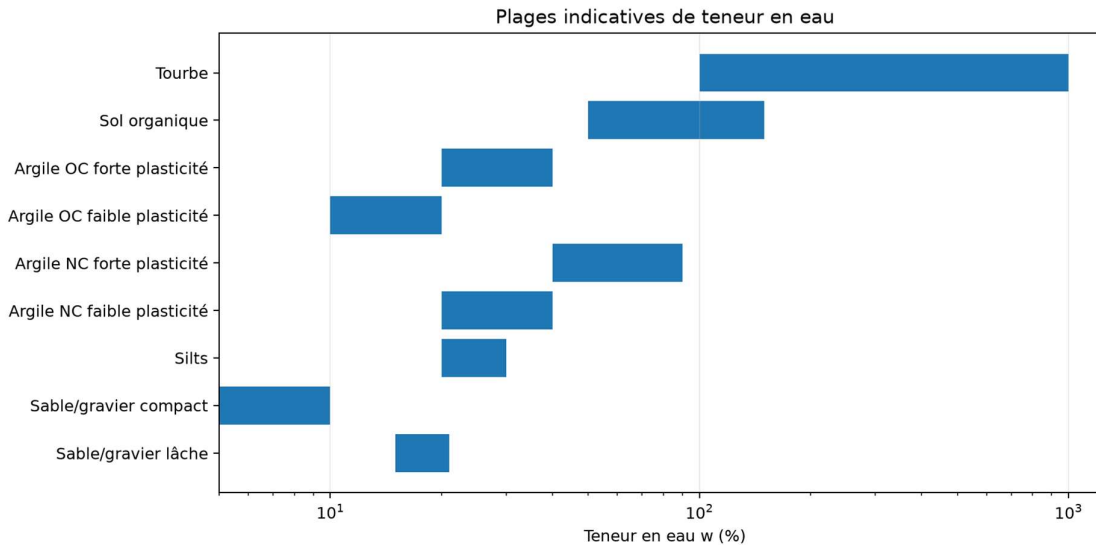


Figure 3: Plages indicatives de teneur en eau des principaux types de sols
Source : Auteur

Interprétation

Les résultats montrent que les sables et graviers compacts présentent les teneurs en eau les plus faibles, de l'ordre de 5 à 10 %, tandis que les sables et graviers lâches se situent approximativement entre 15 et 21 %. Les silts présentent des valeurs proches de 20 à 30 %. Pour les sols argileux, les teneurs en eau augmentent avec la plasticité et l'état de consolidation : les argiles OC à faible plasticité se situent autour de 10 à 20 %, contre 20 à 40 % pour les argiles OC à forte plasticité. Les argiles NC présentent environ 20 à 40 % à faible plasticité et 40 à 90 % à forte plasticité. Les sols organiques atteignent des teneurs nettement supérieures, d'environ 50 à 150 %, tandis que la tourbe présente les valeurs maximales, comprises approximativement entre 100 et 1 000 %. Ces résultats montrent que les terres fortement argileuses peuvent retenir des quantités importantes d'eau, particulièrement lorsqu'elles présentent une forte plasticité. Dans le contexte des murs en terre traditionnels Malagasy, cette capacité de rétention doit être maîtrisée, car des variations importantes de teneur en eau peuvent accentuer les phénomènes de gonflement, de retrait et de fissuration. La maîtrise de l'humidité et l'optimisation du renforcement organique constituent ainsi des paramètres importants pour améliorer la durabilité du matériau face aux variations climatiques.

4- Classification géotechnique des sols selon leur teneur en carbonate de calcium (CaCO_3)

La teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) constitue un indicateur utile pour caractériser la nature minéralogique d'un sol et apprécier son comportement dans les applications de construction en terre. La figure ci-après présente une classification géotechnique indicative des matériaux en fonction de leur proportion de CaCO_3 , depuis les sols essentiellement argileux jusqu'aux matériaux fortement calcaires.

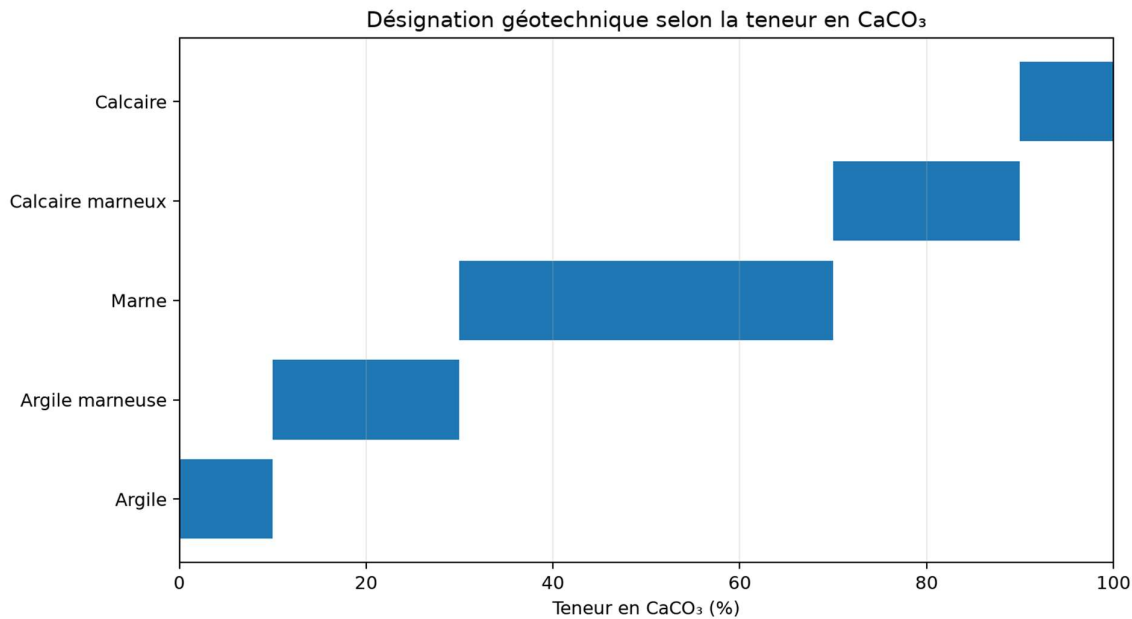


Figure 4: Classification géotechnique des sols selon leur teneur en carbonate de calcium (CaCO_3)

Source : Auteur

Interprétation

La classification montre qu'un sol contenant entre 0 et 10 % de CaCO_3 est considéré comme une argile, tandis qu'une teneur comprise entre 10 et 30 % correspond à une argile marneuse. Entre 30 et 70 %, le matériau est classé comme marne. Lorsque la teneur atteint 70 à 90 %, il s'agit d'un calcaire marneux, alors qu'une proportion comprise entre 90 et 100 % caractérise un matériau essentiellement calcaire. Dans le contexte des murs en terre traditionnels Malagasy, cette classification permet d'apprécier la contribution éventuelle de la fraction calcaire à la cohésion et à la stabilité du matériau. Une faible teneur en CaCO_3 traduit un comportement principalement gouverné par la fraction argileuse, donc potentiellement plus sensible aux variations d'humidité et aux phénomènes de retrait-gonflement. À l'inverse, une augmentation de la fraction calcaire peut modifier la plasticité et contribuer à une meilleure stabilité dimensionnelle. La teneur en CaCO_3 constitue ainsi un paramètre complémentaire à considérer dans l'optimisation des mélanges terre-matériaux organiques destinés à améliorer la durabilité des murs face aux sollicitations climatiques.

5- Distribution simplifiée des contraintes mécaniques dans le mur en terre sous sollicitations combinées

L'analyse de la distribution des contraintes permet d'identifier les zones les plus sollicitées du mur et d'orienter son dimensionnement ainsi que le positionnement du renforcement organique. La figure ci-dessous présente l'évolution, sur une hauteur d'environ 2,7 m, de la contrainte de compression axiale, de la contrainte liée à la flexion latérale et de leur combinaison simplifiée.

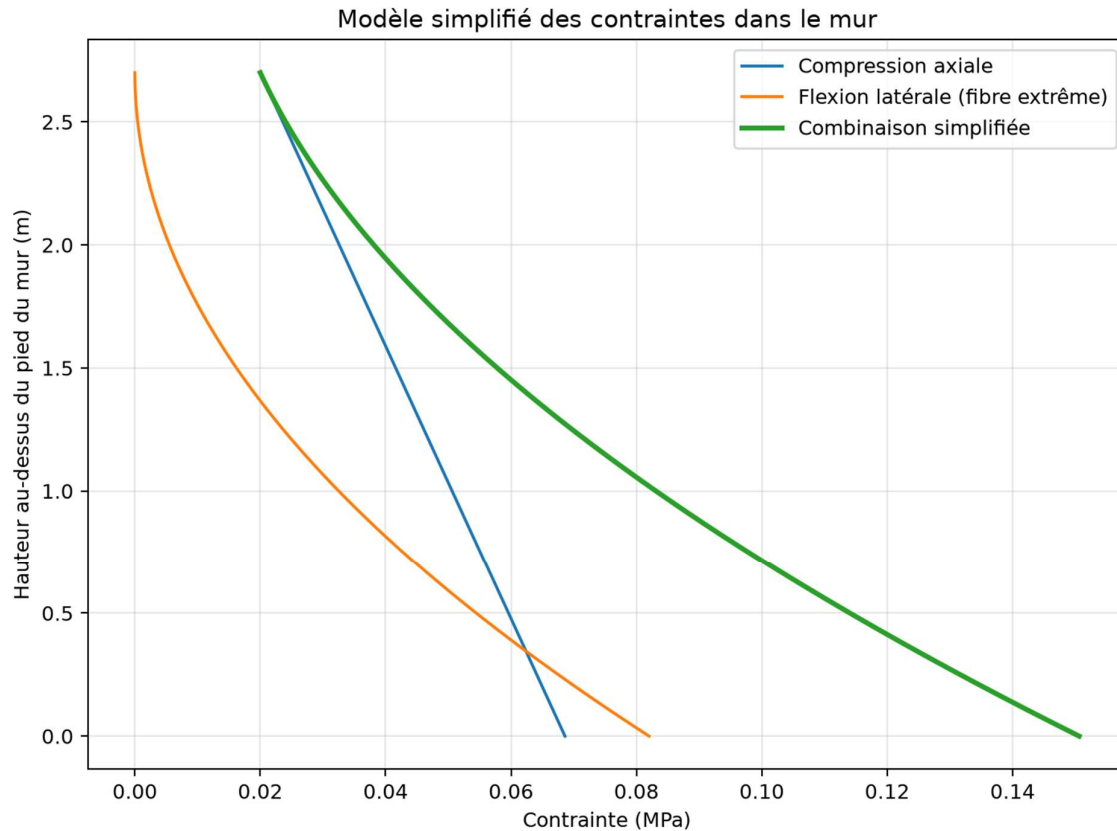


Figure 5: Distribution simplifiée des contraintes mécaniques dans le mur en terre sous sollicitations combinées

Source : Auteur

Interprétation

La compression axiale augmente progressivement vers le pied du mur, passant d'environ 0,02–0,03 MPa dans la partie supérieure à près de 0,07 MPa à la base. La contrainte de flexion latérale suit également une augmentation vers le bas et atteint environ 0,08 MPa au niveau du pied, alors qu'elle devient très faible au sommet. La combinaison simplifiée des sollicitations présente les valeurs les plus élevées, avec une contrainte maximale proche de 0,15 MPa à la base, contre environ 0,02 MPa vers 2,7 m de hauteur. Cette évolution montre que le pied du mur constitue la zone mécaniquement la plus sollicitée, en raison de l'accumulation des charges verticales et des effets des actions latérales. Cette localisation des contraintes justifie une attention particulière au compactage, à la résistance de la terre et au renforcement par des matériaux organiques dans la partie inférieure du mur. Dans une perspective de changement climatique, l'augmentation éventuelle des sollicitations latérales liées aux vents intenses, combinée aux variations d'humidité du matériau, pourrait renforcer cette concentration des contraintes et doit donc être intégrée dans l'optimisation de la conception des murs traditionnels Malagasy.

6- Sensibilité du flux thermique d'un mur en terre de 0,40 m aux variations de conductivité thermique

La performance thermique des murs en terre dépend notamment de leur conductivité thermique, de leur épaisseur et de l'écart de température entre les ambiances intérieure et extérieure. La figure suivante présente l'évolution du flux thermique stationnaire à travers un mur de 0,40 m d'épaisseur, pour trois valeurs de conductivité thermique : $\lambda_{\min} = 0,512 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\lambda_{\text{moy}} = 0,587 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et $\lambda_{\max} = 0,663 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

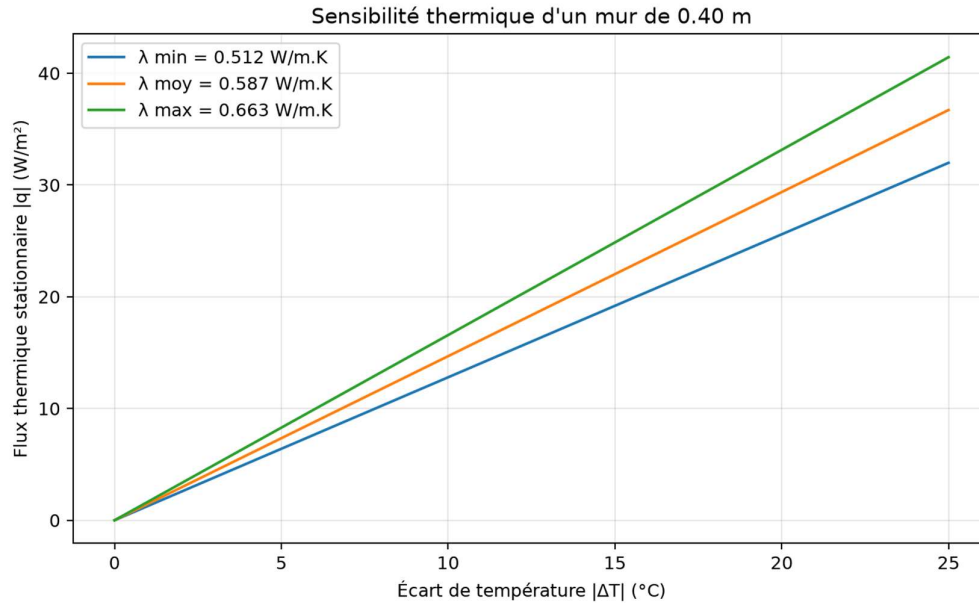


Figure 6 : Sensibilité du flux thermique d'un mur en terre de 0,40 m aux variations de conductivité thermique
Source : Auteur 2026

Interprétation

Les résultats montrent une augmentation linéaire du flux thermique avec l'écart de température $|\Delta T|$. Pour un écart thermique de 10 °C, le flux varie approximativement de 12,8 W/m² pour $\lambda_{\min}$ à 16,6 W/m² pour $\lambda_{\max}$, avec une valeur intermédiaire d'environ 14,7 W/m² pour λ_{moy} . À 20 °C, ces valeurs atteignent respectivement environ 25,6, 29,4 et 33,2 W/m². Pour un écart maximal de 25 °C, le flux thermique est d'environ 32,0 W/m² pour $\lambda_{\min}$, 36,7 W/m² pour λ_{moy} et 41,4 W/m² pour $\lambda_{\max}$. Cette évolution montre qu'une faible conductivité thermique limite davantage les transferts de chaleur à travers le mur. Ainsi, la réduction de λ , notamment par l'incorporation maîtrisée de matériaux organiques, peut améliorer la capacité isolante du mur en terre. Dans le contexte du changement climatique, cette propriété présente un intérêt particulier pour les maisons traditionnelles malagasy, puisqu'elle peut contribuer à limiter les échanges thermiques avec l'extérieur et à améliorer le confort intérieur lorsque les écarts de température deviennent plus importants.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent que la caractérisation géotechnique du sol constitue une étape déterminante pour comprendre le comportement du mur en terre. Une VBS supérieure à 8 confirme le caractère très argileux du matériau, ce qui favorise sa cohésion mais augmente également sa sensibilité aux variations d'humidité. Les plages de poids volumique et de teneur en eau indiquent que l'état hydrique et la compacité peuvent modifier sensiblement les propriétés du matériau et doivent donc être maîtrisés lors de la mise en œuvre. L'analyse mécanique met en évidence une concentration des contraintes dans la partie inférieure du mur, avec une valeur combinée pouvant atteindre environ 0,15 MPa au pied de la paroi. Cette zone apparaît ainsi

comme la plus critique et nécessite une attention particulière concernant le compactage, le soubassement et la protection contre l'humidité. Sur le plan thermique, les résultats montrent que l'augmentation de la conductivité entraîne une hausse du flux traversant le mur. Pour une épaisseur de 0,40 m et un écart de température de 25 °C, le flux varie approximativement de 32,0 à 41,4 W/m² lorsque la conductivité passe de 0,512 à 0,663 W/m·K. Une faible conductivité améliore donc la capacité du mur à limiter les échanges thermiques. Dans l'ensemble, ces résultats confirment que la performance des murs en terre dépend conjointement de la nature du sol, de son état hydrique, de la distribution des contraintes et de ses propriétés thermiques.

5. CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que le comportement des murs en terre dépend étroitement des caractéristiques géotechniques du sol, de son état hydrique et de ses propriétés mécaniques et thermiques. La VBS supérieure à 8 confirme le caractère très argileux du matériau, nécessitant une maîtrise particulière de l'humidité afin de limiter les risques de retrait, de gonflement et de fissuration. L'analyse mécanique met en évidence une sollicitation plus importante au pied du mur, avec une contrainte combinée pouvant atteindre environ 0,15 MPa, ce qui justifie une attention particulière au compactage, au soubassement et à la protection de cette zone. Sur le plan thermique, pour un mur de 0,40 m, le flux varie d'environ 32,0 à 41,4 W/m² pour un écart de température de 25 °C, selon la conductivité considérée. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la durabilité et la performance du mur reposent sur une conception intégrant simultanément la nature du sol, la maîtrise de l'humidité, la stabilité mécanique et la limitation des transferts thermiques.

REFERENCES

- [1] Razanamanampisoa, H., Randriamanantany, Z. A., Rakotondramiarana, H. T., Garde, F., & Boyer, H. (2007). Simulation of a typical house in the region of Antananarivo, Madagascar: Determination of passive solutions using local materials. 3rd International Madagascar Conference in High-Energy Physics, Antananarivo.
- [2] AFNOR (1998). NF P94-068 — Sols : reconnaissance et essais — Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux — Détermination de la valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tache. AFNOR Éditions. Note : édition actuellement annulée ; à conserver comme référence de la méthode utilisée si elle correspond au protocole expérimental du mémoire.
- [3] AFNOR (1996). NF P94-048 — Sols : reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en carbonate — Méthode du calcimètre. AFNOR Éditions.
- [4] Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163–169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067.
- [5] Jaquin, P. A., Augarde, C. E., Gallipoli, D., & Toll, D. G. (2009). The strength of unstabilised rammed earth materials. *Géotechnique*, 59(5), 487–490. DOI: 10.1680/geot.2007.00129.
- [6] Cagnon, H., Aubert, J.-E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- [7] Hall, M., & Allinson, D. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935–1942. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.01.007.
- [8] AFNOR (1998). NF P94-068 — Sols : reconnaissance et essais — Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux — Détermination de la valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tache. AFNOR Éditions. Référence actuellement annulée.
- [9] ISO (2014). ISO 17892-2:2014 — Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 2: Determination of bulk density. International Organization for Standardization.

- [10] ISO (2014). ISO 17892-1:2014 — Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content. International Organization for Standardization.
- [11] AFNOR (1996). NF P94-048 — Sols : reconnaissance et essais — Détermination de la teneur en carbonate — Méthode du calcimètre. AFNOR Éditions.
- [12] Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163–169.
- [13] Jaquin, P. A., Augarde, C. E., Gallipoli, D., & Toll, D. G. (2009). The strength of unstabilised rammed earth materials. *Géotechnique*, 59(5), 487–490.
- [14] Cagnon, H., Aubert, J.-E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217.
- [15] Hall, M., & Allinson, D. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935–1942.