



Durabilité, interaction terre–renfort et comportement mécanique des murs en terre à renforts organiques : cas d’une maison traditionnelle Tsimihety à Madagascar

^{1,1}RANDRIANTIANA Jean Charlin, ^{1,2}Lalaina Dina Prisca Rajaonarison, ^{1,3}TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, ^{1,4}RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, ^{1,5}RAJAONARISON Eddie Franck

¹Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d’Antananarivo

RESUME : Dans le contexte de l’amélioration de la résilience des murs en terre renforcés par des matériaux organiques, cette étude vise à évaluer conjointement la durabilité des renforts, leur interaction avec la matrice terreuse, les déplacements structuraux et la sensibilité des paramètres de conception. Les résultats montrent qu’après 100 cycles de mouillage-séchage, le bambou conserve environ 86 % de sa capacité initiale, contre 80 % pour le bois, 75 % pour le sisal et 70 % pour le coir. L’analyse d’arrachement indique qu’une amélioration du coefficient d’interface de 0,25 à 0,55 peut réduire, pour une demande de 20 kN, la longueur d’ancrage d’environ 10 m à 4,5 m. Les déplacements maximaux restent proches de 80 mm pour le bambou, contre environ 100 mm pour le coir, traduisant une rigidité supérieure du premier. L’analyse globale de sensibilité met en évidence des coefficients atteignant 0,60 à 0,70 en valeur absolue pour les paramètres les plus influents. Enfin, l’augmentation de la qualité d’interface et l’optimisation géométrique contribuent à diminuer la longueur requise des renforts et à améliorer la sécurité globale du mur dans les conditions du modèle.

Mots-clés : durabilité ; arrachement ; interface terre–renfort ; analyse de sensibilité ; renforcement organique.

ABSTRACT: In the context of improving the resilience of earthen walls reinforced with organic materials, this study aims to jointly assess the durability of the reinforcements, their interaction with the earthen matrix, structural displacements, and the sensitivity of design parameters. The results show that after 100 wetting–drying cycles, bamboo retains approximately 86% of its initial capacity, compared with 80% for wood, 75% for sisal, and 70% for coir. The pull-out analysis indicates that improving the interface coefficient from 0.25 to 0.55 can reduce, for a 20 kN demand, the anchorage length from approximately 10 m to 4.5 m. Maximum displacements remain close to 80 mm for bamboo, compared with approximately 100 mm for coir, reflecting the higher stiffness of the former. The overall sensitivity analysis highlights coefficients reaching absolute values of 0.60 to 0.70 for the most influential parameters. Finally, improving interface quality and optimizing the geometry contribute to reducing the required reinforcement length and enhancing the overall safety of the wall under the modelled conditions.

Keywords: durability; pull-out; soil–reinforcement interface; sensitivity analysis; organic reinforcement.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22858457>

1 Introduction

La construction en terre, longtemps associée aux savoir-faire vernaculaires, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt en raison de ses faibles besoins de transformation, de sa disponibilité locale et de son potentiel d'intégration dans des stratégies d'habitat bioclimatique. À Madagascar, les recherches sur l'habitat montrent que l'utilisation de matériaux locaux et l'amélioration passive de l'enveloppe peuvent contribuer au confort thermique tout en limitant la dépendance aux solutions énergivores [1]. Dans le contexte des maisons traditionnelles Tsimihety, cette logique présente un intérêt particulier, car elle permet d'envisager l'amélioration des parois en terre sans rompre avec les ressources et principes constructifs locaux. Elle répond également à la nécessité d'adapter l'enveloppe aux variations d'humidité, aux pluies intenses, aux cycles thermiques et aux sollicitations latérales susceptibles d'affecter progressivement sa stabilité. Toutefois, la terre reste un matériau sensible à la variation de sa teneur en eau. Les travaux de Bui et al. [2] ont montré que l'humidité influence directement la résistance à la compression, le module d'élasticité et la succion de la terre compactée. Cette sensibilité devient critique lorsque les murs subissent des alternances répétées d'humidification et de séchage. Les études récentes sur les composites terre-fibres confirment que ces cycles peuvent progressivement modifier les propriétés des matériaux renforcés et affecter leur durabilité [3]. Dans cette perspective, l'introduction de renforts organiques doit être évaluée non seulement à partir de leur résistance initiale, mais également selon leur capacité à conserver leurs performances au cours du vieillissement. Les fibres et éléments végétaux constituent néanmoins une solution prometteuse pour améliorer le comportement des matériaux terreux. La littérature montre que leur incorporation peut agir sur la fissuration, la ductilité, la densité et les caractéristiques hygrothermiques, avec des effets fortement dépendants de la nature, du dosage et de la géométrie du renfort [4]. Les essais réalisés sur des parois en terre compactée renforcées par bambou et coir indiquent également une amélioration du comportement en flexion et une modification des mécanismes de rupture [5]. L'efficacité réelle du renforcement dépend toutefois de la qualité de l'interface avec la matrice. Les essais d'arrachement sur bambou incorporé dans la terre compactée montrent que la longueur d'ancrage, la largeur du renfort, la contrainte normale et la géométrie d'ancrage influencent la capacité mobilisable [6]. La présente étude a ainsi pour objectif d'analyser conjointement la durabilité des renforts organiques, leur résistance à l'arrachement, les déplacements des murs, les paramètres contrôlant la sécurité et la longueur de renforcement nécessaire. Elle cherche plus particulièrement à comparer le bambou, le bois, le sisal et le coir dans une démarche intégrée associant vieillissement hydrique, interaction terre-renfort, réponse mécanique et analyse de sensibilité. L'objectif final est d'identifier les paramètres et les solutions capables d'améliorer la stabilité et la durabilité d'un mur en terre tout en conservant la logique constructive d'une maison traditionnelle Tsimihety à Madagascar.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Les matériels mobilisés dans cette étude ont été définis de manière à assurer la continuité entre les observations du système constructif, la caractérisation des matériaux, l'organisation des données et leur exploitation numérique. Les principaux matériaux étudiés comprennent la terre destinée à constituer la matrice du mur ainsi que plusieurs renforts organiques représentatifs des ressources végétales pouvant être intégrées à ce type de construction, notamment le bambou, le bois, le sisal et le coir. Les informations relatives à leurs caractéristiques géométriques, mécaniques, hydriques et de durabilité ont été regroupées avec les données concernant la géométrie du prototype, l'épaisseur du mur, les conditions d'interface et les sollicitations considérées. Ces données constituent la base des analyses portant sur le vieillissement hydrique, l'arrachement, les déplacements, la sensibilité paramétrique et la longueur requise des renforcements. Le traitement numérique a été réalisé à l'aide d'un environnement informatique reposant principalement sur le langage Python. Ce langage a été retenu pour automatiser les calculs répétitifs, réaliser les analyses paramétriques et probabilistes et assurer la reproductibilité des traitements. La documentation officielle de Python met en évidence son utilisation comme langage généraliste permettant l'intégration de modules spécialisés pour le calcul et le traitement scientifique [7]. Dans la présente étude, les scripts ont notamment servi à comparer les capacités résiduelles des renforts, générer les relations entre déplacement et facteur de sécurité, étudier l'influence des paramètres d'interface et exploiter les séries de résultats nécessaires aux simulations. La bibliothèque NumPy a constitué le support principal des opérations numériques.

Elle permet de représenter efficacement des données sous forme de tableaux multidimensionnels et fournit les opérations nécessaires aux calculs matriciels, aux traitements vectorisés et à la génération de variables numériques. Son rôle central dans l'écosystème scientifique Python est largement documenté dans les travaux de Harris et al. [8]. Elle a ainsi été adaptée aux calculs répétitifs associés aux différentes configurations de renforcement et aux analyses probabilistes, notamment lorsque plusieurs combinaisons de propriétés mécaniques ou géométriques devaient être évaluées. La bibliothèque pandas a été utilisée pour structurer et exploiter les tableaux de résultats. Elle fournit notamment la structure DataFrame, particulièrement adaptée aux données organisées en lignes et colonnes et à leur manipulation statistique [9]. Dans le cadre de l'étude, cet outil a permis de regrouper les propriétés des matériaux, les paramètres de calcul, les valeurs intermédiaires et les résultats obtenus pour le bambou, le bois, le sisal et le coir. Cette organisation facilite les comparaisons entre matériaux ainsi que le transfert des informations vers les procédures de représentation graphique et d'analyse de sensibilité. Les données initiales et les résultats intermédiaires ont parallèlement été conservés dans un classeur Microsoft Excel, utilisé comme support de centralisation et de vérification. Excel permet l'organisation des données sous forme de tableaux, l'utilisation de formules, la production de graphiques et l'analyse de séries structurées [10]. Le classeur a ainsi constitué l'interface entre les données de terrain, les paramètres introduits dans les modèles et les résultats générés par les scripts Python. Une séparation entre données d'entrée, résultats calculés et valeurs conceptuelles a été privilégiée afin d'améliorer la traçabilité des analyses. L'association de ces différents matériels a permis de construire une chaîne de traitement cohérente allant de l'acquisition des informations relatives à la terre et aux renforts organiques jusqu'à l'analyse des résultats. Les données géométriques et matérielles ont été centralisées dans Excel, puis exploitées sous Python afin d'effectuer les calculs, les simulations et les comparaisons. Cette organisation a notamment permis d'étudier l'évolution de la capacité résiduelle sous cycles hydriques, les mécanismes d'arrachement, les champs de déplacement, l'influence des paramètres de conception et les variations de longueur d'ancrage. Elle constitue ainsi un cadre reproductible pour l'évaluation du comportement des murs en terre renforcés appliquée au cas de la maison traditionnelle étudiée.

2.2 Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une démarche comparative et paramétrique permettant d'évaluer conjointement le vieillissement des renforts organiques, leur interaction avec la matrice en terre, les déplacements du mur ainsi que l'influence des principaux paramètres de conception. Les matériaux considérés sont principalement le bambou, le bois, le sisal et le coir. Afin de conserver une cohérence entre les différentes analyses, les propriétés initiales des renforts ont été organisées dans une base de données commune, puis utilisées comme paramètres d'entrée dans les calculs numériques. Les résultats obtenus ont ensuite été normalisés ou comparés à des valeurs de référence afin de mettre en évidence les différences relatives entre les solutions étudiées. L'évaluation de la durabilité a été réalisée à partir d'une procédure de vieillissement hydrique représentée par des cycles successifs de mouillage et de séchage. Cette méthode permet d'étudier la diminution progressive de la capacité mécanique d'un renfort sous l'effet de variations répétées d'humidité. Les travaux de Saliba, Kouta et Saiyouri montrent que les cycles de mouillage-séchage constituent effectivement un mécanisme pertinent pour évaluer l'évolution des performances de composites en terre renforcés par des fibres végétales [11]. Dans la présente étude, la capacité initiale de chaque matériau a été prise comme référence, puis une capacité résiduelle a été estimée en fonction du nombre de cycles et de la durée d'exposition. Cette approche a permis de comparer les tendances de dégradation du bambou, du bois, du sisal et du coir et d'identifier les matériaux présentant la meilleure conservation relative de leurs performances. Les valeurs obtenues doivent néanmoins être interprétées comme des résultats de modélisation comparative tant qu'elles ne sont pas confirmées par des essais accélérés réalisés directement sur les matériaux locaux. L'analyse du comportement à l'arrachement a été conduite en considérant la longueur mobilisable du renfort, la profondeur, les conditions de confinement et les caractéristiques de l'interface terre-renfort. L'objectif consiste à déterminer dans quelle mesure l'effort de traction transmis à un élément organique peut être repris sans glissement excessif ni extraction du matériau. Les travaux expérimentaux et analytiques de Luo et al. consacrés à l'interface entre bambou et terre compactée montrent que la capacité d'arrachement dépend fortement du mécanisme de transfert des efforts à l'interface et que les prédictions analytiques peuvent être confrontées aux mesures expérimentales [12]. Dans les calculs réalisés ici, plusieurs valeurs du coefficient d'interface ont été considérées afin d'étudier leur influence sur la résistance disponible. La procédure a également permis de distinguer une zone active, dans laquelle le renfort traverse la partie

potentiellement mobilisée du massif, et une zone passive assurant l'ancrage. Cette distinction est cohérente avec les principes généraux de dimensionnement des ouvrages en sol renforcé, pour lesquels la résistance à l'arrachement et la longueur résistante constituent des critères essentiels de stabilité interne [15]. L'étude des champs de déplacement et des formes déformées a été réalisée à partir d'une représentation numérique comparative du comportement des différentes configurations de renforcement. Le principe des éléments finis constitue un cadre approprié pour analyser la distribution des contraintes et des déplacements dans les systèmes géotechniques. PLAXIS 2D est notamment conçu pour l'analyse bidimensionnelle des déformations, de la stabilité et des interactions entre le sol et les éléments structuraux [13]. Dans le cadre de cette étude, les courbes comparatives du bambou, du bois, du sisal et du coir ont été exploitées pour apprécier l'influence relative de la rigidité des renforts sur le déplacement horizontal du système. Les valeurs obtenues ont été comparées à différents niveaux de hauteur afin d'identifier le matériau limitant le mieux les déformations. Lorsque les cartes présentées sont générées à partir de scripts paramétriques et non directement extraites d'un calcul PLAXIS calibré, elles doivent être qualifiées de représentations numériques ou pseudo-éléments finis à caractère démonstratif, afin de ne pas les confondre avec des sorties directes d'un logiciel de calcul. L'analyse globale de sensibilité a ensuite été adoptée pour identifier les variables contrôlant principalement la réponse du modèle. Les paramètres étudiés comprennent notamment les caractéristiques de résistance, la longueur de renforcement, la surcharge, la rigidité axiale et les variables liées aux conditions d'interface ou à la réponse thermique. Pour chaque paramètre, les variations ont été confrontées aux réponses constituées par le facteur de sécurité, le déplacement horizontal et la température maximale. Le classement de l'influence a été réalisé à partir de coefficients de corrélation de rang, méthode adaptée lorsque la relation entre une variable d'entrée et une réponse est monotone sans être nécessairement strictement linéaire. Saltelli et Sobol ont montré l'intérêt de la transformation en rangs dans les analyses de sensibilité de modèles numériques lorsque les relations entrée-sortie présentent ce type de comportement [14]. Le signe du coefficient a été utilisé pour identifier le sens de l'influence, tandis que sa valeur absolue a permis de hiérarchiser les paramètres du moins influent au plus déterminant. Enfin, une analyse paramétrique spécifique a été conduite pour évaluer l'influence de la géométrie, de l'interface et de la surcharge sur la longueur requise des renforcements. Plusieurs hauteurs de mur et plusieurs niveaux d'angle ou de coefficient d'interface ont été considérés afin de construire des abaques comparatifs. La longueur nécessaire a été déterminée en recherchant une configuration dans laquelle la partie passive du renfort fournit une résistance suffisante pour reprendre l'effort transmis. Les principes de conception des ouvrages en sol mécaniquement renforcé définissent précisément la longueur de renforcement, la résistance en traction et la résistance à l'arrachement comme des paramètres fondamentaux de la stabilité interne [15]. La surcharge a également été introduite comme variable paramétrique afin d'apprécier son effet sur les contraintes normales et sur la mobilisation de l'interface. Cette procédure a permis de produire des courbes reliant la hauteur, les caractéristiques de frottement, la surcharge et la longueur requise, puis de comparer les quatre matériaux organiques selon leur efficacité relative. Ces méthodes forment une démarche cohérente reliant durabilité, résistance d'interface, déplacement et sensibilité paramétrique. Elle permet de ne pas limiter le choix du renfort à sa seule résistance initiale, mais de considérer également son comportement sous humidité, sa capacité d'ancrage, sa contribution à la limitation des déformations et la sensibilité du système aux paramètres de conception. Les résultats issus de cette démarche constituent ainsi des éléments de comparaison et de pré-dimensionnement. Pour une application définitive à une construction réelle, ils devront être complétés par des essais de laboratoire et, lorsque cela est possible, par une modélisation numérique calibrée sur les propriétés effectivement mesurées des matériaux locaux.

3 Résultats et discussions

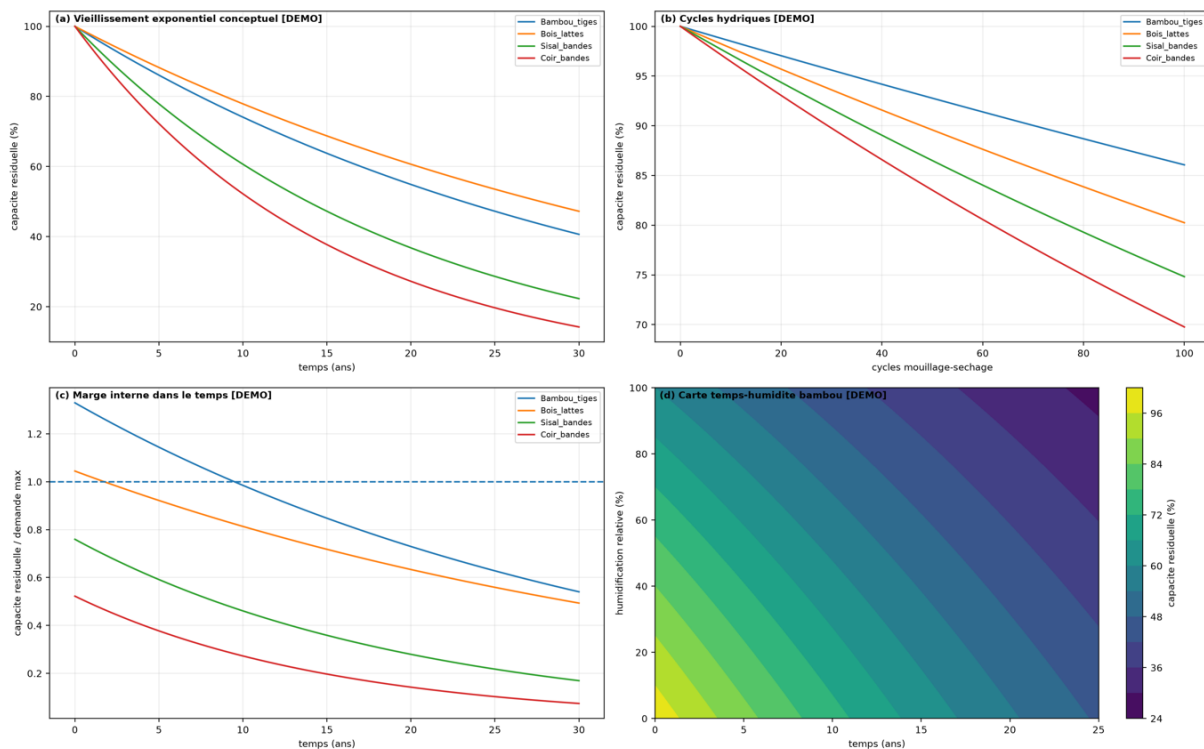
3.1 Résultats

3.1.1 Evolution de la durabilité et de la capacité résiduelle des renforts organiques sous vieillissement et cycles hydriques

La durabilité des matériaux organiques incorporés dans les murs en terre constitue un paramètre déterminant pour apprécier leur comportement à long terme, notamment sous l'effet combiné du vieillissement naturel et des variations répétées d'humidité. La figure suivante présente une analyse conceptuelle comparative de quatre types de renforts organiques, à savoir le bambou, le bois, le sisal et le coir, en considérant l'évolution de leur capacité résiduelle au cours du temps, leur sensibilité aux cycles de mouillage-séchage, la marge de sécurité interne ainsi

que l'effet conjoint du temps et de l'humidité relative sur les performances du bambou. Les résultats doivent être interprétés comme des tendances de comportement permettant d'identifier les matériaux potentiellement les plus durables dans les conditions considérées.

Figure 1: Evolution de la durabilité et de la capacité résiduelle des renforts organiques sous vieillissement et cycles hydriques



Source : Auteur 2026

Interprétation

L'évolution temporelle représentée montre une diminution progressive de la capacité résiduelle pour l'ensemble des matériaux. Après environ 30 ans, le bois conserve une capacité voisine de 47 %, tandis que le bambou se situe autour de 40 %. Le sisal présente une diminution plus importante, avec une capacité résiduelle proche de 22 %, alors que le coir atteint environ 14 %. Ces résultats indiquent que, dans le modèle considéré, le bois et le bambou présentent une meilleure conservation de leurs propriétés à long terme que les fibres de sisal et de coir. La différence devient particulièrement marquée au-delà de 15 à 20 ans, période à partir de laquelle les courbes des différents matériaux s'écartent sensiblement. L'effet des cycles hydriques confirme cette hiérarchie. Après 100 cycles de mouillage-séchage, le bambou conserve approximativement 86 % de sa capacité initiale, contre environ 80 % pour le bois, 75 % pour le sisal et près de 70 % pour le coir. Le bambou apparaît donc comme le matériau le moins sensible aux sollicitations hydriques répétées parmi les solutions comparées. Cette propriété est particulièrement importante pour des murs en terre soumis à des alternances saisonnières d'humidification et de séchage, puisque les variations de teneur en eau peuvent affecter simultanément la matrice terreuse et les renforts végétaux. L'analyse de la marge interne, exprimée par le rapport entre la capacité résiduelle et la demande maximale, met également en évidence une différence importante entre les matériaux. Au début de la période considérée, le bambou présente une marge supérieure à 1,3, tandis que le bois se situe légèrement au-dessus de 1,0. Le sisal et le coir présentent des valeurs initiales plus faibles, respectivement proches de 0,75 et 0,52. La ligne correspondant à une marge égale à 1 représente la limite à partir de laquelle la capacité disponible devient équivalente à la demande. Pour le bambou, cette limite est atteinte approximativement après 9 à 10 ans, alors que le bois passe sous ce seuil après seulement quelques années. Le sisal et le coir restent quant à eux sous la valeur de référence sur l'ensemble de la période représentée. Cette évolution souligne l'importance de prévoir une marge de conception suffisante lorsque des renforts organiques sont destinés à assurer une fonction structurale durable. La carte temps-humidité consacrée au bambou montre enfin que l'augmentation simultanée de la durée d'exposition et de l'humidité relative entraîne une diminution progressive de la capacité résiduelle. Dans les premières années et pour une humidité relativement faible, la capacité reste proche de 90 à 100 %. À l'inverse, après environ 20 à 25 ans sous des humidités relatives élevées, proches de 80 à 100 %, la capacité résiduelle peut

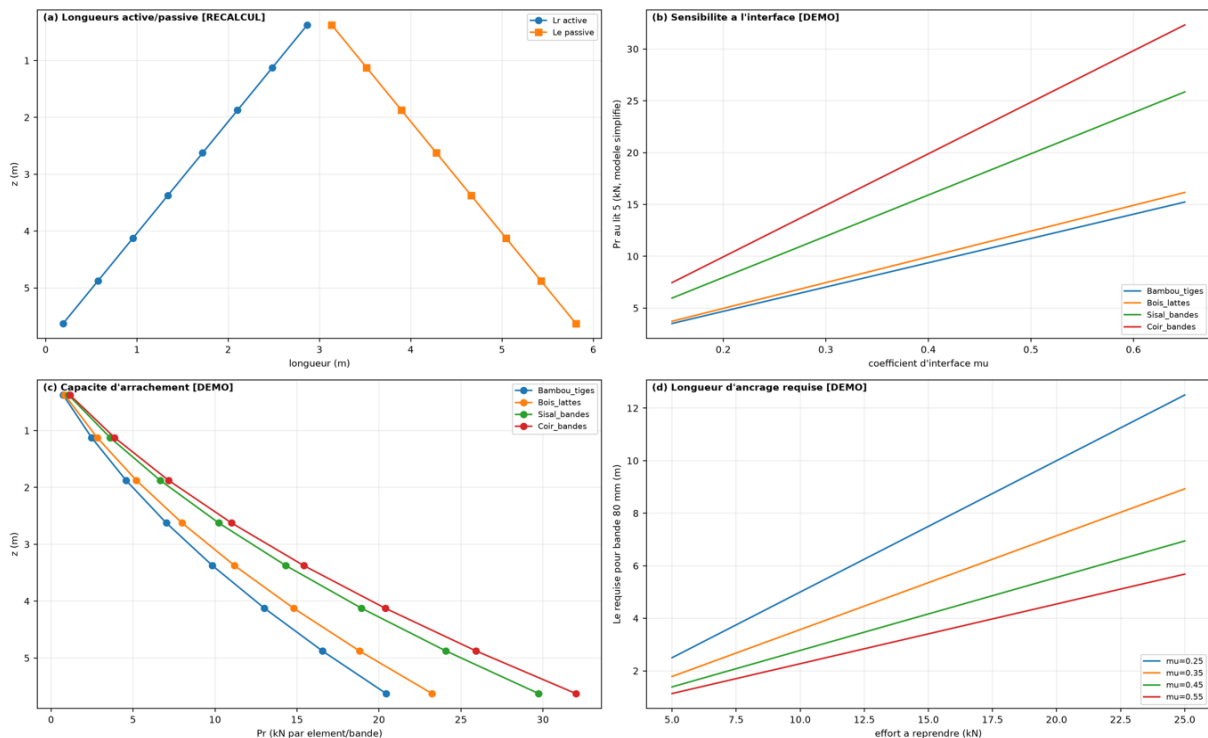
descendre approximativement vers 30 à 40 %. Cette représentation met en évidence le rôle majeur de l'humidité dans l'accélération du vieillissement des renforts végétaux.

Les résultats suggèrent que le bambou présente le comportement le plus favorable parmi les matériaux étudiés en matière de vieillissement et de résistance aux cycles hydriques, tandis que le bois conserve également des performances relativement intéressantes. Le sisal et le coir présentent une dégradation plus rapide dans le scénario considéré. Ces tendances montrent que l'optimisation des murs en terre renforcés ne doit pas se limiter aux performances initiales des fibres, mais intégrer leur évolution dans le temps, leur exposition à l'humidité et les conditions de protection constructive. La limitation des remontées capillaires, la protection contre les pluies battantes, l'utilisation de soubassements adaptés et la maîtrise de l'humidité interne apparaissent ainsi essentielles pour prolonger la durée de service des renforts organiques et maintenir la performance globale du mur.

3.1.2 Comportement à l'arrachement et efficacité de l'interface terre-renfort organique

L'efficacité d'un renforcement organique dans un mur en terre dépend non seulement de la résistance propre du matériau, mais également de la qualité de son interaction avec la matrice terreuse. La résistance à l'arrachement, la longueur effectivement mobilisée et le niveau d'adhérence ou de frottement à l'interface constituent ainsi des paramètres déterminants pour assurer le transfert des efforts entre la terre et le renfort. La figure ci-après présente une analyse comparative de ces mécanismes à travers l'évolution des longueurs active et passive, la sensibilité de la résistance d'interface au coefficient de frottement, la capacité d'arrachement de différents renforts et la longueur d'ancrage nécessaire en fonction de l'effort à reprendre. Les résultats sont de nature conceptuelle et permettent principalement d'identifier les tendances de comportement utiles au dimensionnement.

Figure 2: Comportement à l'arrachement et efficacité de l'interface terre-renfort organique



Source : Auteur 2026

Interprétation

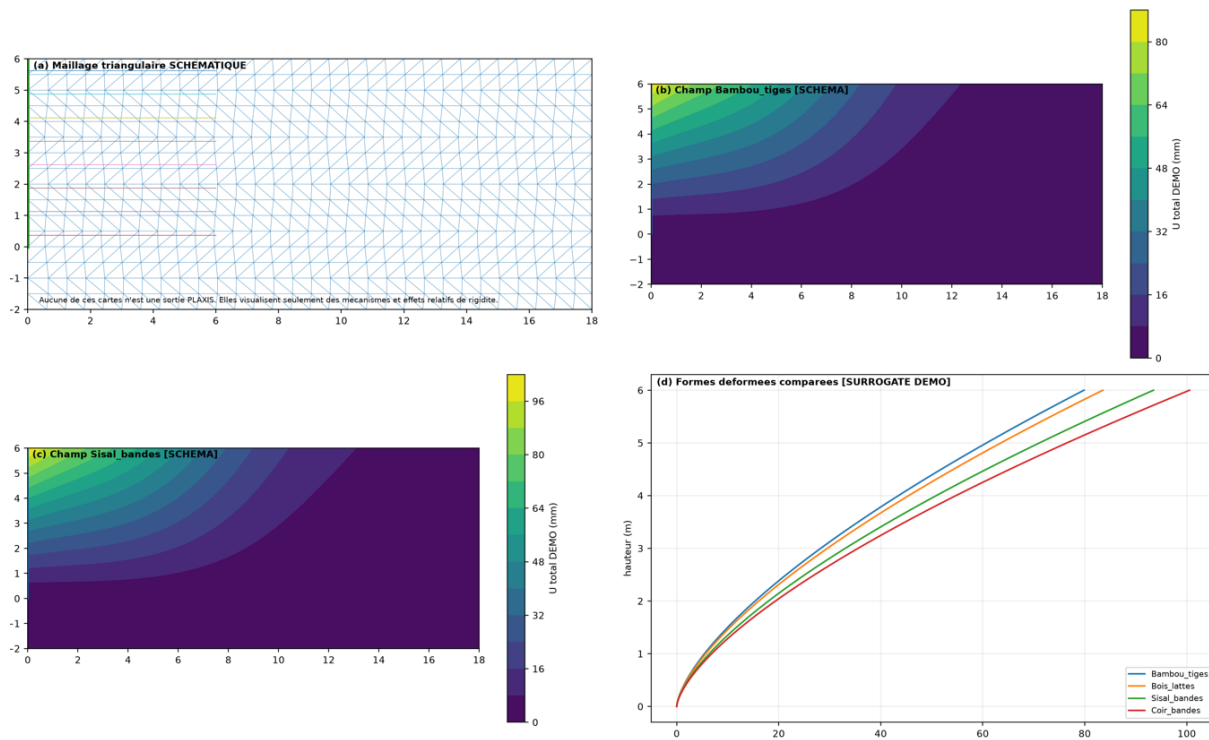
La figure (a) montre que la répartition des longueurs active et passive évolue sensiblement avec la profondeur. Dans la partie supérieure, la longueur active est voisine de 2,8 à 2,9 m, tandis que la longueur passive est d'environ 3,1 m. Lorsque la profondeur augmente, la longueur active diminue progressivement pour atteindre environ 0,2 m vers $z = 5,6$ m, alors que la longueur passive augmente simultanément jusqu'à près de 5,8 m. Cette évolution traduit une mobilisation croissante de la zone d'ancrage avec la profondeur. La partie passive devient ainsi prépondérante dans les niveaux inférieurs, ce qui indique que la stabilité du renfort dépend de plus en plus de la longueur disponible pour transmettre les efforts à la matrice terreuse. La sensibilité de l'interface, représentée en figure (b), met en évidence une augmentation presque linéaire de la résistance à l'arrachement avec le coefficient d'interface μ . Lorsque μ passe approximativement de 0,15 à 0,65, la résistance associée au bambou augmente d'environ 3,5 à 15 kN, tandis que celle du bois évolue approximativement de 3,7 à 16 kN. Les bandes de sisal présentent des valeurs plus élevées, passant d'environ 6 à 26 kN, et le coir atteint les performances les plus

importantes, avec une résistance qui augmente approximativement de 7,5 à plus de 32 kN. Ces résultats montrent que l'amélioration de l'adhérence ou du frottement entre le renfort et la terre peut accroître fortement la capacité de transfert des efforts sans nécessairement augmenter les dimensions du renfort. La figure (c) confirme que la capacité d'arrachement augmente également avec la profondeur d'ancrage. Dans la partie supérieure du modèle, les quatre matériaux présentent des capacités relativement faibles, généralement proches de 1 à 3 kN. À environ $z = 3,4$ m, la résistance atteint approximativement 10 kN pour le bambou, 11 kN pour le bois, 14 kN pour le sisal et 15 à 16 kN pour le coir. Aux profondeurs les plus importantes, proches de 5,5 à 5,6 m, les valeurs atteignent environ 20 à 21 kN pour le bambou, 23 kN pour le bois, 30 kN pour le sisal et près de 32 kN pour le coir. Le coir et le sisal apparaissent donc particulièrement performants du point de vue de la résistance d'interface dans les hypothèses retenues, tandis que le bambou présente la capacité d'arrachement la plus faible malgré ses bonnes performances mécaniques observées dans les analyses précédentes. La longueur d'ancrage requise, présentée en figure (d), dépend simultanément de l'effort à transmettre et du coefficient d'interface. Pour un effort de 5 kN, la longueur nécessaire est d'environ 2,5 m pour $\mu = 0,25$, 1,8 m pour $\mu = 0,35$, 1,4 m pour $\mu = 0,45$ et seulement 1,1 à 1,2 m pour $\mu = 0,55$. Lorsque l'effort atteint 25 kN, ces longueurs augmentent respectivement jusqu'à environ 12,5 m, 8,9 m, 7,0 m et 5,7 m. La tendance est donc claire : plus l'effort à reprendre augmente, plus la longueur d'ancrage nécessaire est importante, tandis qu'une amélioration du coefficient d'interface permet de réduire sensiblement cette longueur. À titre d'exemple, pour une demande de 20 kN, une interface relativement faible avec $\mu = 0,25$ nécessite près de 10 m d'ancrage, alors qu'une interface améliorée à $\mu = 0,55$ réduit cette longueur à environ 4,5 m. Cette différence, supérieure à 50 %, montre que la qualité de contact terre-renfort constitue un levier de conception aussi important que la résistance intrinsèque du matériau organique. Une surface plus rugueuse, une meilleure imprégnation par la matrice ou une géométrie favorisant l'accrochage mécanique peuvent ainsi contribuer à augmenter la mobilisation du renfort.

3.1.3 Analyse comparative des champs de déplacement et des déformées des murs en terre renforcés par matériaux organiques

La modélisation numérique constitue un outil complémentaire pour apprécier la manière dont un mur en terre renforcé redistribue les sollicitations et développe des déplacements sous chargement. La figure ci-dessous présente une pseudo-modélisation par éléments finis à caractère démonstratif, comprenant un maillage triangulaire schématisant le domaine, des champs de déplacement associés à deux configurations de renforcement ainsi qu'une comparaison des formes déformées obtenues pour différents matériaux organiques. L'objectif est principalement de visualiser l'influence relative de la rigidité des renforts sur l'amplitude et la distribution des déplacements, plutôt que de reproduire directement une analyse issue d'un logiciel de calcul géotechnique complet.

Figure 3: Analyse comparative des champs de déplacement et des déformées des murs en terre renforcés par matériaux organiques



Source : Auteur 2026

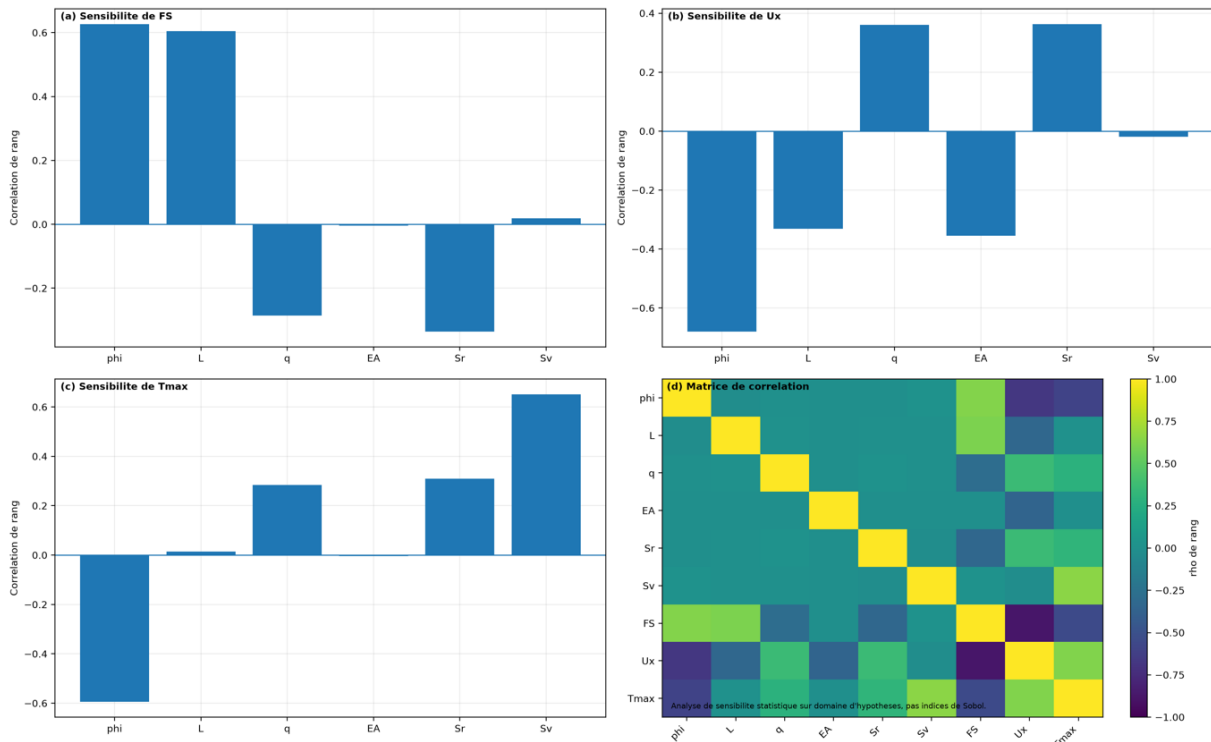
Interprétation

Le maillage représenté en figure (a) couvre un domaine d'environ 18 m de longueur, pour une hauteur analysée allant approximativement de -2 à 6 m. La discrétisation triangulaire permet de représenter spatialement la réponse du système, tandis que les lignes horizontales matérialisent schématiquement différentes zones de renforcement. Une telle organisation permet de suivre les variations de déplacement sur la hauteur et d'identifier les secteurs dans lesquels l'effet des renforts devient le plus important. Le raffinement régulier du maillage donne ici une représentation cohérente des mécanismes relatifs, mais il convient de rappeler qu'il s'agit d'un schéma conceptuel et non d'un maillage calibré à partir d'une étude réelle par éléments finis. Le champ de déplacement associé aux tiges de bambou, présenté en figure (b), montre que les déplacements restent faibles dans la partie inférieure du domaine et augmentent progressivement vers la zone supérieure gauche. Les valeurs maximales se situent approximativement autour de 80 à 85 mm, tandis qu'une grande partie du domaine reste inférieure à 20–30 mm. Cette distribution traduit une meilleure limitation des déplacements lorsque le renforcement offre une rigidité suffisante, particulièrement dans les zones les plus sollicitées. La configuration renforcée par des bandes de sisal, illustrée en figure (c), présente une distribution globalement similaire, mais avec des déplacements plus élevés. Les valeurs maximales atteignent approximativement 95 à 100 mm, contre environ 80 à 85 mm pour le bambou. L'écart de l'ordre de 15 à 20 mm au niveau des zones les plus déformées indique que, dans les hypothèses retenues, le système renforcé par bambou possède une rigidité globale supérieure et limite davantage les déplacements latéraux. Le sisal demeure néanmoins capable de redistribuer les déformations, mais avec une réponse plus souple. La comparaison directe des formes déformées, présentée en figure (d), confirme cette tendance. Les déplacements augmentent progressivement avec la hauteur et atteignent leur maximum vers 6 m. À cette hauteur, la configuration avec bambou présente un déplacement horizontal proche de 80 mm, suivie du bois en lattes avec environ 84 à 85 mm. Le sisal atteint approximativement 94 mm, tandis que le coir présente la déformation la plus élevée, voisine de 100 mm. Le classement obtenu est donc, du plus rigide au plus déformable dans ce modèle, bambou, bois, sisal puis coir. L'écart entre les courbes devient progressivement plus marqué avec la hauteur. Dans la partie basse, les déplacements restent relativement proches, alors qu'au sommet la différence entre le bambou et le coir atteint environ 20 mm, soit une augmentation du déplacement de l'ordre de 25 % pour le coir par rapport au bambou. Ce comportement montre que le choix du renfort devient particulièrement important dans les zones où les sollicitations latérales produisent les plus fortes déformations. Une rigidité plus élevée contribue à réduire le déplacement global, tandis qu'un matériau plus souple peut accepter une déformation plus importante tout en participant au contrôle de la fissuration.

3.1.4 Analyse globale de sensibilité des paramètres influençant la sécurité, les déplacements et la réponse thermique du mur

L'analyse de sensibilité globale permet d'identifier les paramètres qui exercent l'influence la plus importante sur les réponses du modèle. Les variables d'entrée considérées sont ϕ , L , q , E_A , S_r et S_v , tandis que les grandeurs de réponse étudiées sont le facteur de sécurité FS , le déplacement horizontal U_x et la température maximale T_{max} . La figure suivante présente les coefficients de corrélation de rang obtenus entre les paramètres qui peuvent être notés directement sous la forme : ϕ ; L ; q ; E_A ; S_r ; S_v et les variables de réponse sous la forme : FS ; U_x ; T_{max} .

Figure 4: Analyse globale de sensibilité des paramètres influençant la sécurité, les déplacements et la réponse thermique du mur



Source : Auteur 2026

Interprétation

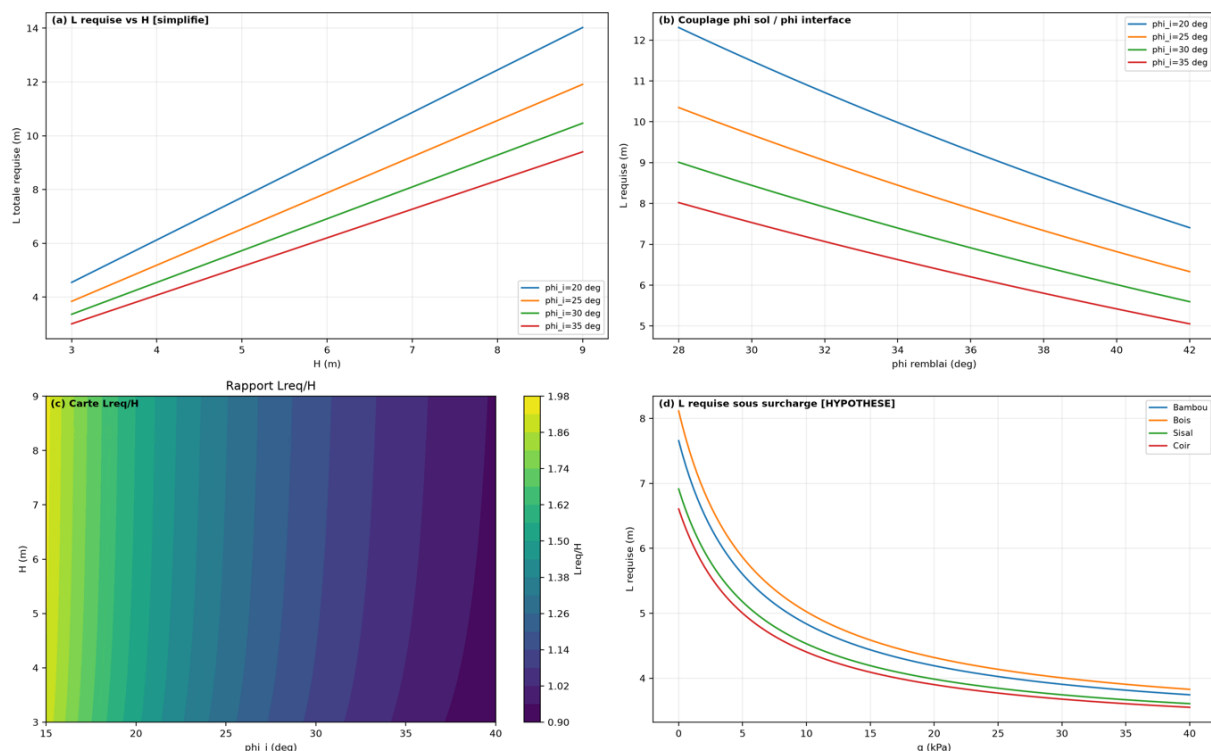
Pour le facteur de sécurité FS , les paramètres les plus influents sont ϕ et L , avec des coefficients de corrélation de rang respectivement proches de +0,62 et +0,60. Ces corrélations positives indiquent qu'une augmentation de ϕ ou de L tend à accroître le facteur de sécurité dans le domaine étudié. À l'inverse, q et S_r présentent des corrélations négatives, respectivement proches de -0,29 et -0,34, ce qui signifie que leur augmentation tend à réduire la marge de sécurité. Les paramètres E_A et S_v présentent une influence très faible sur FS , avec des coefficients voisins de zéro. Pour le déplacement horizontal U_x , le paramètre ϕ constitue la variable dominante, avec une corrélation négative proche de -0,69. Une augmentation de ϕ est donc associée à une diminution importante du déplacement horizontal. Les paramètres L et E_A présentent également des corrélations négatives, de l'ordre de -0,33 et -0,35. À l'inverse, q et S_r possèdent des corrélations positives proches de +0,36, traduisant une augmentation du déplacement lorsque ces paramètres augmentent. L'influence de S_v demeure pratiquement négligeable. La température maximale T_{max} est principalement sensible aux paramètres S_v et ϕ . Le coefficient associé à S_v atteint environ +0,65, indiquant une influence positive importante sur la température maximale. À l'inverse, ϕ présente une corrélation d'environ -0,60. Les paramètres q et S_r exercent des influences positives intermédiaires, respectivement proches de +0,28 et +0,31, tandis que L et E_A ont une influence très limitée sur T_{max} . La matrice de corrélation confirme également une relation inverse importante entre le facteur de sécurité et le déplacement horizontal. La corrélation entre FS et U_x est proche de -0,90, ce qui indique que l'augmentation du déplacement est généralement associée à une diminution de la marge de sécurité. Cette relation permet de considérer U_x comme un indicateur complémentaire pertinent pour apprécier la réponse mécanique globale du mur. Dans l'ensemble, ϕ apparaît comme le paramètre le plus transversal puisqu'il influence simultanément FS , U_x et T_{max} , avec des coefficients pouvant atteindre environ 0,60 à 0,70 en valeur absolue. Les paramètres L , q , S_r et S_v présentent des

influences plus spécifiques selon la réponse étudiée, tandis que EA apparaît globalement moins déterminant dans le domaine d'analyse considéré.

3.1.5 Influence de la géométrie, des paramètres d'interface et de la surcharge sur la longueur requise des renforts organiques

La détermination de la longueur nécessaire des renforts constitue un paramètre essentiel pour assurer un transfert efficace des efforts entre la matrice terreuse et les éléments organiques incorporés au mur. La figure suivante présente plusieurs abaques permettant d'apprécier l'influence de la hauteur du système, de l'angle de frottement à l'interface, de l'angle de frottement du remblai ainsi que de la surcharge appliquée sur la longueur requise de renforcement. Les quatre représentations permettent ainsi d'identifier les paramètres géométriques et mécaniques susceptibles de contrôler le dimensionnement des dispositifs d'ancrage.

Figure 5: Influence de la géométrie, des paramètres d'interface et de la surcharge sur la longueur requise des renforts organiques



Source : Auteur 2026

Interprétation

La figure (a) met en évidence une augmentation pratiquement linéaire de la longueur requise avec la hauteur H. Pour un angle d'interface $\phi_i = 20^\circ$, la longueur nécessaire passe approximativement de 4,6 m pour H = 3 m à près de 14,0 m pour H = 9 m. Lorsque ϕ_i augmente, la longueur nécessaire diminue sensiblement : pour H = 9 m, elle est d'environ 11,9 m à $\phi_i = 25^\circ$, 10,5 m à $\phi_i = 30^\circ$ et 9,4 m à $\phi_i = 35^\circ$. Cette évolution montre qu'une augmentation de la hauteur accroît les sollicitations à reprendre, tandis qu'une interface présentant de meilleures caractéristiques de frottement permet de limiter la longueur d'ancrage nécessaire.

La figure (b) confirme l'effet favorable du couplage entre l'angle de frottement du sol et celui de l'interface. Lorsque l'angle de frottement du remblai augmente approximativement de 28° à 42° , la longueur requise diminue pour toutes les valeurs de ϕ_i . Pour $\phi_i = 20^\circ$, elle passe ainsi d'environ 12,3 m à 7,4 m. Pour $\phi_i = 35^\circ$, elle diminue d'environ 8,0 m à 5,0 m sur le même intervalle. Une amélioration simultanée du frottement interne de la terre et de l'adhérence terre-renfort permet donc de mobiliser plus efficacement la résistance disponible et de réduire les dimensions nécessaires du système d'ancrage.

La carte présentée en figure (c) exprime cette tendance à travers le rapport entre la longueur requise et la hauteur, noté L_{req}/H . Pour un angle d'interface voisin de 15° , ce rapport atteint environ 1,9 à 2,0, alors qu'il diminue progressivement vers 1,5 à 1,6 pour $\varphi_i \approx 20^\circ$, environ 1,3 pour $\varphi_i \approx 25^\circ$, puis près de 1,0 à 1,1 pour φ_i compris entre 35° et 38° . Aux valeurs les plus élevées de l'angle d'interface, proches de 40° , le rapport devient voisin de 0,9. Les bandes presque verticales de la carte montrent que, dans le modèle simplifié considéré, le rapport L_{req}/H dépend principalement de l'angle d'interface et relativement peu de la hauteur elle-même. Cette représentation constitue ainsi un abaque pratique pour estimer rapidement la proportion de longueur de renforcement nécessaire par rapport à la hauteur étudiée.

La figure (d) analyse enfin l'influence d'une surcharge q sur la longueur nécessaire pour quatre types de renforts organiques. Dans l'hypothèse adoptée par le modèle, l'augmentation de q entraîne une diminution progressive de la longueur requise. À $q = 0$ kPa, les longueurs sont approximativement de 7,7 m pour le bambou, 8,1 m pour le bois, 6,9 m pour le sisal et 6,6 m pour le coir. À $q = 20$ kPa, elles diminuent respectivement vers 4,2 m, 4,3 m, 4,0 m et 3,9 m. Pour une surcharge de 40 kPa, les valeurs se rapprochent d'environ 3,7 à 3,8 m pour le bambou et le bois, 3,6 m pour le sisal et 3,5 m pour le coir. Dans ce modèle, cette évolution traduit l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de la contrainte normale améliore la mobilisation du frottement à l'interface et permet ainsi de transmettre un même effort sur une longueur plus faible.

La comparaison entre les matériaux montre que le coir et le sisal nécessitent les longueurs d'ancrage les plus faibles dans les hypothèses retenues, alors que le bois et le bambou demandent des longueurs légèrement supérieures. Cette différence est cohérente avec les analyses précédentes relatives à l'arrachement, où les matériaux fibreux présentaient une capacité d'interface relativement élevée. Elle ne signifie toutefois pas que ces renforts sont globalement supérieurs au bambou ou au bois, car le choix final doit également intégrer leur rigidité, leur résistance mécanique, leur durabilité et leur sensibilité à l'humidité.

3.2 Discussions

Les résultats obtenus montrent que la performance des murs en terre renforcés dépend conjointement de la durabilité des matériaux organiques, de la qualité de l'interface terre-renfort et de la capacité du système à limiter les déformations. Après 100 cycles de mouillage-séchage, le bambou conserve environ 86 % de sa capacité initiale, contre 80 % pour le bois, 75 % pour le sisal et 70 % pour le coir. Cette tendance met en évidence une meilleure stabilité relative du bambou face au vieillissement hydrique dans les hypothèses retenues, tout en confirmant la nécessité d'une protection efficace contre l'humidité pour assurer la durabilité des renforts. L'analyse de l'arrachement montre également que la performance ne dépend pas uniquement de la résistance propre du matériau. Pour une demande de 20 kN, l'augmentation du coefficient d'interface de 0,25 à 0,55 permet de réduire la longueur d'ancrage nécessaire d'environ 10 m à 4,5 m. La qualité du contact entre la terre et le renfort constitue donc un paramètre déterminant pour améliorer le transfert des efforts et limiter la quantité de matériau nécessaire. Les résultats relatifs aux déplacements confirment cette différenciation entre les solutions étudiées. Le bambou présente un déplacement maximal proche de 80 mm, contre environ 100 mm pour le coir, traduisant une rigidité globale plus favorable. L'analyse de sensibilité montre par ailleurs que certains paramètres présentent des coefficients atteignant 0,60 à 0,70 en valeur absolue, ce qui indique qu'ils contrôlent fortement la sécurité et les déformations du système. Ces résultats montrent qu'aucun critère ne doit être considéré isolément. Le choix du renfort doit intégrer simultanément sa résistance, sa durabilité, son comportement d'interface et son influence sur les déplacements. Les valeurs obtenues constituent toutefois des tendances de modélisation qui devront être confirmées par des essais expérimentaux sur les matériaux réellement disponibles dans la zone d'étude.

4 Conclusion

Les analyses réalisées montrent que le comportement des murs en terre renforcés par des matériaux organiques dépend fortement de l'interaction entre durabilité, qualité de l'interface et rigidité du renforcement. Parmi les matériaux étudiés, le bambou présente les performances les plus favorables dans les conditions considérées, avec une capacité résiduelle d'environ 86 % après 100 cycles de mouillage-séchage et un déplacement maximal proche de 80 mm, inférieur à celui observé pour le coir, voisin de 100 mm. L'étude de l'arrachement confirme également l'importance des propriétés d'interface. Pour une sollicitation de 20 kN, l'amélioration du coefficient d'interface de 0,25 à 0,55 permet de réduire la longueur d'ancrage nécessaire d'environ 10 m à 4,5 m, ce qui met en évidence l'intérêt d'un contact terre-renfort suffisamment mobilisable. L'analyse de sensibilité montre par ailleurs que certains paramètres présentent des coefficients de l'ordre de 0,60 à 0,70 en valeur absolue, traduisant leur influence importante sur la sécurité et les déformations du système. Ces résultats confirment que le choix d'un renfort organique ne doit pas reposer sur un seul critère, mais sur une appréciation simultanée de sa résistance, de sa

durabilité, de son comportement à l'interface et de son aptitude à limiter les déplacements. Cette approche intégrée permet d'orienter la conception vers des murs en terre plus fiables et mieux adaptés aux sollicitations hydriques et mécaniques. Les résultats obtenus constituent toutefois une base de comparaison et de prédimensionnement qui devra être complétée par des essais expérimentaux sur les matériaux locaux afin de valider les paramètres utilisés et d'affiner les recommandations constructives.

REFERENCES

- [1] . Razanamanampisoa, H., Randriamanantany, Z. A., Rakotondramiarana, H. T., Garde, F., & Boyer, H. (2013). Simulation of a typical house in the region of Antananarivo, Madagascar: Determination of passive solutions using local materials..
- [2] 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.
- [3] Saliba, J., Kouta, N., & Saiyouri, N. (2024). Effect of wetting/drying cycles on the durability of flax fibers reinforced earth concrete. *Construction and Building Materials*, 445, 137924.
- [4] Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.
- [5] Tripura, D. D., Gupta, S., Debbarma, B., & Raavi, S. S. D. (2020). Flexural strength and failure trend of bamboo and coir reinforced cement stabilized rammed earth wallettes. *Construction and Building Materials*, 242, 117986.
- [6] Luo, Y., Ye, C., Zhong, H., Ni, P., Li, W., & Zeng, Z. (2025). Pullout capacity at the bamboo reinforcement–compacted earth interface. *Geosynthetics International*, 32(3), 382–393.
- [7] Python Software Foundation. Python Documentation. Documentation officielle du langage Python.
- [8] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [9] McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51–56.
- [10] Microsoft Corporation. Excel Help & Learning: Data Organization, Analysis and Visualization. Documentation officielle Microsoft Excel.
- [11] Saliba, J., Kouta, N., & Saiyouri, N. (2024). Effect of wetting/drying cycles on the durability of flax fibers reinforced earth concrete. *Construction and Building Materials*, 445, 137924.
- [12] Luo, Y., Ye, C., Zhong, H., Ni, P., Li, W., & Zeng, Z. (2025). Pullout capacity at the bamboo reinforcement–compacted earth interface. *Geosynthetics International*, 32(3), 382–393.
- [13] Bentley Systems. PLAXIS 2D: Geotechnical Engineering Software. Documentation officielle relative à la modélisation par éléments finis des déformations, de la stabilité et des interactions sol–structure.
- [14] Saltelli, A., & Sobol', I. M. (1995). About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(3), 225–239. DOI: 10.1016/0951-8320(95)00099-2.
- [15] Berg, R. R., Christopher, B. R., & Samtani, N. C. (2009). Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I. FHWA-NHI-10-024, Federal Highway Administration, National Highway Institute.