



HAL
open science

Analyse de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression du pisé non stabilisé

Eluckkiya Angalakurichi Nallasamy

► **To cite this version:**

Eluckkiya Angalakurichi Nallasamy. Analyse de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression du pisé non stabilisé. Architecture, aménagement de l'espace. 2022. dumas-04473372

HAL Id: dumas-04473372

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04473372>

Submitted on 22 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Analyse de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression du pisé non stabilisé



Eluckkiya ANGALAKURICHI NALLASAMY
DSA Architecture de terre
2020-2022

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE
BP 2636 - 60, avenue de Constantine - 38036 GRENOBLE Cedex 2

Analyse de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression du pisé non stabilisé.

Eluckkiya ANGALAKURICHI NALLASAMY

Architecte

Mémoire de Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement
architecture de Terre - mention patrimoine - promotion 2020-2022

Soutenance : Grenoble, 14 décembre 2022

Directrice d'étude

Halimatou MAMA HAWAL
Maître de Conférences en HCA - ENSAG
Coordinatrice DSA architecture de terre - CRAterre

Membres du jury

Martin POINTET
Architecte
Maître de conférences en Sciences et Techniques pour l'Architecture
ENSAG-CRAterre

Laetitia FONTAINE
Ingénieure de recherche / CRAterre-AE&CC-ENSAG/UGA
Directrice / amàco

Florent VIEUX-CHAMPAGNE
Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes, UFR Phitem
Laboratoire 3SR

Yannick SIEFFERT
HDR, Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes, UFR Phitem
Laboratoire 3SR

RÉSUMÉ

Analyse de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression du pisé non stabilisé.

Le pisé (RE) est l'une des techniques traditionnelles de construction en terre crue. Elle est considérée comme une méthode de construction durable car elle utilise une ressource locale, réversible et peu transformée et elle laisse une empreinte carbone très faible. Le processus de construction consiste à compacter le matériau de terre avec une faible teneur en eau optimale dans un coffrage. Le coffrage est retiré immédiatement une fois que le mur a atteint la hauteur souhaitée.

La résistance à la compression de RE est l'une des principales caractéristiques mécaniques prises en compte lors de la conception de structures porteuses. Elle est déterminée en testant des échantillons cylindriques représentatifs de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur dans des conditions de laboratoire pour la compression. La représentativité de ces échantillons cylindriques par rapport aux murs du site est influencée non seulement par l'hétérogénéité du matériau mais aussi par la nature de sa fabrication.

Cette étude a pour but d'évaluer la relation entre la résistance à la compression des échantillons de RE de différentes tailles et d'analyser ainsi la représentativité des échantillons de laboratoire, c'est-à-dire des cylindres de taille 16/32. L'établissement de cette relation est essentiel car la fabrication d'échantillons de grande taille prend du temps et est coûteuse pour déterminer la résistance à la compression de la terre fournie pour les petits projets de construction.

Les échantillons RE de 5 tailles différentes ont été fabriqués pour subir un test de compression uniaxial jusqu'à la rupture. En dehors des cylindres typiques (C_R) de taille 16/32 cm, des prismes RE de 20/20/40 cm (P20), 30/30/60 cm (P30), 50/50/100 cm (P50) et 80/50/160 cm (P80) ont été fabriqués en laboratoire. Tous les échantillons de P80, P50, P30 ont été fabriqués avec le même protocole pour la distribution granulométrique de la terre, le coffrage, le compactage et la teneur en eau de fabrication. Alors que P20 et C suivent un protocole différent pour la granulométrie afin de respecter la proportion granulométrie/taille de l'échantillon. Tous les échantillons ont été pesés périodiquement pour enregistrer la perte de masse pendant le processus de séchage.

La résistance à la compression des échantillons de RE a diminué avec l'augmentation de leur taille. Cependant, l'échantillon comparativement le plus grand de cette campagne expérimentale a été testé avant qu'il ne soit complètement séché. Par conséquent, une étude séparée pour examiner l'effet de la teneur en eau de l'essai est nécessaire pour arriver à l'effet d'échelle pur entre les échantillons.

Mots clés : pisé non stabilisée, résistance à la compression uniaxiale. Effet d'échelle, échantillons cylindriques, échantillons prismatiques, teneur en eau de fabrication, teneur en eau d'essai.

REMERCIEMENTS

Je suis heureuse d'avoir participé au programme de stage de recherche proposé et soutenu par le Laboratoire 3SR-UGA, BE terre, CRA terre, AE&CC -ENSAG et le CNRS. Le projet de stage et le parcours ont été si riches que j'ai pu les développer dans mon mémoire académique.

Je remercie mes maîtres de stage Florent VIEUX CHAMPAGNE, Martin POINET, Yann MALECOT et Yannick SIEFFERT pour leur soutien, leur facilité d'approche et la flexibilité de leur environnement de travail.

Je tiens à remercier mes collègues Antoine CHARBONNIER, Halfdanson JEAN, Mhlengi Khaya Luke MASANGO et Valentin RASPAIL pour avoir partagé une atmosphère de travail positive. Je ne pourrais pas imaginer trouver des solutions aux problèmes techniques sans nos discussions à la pause café. Merci beaucoup pour tous vos grands "OUI" souriants pour m'aider dans le laboratoire.

Sans Anthony ZALZAL, Antoine BRETON, Carine GALICHET, Hiep DO, Leonardo EGAS et Suryanarayanan BALASUBRAMANIAN, les échantillons de grande taille n'auraient pas été fabriqués et testés. Je leur exprime ma gratitude pour leur volonté totale de participer à ce processus.

J'ai la chance d'avoir Halimatou MAMA AWAL comme conseillère académique. Ses conseils ont été précieux pour me maintenir sur la bonne voie. Merci beaucoup pour son orientation dès le début du processus.

Je profite de cette occasion pour remercier l'équipe de la bourse MOPGA pour avoir financé ma participation au programme DSA terre 2020-2022. Les amitiés et les connexions professionnelles que j'ai nouées au CRA terre et autour de lui sont précieuses. Il s'agit sûrement d'une autre étape importante dans mon parcours personnel et professionnel.

Merci à tous mes professeurs au CRA terre et à mes collègues de la promotion 2020-2022 pour leur soutien tout au long du cours.

Enfin, un grand merci à Alarmeluvalli.S et Elizabeth GRAFF pour m'avoir aidée à organiser le rapport. Elles ont eu la gentillesse de me consacrer du temps même après un avis de dernière minute.

TABLE DES MATIÈRES

I. INTRODUCTION	1
1. La construction en terre - un aperçu	1
1.1 Importance du sujet de l'étude	2
2. Le pisé - un aperçu	3
2.1 Caractéristiques mécaniques du pisé	4
2.2 Production d'échantillons de RE pour l'essai de compression uniaxiale et enjeux	4
3. Plan d'étude	5
4. Revue de la littérature	6
4.1 Teneur en humidité et succion	6
4.2 Forme géométrique et taille des échantillons	6
4.3 la vitesse de chargement par rapport à la résistance à la compression dans l'essai de compression uniaxiale de RE	6
4.4 Effet d'échelle	7
4.5 Conclusion	8
II. MÉTHODES ET PROCÉDURE	9
5. Présentation de l'étude de cas	9
6. Caractérisation de la terre prélevée pour l'étude	11
7. Teneur en eau de fabrication	12
7.1 Résultats des tests Proctor	13
8. Calcul de la teneur en eau de fabrication	13
8.1 Méthode 1	14
8.2 Méthode 2	15
9. Préparation des échantillons pour l'essai de compression	15
9.1 Surface	15
9.2 La vitesse de chargement	15
9.3 Presse d'essai	16
III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	17
10. Interprétation des résultats des tests de compression	17
10.1 Nombre d'échantillons et codification	17
10.2 Effet de la teneur en eau de fabrication	18
10.3 Influence de la géométrie	19

10.4 Influence du matériau des coffrage	19
10.5 Influence de la répartition granulométrique	20
10.6 Effet d'échelle	21
IV. LIMITATIONS DE L'ÉTUDE	22
V. CONCLUSIONS	22
VI. RÉFLEXIONS ET PERSPECTIVES PERSONNELLES	23
VII BIBLIOGRAPHIE	26
ANNEXE	28
A.Outils utilisés et dispositif expérimental	28
B.Caractérisation de la terre utilisée pour la fabrication de l'échantillon	30
C. British standard light compaction test	32
D.Calcul de la MWC selon la (8.1) Méthode 1	33
E. Calcul de la résistance à la compression des échantillons cylindriques et prismatiques	33
F. Échantillons testés avec le modèle de la fissuration-P80	36
P50-A	37
P50-B	38
P20	39
C_R	40
C_G-A	41
C_G-B	42
C_TE-A	43
C_TE-B	44
C_CM	45
C_CO	46

LISTE DES FIGURES

<i>Fig 1 : Roue des différentes techniques de construction en terre</i>	1
<i>Fig 2 : Étapes de la construction d'un mur en pisé</i>	3
<i>Fig 3 : Échantillons cylindriques fabriqués en laboratoire</i>	4
<i>Fig 4 : Découpe d'un muret réalisée sur place et transportée au laboratoire</i>	4
<i>Fig 5 : Schéma de l'analyse de la problématique</i>	5
<i>Fig 6 : Différence de confinement avec les échantillons de différentes tailles</i>	7
<i>Fig 7 : Schéma du protocole de production des échantillons</i>	10
<i>Fig 8 : Terre utilisée pour les expériences</i>	11
<i>Fig 9 : Distribution granulométrique de la terre utilisée pour les expériences</i>	11
<i>Fig 10 : Représentation de la compaction des grains de sol</i>	12
<i>Fig 11 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau de la terre utilisée pour l'expérience</i>	13
<i>Fig 12 : Teneur en eau de fabrication des échantillons testés</i>	14
<i>Fig 13 : Surfaçage en cire</i>	15
<i>Fig 14 : Échantillons prismatiques avec surfaçage en béton armé</i>	15
<i>Fig 15 : Presse utilisée pour l'essai uniaxial sur des échantillons prismatiques</i>	16
<i>Fig 16 : Essai INSTRON de compression de 100 kN</i>	16
<i>Fig 17 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec des échantillons cylindriques de différents MWC</i>	18
<i>Fig 18 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec l'échantillon prismatique P20</i>	19
<i>Fig 19 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec les échantillons cylindriques de coffrage métallique</i>	19
<i>Fig 20 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec des échantillons cylindriques de différents granulométrie</i>	20
<i>Fig 21 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparés entre les échantillons prismatiques des trois tailles différentes testées</i>	21

<i>Fig 22 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec P20 et P50-B</i>	21
<i>Fig 23 : Vue d'une résidence en pisé à Bangalore, en Inde</i>	25
<i>Fig 24 : Coffrage en carton (16/32)</i>	28
<i>Fig 25 : Coffrage métallique (16/32)</i>	28
<i>Fig 26 : Fouloir pneumatique utilisé pour les P80, P50 et P30</i>	28
<i>Fig 27 : Petit fouloir pneumatique de P20 et C</i>	28
<i>Fig 28 : Échantillons prismatiques séchant dans la salle chauffée</i>	28
<i>Fig 29 : Assemblage des P80 et P50 pour l'essai de compression</i>	29
<i>Fig 30 : Socle en béton fabriqué pour atteindre la hauteur souhaitée lors de l'essai de compression de P80 et P50</i>	29

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Code et nombre d'échantillons</i>	17
<i>Tableau 2 : Détails de MWC des cylindres de référence et de deux autres cylindres de série dont MWC varie par rapport à celle du cylindre de référence.</i>	18

ABBREVIATIONS

Laboratoire 3SR	- Laboratoire de Sols, Solides, Structures, Risques
UGA	- Université Grenoble-Alpes
BE terre	- Bureau d'Etude terre
CRA terre	- Centre international de la construction en terre
AE-CC	- Unité de recherche "Architecture, Environnement et Culture Constructive"
ENSAG	- École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble
IUT	- Institut Universitaire de Technologie
CNRS	- Centre Nationale de la Recherche Scientifique
RE	- Rammed Earth
UCS	- Uniaxial Compressive Strength
CS	- Compression Strength
OMC	- Optimum Moisture Content
MWC	- Manufacturing Water Content
TWC	- Testing Water Content
CBR mold	- California Bearing mold
BS light compaction test	- British Standard light compaction test

plasticité. Pour identifier l'état humide, on peut prendre une poignée de terre et la comprimer entre les mains. Si cette boule se brise en quelques morceaux en la laissant tomber d'une certaine hauteur, alors la terre est humide.

L'état plastique :Techniques : 6,7,8,9,10.Teneur en eau : 15-30%. A l'état plastique, la terre est aussi malléable que la pâte à modeler. Il est facile de faire une boule de terre qui ne colle pas aux doigts.

L'état visqueux :Techniques : 8,9,10.Teneur en eau : 15-35%. La terre visqueuse colle aux doigts mais ne glisse pas très facilement. Il est très difficile, voire impossible, de former une boule avec cette terre.

État liquide :Techniques : 11,12. La terre est complètement dispersée dans l'eau et forme un liant très liquide et fluide.

Parmi les 12 techniques possibles, les systèmes courants de construction en terre sont la maçonnerie de blocs de terre, le pisé, le torchis et la bauge. De nombreuses études sur les caractéristiques et l'évolution de chaque technique sont disponibles dans la littérature. Les avantages d'une structure en terre conçue de manière appropriée comprennent une faible empreinte carbone, une meilleure qualité de la température intérieure et une réduction des coûts d'entretien du bâtiment. Malgré ces avantages, son utilisation a diminué au fil du temps. Au XVIIIe siècle, la révolution industrielle a contribué à la disponibilité accrue de matériaux fabriqués industriellement. Ces matériaux aux propriétés mécaniques améliorées ont écarté la terre du secteur de la construction principale.

Ces dernières années, la prise de conscience des avantages environnementaux de la construction en terre a augmenté en raison du scénario du réchauffement climatique et de la forte consommation d'énergie de l'industrie de la construction. En même temps, le secteur de la construction en terre doit faire face à de nombreux défis pour être considéré comme un matériau contemporain. L'un de ces défis est le contrôle de la qualité du matériau ou de la technique car il est non industrialisé et diversifié dans différentes parties du monde.

Les standards et les documents normatifs pour assurer la conception correcte des bâtiments en terre sont utilisés dans quelques pays. Cependant, il n'existe pas de procédures de test en laboratoire uniformes et internationalement acceptées pour déterminer les propriétés des matériaux et les valeurs de conception pour la construction de bâtiments en terre. Les procédures de test actuellement utilisées ont souvent été développées à l'origine pour tester les sols (mécanique des sols) ou le béton et n'ont pas pris en compte les propriétés spécifiques des matériaux en terre. L'adéquation de ces procédures "adoptées" pour les matériaux et systèmes de construction en terre reste à prouver [Schroeder, H. (2012)].

1.1 Importance du sujet de l'étude

Cette étude tente de répondre à une question concernant les procédures d'essai en laboratoire de RE (Rammed Earth ou pisé) pour déterminer la résistance à la compression. La principale caractéristique mécanique de RE considérée pour la conception des éléments porteurs de la structure est la résistance à la compression, qui est actuellement obtenue en effectuant des essais de compression uniaxiale jusqu'à la rupture sur des spécimens

cylindriques de taille 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur . Cependant, la représentativité de ces petites éprouvettes par rapport à un élément de mur à l'échelle réelle est obscure. Une campagne expérimentale a donc été mise en place pour étudier cette question.

2. Le pisé - un aperçu

Le pisé est l'une des techniques traditionnelles de construction en terre. Elle est considérée comme une méthode de construction durable car elle utilise une ressource locale, réversible et peu transformée et elle laisse une empreinte carbone très faible. Le processus de construction implique la compression du matériau de terre avec une faible teneur en eau dans un coffrage. Le coffrage est retiré immédiatement une fois que le mur a atteint la hauteur souhaitée.

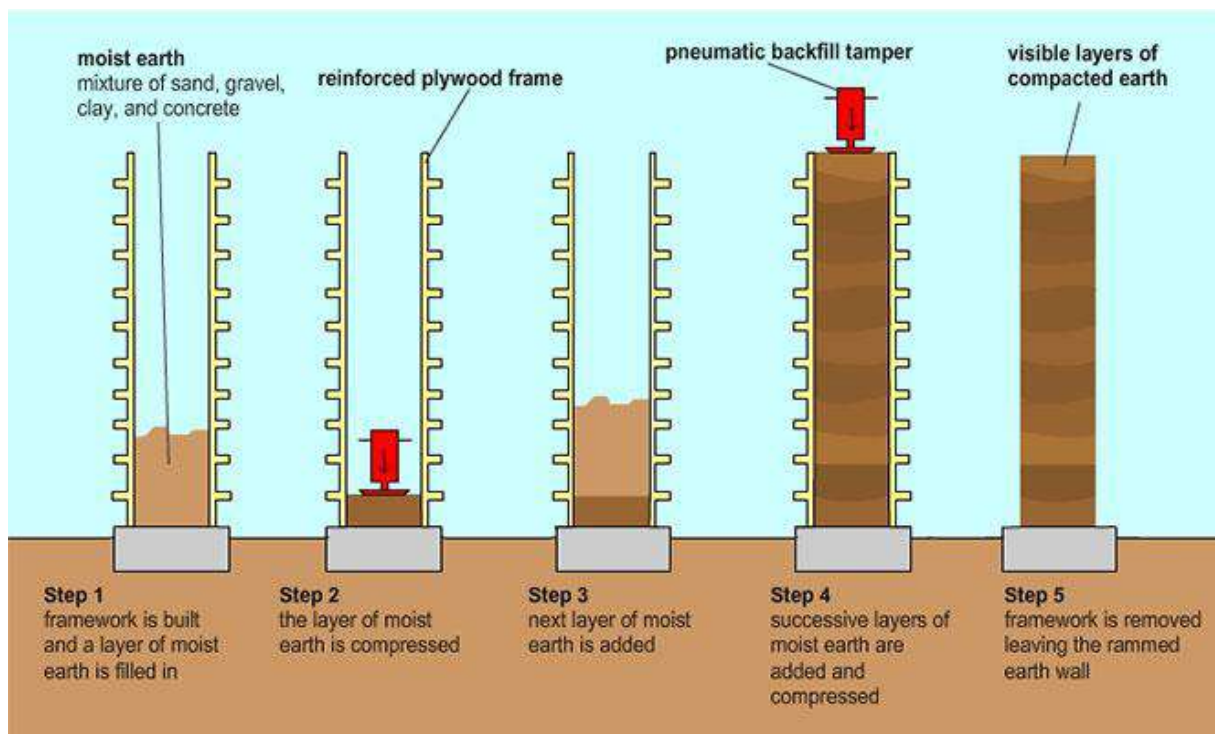


Fig 2 : Étapes de la construction d'un mur en pisé [<https://www.greenspec.co.uk/>]

Chaque mur RE est unique car son aspect dépend de la nature du sol utilisé, de l'épaisseur de la couche, du type de compactage et des détails du coffrage. Des objets peuvent être incorporés ou imprimés dans le processus de battage, ce qui permet au concepteur d'utiliser des motifs de manière créative. Outre son côté esthétique, le RE possède l'une des plus faibles énergies intrinsèques parmi les autres techniques de construction durable. Le pisé stabilisé à 6 % de ciment possède seulement un sixième de l'énergie intrinsèque des briques réfractaires et la moitié de celle du béton. La terre non stabilisée est réutilisable après démolition. Une fois démolie et brisée, la terre peut retourner au sol pour la croissance des plantes. Les murs en RE sont aussi isolants que le béton / les briques cuites, cependant une attention supplémentaire pour tout aménagement d'isolation extérieure permettra d'obtenir une performance thermique élevée. Sa masse thermique élevée en fait un matériau idéal pour les serres où un chauffage passif est prévu. Le mur en RE peut être stabilisé ou

non selon les besoins structurels/esthétiques de la conception. Le principal avantage de la stabilisation du pisé est d'augmenter sa durabilité et ses performances mécaniques. Les inconvénients de la stabilisation sont qu'elle augmente le coût de la construction et que le recyclage devient difficile. Le pisé non stabilisé fait toujours l'objet de recherches scientifiques pour l'entretien des structures patrimoniales qui sont pour la plupart non stabilisées et aussi pour son application dans de nouvelles constructions [Bui, Q.-B., Hans, S., Morel, J.-C., & Mollion, V. (2011)].

2.1 Caractéristiques mécaniques du pisé

La terre, comme les autres géomatériaux, est considérée comme moins résistante aux contraintes de traction [Bui, Q. B. (2008)]. Par conséquent, sa qualité pour résister à la compression est considérée comme la principale caractéristique mécanique de RE. La résistance à la compression est le paramètre le plus important que nous pouvons utiliser pour vérifier la performance mécanique des murs travaillant en compression. Pour une conception sûre des structures en RE, la valeur de la résistance à la compression de la terre fournie devient vitale.

2.2 Production d'échantillons de RE pour l'essai de compression uniaxiale et enjeu

Afin d'obtenir la résistance à la compression, des échantillons sont produits et soumis à une force uniaxiale jusqu'à la rupture. Il y a deux façons de produire des échantillons pour le test de compression. L'une est la production en laboratoire d'échantillons RE et l'autre est l'extrusion d'échantillons à partir de murs fabriqués sur le site.



Fig 3 : Échantillons cylindriques fabriqués en laboratoire.



Fig 4 : Découpe d'un muret réalisée sur place et transportée au laboratoire [Bui, Q. B. (2008)].

Les échantillons extrudés à partir des murs fabriqués sur site à l'échelle réelle seront plus représentatifs. Cependant, les difficultés telles que l'utilisation d'eau pour découper les échantillons et la limitation des outils utilisés pour l'extrusion ne sont pas favorables aux RE non stabilisés [Bui, Q. B. 2008]. Par conséquent, la production d'échantillons de laboratoire représentatifs est inévitable.

3. Plan d'étude

Avant de parvenir à une méthodologie pour mener les expériences, les ressources disponibles sous forme de livres, d'articles de recherche et d'autres publications pertinentes ont été analysées. En même temps, les expériences du Laboratoire 3SR, BEterre et CRAterre liées à la problématique choisie ont été interrogées et prises en compte. La Fig 5 résume la manière dont la grande question a été décomposée en de nombreuses questions plus courtes ainsi que la liste des compétences à acquérir pour procéder aux expériences.

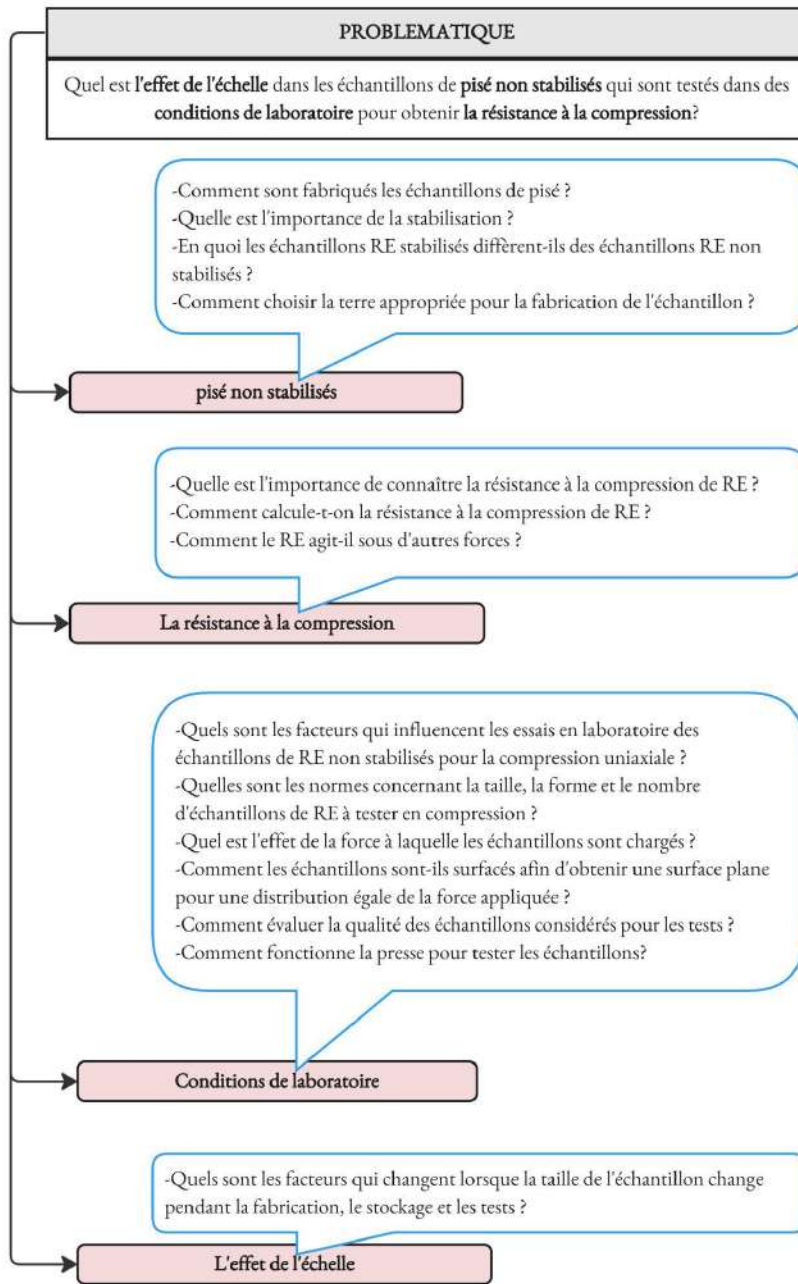


Fig 5 : Schéma de l'analyse de la problématique

4. Revue de la littérature

Le bloc RE est hétérogène à différents niveaux, depuis les matériaux utilisés jusqu'au processus de fabrication lui-même. L'effet de l'échelle dans les échantillons RE testés pour la compression uniaxiale a été discuté dans plusieurs articles de recherche.

4.1 Teneur en humidité et succion

Le pisé est considéré comme un matériau compacté hautement non saturé. Pour établir une relation entre la résistance et la succion, des essais de compression non confinée à des teneurs en eau variables obtenues par séchage à l'air de l'échantillon avec mesure de la succion ont été réalisés par *Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Walker, P. (2014)*. Un comportement fragile pour les échantillons à faible teneur en eau de départ et un comportement ductile pour les échantillons à forte teneur en eau ont été observés et une relation qualitative entre la rigidité de l'échantillon et la succion a été obtenue.

Les auteurs concluent également qu'avec une teneur en eau ne dépassant pas 4%, le matériau conserve ses caractéristiques mécaniques comme à l'état sec (dans les conditions atmosphériques). Cependant, ces échantillons ont été testés en laboratoire avec des cylindres de petite taille. Pour établir une corrélation avec les murs in situ, un coefficient de corrélation est nécessaire. Une des raisons pour lesquelles les échantillons de laboratoire ne sont pas pertinents pour les murs in-situ est leur échelle.

4.2 Forme géométrique et taille des échantillons

L'influence de la taille des échantillons testés pour la compression uniaxiale a été étudiée dans les blocs de terre comprimée [*Lan, G., Wang, Y., & Chao, S. 2018*]. L'étude a été menée avec la variation étroite de la taille des échantillons, c'est-à-dire des cubes de 100 mm, 150 mm et 200 mm, un cylindre de 100 mm de diamètre et 100 mm de hauteur. Il en déduit que la résistance à la compression non confinée diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon. Ce phénomène est dû à l'influence combinée de l'effet de contrainte de la plaque et de l'inhomogénéité de la distribution des défauts des matériaux terre. La pertinence de cette étude à celle de l'effet d'échelle des échantillons RE en compression uniaxiale est entravée par les faits suivants,

1. Les échantillons n'ont pas respecté le rapport d'aspect de l'élanement de 2,
2. La taille des échantillons est bien inférieure à celle des murs sur site.

4.3 la vitesse de chargement par rapport à la résistance à la compression dans l'essai de compression uniaxiale de RE

La variation de la résistance à la compression avec la vitesse de chargement est étudiée par les auteurs [*Lan, G., Wang, Y., & Chao, S. 2018*] sur les cubes de terre compactée de 70.7mm

à 200 mm. La résistance à la compression a légèrement diminué avec l'augmentation de la vitesse de chargement de 1 mm/min à 7 mm/min, mais l'effet de vitesse de chargement est mineur dans ces essais par rapport à l'effet de la taille. La différence maximale de résistance à la compression entre les deux taux de chargement est inférieure à 25%. Ces résultats sont opposés à l'effet de la vitesse de chargement sur le béton. Les mêmes auteurs ont conclu que la résistance à la compression non confinée diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.

4.4 Effet d'échelle

D'après les déductions des auteurs [Bui, Q. B. (2008)] et [Maniatidis, V., & Walker, P. (2008)], des variations importantes de la CS sont observées avec la taille variée des échantillons RE pour les raisons suivantes,

- La friction produite par le coffrage
- Différence dans le confinement, en particulier dans les plus petits échantillons (Fig 6)

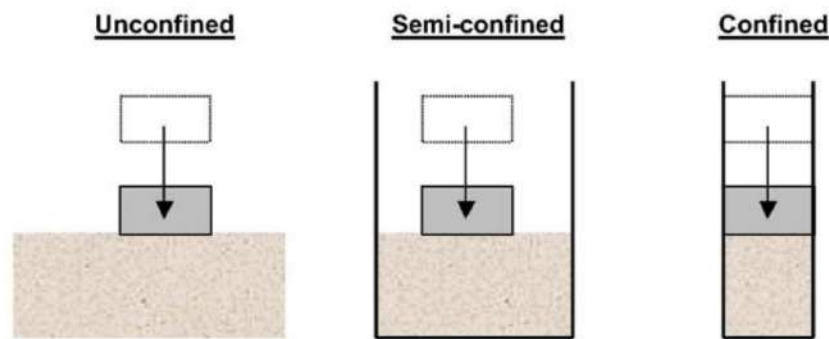


Fig 6 : Différence de confinement avec les échantillons de différentes tailles [Montgomery, D. E. (2002)].

- Augmentation de la teneur en gravier dans l'essai en vraie grandeur.

Les auteurs [Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022)] ont conçu une relation de similitude pour la densité sèche, la teneur en eau de fabrication, et la granulométrie de RE. Ces paramètres ont d'abord été déterminés à partir du chantier de construction d'une étude de cas, afin de définir les paramètres équivalents pour fabriquer les échantillons à échelle réduite avec trois granulométries différentes, plafonnées à 12, 20, 30 mm pour la terre ; 50mm étant la granulométrie maximale de la terre utilisée sur site. Des essais de compression ont été réalisés sur 66 échantillons avec des échantillons de trois tailles différentes, deux géométries et quatre teneurs en eau de fabrication. La résistance à la compression des échantillons de granulométrie à échelle réduite conçus avec la relation de similitude est similaire à la résistance de la granulométrie à échelle réelle, quelle que soient la taille ou la géométrie de l'échantillon.

L'étude des auteurs [*Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022)*] est la plus proche de l'effet d'échelle dans les échantillons RE. Cependant le confinement et le frottement produit par le coffrage n'ont pas été abordés.

4.5 Conclusion

La plupart des recherches scientifiques ont interprété l'existence de l'influence d'échelle dans les échantillons de RE en se concentrant sur les autres facteurs importants de la technique tels que la densité sèche, la succion, la MWC, la distribution des grains, la forme des échantillons et le taux de chargement. L'objectif de cette étude est d'étendre la compréhension de l'influence de l'effet d'échelle dans les échantillons de RE en tant qu'entité globale à l'aide des déductions faites dans les études existantes.

II. MÉTHODES ET PROCÉDURE

5. Présentation de l'étude de cas

Les échantillons de RE de 5 tailles différentes ont été fabriqués pour subir un essai de compression uniaxiale jusqu'à la rupture. Outre les cylindres typiques (C_R) de taille 16/32 cm, des prismes RE de 20/20/40 cm (P20), 30/30/60 cm (P30), 50/50/100 cm (P50) et 80/50/160 cm (P80) ont été fabriqués en laboratoire. Tous les échantillons ont été fabriqués avec la même terre, la même teneur en eau optimale (par un test sur le terrain), le même compactage et la même épaisseur de couche proportionnelle.

Alors que P20 et C suivent un protocole différent pour la granulométrie afin de respecter la proportion granulométrie/taille de l'échantillon. Par conséquent, 2 séries de cylindres (C_G-A et C_G-B) de différentes tailles de grain ont été fabriquées pour analyser l'effet des grains pendant l'essai de compression uniaxiale en dehors de l'effet d'échelle.

La teneur en eau optimale lors de la fabrication des échantillons a été déterminée par un test sur le terrain en comprimant une poignée de la terre préparée entre les paumes et en la laissant tomber d'une hauteur d'environ 1 à 1,5 m pour observer le modèle auquel la balle se brise en morceaux.

Cas 1 : S'il est difficile de donner à la terre la forme d'une boule, on ajoute de l'eau au mélange.

Cas 2 : Si la boule lâchée se brise en deux ou trois morceaux, on considère que la teneur en eau de la terre est optimale.

Cas 3 : Si la boule lâchée modifie sa forme mais ne se casse pas en morceaux, on considère qu'elle a plus d'eau que l'optimum.

Cependant, le contrôle de la teneur en eau optimale aurait pu varier compte tenu des difficultés pratiques de la fabrication de nombreux échantillons en même temps avec 5-6 personnes impliquées dans la production. C'est pourquoi deux autres séries de cylindres (C_TE-A et C_TE-B) ont été fabriquées avec une teneur en eau variable. C_TE-A avec un mélange de terre comparativement sec par rapport à la référence (C_R) et C_TE-B avec un mélange de terre comparativement humide par rapport à la référence (C_R) pour étudier la gamme de variation due à la teneur en eau variable de fabrication.

Le fouloir pneumatique a été passé quatre fois le long de la surface pour comprimer la terre remplie dans le coffrage. Une série de cylindres (C_CM) a été fabriquée pour étudier l'effet du nombre de passages du fouloir car il ne pouvait pas être constant avec les différents opérateurs le manipulant.

Outre les variations et les tests supplémentaires ci-dessus, une autre série de cylindres (C_CO) a été fabriquée pour vérifier l'effet des coffrages métalliques contrairement aux cartons utilisés dans les cylindres de référence.

Tous les échantillons ont été pesés périodiquement pour enregistrer la perte de masse. La *figure 7* explique le schéma de la préparation des échantillons et du protocole.

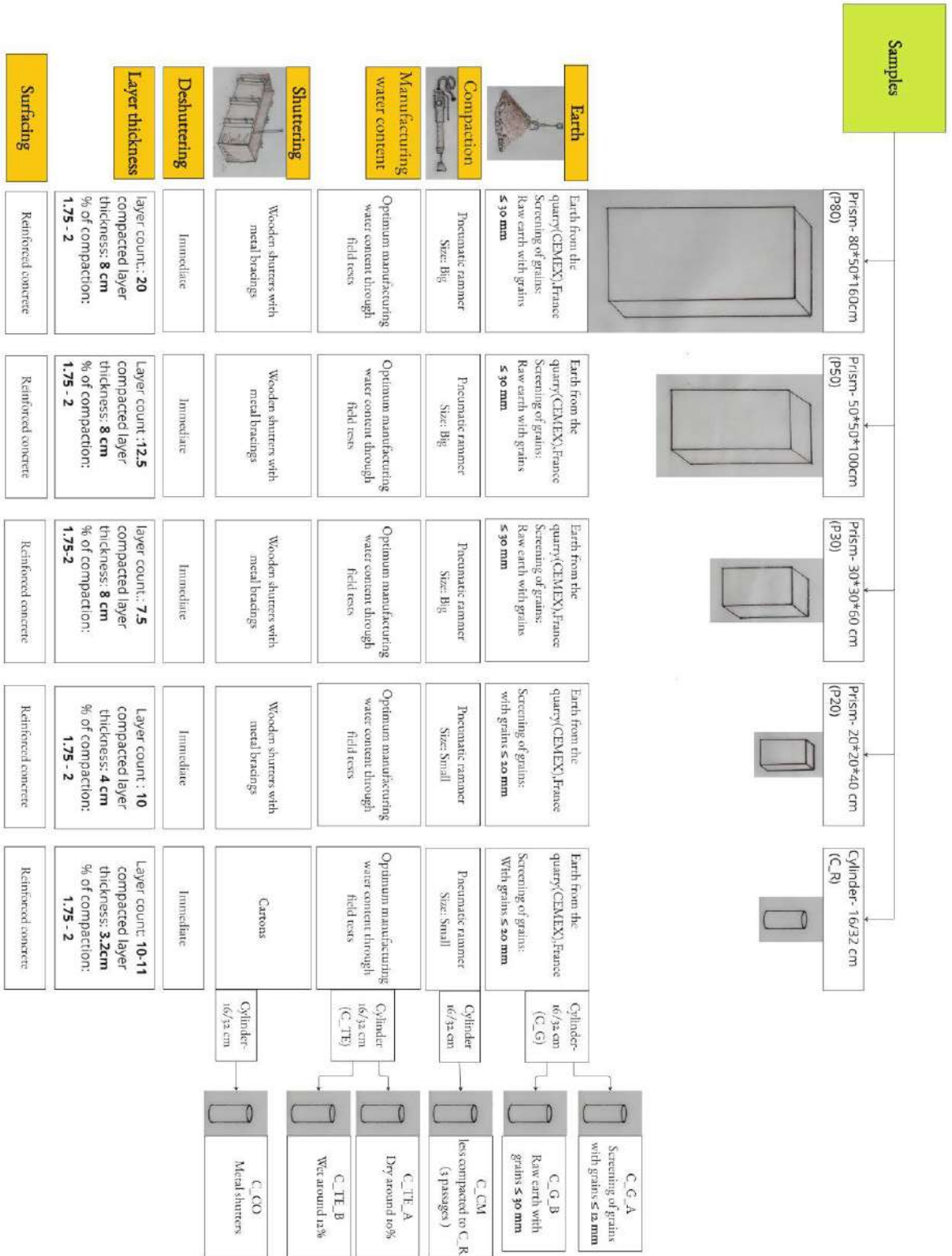


Fig 7 : Schéma du protocole de production des échantillons

6. Caractérisation de la terre prélevée pour l'étude

La terre utilisée pour cette étude provient de la carrière de CEMEX (industrie des matériaux de construction), Oytier-Saint-Oblas, France. Une courbe granulométrique du sol est l'un des outils les plus utiles pour évaluer l'aptitude d'un matériau à la construction en pisé. Des proportions différentes et parfois contradictoires d'argile, de limon, de sable et de gravier sont proposées pour les sols de RE [Ciancio, D., Jaquin, P., & Walker, P. (2013)]. La fig 9 représente la courbe de distribution du sol de l'échantillon de terre étudiée. On voit que la terre sélectionnée est juste dans la gamme de distribution de sol conseillée pour la construction en pisé. Cependant, le dépassement de 0,08 est inférieur à la fourchette conseillée.



Fig 8 : Terre utilisée pour les expériences

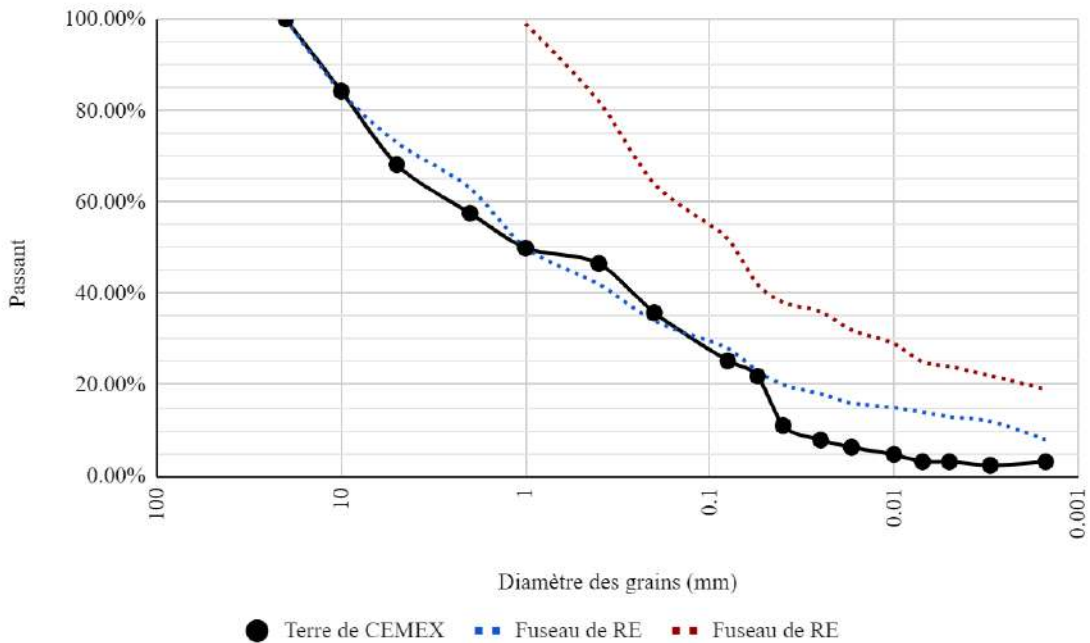


Fig 9 : Distribution granulométrique de la terre utilisée pour les expériences

7. Teneur en eau de fabrication

Le compactage du sol est le processus par lequel les particules solides du sol sont tassées plus étroitement ensemble par des moyens mécaniques, augmentant ainsi la densité sèche [Markwick, A. H. D. 1945]. Par l'essai de compactage en laboratoire, les données de base suivantes pour l'échantillon de terre pourraient être dérivées [Manual of Soil Laboratory Testing-Volume 1].

- La relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour un degré donné d'effort de compactage,
- La teneur en eau pour le compactage le plus efficace, c'est-à-dire pour lequel la densité sèche maximale est atteinte sous cet effort de compactage,
- La valeur de la densité sèche maximale est ainsi obtenue.

La teneur en eau de fabrication avec une quantité donnée de compactage joue un rôle majeur dans la détermination de la résistance des échantillons RE. A une faible teneur en eau, les grains du sol sont entourés d'une fine pellicule d'eau, qui a tendance à maintenir les grains séparés même lorsqu'ils sont compactés. Plus les grains du sol sont fins, plus cet effet est important.

Si la teneur en eau est augmentée, l'eau supplémentaire permet aux grains d'être plus facilement compactés ensemble. Une partie de l'air est déplacée et la densité sèche augmente. L'ajout d'eau supplémentaire, jusqu'à un certain point, permet d'expulser plus d'air pendant le compactage. À ce stade, les grains du sol sont aussi serrés les uns contre les autres qu'ils peuvent l'être (c'est-à-dire que la densité sèche est maximale) sous l'application de cet effort de compactage.

Lorsque la quantité d'eau dépasse celle requise pour atteindre cette condition, l'excès d'eau commence à écarter les particules. Ainsi, la densité sèche est réduite. A des taux d'humidité plus élevés, peu ou pas d'air est déplacé par le compactage, et la densité sèche résultante continue à diminuer.

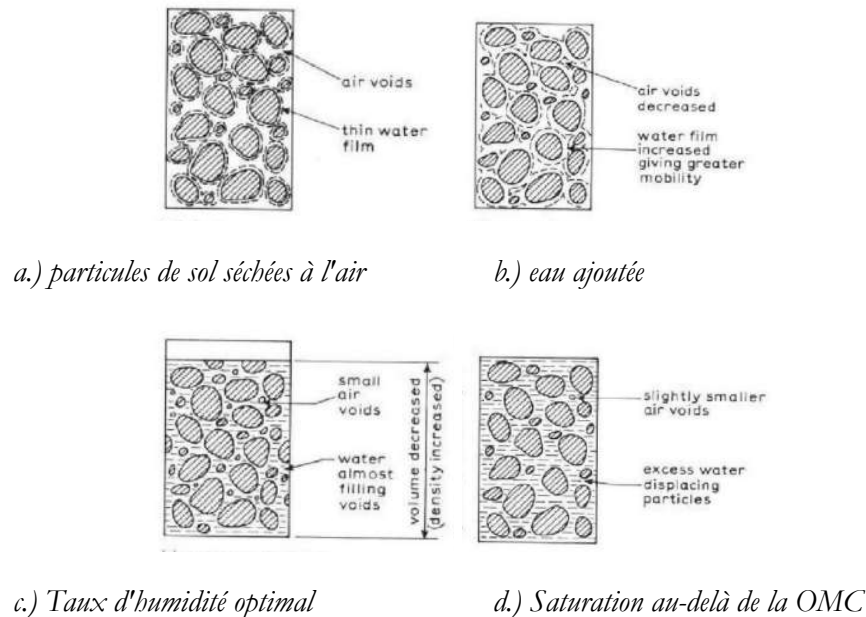


Fig 10 : Représentation de la compaction des grains de sol [Montgomery, D. E. (2002)].

7.1 Résultats des tests Proctor

Il y a plusieurs différents tests de compactage en laboratoire différents utilisés dans la pratique pour arriver à l'OMC de l'échantillon de terre. Pour l'échantillon de terre considéré, le test "BS light compaction" dans le moule CBR a été effectué lorsque le pourcentage de refus du tamis de 20 mm est entre 5%-30%.

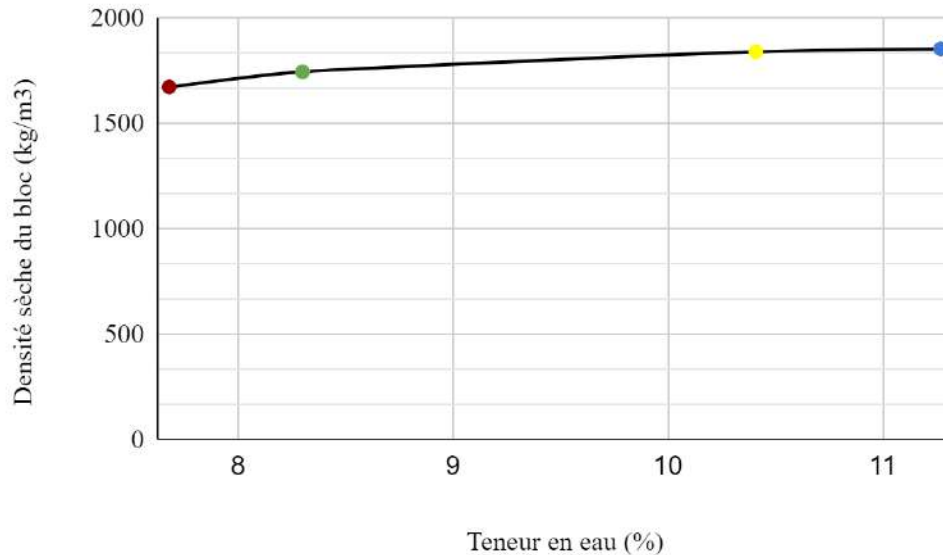


Fig 11 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau de la terre utilisée pour l'expérience.

La densité sèche maximale de 1853 kg/m³ a été obtenue pour un taux d'humidité de 11,27%. Pour la teneur en humidité de 10,41%, la densité sèche était très proche de la densité maximale, soit 1839 kg/m³. Par conséquent, une fourchette de 10-11,5% est conclue comme OMC pour l'échantillon fourni. Comme on le voit sur la figure 11, la courbe n'est pas proéminente avec un pic d'humidité clair auquel la terre atteint sa densité sèche maximale. C'est une courbe peu profonde sans que la courbe descende avec l'augmentation de la teneur en humidité. Une autre campagne de tests proctor avec la teneur en humidité des échantillons de 5%, 7%, 9%, 11% et 13% est recommandée pour le même échantillon de terre.

8. Calcul de la teneur en eau de fabrication

La terre acquise dans la carrière était humide. La teneur en eau de fabrication a été contrôlée par un essai sur le terrain consistant à former une boule avec une poignée de terre, pressée manuellement, et à la laisser tomber d'une hauteur de 1 à 1,5 m. La teneur en eau optimale pour que la boule de terre se divise en deux ou trois morceaux lorsqu'elle tombe a été obtenue en ajoutant de l'eau au

mélange. Si le mélange est trop humide pour l'expérience, il est séché à la température ambiante pendant un jour ou deux pour obtenir la teneur en eau souhaitée.

La façon la plus précise de contrôler la teneur en eau de fabrication aurait pu être de sécher la terre à utiliser et d'ajouter la teneur en eau calculée (par exemple à partir du test proctor) pendant la préparation de chaque mélange. Bien que le processus ci-dessus aurait été plus précis, il est moins pratique sur le site de construction, même dans ce test de laboratoire où environ 10 m³ de terre ont été utilisés pour la production d'échantillons. Les deux méthodes suivantes ont été incorporées pour calculer la teneur en eau de fabrication après la production.

8.1 Méthode 1

Une partie du mélange de terre d'environ 1,5 kg a été recueillie dans un récipient avant qu'elle ne soit utilisée pour la fabrication du mur afin de calculer la teneur en eau exacte en utilisant la procédure suivante: les échantillons ont été conservés à une température ambiante comprise entre 19 et 24 degrés Celsius pendant quelques jours; une fois la masse stabilisée, ils ont été passés dans un four chauffé à 40 degrés Celsius et pesés pour calculer la perte d'eau évaporée après le séchage. La teneur en eau moyenne des échantillons produits est de 10,85% avec une déviation standard de 0,95 selon le calcul de méthode 1. Le minimum de la fourchette étant de 9,27% et le maximum de 12,48%.

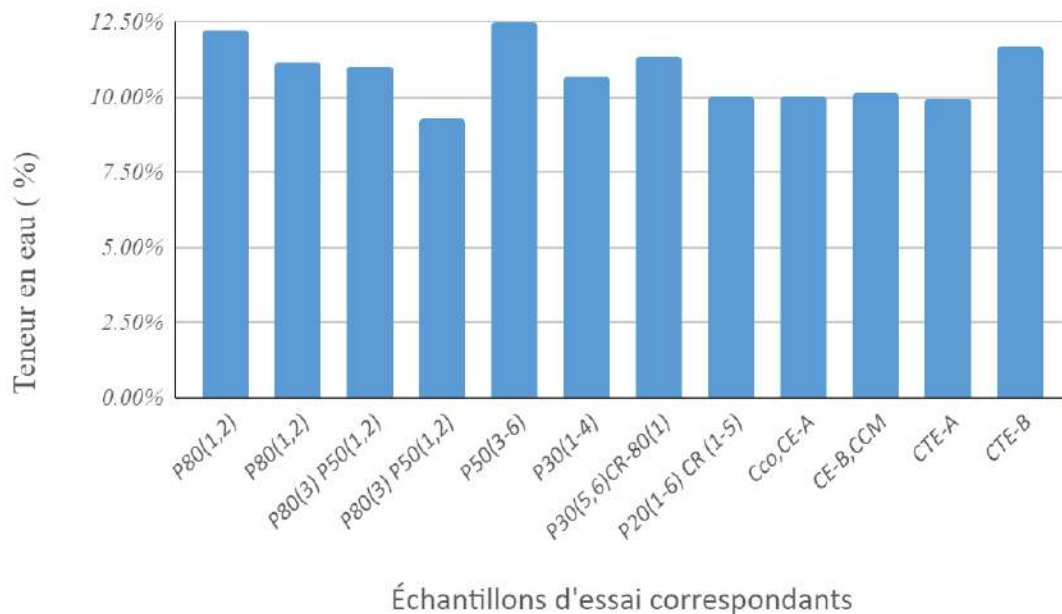


Fig 12 : La teneur en eau de fabrication des échantillons testés

8.2 Méthode 2

Tous les échantillons cylindriques et prismatiques ont été placés dans une pièce chauffée où une température presque constante a été maintenue pendant un certain temps. Ils ont été pesés une fois par semaine jusqu'à ce que la masse se stabilise. Cependant, P80 et P50 sont des exceptions car ils n'étaient pas complètement secs pendant l'essai de compression. L'influence des échantillons non séchés pendant le test de compression doit être étudiée dans la prochaine phase de ce projet.

Pour les autres échantillons, à l'exception de P80 et P50, la masse séchée a été déduite de la masse initiale pour obtenir la perte d'eau. En fait, cela pourrait être la teneur en eau de fabrication de l'échantillon fourni après réduction de la teneur en eau d'essai.

9. Préparation des échantillons pour l'essai de compression

9.1 Surface

La surface sur laquelle la force est appliquée pendant l'essai de compression doit être plate pour assurer une distribution égale de la charge. Tous les échantillons prismatiques ont été recouverts de béton armé sur environ 10 cm. Les échantillons cylindriques 16/32 ont été recouverts de cire.



Fig 13 : Surfaçage en cire



Fig 14 : Échantillons prismatiques avec le surfaçage en béton armé

9.2 La vitesse de chargement

La vitesse de chargement a été adaptée à la résistance du bloc, de manière à ce que l'échantillon d'essai se décompose entre 5 et 30 minutes après le début du chargement [NF P 94-420]. Les blocs de P80 et P50 ont été chargés respectivement à 0,5 kN/seconde et 0,3 kN/seconde. P20 et tous les échantillons cylindriques ont été chargés à 0,1 kN/seconde.

9.3 Presse d'essai

Deux presses différentes ont été utilisées pour les essais des échantillons de RE. P80 et P50 ont été testés à la presse de l'IUT de Grenoble. P20 et tous les cylindres ont été testés dans une INSTRON 100 kN dans un des laboratoires de 3SR.



Fig 15 : Presse utilisée pour l'essai uniaxial sur des échantillons prismatiques



Fig 16 : Essai INSTRON de compression de 100 kN

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

10. Interprétation des résultats des tests de compression

Il est nécessaire d'arriver à la correction de divers autres facteurs qui influencent la CS des échantillons RE avant d'arriver à une solution pour l'effet d'échelle. En dehors de l'échelle, les échantillons de RE pris pour cette étude varient en quatre paramètres:

- Teneur en eau de fabrication
- Géométrie
- Distribution granulométrique de la terre utilisée
- Teneur en eau d'essai

10.1 Nombre d'échantillons et codification

Un minimum de 3 échantillons dans chaque série a été fabriqué pour subir la résistance à la compression uniaxiale. Le code d'échantillon mentionné dans le *tableau 1* a été utilisé tout au long de l'étude pour l'organisation de l'ensemble des 66 échantillons produits et testés.

S.No	Type d'échantillon	Code	Nombre d'échantillons produits	Nombre d'échantillons testés
1	Prisme- 80/50/160 cm	P80	3	3
2	Prisme-50/50/100 cm	P50	6	6
3	Prisme-30/30/60 cm	P30	6	0
4	Prisme- 20/20/40 cm	P20	6	3
5	Cylindre-Référence	C_R	7	7
6	Cylindre-Granulo ≤ 12 mm	C_G-A	7	7
7	Cylindre-Granulo ≤ 30 mm	C_G-B	6	6
8	Cylindre-moins compact que C_R	C_CM	7	7
9	Cylinder-MWC moins que C_R	C_TE-A	6	6
10	Cylindre-MWC plus que C_R	C_TE-B	6	5
11	Cylindre-Coffrage métallique	C_CO	6	6

Tableau 1 : Code et nombre d'échantillons

10.2 Effet de la teneur en eau de fabrication

Le MWC obtenu par “BS light compaction test” avec le moule CBR donne la gamme de 10-11 % pour obtenir une densité sèche accrue. D'autre part, les cylindres testés avec une MWC inférieure à 10% ont donné la CS moyenne maximale. Ceci est pertinent avec les résultats obtenus dans l'étude sur l'effet de la teneur en eau de compactage sur la résistance des matériaux de terre pisé stabilisé au ciment par les auteurs *Beckett, C., & Ciancio, D. (2014)*.

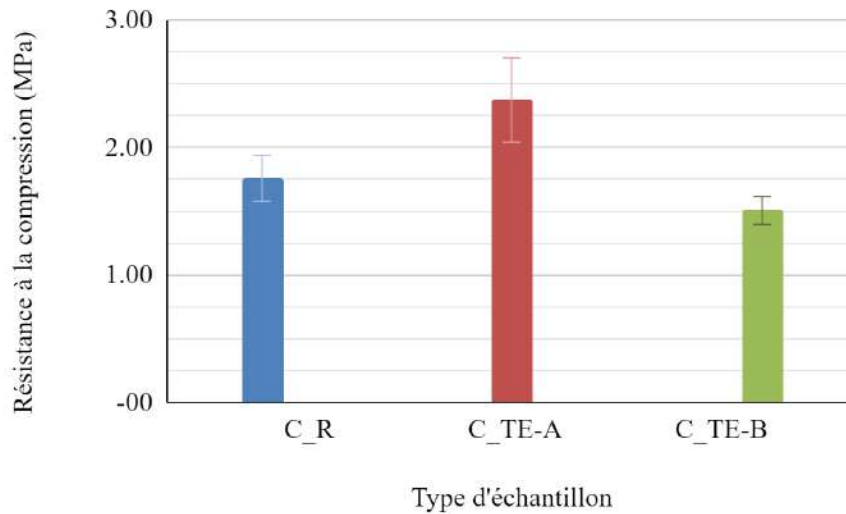


Fig 17 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec des échantillons cylindriques de différents MWC

Code	Densité sèche(kg/m3)	Résistance à la compression (MPa)	MWC (Method 1)	MWC (Method 2)	TWC
C_R	2005	1.76	10.04 %	8.8 %	0.22 %
C_TE-A	2039	2.37	9.95 %	7.9 %	0.27 %
C_TE_B	2031	1.51	11.7 %	10.1 %	0.77 %

Tableau 2 : Détails de MWC des cylindres de référence et de deux autres cylindres de série dont MWC varie par rapport à celle du cylindre de référence.

Avec la diminution d'environ 1% de la MWC par rapport à la référence, on observe une augmentation de la CS de 1,34 fois dans les échantillons cylindriques testés.

10.3 Influence de la géométrie

La CS moyenne des échantillons cylindriques et prismatiques qui sont fabriqués avec le même protocole est comparée. La CS de P20 et C_R est presque la même. Cela confirme l'étude des auteurs [Lan, G., Wang, Y., & Chao, S. (2018)] dans des blocs de terre compactés non stabilisés. Cependant, le CS du P20 est légèrement plus élevé que le C_R. Cela pourrait être possible en raison du nombre inférieur de blocs P20 testés pour obtenir les résultats.

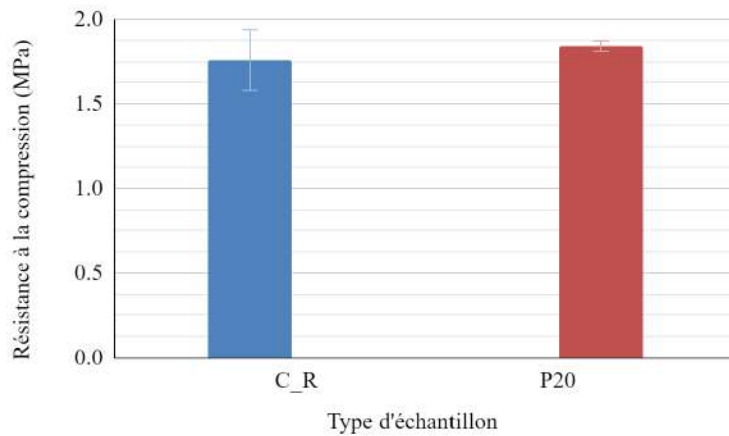


Fig 18 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec l'échantillon prismatique P20

10.4 Influence du matériau des coffrage

Les deux cylindres de même taille fabriqués dans deux matériaux de coffrage différents présentent une légère différence de résistance à la compression. Le C_CO fabriqué dans un coffrage métallique est 1,17 fois plus résistant que le C_R fabriqué avec les cartons. Des recherches supplémentaires sur l'effet du matériau de coffrage sont nécessaires pour une analyse détaillée.

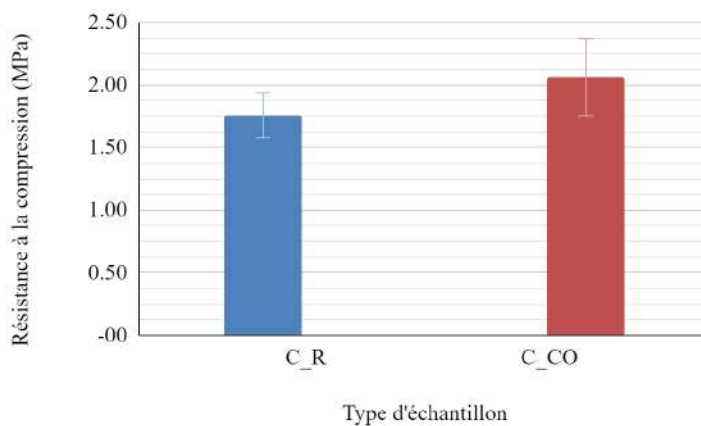


Fig 19 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec les échantillons cylindriques de coffrage métallique

10.5 Influence de la répartition granulométrique

Pour assurer l'homogénéité des échantillons, la proportion granulométrie/diamètre de l'échantillon est conseillée dans la norme française de détermination de l'essai de compression uniaxiale des roches [NF P 94-420]. Selon cette norme, la plus grande granulométrie du géomatériau utilisé pour réaliser les échantillons ne doit pas dépasser 1/10 fois la plus petite longueur de l'échantillon. L'effet de la fraction granulométrique pour le pisé a été largement étudié par les auteurs [Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022)].

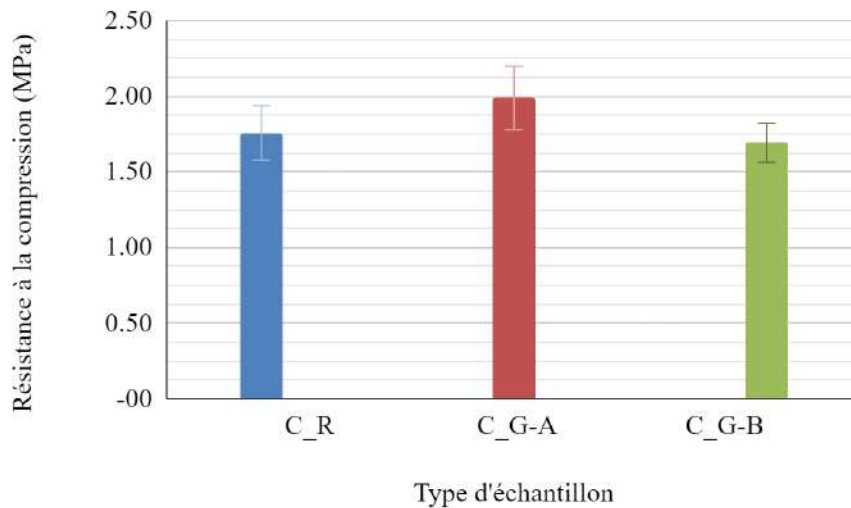


Fig 20: Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec des échantillons cylindriques de différents granulométrie

La granulométrie autorisée pour les échantillons cylindriques de diamètre 16cm ne doit pas dépasser 1,6 cm selon les normes françaises. L'hétérogénéité des échantillons augmente avec l'augmentation de cette fraction granulométrique (i.e. diamètre maximal du grain de l'échantillon $\leq 1/10$ du diamètre de l'échantillon).

Le graphique présente la CS moyenne des cylindres testés avec différentes tailles de grains maximales. Le CS des échantillons diminue avec l'augmentation de l'écart de la proportion entre la taille du grain et le diamètre de l'échantillon.

Le CS moyen du C_G-A (taille du grain $\leq 12\text{mm}$) est le plus élevé par rapport à celui du C_R (taille du grain $\leq 20\text{mm}$) et du C_G-B (taille du grain $\leq 30\text{mm}$).

10.6 Effet d'échelle

Tous les échantillons de la P80 ont été testés à une teneur en eau d'environ 2,6 %. Alors que les échantillons du P50-A ont été testés à 1,87%. Dans la même série de P50, 3 échantillons ont été testés environ 120 jours après P50-A et sont nommés P50-B. De toute évidence, le P50-B devrait être plus sec que le P50-A. Les échantillons P20 ont été testés à 0.75% de teneur en eau pendant l'essai de compression.

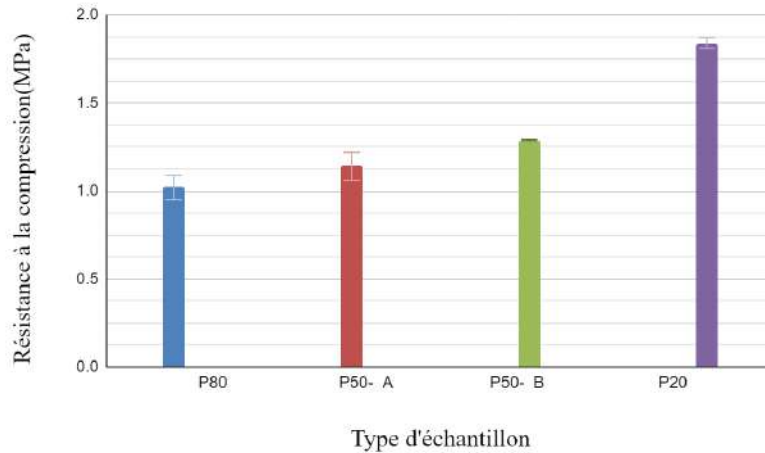


Fig 21 : Résistance moyenne à la compression des échantillons comparés entre les échantillons prismatiques des trois tailles différentes testées

La figure 21 montre la résistance à la compression de différents échantillons prismatiques qui ont été testés à différents teneurs en eau. Par conséquent, une série d'expériences sur les cylindres de référence à différents teneurs en eau est nécessaire pour l'analyse de l'effet d'échelle.

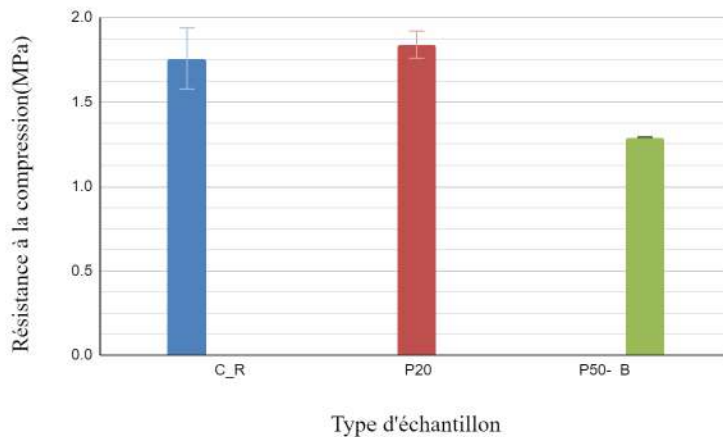


Fig 22: Résistance moyenne à la compression des échantillons comparant les cylindres de référence avec P20 et P50-B

La fig. 22 montre que la résistance à la compression de C_R est 1,36 fois supérieure à celle de P50-B. Cela montre que les échantillons cylindriques ne sont pas exactement représentatifs des échantillons de grande taille. Cependant, la comparaison des échantillons cylindriques 16/32 avec d'autres échantillons de taille croissante tels que P30 et P80 apporterait plus de clarté.

IV. LIMITATIONS DE L'ÉTUDE

- La première phase de l'étude s'est concentrée plus sur les éléments tels que la teneur en eau de fabrication, la distribution granulométrique de la terre et la géométrie des échantillons pour la terre fournie. Par conséquent, pour éliminer ces corrections pour la terre fournie et dériver la relation pure de l'échelle des échantillons dans la deuxième phase.
- Les échantillons de grande taille ont été testés avant qu'ils ne soient complètement secs en raison du temps imparti pour le stage. Par conséquent, une série supplémentaire d'expériences doit être menée pour éliminer l'effet de la teneur en eau des tests.
- Les prismes P30 n'ont pas pu être testés durant la première phase de l'étude en raison du mauvais fonctionnement de la presse destinée à l'essai.
- Dans les cas P20, seulement 3 échantillons ont été testés, dont un a été endommagé pendant le transport. Le nombre est inférieur pour obtenir une valeur fiable de UCS..

V. CONCLUSIONS

Avec cette première phase de l'étude sur l'effet d'échelle de l'échantillon RE, les points suivants sont notés et doivent être poursuivis dans la deuxième phase,

- La MWC des échantillons de RE joue un rôle majeur dans leur résistance à la compression. Les échantillons de laboratoire à petite échelle pourraient être fabriqués avec une MWC constante et contrôlée pour obtenir une résistance à la compression maximale. Dans cette campagne expérimentale, une légère variation de la MWC a été remarquée entre les échantillons. Lorsque des échantillons à grande échelle doivent être produits, un protocole approprié pour la MWC doit être établi.

- Cette étude confirme l'influence de la forme des échantillons, de la distribution granulométrique et de la MWC sur la résistance à la compression de RE, comme l'ont déduit les auteurs Lan, G., Wang, Y., & Chao, S. (2018), Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022) et Beckett, C., & Ciancio, D. (2014).
- La deuxième phase de la poursuite de cette étude est recommandée pour inclure l'effet du test de la teneur en eau des échantillons. Cette expérience supplémentaire permettrait de corriger les erreurs d'avoir testé les énormes blocs de RE avant le séchage. Enfin, l'effet d'échelle pourrait être déduit après avoir éliminé l'effet de grain suggéré par les auteurs *Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022)*.
- La terre choisie pour cette expérimentation est vraiment la limite des plus gros grains proposés pour la fabrication des RE (fig 9). L'effet du grain pourrait jouer un rôle majeur pour déterminer l'homogénéité des grands échantillons par rapport aux petits échantillons. D'autre part, un type de sol dont la composition des grains est inférieure à 20 mm pourrait être pris pour l'étude de l'effet d'échelle dans RE. Le rôle des grains serait moindre dans ce cas car la terre n'a pas besoin d'être tamisée pour faire des échantillons 16/32.

Une étude future avec d'autres types de terre sur le même sujet est une possibilité pour comprendre l'effet de l'échelle sur le RE testé pour la compression.

VI. RÉFLEXIONS ET PERSPECTIVES PERSONNELLES

Le contrôle de la qualité dans la construction en terre est aussi important que la technique elle-même pour le rayonnement des matériaux en terre dans le scénario de construction actuel. Connaître les limites du matériau par la recherche est l'un des moyens de remettre en question la faisabilité et la pertinence d'une conception. Qu'il s'agisse d'une recherche standardisée en laboratoire ou d'une simple expérience sur site pour arriver à une décision.

Je considère cette opportunité de travailler en laboratoire pour analyser l'effet d'échelle dans les échantillons du pisé non stabilisé comme une exposition pour explorer davantage le côté technique des matériaux. La pression exercée pour rendre justice au sujet choisi m'a conduit à améliorer mes compétences techniques et mathématiques de base. En tant qu'architecte, je considère les points suivants comme les principales conclusions à la fin de ce projet de thèse,

- **Aborder un sujet d'étude technique : Théoriquement**

Après avoir traité la première phase d'un sujet d'étude technique sur la construction en pisé, j'ai développé diverses techniques de brainstorming et un plan personnalisé pour aborder un problème technique à l'avenir. Découpage de la question en sous-thèmes et mots clés, collecte d'informations sur les sous-thèmes, compilation des pistes disponibles pour positionner le problème et arriver à une méthodologie. Il est probable que cette méthode soit plus ou moins une façon classique d'aborder tout problème. Je suis heureuse d'avoir pu élaborer et mettre en œuvre ma propre façon d'aborder un sujet d'étude.

En tant qu'architecte de formation, j'ai reçu une formation académique pour aborder et analyser de manière critique un sujet d'étude du point de vue d'un architecte. Je considère ma participation à ce sujet d'étude comme une exposition à une nouvelle façon de penser. Au début de l'étude, j'ai dépensé beaucoup de temps et d'énergie pour comprendre les termes techniques utilisés dans les articles de recherche sur le pisé, auxquels j'avais prêté le moins d'attention dans ma carrière d'architecte.

J'aurais facilement pu les sauter ou prendre l'aide d'un ingénieur pour m'informer sur les aspects techniques. C'était plus ou moins le même scénario pendant la période de stage, car j'étais entourée d'ingénieurs pour m'aider dans le processus, mais je devais initier les procédures de recherche de problèmes par moi-même. Je ne peux certainement pas remplacer le service d'un ingénieur dans ma future pratique architecturale, mais cela m'encourage à me concentrer sur la stabilité structurelle et les contraintes du matériau tout en tenant compte des valeurs esthétiques et sociales.

- **Connaissances pratiques obtenues lors de la fabrication des échantillons d'essai.**

Le fait de passer beaucoup de temps à traiter un type de terre particulier pour une technique particulière a permis de remarquer des détails mineurs. Par exemple : Avec la terre étudiée pour le pisé, la teneur en eau optimale pour obtenir une résistance élevée est différente de la teneur en eau optimale pour obtenir une surface sans poussière de particules. Pour un matériau non industriel comme la terre, cette attitude d'observation attentive de son comportement est vitale pour une mise en œuvre réussie et une résolution des problèmes orientée vers le contexte.

J'ai conçu et consulté un projet de construction en terre en Inde en 2019. C'était juste avant de postuler pour participer au programme DSA 2020-2022 de CRAterre. Le projet a été mis en œuvre dans un village où le pisé n'est pas une technique de construction courante. Par conséquent, les maçons et les autres aides à la construction étaient vraiment perplexes de faire un essai sur une méthode de construction différente de la construction conventionnelle. Je ne pouvais pas limiter mes responsabilités aux dessins et à la conception, mais je devais les étendre sur le chantier. Je devais les éduquer sur la technique et le matériel. Même si j'avais une bonne connaissance du côté technique du matériau avec l'aide de sources littéraires, je me trouvais un peu incompetent pour arriver à des décisions telles que

le pourcentage de stabilisateurs utilisés ?

La stabilisation est-elle vraiment nécessaire ?

Quelles seront les conséquences si le mur en pisé est trempé par la pluie quelques heures avant la pose de la toiture ? Sera-t-il suffisamment stable ?

Pourquoi le mur n'a pas atteint la texture lisse que nous avons imaginée ? Pourquoi les fines particules se détachent-elles lorsqu'on les frotte ?



Fig 23: Vue d'une résidence en pisé à Bangalore, en Inde.

Pour les petits projets de construction, il est moins pratique d'avoir un soutien d'ingénierie pour ces questions techniques. Après l'expérience ciblée en laboratoire, je me sens en confiance pour tirer parti des recherches existantes sur le problème et réaliser des essais simples sur le terrain pour trouver des solutions.

- Compréhension du processus d'évaluation des techniques en laboratoire pour analyser ses limites sur les implications pratiques.
- Ayant terminé la série de tests sur la question de l'effet d'échelle dans les échantillons de terre pisé non stabilisé, la tentative d'écrire et de publier comme un article de recherche serait une possibilité pour aller de l'avant. Les résultats de la deuxième phase d'expériences avec le 16/32 à différentes teneurs en eau pendant l'essai de compression, ainsi que les résultats des échantillons P30 et P20 restants donneraient plus de clarté à l'article de recherche.

VII BIBLIOGRAPHIE

- Bui, Q. B. (2008). *Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques*.
- Bui, Q.-B., Hans, S., Morel, J.-C., & Mollion, V. (2011). *Influence of water on the mechanical characteristics of rammed-earth material* 565–576.
- 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.
- Ciancio, D., Jaquin, P., & Walker, P. (2013). Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials*, 42, 40–47.
- Hugo, H., Hubert, G., 2006. *Traité de construction en terre. 3e édition*. Marseille : Éditions Parenthèses. 355 p. ISBN 978-2863641613.
- Jaquin, P. (2012). *History of earth building techniques*(pp. 307–323).
- Lan, G., Wang, Y., & Chao, S. (n.d.). Influences of Specimen Geometry and Loading Rate on Compressive Strength of Unstabilized Compacted Earth Block. *Advances in Materials Science and Engineering*, 11.
- Maniatidis, V., & Walker, P. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 20(3), 230–238.
- Manual of Soil Laboratory Testing—Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests, 3rd edition. (2012). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45(4), 505–508.
- Markwick, A. H. D. (1945). The basic principles of soil compaction and their application. Road engineering division. *The Institution of Civil Engineers Engineering Division Papers*, 3(3), 1–48.
- Mazars, J. (1989). L'effet d'échelle dans les structures en béton. *Revue Française de Géotechnique*, 49, Article 49.

- Montgomery, D. E. (2002). *Dynamically-compacted cement stabilised soil blocks for low-cost walling* [Phd, University of Warwick].
- NF P 94-420, Roches: Détermination de la résistance à la compression uniaxiale, 2000, 7.
- Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., & Lhenry, M. (2022). A similitude relation to assessing the compressive strength of rammed earth from scale-down samples. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00921.
- Schroeder, H. (2012). 4—Modern earth building codes, standards and normative development. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern Earth Buildings* (pp. 72–109). Woodhead Publishing.
- Venkatarama Reddy, B. V., Suresh, V., & Nanjunda Rao, K. S. (2017). Characteristic Compressive Strength of Cement-Stabilized Rammed Earth. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016203.

ANNEXE

A.Outils utilisés et dispositif expérimental



Fig 24: Coffrage en carton (16/32)



Fig 25: Coffrage métallique (16/32)



Fig 26: Le fouloir pneumatique utilisé pour les P80, P50 et P30



Fig 27: Le petit fouloir pneumatique de P20 et C



Fig 28: Les échantillons prismatiques séchant dans la salle chauffée



Fig 29: Assemblage du P80 et P50 pour l'essai de compression



Fig 30: Socle en béton fabriqué pour atteindre la hauteur souhaitée lors de l'essai de compression de P80 et P50.

B.Caractérisation de la terre utilisée pour la fabrication de l'échantillon

GRANULOMETRY ANALYSIS									
Dry weight of the sample taken for the test (g)					4095.91				
Operateur	Eluckkiya A N			Date	15/3/2022 - 22/3/2022				
Square mesh sieve (mm)	Partial sieve refusal				Cumulative refusal		Sieve passing		
	Dry weight with tare (g)	Tare (g)	Dry weight (g)	%	Dry weight (g)	%	Dry weight (g)	%	
20	1150	504	646	15.77%	646	15.77%	3449.91	84.23%	
10	1156	498	658	16.06%	1304	31.84%	2791.91	68.16%	
5	934	498	436	10.64%	1740	42.48%	2355.91	57.52%	
2	810	498	312	7.62%	2052	50.10%	2043.91	49.90%	
1	636	498	138	3.37%	2190	53.47%	1905.91	46.53%	
0.4	938	498	440	10.74%	2630	64.21%	1465.91	35.79%	
0.2	930	498	432	10.55%	3062	74.76%	1033.91	25.24%	
0.08	636	498	138	3.37%	3200	78.13%	895.91	21.87%	
Passing of 0.08mm sieve									
	1216	406.2	809.8	19.77%					
Percentage of cumulative refusal in 0.08 mm sieve				78.13%					
Percentage of passing in 0.08 mm sieve				19.77%					
Total				97.90%					
Percentage of material loss				2.10%					
Therefore weight of the material lost (g)				86.11					
Note	The study sample is the passing of 31.5 mm sieve from the extraction quarry								

SEDIMENTOMETRY								
Heure	Temps minutes	Temp °C	Suspensión A	Reference B	A-B	8*(A-B)*P %	Inverser	Diam Microns
9:55	1	19	1008.0	1001.0	7.0	11.07%	88.93%	55
9:56	2	19	1006.0	1001.0	5.0	7.91%	92.09%	40
9:59	5	19	1005.0	1001.0	4.0	6.33%	93.67%	25
10:04	10	19	1004.0	1001.0	3.0	4.75%	95.25%	17
10:24	30	19	1003.0	1001.0	2.0	3.16%	96.84%	10
10:54	60 (1H)	19	1003.0	1001.0	2.0	3.16%	96.84%	7
11:54	120 (2H)	19	1002.5	1001.0	1.5	2.37%	97.63%	5
14:54	300 (5H)	21	1002.5	1000.5	2.0	3.16%	96.84%	3
9:54	1440 (24H)	20	1002.5	1000.5	2.0	3.16%	96.84%	1.5

ATTERBERG LIMITS

Operateur	Eluckkiya A N			Date	22/3/2022			
	Liquid limit				Plasticity limit			
	WL1	WL2	WL3	WL4	WP1	WP2	WP3	WP4
Number of turns (N)	21	21	30	30				
No. of the samples	1	2	3	4	5	6	7	8
Total humid mass (g)	27.73	33.74	32.69	35.48	23.95	23.75		
Total dry mass (g)	25.47	30.83	29.46	31.63	23.75	23.56		
Weight of the tare (g)	18.08	21.28	17.8	17.78	22.54	22.47		
Mass of the water (g)	2.26	2.91	3.23	3.85	0.20	0.19		
Mass of the dry earth (g)	7.39	9.55	11.66	13.85	1.21	1.09		
Water content % (W)	30.58%	30.47%	27.70%	27.80%	16.53%	17.43%		
WP / WL Caluculation	29.94%	29.84%	28.32%	28.42%	16.98%			
		WP			WL			

Results	
Liquid limit (LL) Average of WL	29.13%
Plasticity limit (LP) Average of WP	16.98%
Plasticity index (IP) LL-LP	12.15%

Autres Resultats	
% of clay in the whole sample taken for the study	3%
% of particles < 0,4 mm	35.79%
% of clay in the fraction of < 0,4 mm	8.84%
Coefficient of activity IP / % Argile < 0,4 mm	1.37

THE METHYLENE BLUE TEST

Value of the blue for the earth sample $V_{bs} = 0.53 \text{ m}^2/\text{gr}$

Total specific area of the earth SST total = $11.21 \text{ m}^2/\text{gr}$

C. British standard light compaction test

Type of the mould	-CBR		Operator	Eluckkiya A N	
Diameter (cm)	15.2		Date:	29/09/2022-30/09/2022	
Height (cm)	12.7		Grain size	<=30mm	
Internal volume (cm ³)	2305		Sieve refusal 20mm	13%	
Mass of the rammer(kg)	2.5				
Drop of the rammer(cm)	30				
No of layers	3				
Blows per layer	62				
Energy applied (kJ/m ³)	533				
Description	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
COMPACTING					
Weight of earth taken for test(g)					
Water added (g)					
Total humid mass (mould+sample)(g)	10293	10632	10495	10804	10895
Weight of the mould (g)	6142	6142	6142	6142	6142
Weight of the humid block (g)	4151	4490	4353	4662	4753
Volume of the mould (cm ³)	2305	2305	2305	2305	2305
Wet density (kg/m ³)	1801	1948	1889	2023	2062
Name of the sample taken	1	2	3	4	5
Weight of the humid sample + container (g)	1323	1411	1167	1576	1954
Weight of the dry sample+container (g)	1254	1329	1104	1460	1790
Weight of the container (g)	356	339	345	346	335
Weight fo the dry sample alone (g)	898	990	759	1114	1455
Weight of the water evaporated(g)	69	82	63	116	164
Moisture content (%)	7.68	8.28	8.30	10.41	11.27
Dry density of the block (kg/m ³)	1672.37	1798.94	1743.76	1831.81	1853.16

D. Calcul de la MWC selon la (8.1) Méthode 1

Correspondance to the test samples	Initial mass(g)	Final mass(g)	Water content (g)	Moisture content	Average	Standard deviation
P80(1,2)	1844	1643	201	12.23%	10.85%	0.95
P80(1,2)	1736	1562	174	11.14%		
P80(3) P50(1,2)	2373	2137	236	11.04%		
P80(3) P50(1,2)	1968	1801	167	9.27%		
P50(3-6)	1397	1242	155	12.48%		
P30(1-4)	1281	1157	124	10.72%		
P30(5,6)CR-80(1)	1175	1055	120	11.37%		
P20(1-6) CR (1-5)	1405	1277	128	10.02%		
Cco,CE-A	2235	2031	204	10.04%		
CE-B,CCM	1918	1741	177	10.17%		
CTE-A	1337	1216	121	9.95%		
CTE-B	1442	1291	151	11.70%		

E. Calcul de la résistance à la compression des échantillons cylindriques et prismatiques

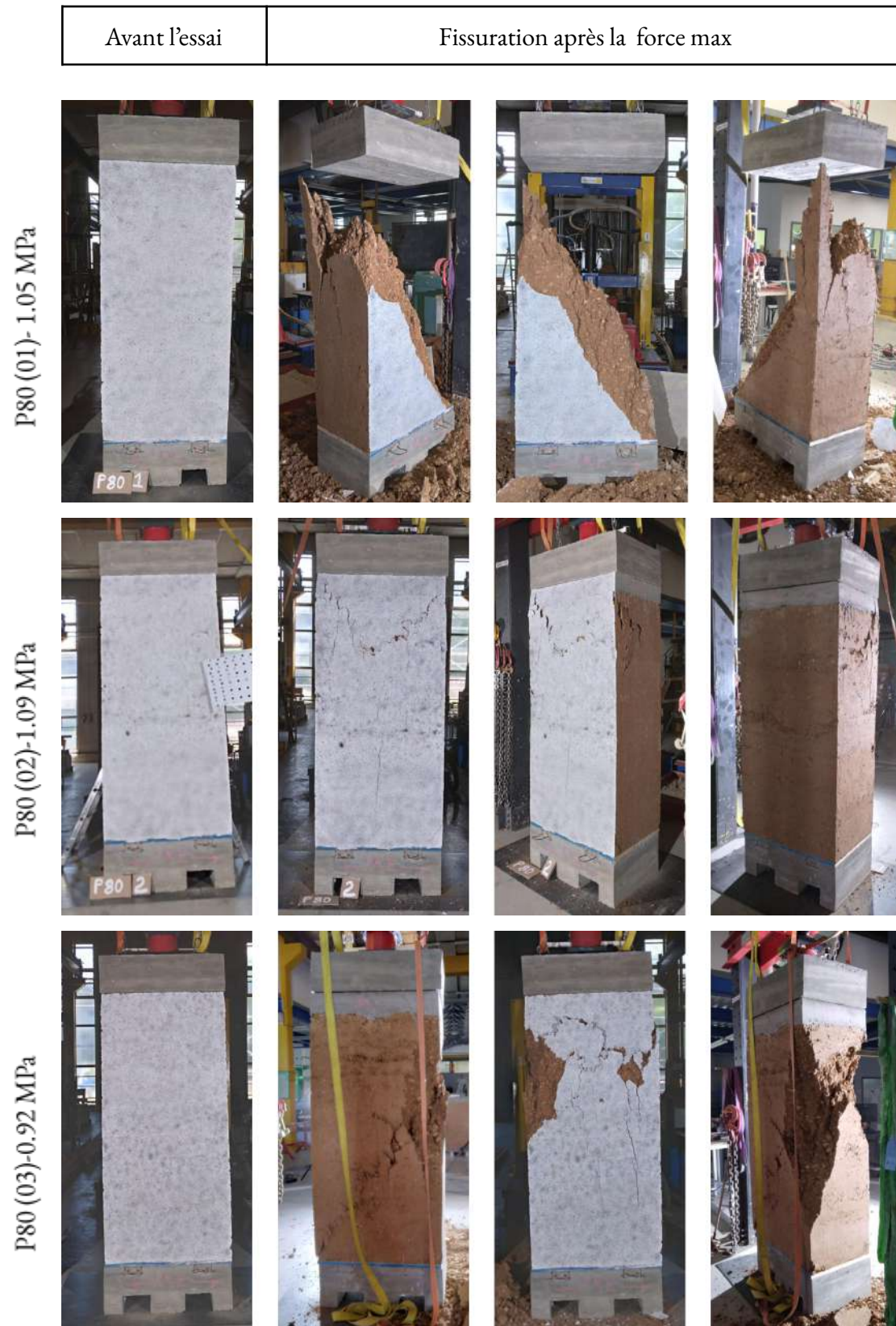
Code hint	Code of the samples	Force max. (kn)	Area (mm ²)	Dry density (kg/m ³)	Compression strength (MPa)	Mean	Standard deviation	COV	
Reference_P80_1/1	C_R_80	1	30.92	20096	1.54				
Reference_7/7	C_R	1	42.73	20096	2011	2.13	1.76	0.18	10.51%
		2	38.03	20096	2077	1.89			
		3	31.07	20096	1992	1.55			
		4	34.87	20096	1950	1.74			
		5	33.84	20096	1986	1.68			
		6	31.61	20096	2015	1.57			

		7	35.23	20096	1999	1.75			
Metal shutters_ 6/6	C_CO	1	41.42	20096	2024	2.06	2.06	0.31	14.98%
		2	41.26	20096	2010	2.05			
		3	52.34	20096	2054	2.60			
		4	44.31	20096	2098	2.20			
		5	58.10	20096	2077	2.89			
		6	44.20	20096		2.20			
Granulo metry <=12mm_ _7/7	C_G-A	1	48.10	20096	1995	2.39	1.99	0.21	10.72%
		2	40.96	20096	2027	2.04			
		3	40.87	20096	1923	2.03			
		4	33.15	20096	1974	1.65			
		5	40.25	20096	2030	2.00			
		6	40.28	20096	1996	2.00			
		7	36.09	20096	2002	1.80			
Granulo metry <= 30mm_ 6/6	C_G-B	1	35.72	20096	2004	1.78	1.69	0.13	7.78%
		2	34.57	20096	1996	1.72			
		3	33.87	20096	1995	1.69			
		4	32.45	20096	1994	1.61			
		5	29.50	20096	1981	1.47			
		6	38.01	20096	2014	1.89			
Less compacte d to the reference _7/7	C_CM	1	41.65	20096	1956	2.07	2.04	0.08	3.92%
		2	41.64	20096	1987	2.07			
		3	39.49	20096	2011	1.97			

		4	43.94	20096	2029	2.19			
		5	41.15	20096	2027	2.05			
		6	38.47	20096	2036	1.91			
		7	41.13	20096	2044	2.05			
Moisture content minimum _6/7	C_TE-A	1	55.50	20096	2002	2.76	2.37	0.33	13.85%
		2	55.02	20096	2077	2.74			
		3	50.99	20096	2025	2.54			
		4	41.03	20096	2060	2.04			
		5	38.53	20096	2075	1.92			
		6	44.95	20096	2066	2.24			
Moisture content maximum _5/7	C_TE-B	2	28.71	20096	2002	1.43	1.51	0.11	7.29%
		3	29.89	20096	2017	1.49			
		4	27.63	20096	2031	1.37			
		5	34.01	20096	2042	1.69			
		6	31.17	20096	2058	1.55			

Prism_80*80*160 cm_3/3	P80	1	421.85	400000		1.05	1.02	0.07	6.91%
		2	434.00	400000		1.09			
		3	369.00	400000		0.92			
Prism_50*50*100 cm_3/6	P50(A)	1	272.59	250000		1.09	1.14	0.08	7.24%
		2	269.13	250000		1.08			
		3	314.60	250000		1.26			
	P50(B)	4	321.40	250000		1.29	1.29	0.004	0.33%
		5	323.00	250000		1.29			
		6	324.00	250000		1.30			
Prism_20*20*40 cm_2/6	P20	1	74.40	40000		1.86	1.84	0.03	1.46%
		2	72.88	40000		1.82			

F. Échantillons testés avec le modèle de la fissuration-P80



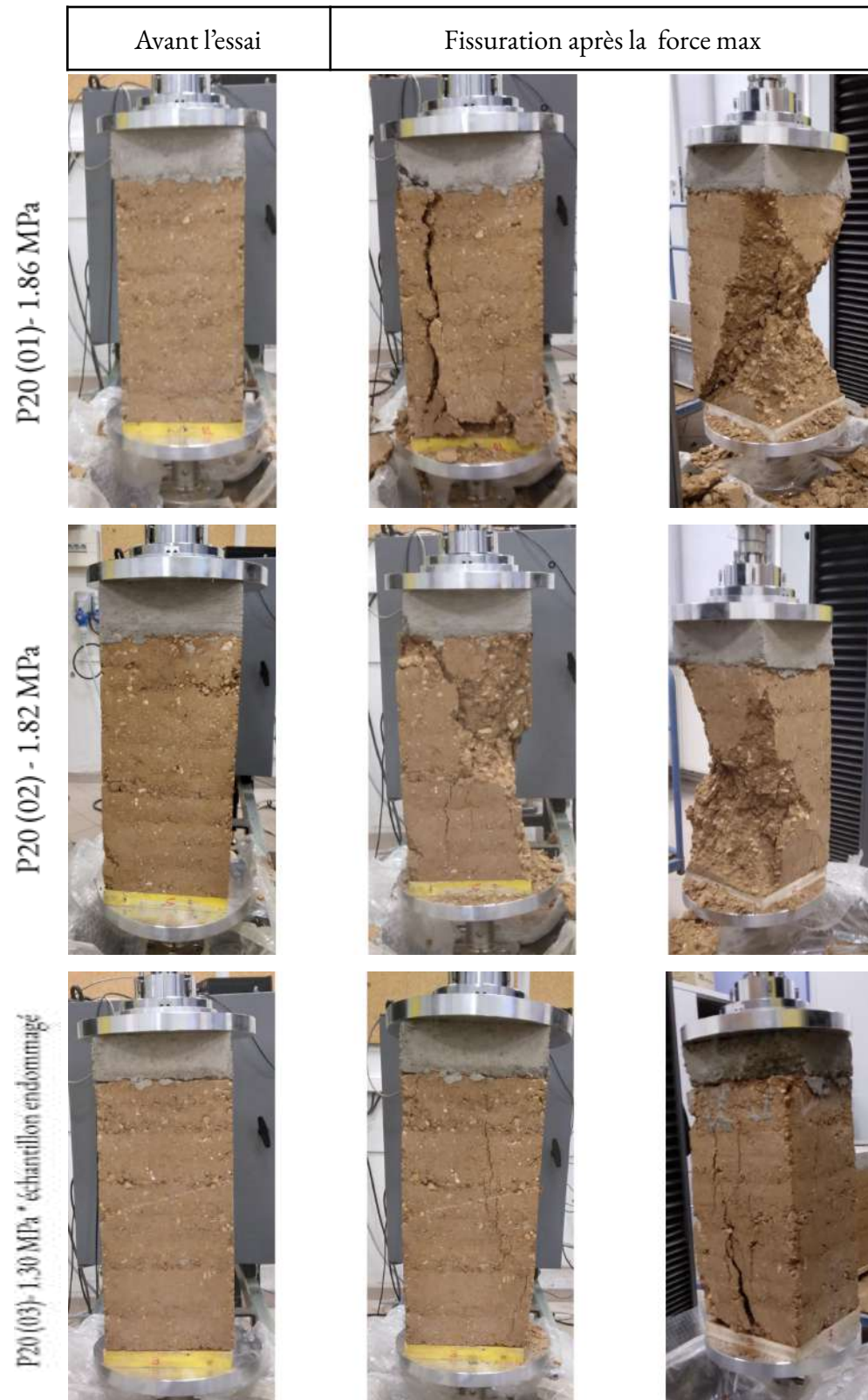
P50-A
























P50-B

	Avant l'essai	Fissuration après la force max		
P50 (04)- 1.29 MPa				
P50 (05)- 1.29 MPa				
P50 (06) - 1.30 MPa				

P20



C_R

	Avant l'essai	Fissuration après la force max			Avant l'essai	Fissuration après la force max	
C_R(01)-2.13 MPa				C_R(02)-1.89MPa			
C_R(03)-1.55 MPa				C_R(04)-1.74 MPa			
C_R(05)-1.68 MPa				C_R(06)-1.57 MPa			
C_R(07)-1.75 MPa							

C_G-A

Avant l'essai	Fissuration après la force max		Avant l'essai	Fissuration après la force max
---------------	--------------------------------	--	---------------	--------------------------------

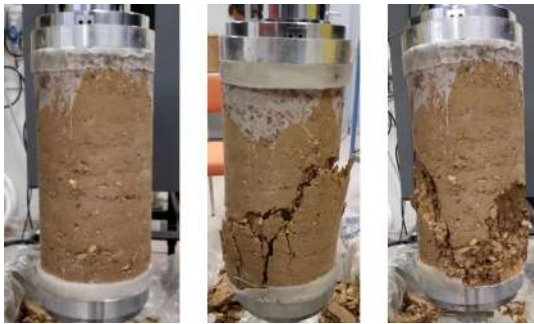
C_G-A(01)-2.39 MPa



C_G-A(02)-2.04MPa



C_G-A(03)-2.03 MPa



C_G-A(04)- 1.65 MPa



C_G-A(05)-2 MPa



C_G-A(06)-2 MPa



C_G-A(07)- 1.8 MPa



C_G-B

Avant l'essai	Fissuration après la force max		Avant l'essai	Fissuration après la force max
---------------	--------------------------------	--	---------------	--------------------------------

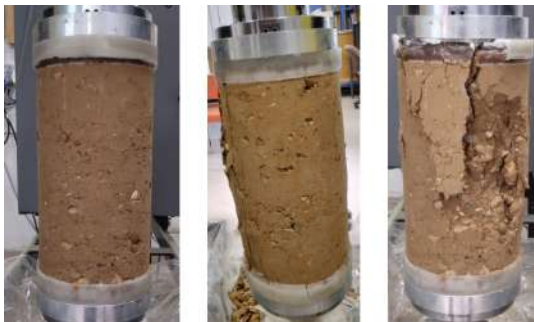
C_G-B(01)-1.78 MPa



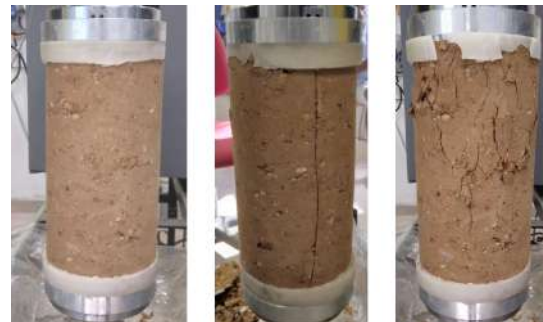
C_G-B(02)-1.72 MPa



C_G-B(03)-1.69 MPa



C_G-B(04)-1.61 MPa



C_G-B(05)-1.47 MPa



C_G-B(06)-1.89 MPa



C_TE-A

Avant l'essai	Fissuration après la force max		Avant l'essai	Fissuration après la force max
---------------	--------------------------------	--	---------------	--------------------------------

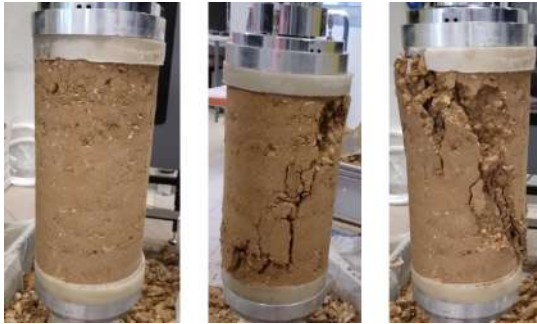
C_TE-A (01)-2.76 MPa



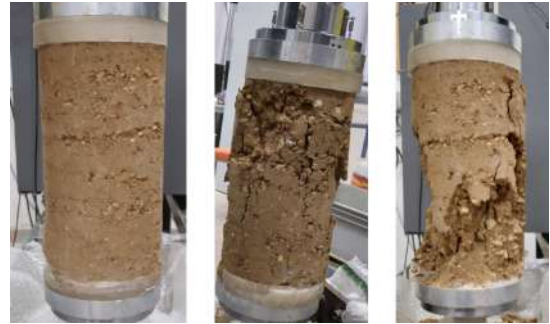
C_TE-A(02)-2.74 MPa



C_TE-A (03)-2.54 MPa



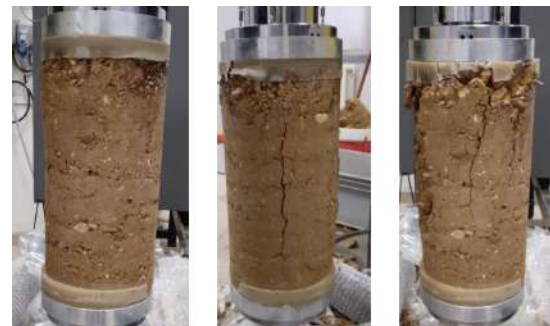
C_TE-A (04)-2.04 MPa



C_TE-A (05)-1.92 MPa



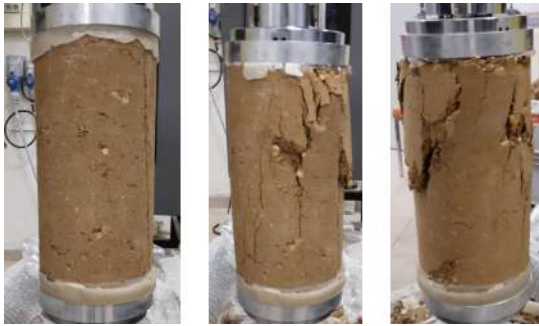
C_TE-A (06)-2.24 MPa



C_TE-B

Avant l'essai	Fissuration après la force max		Avant l'essai	Fissuration après la force max
---------------	--------------------------------	--	---------------	--------------------------------

C_TE-B(02)-1.43 MPa



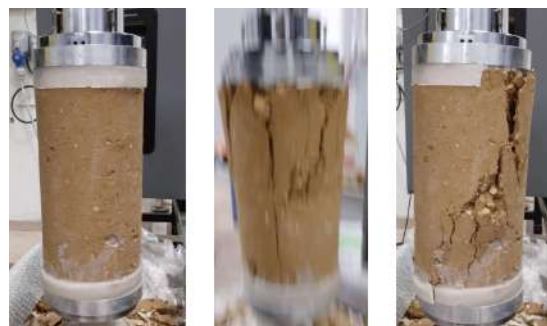
C_TE-B(03)-1.49 MPa



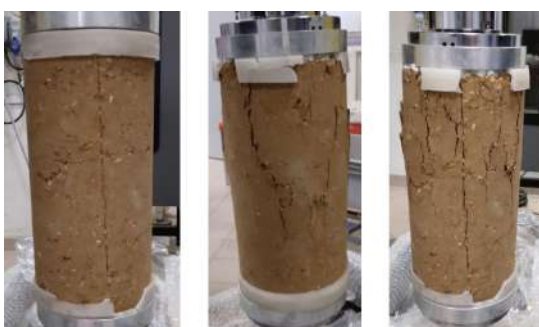
C_TE-B(04)-1.37 MPa



C_TE-B(05)-1.69 MPa



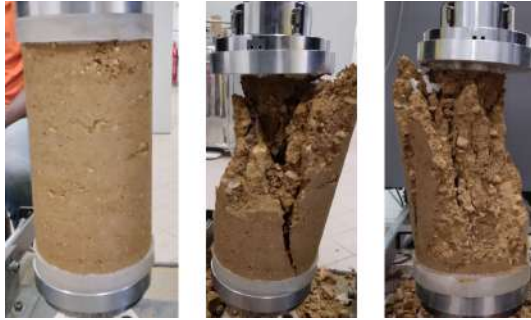
C_TE-B(06)-1.55 MPa



C_CM

Avant l'essai	After		Avant l'essai	After
---------------	-------	--	---------------	-------

C_CM (01)-2.07 MPa



C_CM (02)-2.07 MPa



C_CM (03)-1.97 MPa



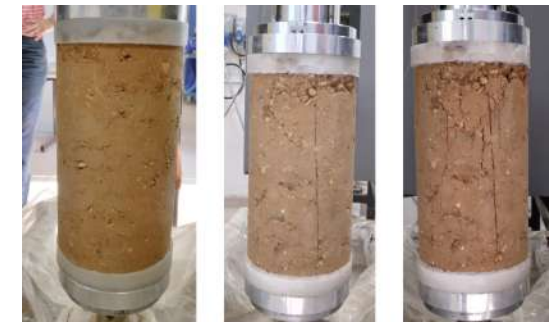
C_CM (04)-2.19 MPa



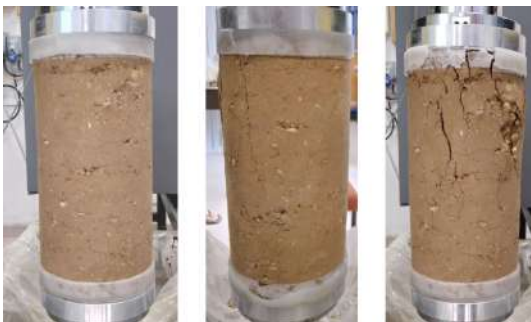
C_CM (05)-2.05 MPa





















C_CM (06)-1.91 MPa



C_CM (07)-2.05 MPa



C_CO

	Avant l'essai	After			Avant l'essai	After	
C_CO (01)-2.06 MPa				C_CO (02)-2.05 MPa			
C_CO (03)-2.60 MPa				C_CO (04)-2.2 MPa			
C_CO (05)-2.89 MPa				C_CO (06)-2.2 MPa			

Eluckkiya ANGALAKURICHI NALLASAMY

eluckkiya@gmail.com

Mémoire de Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement
architecture de Terre - mention patrimoine - promotion 2020-2022