

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Comportement thermomécanique de murs en béton damé avec fines de recyclage

Auteur : Kerckhove, Clément

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14603>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Comportement thermomécanique de murs en béton damé avec fines de recyclage

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du master en Ingénieur Civil Architecte

De Clément Kerckhove

Promoteur : Monsieur Luc Courard

Jury : Monsieur Shady Attia, Monsieur Luc Courard, Monsieur Julien Hubert, Monsieur Boyan Mihaylov, Monsieur Henri Van Bennekom.

Année Académique : 2021 - 2022

Mots-clés : Béton damé, granulats fins recyclés, matériau de construction durable, étude mécanique, étude thermique

Résumé

Le secteur de la construction produit aujourd'hui une forte part des déchets mondiaux. Les constructions en béton vieillissent de plus en plus, il est donc nécessaire de les rénover ou de les démolir créant ainsi un nombre important de déchets qui augmente l'impact négatif sur l'environnement. De nouvelles méthodes de constructions permettant de retrouver une vision plus écologique, durable et responsable doivent voir le jour. L'utilisation des déchets de construction pourrait être une solution plausible car pour le moment ils ne sont réutilisés qu'en tant que matériaux de remblai ou en sous fondation.

L'objectif de cette recherche est de travailler autour d'un matériau damé utilisant en tant que granulats, des fines issues du recyclage du secteur de la construction. L'accent sera porté sur les propriétés thermomécaniques du béton damé. Une étude sera faite autour de la durabilité du matériau face à l'érosion ainsi qu'aux cycles de gel/dégel. Le matériau n'étant pas encore connu à une grande échelle, peu de normes existent pour codifier son utilisation. Les normes concernant la terre damée stabilisée seront ici adaptées pour cette recherche.

Les composants du matériau ont d'abord été caractérisés. En effet, il s'agit de granulats produits à base de déchets provenant d'origines diverses. Il était donc important de bien les caractériser afin d'avoir le plus d'informations possible sur leurs propriétés de façon à interpréter correctement les résultats des essais sur le matériau final. Une analyse des propriétés mécaniques, physiques, thermique et de durabilité a ensuite été faite avec l'étude de la résistance en compression, de la densité, de l'absorption en eau du matériau, de la résistance à l'érosion, de la résistance aux cycles de gel-dégel et de la conductivité thermique.

Les résultats montrent que le matériau possède des qualités mécaniques, thermiques et durables intéressantes pour son utilisation en tant que matériaux de maçonnerie. Le compactage influe fortement sur les propriétés du matériau. Une méthode automatisée et normée permettrait d'obtenir les meilleurs résultats de compactage. Le béton damé fabriqué avec des fines de recyclage possède des propriétés mécaniques proches d'éléments de maçonnerie utilisés de nos jours dans le secteur de la construction.

Abstract

The construction sector today produces a large share of the world's waste. As concrete buildings age, it is necessary to renovate or demolish them, creating a large amount of waste that increases the negative impact on the environment. New construction methods that are more ecological, sustainable and responsible must be developed. The use of construction waste could be a plausible solution as at present it is only reused as fill material or in sub-base.

The objective of this research is to work on a rammed material using fines from the construction sector as aggregates. The focus will be on the thermomechanical properties of the rammed concrete. The durability of the material against erosion and freeze/thaw cycles will be studied. As the material is not yet known on a large scale, few standards exist to codify its use. The standards for stabilised rammed earth will be adapted here for this research.

The components of the material were first characterised. Indeed, the aggregates were produced from waste of various origins. It was therefore important to characterise them well in order to have as much information as possible on their properties so as to correctly interpret the results of the tests on the final material. An analysis of the mechanical, physical, thermal and durability properties was then carried out with the study of the compressive strength, density, water absorption of the material, erosion resistance, resistance to freeze-thaw cycles and thermal conductivity.

The results show that the material has interesting mechanical, thermal and durable qualities for its use as a masonry material. Compaction has a strong influence on the properties of the material. An automated and standardised method would provide the best compaction results. The mechanical properties of rammed concrete made from recycled fines are similar to those of masonry elements used in the construction industry today.

Remerciements

Mes premiers remerciements iront à monsieur Luc Courard, mon promoteur qui m'a offert l'opportunité de travailler sur ce sujet de recherche. Le temps précieux qu'il ait su m'accorder, son aide et son apport important de connaissances tout au long de ma recherche m'ont permis de réaliser, de la meilleure des manières possibles, cette étude.

Je tiens ensuite à remercier monsieur Julien Hubert, pour son aide précieuse durant toute la période de recherche. Son soutien, sa bienveillance et son aide précieuse ont permis de réaliser mon travail de fin d'études dans les meilleures conditions et faciliter au mieux ma recherche.

Je voudrais ensuite remercier les techniciens de l'université de Liège qui m'ont permis de réaliser mes expériences en étant toujours disponible et prêt à apporter leur aide et leurs connaissances.

Il est important pour moi de remercier le jury de mon travail de fin d'étude pour l'intérêt qu'ils portent à ma recherche et leur évaluation des résultats finaux.

Pour terminer, je veux remercier ma famille et mes amis sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. Situation actuelle et problématiques du secteur de la construction	7
1.2. Objectifs de recherche.....	8
1.3. Questions de recherches.....	8
2. Etat de l'art.....	9
2.1. Présentation de la terre damée	9
2.2. Propriétés et caractéristiques de la terre et du béton damé	14
2.3. Utilisation à l'échelle de la construction du « rammed earth »	24
2.4. Comportement des murs en béton damé	28
2.5. Caractéristiques, propriétés et intérêt de l'utilisation des granulats recyclés.....	32
3. Matériaux et essais	35
3.1. Matériaux et préparation des échantillons	35
3.2. Détermination des propriétés physiques et mécaniques	41
3.3. Etude des propriétés thermiques et de durabilité	44
4. Analyse des résultats.....	48
4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques	48
4.2. Caractéristiques thermiques et durabilité du béton damé.....	60
4.3. Discussion de l'utilisation du béton damé dans le monde de la construction.....	63
5. Conclusion	65
5.1. Synthèse	65
5.2. Limites de l'étude et perspectives d'avenir	65
6. Liste des figures.....	67
7. Liste des tableaux.....	69
8. Bibliographies	70
9. Annexes	72

1. Introduction

1.1. Situation actuelle et problématiques du secteur de la construction

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde. Le nombre de nouvelles constructions ne cessant d'augmenter, la problématique de l'utilisation du béton pour la construction de ces nouveaux bâtiments apparaît. En effet, ce matériau consomme une grande quantité d'eau, de ciment et de granulats pour sa fabrication. Or de nos jours, les carrières s'épuisent et se raréfient. Les difficultés en approvisionnement des matériaux ne cessent d'augmenter. Le ciment fait aussi parti des matériaux les impactant écologiquement. L'empreinte carbone de la construction est un débat important aujourd'hui.

Une nouvelle problématique concernant le secteur de la construction voit le jour depuis le début du 21^{ème} siècle. De nombreux bâtiments du 20^{ème} siècle arrivent en fin de vie. Leur rénovation ou déconstruction doit avoir lieu rapidement. Mais cela amène de nombreux déchets qui font partie de plus d'un tiers des déchets produits en Europe. Ils sont par ailleurs principalement déposés dans des lieux de stockage en attente d'un futur recyclage. Le principal recyclage de nos jours reste le remblaiement/sous fondation des routes grâce aux granulats recyclés. Mais la forte quantité de ces granulats doit amener une nouvelle réflexion sur leurs valorisations. Un enjeu environnemental majeur apparaît aujourd'hui autour de la réutilisation des déchets de constructions.

Leur utilisation en tant que granulats recyclés pour la fabrication de nouvelle construction est un moyen écologique et durable de valoriser les déchets de construction. Cette solution permettrait de préserver fortement les ressources naturelles et de limiter le stockage. De nombreux projets travaillent actuellement sur les possibles utilisations des granulats recyclés en tant que nouveau matériau.

De nouvelles méthodes de fabrication sont aussi recherchées pour permettre de diminuer l'impact écologique du secteur de la construction. L'exemple des constructions en terre damée doit influencer les constructeurs. Ce mode de construction utilise des méthodes de fabrication visant à réduire l'empreinte carbone tout en limitant les transports pour l'approvisionnement. La terre damée possède de nombreux avantages que ce soit sur ses capacités de régulation de la température ou encore son côté esthétique. L'association des granulats recyclés à ce mode de construction pourrait permettre une réduction des quantités d'eau au sein du mélange ainsi qu'une valorisation des déchets de constructions. Des études ont permis de jauger des caractéristiques mécaniques du matériau mais très peu de recherches se sont orientées sur la durabilité de ce mode constructif.

1.2. Objectifs de recherche

Cette étude a pour objectif de développer les connaissances autour de l'association du mode de construction de la terre damée à la valorisation des déchets de constructions. L'analyse se portera sur l'utilisation des fines de recyclage et leurs influences sur les caractéristiques du matériau. L'étude thermomécanique du béton damé incorporant des fines issues du recyclage permettra de déterminer si le matériau possède les propriétés nécessaires à une utilisation en tant que matériau de maçonnerie. L'analyse permettra de déterminer en premier lieu l'influence des granulats recyclés sur la densité, l'absorption ainsi que la résistance en compression du matériau. Ensuite, une étude thermique permettra d'apporter plus d'informations sur la conductivité thermique ainsi que la résistance thermique du béton damé. Finalement, la durabilité du matériau sera étudiée via des tests d'érosion de gel/dégel.

1.3. Questions de recherches

L'influence de l'incorporation des fines issues du recyclage au béton damé sera le sujet principal de cette étude. Plusieurs questions seront toutefois mises en avant :

- Quelles sont les influences des fines de recyclage sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau ?
- Quelles sont les propriétés thermiques et liées à la durabilité du matériau ?
- Le béton damé produit avec des fines issues du recyclage peut-il être utilisé en tant que mode de construction ?

2. Etat de l'art

2.1. Présentation de la terre damée

La terre damée prend ses origines dans les temps anciens. De nombreuses expéditions archéologiques ont permis la découverte de constructions utilisant la terre en tant que matière première réalisant ainsi les premiers édifices. Les premières utilisations de ces matériaux peuvent être retracées jusqu'à 10000 avant Jésus-Christ au sein de l'est méditerranéen. Une des plus grandes constructions en terre reste à ce jour la grande muraille de Chine, associant un système constructif en pierre et terre damée. L'utilisation de ce procédé à cette époque relevait surtout de sa facilité de mise en œuvre. Un simple mélange de terre et d'eau permettait de construire rapidement les édifices. L'architecte Vitruve a permis grâce à son ouvrage « De Architectura » de retracer les utilisations d'éléments en terre sous forme de briques au sein de nombreux édifices de son temps.

De nombreuses traces de constructions en terre damée peuvent être trouvées dans les régions du nord de l'Afrique. Ce procédé de construction est utilisé depuis de nombreux siècles sous le nom de « Pisé ». Les propriétés thermiques font de ce matériau un atout majeur dans la gestion bioclimatique des habitations de cette région. Ajoutant à cela un style architectural original, l'usage du pisé est encore aujourd'hui très important dans cette partie du monde.

Au cours des siècles, l'utilisation de la terre s'est diversifiée de par ses méthodes de mise en œuvre ou d'emploi ainsi que dans sa composition avec des ajouts de nouveaux éléments permettant de renforcer le matériau. Mais l'idée première reste la même. En effet, la simplicité de fabrication du matériau sur site en utilisant dans le meilleur des cas le sol présent sur place, fait de ce mode de construction, une solution écologique et durable.

Plusieurs techniques pour la réalisation d'un système constructif en terre peuvent être mises en avant comme par exemple le torchis qui est un élément fortement présent sur le territoire français. Il s'agit d'un mélange de terre, de paille et d'eau que l'on vient associer à des montants porteurs en bois assurant ainsi l'équilibre structurel de l'édifice. Les maisons à colombage (exemple en figure 1), symbole important de l'architecture alsacienne, utilisent ce procédé depuis de nombreux siècles.



Figure 1 : Maison à colombage produite avec du torchis (source : Build-green.fr)

Un autre système utilisant la terre est l'adobe. Ce procédé de fabrication de briques de terre crue séchée mélangée à de la paille et de l'eau, permet de construire des édifices avec de bonnes capacités de reprises d'efforts verticaux. Un moulage manuel est réalisé pour obtenir la forme souhaitée bien que la forme la plus classique reste avant tout la brique rectangulaire (figures 2 ¹). Ce système peut être considéré comme l'ancêtre de la maçonnerie.



Figures 2: Façonnage de briques de terre comprimées (source : amaco.org)

¹ Source : <https://amaco.org/btc-briques-de-terre-comprimee/>

Plus récemment, un procédé similaire à l'adobe a pu voir le jour. Il s'agit des briques de terre comprimée. La différence est que dans ce cas-ci, les briques vont être moulées en utilisant de la terre ainsi que de l'eau puis être pressées pour renforcer les capacités mécaniques de l'élément de construction (Laneyrie Cléo, 2014).

L'utilisation de la terre sous les différentes formes précédemment introduites, a été oubliée en majeure partie durant le dernier siècle dû à l'utilisation de matériaux plus performants permettant de réaliser des structures de plus grandes envergures. Le béton est devenu l'élément structurel le plus utilisé au monde depuis plus d'un siècle. Mais de nos jours, la problématique de la construction verte et durable commence à prendre de l'ascendant. La surconsommation de matériaux difficilement recyclables, l'utilisation de ressources qui s'épuisent fortement ou encore le transport de matériaux et leur transformation provoquent une importante remise en question et il devient urgent de repenser nos méthodes de constructions. C'est dans cette optique que les constructions utilisant la terre refont surface (Taghiloha Ladan, 2013). L'étude réalisée par Morel a mis en avant l'impact énergétique de différents modes constructifs dans le cas particulier de la construction d'une maison (Morel et al., 2001). L'utilisation de matériaux locaux ou présents sur site comme dans le cas de la terre damée permet une économie importante de la quantité d'énergie consommée pour la construction mais aussi le transport (tableau 1).

	Maçonnerie	Terre damée	Béton
Energie consommée (GJ)	97	70	239
Energie transport (t.km)	1390	1041	6707

Tableau 1 : Consommation énergétique pour différents types de constructions (source : Morel, 2001)

Une nouvelle volonté du travail en architecture repose de nos jours sur le fait de concevoir des constructions plus réfléchies. Deux idées majeures sont mises en avant : la seconde vie des constructions ainsi qu'une méthode claire et écologique de déconstruction qui permettra de diminuer un maximum les déchets. Le recyclage des déchets de construction est aujourd'hui un point clé de l'évolution (Bui Quoc-Bao, 2008).

De nombreuses recherches traitent du sujet de la terre damée essayant de produire un matériau plus performant, plus écologique et durable pouvant à terme devenir le nouveau matériau de prédilection. De nombreuses avancées ont déjà pu être observées avec l'ajout de produit stabilisant le matériau (Taghiloha Ladan, 2013). C'est en Australie et en Amérique du Nord que le plus grand nombre de nouvelles habitations utilisant ce mode de construction peuvent être retrouvé.

La stabilisation du matériau permet d'améliorer les performances comme face à l'érosion qui est l'un des défauts majeurs de la terre damée. Cela permet aussi de pouvoir augmenter fortement sa résistance mécanique pour réaliser des édifices de

plus grandes importances (Bui Quoc-Bao, 2008). Les stabilisants sont nombreux et peuvent varier selon les régions.

Néanmoins, les stabilisants utilisés dans ces nouveaux mélanges amènent une importante augmentation de l'empreinte carbone de ce matériau (Arrigoni et al., 2019). L'utilisation du ciment en majeure partie rend le mélange de terre beaucoup plus performant et permet d'atteindre des capacités portantes de l'ordre de 50 MPA (Projet 2 and U, Seattle, entreprise Sirewall)². Mais l'utilisation de ciment amène une consommation énergétique plus forte (Taghiloha Ladan, 2013). L'achat de ciment ou d'autres stabilisants augmente aussi le coût de construction à comparaison de la construction en terre non stabilisée (Bui Quoc-Bao, 2008). C'est pourquoi de nombreuses recherches préfèrent s'orienter vers des méthodes alternatives de stabilisation plutôt que le ciment (Meek et al., 2021). Toujours dans l'idée de vouloir diminuer les impacts écologiques des constructions, l'utilisation de produits tels que la chaux, les cendres volantes ou encore des agents moins courants comme des produits issus du monde végétal, va permettre d'utiliser des produits qui deviendraient des déchets dans le cas contraire mais aussi d'apporter aux mélanges, des caractéristiques précises qui peuvent être recherchées par l'utilisation de ces stabilisants (Minke, 2006).

La durabilité et les caractéristiques de résistance mécanique de la terre damée reposent non seulement sur les stabilisants mais aussi sur le type de granulats qui composent le matériau (Taghiloha Ladan, 2013). Au fil des siècles et du développement de l'utilisation de la terre damée, l'usage le plus classique restait le sol présent sur place. Cela évitait les nombreux transports entre les lieux d'approvisionnement. De nombreuses recherches ont permis de définir des caractéristiques pour des sols qui sont possiblement utilisables en tant que matériau stabilisé (Taghiloha Ladan, 2013). Les résultats de ces recherches se retrouvent en figure 3. L'analyse du retrait linéaire ainsi que la résistance en compression simple donnent lieu à la validation de la stabilisation du sol ou non.

² Source : <https://www.sirewallusa.com/2-and-u>

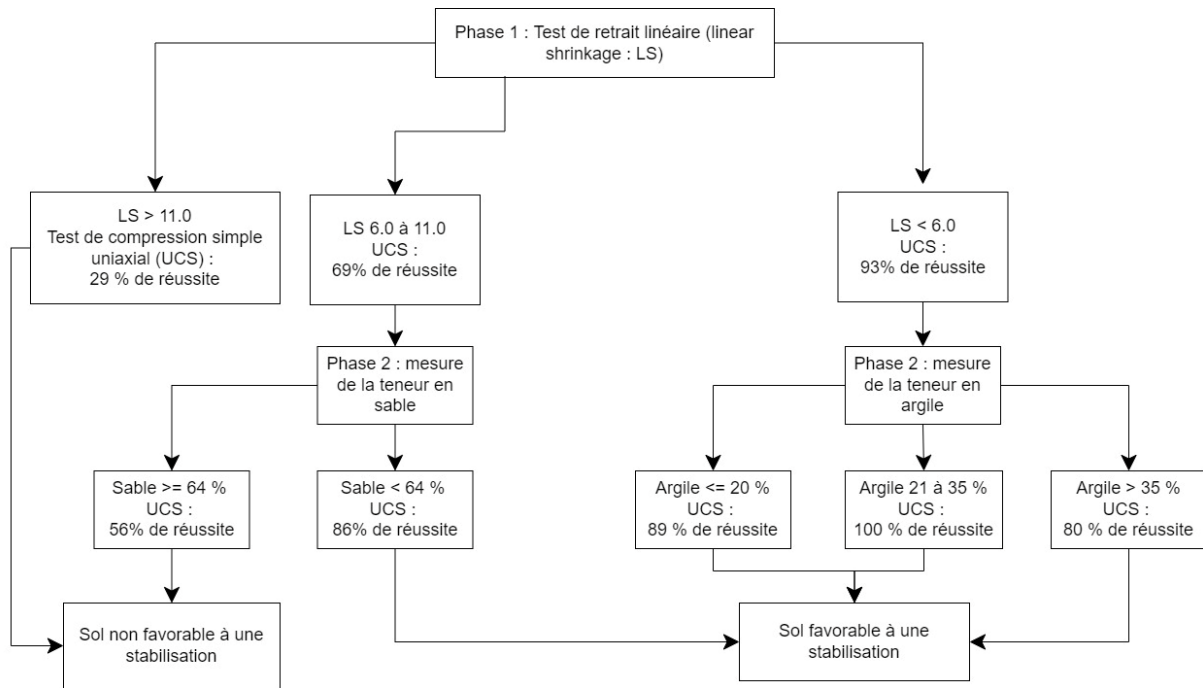


Figure 3: Procédures à réaliser pour déterminer de la possible stabilisation d'un sol (résultat du test en compression supérieur à 2 MPa) (source : Burroughs, 2010)

En vue de développer à la fois l'utilisation de la terre damée et la valorisation des déchets de construction, des études portent aujourd'hui sur un usage des déchets de recyclage au sein d'un mélange damé qui permettrait de fabriquer le « Rammed Concrete » (béton damé).



Figure 4 : Réalisation en terre damée stabilisée (source : narbovia.fr)



Figure 5 : Réalisation en béton damé (source : actu.epfl.ch)

Un résumé des différentes normes et réglementations utilisées pour la caractérisation de la terre damée est donné dans le tableau 2. A ce jour, peu de normes sont en vigueur pour l'utilisation de la terre stabilisée ou non. Seule la Nouvelle-Zélande a produit des normes spécifiques. Dans les autres pays, ce sont les normes produites pour les bétons courants qui sont plus généralement utilisées lors de l'étude de la terre stabilisée en particulier pour les études de durabilité. Pourtant, le matériau reste assez différent en termes de composition mais aussi de méthode de fabrication.

Document	Ref.	Country	Properties of the Soil mixture			Properties of the Material			
			Granulation	Organic substances	Soluble salts	Plasticity	Compressive strength	Tensile strength	Durability
CSIRO Bulletin 5, 4th ed. (1995)	[15]	Australia		X			X		X
EBAA (2004)	[16]			X	X		X		
HB 195-2002	[17]			X			X	X	
NBR 13553 (1996)	[18]	Brazil	The standard does not contain numerical requirements						
Lehmbau Regeln (2009)	[19]	Germany		X	X		X		X
IS: 2110 (1998)	[20]	India		X		X	X		
IS: 13827 (1998)	[21]			X		X			
PCH-2-87 (1988)	[22]	Kyrgyzstan	X		X	X	X		
NZS 4297 (1998)	[23]	New Zealand			X		X	X	X
NZS 4298 (1998)	[12]								
NZS 4299 (1998)	[24]								
14.7.4 NMAC (2006)	[25]	USA	X	X	X		X		
ASTM 2392/E2392M (2010)	[26]		The standard does not contain numerical requirements						
ASTM D 560 (1996)	[27]								X
ASTM D559 (2003)	[28]								X
SAZS 724 (2001)	[29]	Zimbabwe	X	X	X		X		
BN-62/6738-01	[30]	Poland	X				X	X	X
BN-62/6738-02	[31]								
MOPT Tapial (1992)	[32]	Spain	X	X			X		

Tableau 2 : Normes mondiales pour l'étude de la terre damée. (Source : Narloch & Wojciechowski, 2020)

2.2. Propriétés et caractéristiques de la terre et du béton damé

Les travaux à ce jour restent nombreux sur l'étude des caractéristiques du « rammed earth » (terre damée). Il existe deux types majeurs : les éléments non-stabilisés et les éléments stabilisés par des ajouts de nouveaux composants. Les constructions en terre stabilisée s'appuient sur les terres non-stabilisées tout en venant améliorer le concept. Les capacités hygrothermiques, la facilité de mise en œuvre et l'aspect architectural sont les atouts principaux du matériau. Puis il est amélioré par une addition d'agents stabilisants permettant de retrouver des capacités de durabilité et de résistance.

2.2.1 Caractéristiques mécaniques

Le comportement mécanique des terres stabilisées ou non dépend fortement des granulats du mélange, car ils favorisent fortement la résistance du matériau (Birznieks Lauris, 2013). La forme des granulats, leurs dimensions ainsi que la proportion en argile peuvent impacter fortement les capacités mécaniques. Les méthodes de compactage doivent être sélectionnées avec soin. En effet, en fonction de la teneur en eau du matériau, l'énergie de compactage devra être adaptée.

Le comportement de la terre damée peut être rapproché de celui du béton. La meilleure résistance est la compression et la plus grande faiblesse est la traction. Les études de Minke en 2006 sur un matériau optimisé non stabilisé donnent des valeurs qui avoisinent les 0.5 à 5.5 MPa en compression avec un module d'élasticité compris entre 600 et 850 kg/mm² (Minke, 2006).

Les résistances en traction et en cisaillement sont quant à elles assez faibles comprises entre 0.05 MPa et 0.65 MPa (figure 6).

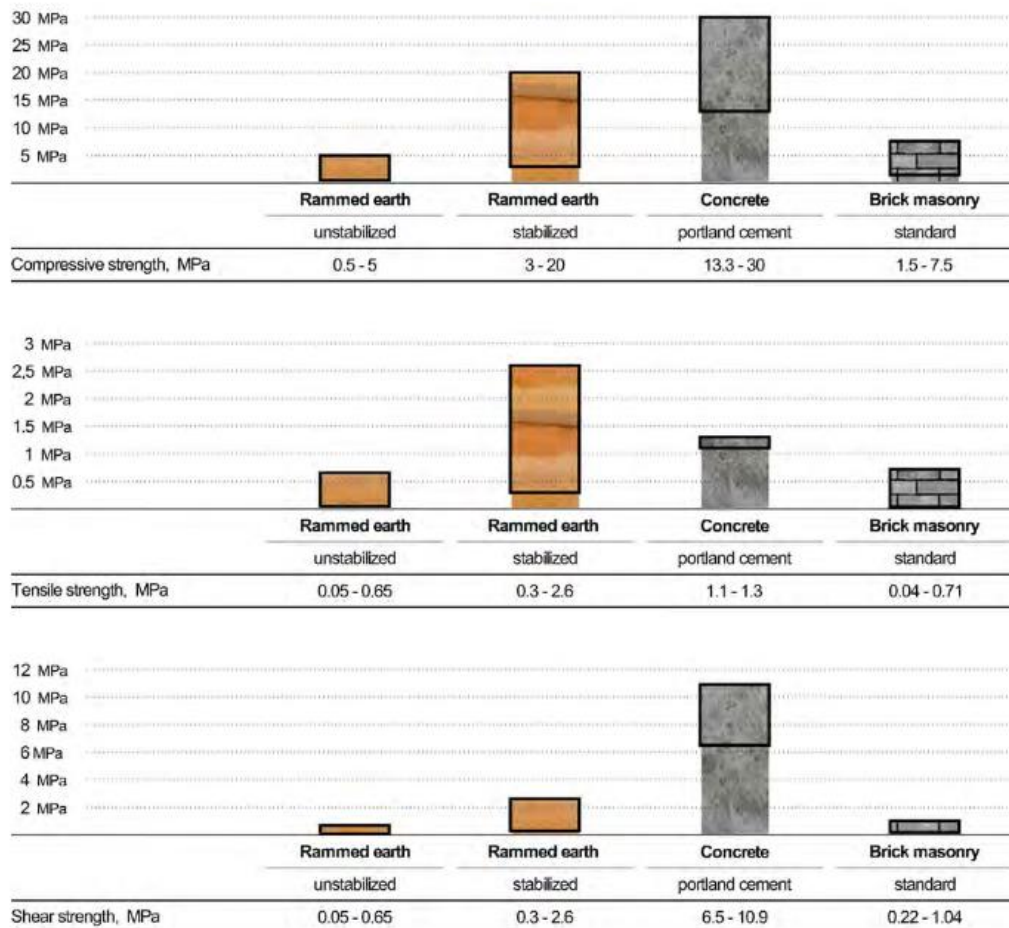


Figure 6 : Comparaison des propriétés mécaniques de la terre damée stabilisée, non stabilisée, du béton ainsi que de la maçonnerie (source : Birznieks Lauris, 2013)

Le matériau non stabilisé ne sera pas un matériau utilisé pour ses performances de reprise d'effort. C'est dans cette perspective qu'une stabilisation peut permettre de franchir des paliers de résistances qui amène à la construction de bâtiment beaucoup plus important.

Les ajouts de ciment ou de chaux en tant que stabilisateur, permettent d'améliorer en tout point les caractéristiques de résistances que ce soit en compression mais aussi en tension comme le montre l'étude de A.H. Meek de 2021. Cette étude porte sur une analyse des nouveaux ajouts stabilisateurs tout en faisant varier les types de granulats. Dans le tableau 3, la référence « CL.C » correspond à l'utilisation de « Crushed Limestone » avec comme stabilisant, le ciment. La composition utilisée était de 8% de ciment pour 10% d'eau. La résistance en compression atteint les 11 MPa contre les 5 MPa maximum pour un élément non stabilisé.

Stabiliser	Mix	DD _{av} (kg/m ³)	f_c (MPa) {CoV (%)}	f'_c (MPa)	E_{RE} (GPa)	ν	G (GPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa) {CoV (%)}	f'_{ct} (MPa)
Cement-stabilised Alkali-activated	CLC	1875	11.11 {9}	9.49	7.5	0.18	3.20	2.30 {6}	1.78
	CLAA	1973	21.38 {6}	15.32	9.79	0.17	4.19	2.57 {15}	1.95
	BCAA	2009	24.07 {7}	17.80	8.0	0.15	3.50	3.24 {5}	2.94
Lime-activated	CLL	1853	12.95 {8}	11.34	7.50	0.20	3.20	1.90 {6}	1.72
	BC.L	1889	14.22 {7}	12.49	7.30	0.15	3.20	1.95 {6}	1.77
Self-activated	CLS	1843	7.74 {8}	6.68	5.60	0.20	2.40	1.01 {7}	0.89
	BC.S	1930	9.27 {5}	8.44	5.73	0.16	2.47	1.97 {10}	1.04

All results at 28 days from manufacture; DD_{av}: average dry density; CoV = Coefficient of variation; f'_c : characteristic compressive strength; E_{RE} : elastic modulus of rammed earth; ν : Poisson's ratio; G: shear modulus; $f_{ct,sp}$: splitting tensile strength; f'_{ct} : characteristic uniaxial tensile strength.

Tableau 3 : Propriétés mécaniques de la terre damée associée à différents stabilisants (source : Meek et al., 2021)

L'étude produite par Anysz et Narloch et résumée dans le tableau 4, montre que l'ajout de ciment ainsi qu'une optimisation du mélange granulaire amènent des différences en termes de résistance en compression. En comparaison avec l'étude de Meek, les meilleures résistances sont obtenues avec 9% de ciment et non à 10%, prouvant ainsi que le choix du mélange granulaire reste tout aussi important pour les résistances du matériau.

Sample Number	Particle Size Distribution [%]				Cement Addition [%]	Moisture Content [%]	Density of the Sample [kg/m ³]	Compressive Strength [MPa]
	Clay $\phi > 0.002$ [mm]	Silt $\phi \geq 0.002$ $\phi < 0.063$ [mm]	Sand $\phi \geq 0.063$ $\phi < 2.0$ [mm]	Gravel $\phi \geq 2.0$ $\phi < 4.0$ [mm]				
6	0.105	0.192	0.403	0.300	3	9	2295	4.01
81	0.105	0.192	0.403	0.300	6	8	2240	6.45
108	0.105	0.210	0.585	0.100	6	8	2218	5.43
125	0.105	0.210	0.585	0.100	6	10	2299	5.55
144	0.105	0.219	0.676	0.000	6	10	2265	5.16
179	0.140	0.244	0.416	0.200	9	10	2301	5.97
219	0.105	0.192	0.403	0.300	9	9	2274	5.91
245	0.105	0.192	0.403	0.300	9	12	2240	5.55
328	0.070	0.176	0.754	0.000	9	8	2241	9.75
364	0.105	0.192	0.403	0.300	10	13	2282	7.06

Tableau 4 : Comparaison des propriétés mécaniques de la terre damée avec une variation de sa composition (source : Anysz & Narloch, 2019)

La recherche autour de l'utilisation des déchets de construction s'intensifie fortement de nos jours. Très peu d'études traitent pour le moment de ce sujet. Un des soucis majeurs de la faible quantité d'études réside dans le fait que les granulats issus du recyclage possèdent des caractéristiques différentes. Le type de chantier, le type de construction ainsi que le type de matériau composant les déchets peuvent influencer les caractéristiques du nouveau matériau produit à partir de ces déchets.

Lors du travail de recherche de Makara Long, une analyse sur les quantités de ciment ou encore la quantité d'eau au sein des mélanges a permis d'apporter de nouvelles données au sujet du « rammed concrete » (Long Makara, 2021). Ce matériau relativement similaire à la terre damée possède des caractéristiques différentes selon le type de granulats utilisés. Dans le tableau 5, la différence en termes de résistance en compression peut déjà être mise en avant en comparant les « Original RFAs » (fines de recyclage) avec une résistance de 11 MPa et les « washed RFAs » (fines de recyclage lavées) avec une résistance de 17 MPa. Le lavage des granulats recyclés améliore la résistance suite notamment à la disparition des argiles mais aussi sans doute à l'enlèvement de certaines parties restantes de ciment sur les granulats recyclés. Les valeurs de résistances en compression restent toutefois dans l'ordre de grandeur des résistances en compression des terres damées stabilisées c'est à dire entre 7 et 11 MPa.

Aggregate type	Batch	Cement [%]	Water [%]	Aggregate [%]	Compressive strength [MPa]
Original RFAs	R1	15	5	80	6.16
	R2	15	10	75	11.36
	R3	15	15	70	7.83
	R4	5	10	85	3.10
	R5	10	10	80	6.81
Natural sands	NS	15	10	75	30.52
Washed RFAs	WR	15	10	75	17.19
Original RFAs	ER1	15	5	80	4.96
	ER5	10	10	80	10.44

Tableau 5 : Comparaison de la résistance en compression simple pour différentes compositions de béton damé (source : Long Makara, 2021)

L'étude de Arrigoni présentée dans la figure 7, démontre l'impact important de l'incorporation au mélange de granulats recyclés sur la résistance en compression simple. Les essais portent sur la variation de la quantité de RCA au sein de plusieurs mélanges reprenant deux types de sols différents. Lorsque la proportion des granulats issus du recyclage (« RCA ») avec une granulométrie entre 0.6 et 19mm atteint les 100 %, la résistance en compression se situe autour des 4 MPa. Alors que pour un mélange utilisant uniquement des granulats naturels, la résistance s'élève à 15 MPa. Il y a donc un juste milieu à trouver lors de l'utilisation de fines issues du recyclage pour trouver des optimums en termes de résistance, d'impact écologique et économique (Arrigoni et al., 2018).

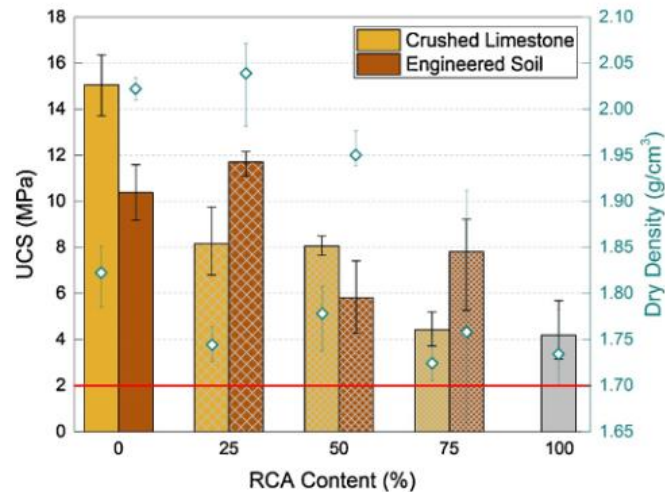


Figure 7 : Résistance en compression simple et densité en fonction de la teneur en granulats recyclés (source : Arrigoni et al., 2018)

2.2.2. Propriétés et performances thermiques

La capacité hygrothermique de la terre va fortement influencer sur l'utilisation de ce matériau en tant que mode constructif. Comme tout matériau lourd, l'effet de mur de masse permet de stocker la chaleur et ainsi de réguler la température au sein des habitations pour améliorer le confort de vie.

Le confort thermique sera apporté par une épaisseur de mur importante favorisant la régulation naturelle de la température et réduisant les amplitudes thermiques entre la journée et la nuit. Lors de la journée, de fortes chaleurs seront présentes au sein de l'habitation. Mais les murs épais de terre vont venir stocker cette énergie pour la restituer au sein du bâtiment durant la nuit assurant ainsi un confort constant au sein de la journée (Laneyrie Cléo, 2014).

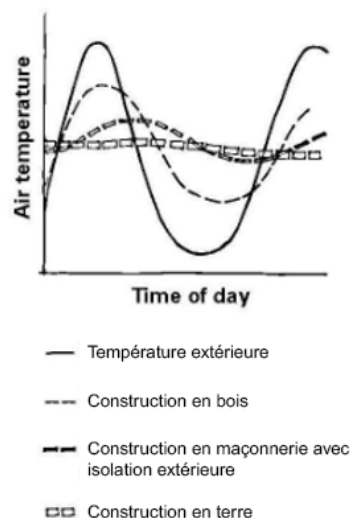


Figure 8 : Influence de la masse thermique dans le confort du bâtiment (source : Bui Quoc-Bao, 2008)

Ainsi, la masse thermique d'un mur en terre damée va permettre une réduction des énergies consommées pour le chauffage mais aussi pour les périodes de climatisation de plus en plus fréquentes avec les surchauffes dans les logements. Mais il s'avère que selon certaines études, cet effet de masse obtient son optimum pour un mur d'une épaisseur de 20cm (Hall & Allinson, 2008). Au-dessus de cela il devient compliqué au mur de capter toute l'énergie calorifique sur une période de 24h à cause des fluctuations.

Malgré de bonnes capacités hygrothermiques, la terre n'est pas un matériau possédant de bonnes capacités isolantes. La résistance thermique de la terre damée a pu être calculée lors de nombreuses études comme par Hall et Allinson ou encore le CSIRO, centre de recherche en Australie : ces études ont pu mettre en avant la faible résistance thermique comme le montre le tableau 6 (Bui Quoc-Bao, 2008). Les valeurs de résistances sont en effet toutes plus faibles que la norme Australien de 1.3 m².°K/W.

Etude	Type d'échantillon de pisé	R (m ² K/W)
CSIRO	20 cm d'épaisseur	0,4
Hall et Allinson	30 cm d'épaisseur	0,48 - 0,54
-	40 cm d'épaisseur	0,58 - 0,66
-	40 cm d'épaisseur, dont 5 cm d'isolation	2,91 - 2,97
Règlement (Australie)		≥ 1,3

Tableau 6: Comparaison de la résistance thermique en fonction de la taille de l'échantillon de pisé (source : Bui Quoc-Bao, 2008)

Les résultats de Hall et Allinson (tableau 6) se portent sur des matériaux stabilisés à 6% de ciment. Lorsque l'on étudie pour une épaisseur de 30 cm, un matériau isolant comme la laine de roche et un matériau de construction classique comme le parpaing, les résistances thermiques sont respectivement de 7.5 m².°K/W et 0.6 m².°K/W. Cela prouve le fait que la terre damée possède une résistance thermique faible. Lors de leur étude, il a été prouvé que la granulométrie ainsi que la teneur en eau dans le matériau influencent fortement la résistance thermique. Cela provient des pores fortement présents dans le matériau qui vont favoriser l'apparition de « ponts thermiques ». Comme le démontre dans son étude Siyimane Mohaine, « la conductivité thermique des matériaux cimentaires augmente avec leur teneur en humidité et ce proportionnellement à leur porosité. ». En effet, la conductivité de l'eau est 25 fois supérieure à celle de l'air (respectivement 0.6 W/m.°K et 0.024 W/m.°K) (Siyimane Mohaine, 2018). Dans la figure 9, Birznieks met en avant une saturation de 60% dans un élément produit en terre stabilisée peut atteindre une augmentation de 50 % de sa conductivité lors de la période de séchage.



Figure 9 : Comparaison des conductivités thermiques entre la terre damée stabilisée ou non, le béton et la maçonnerie (source : Birznieks Lauris, 2013)

L'ajout d'une isolation légère permet d'améliorer grandement la résistance bien que cela ne corresponde plus aux caractéristiques originales du matériau qui se voulait respirant. Plusieurs solutions ont été étudiées au cours du temps en fonction de l'emplacement de l'isolant, si sa présence était plus appropriée entre deux couches de matériaux ou en extérieur (Ciancio & Beckett, 2013).

2.2.3 Impact de l'humidité

La terre stabilisée ne possède pas que des avantages. L'un des défauts majeurs reste la gestion face à l'humidité qui peut apporter de nombreuses dégradations ainsi que des problèmes en termes de résistances mécaniques. Les nombreux pores du matériau induisent une importante et rapide absorption de l'eau qui se situera en contact avec la construction (Gallipoli et al., 2017).

Selon Birznieks, la résistance en compression des matériaux humides peut être réduite de 50%. Des baisses de performances thermiques ainsi que des variations de dimensions des éléments construits peuvent aussi survenir. Dans une étude produite par Dierks et Ziegeri, des essais réalisés sur des éprouvettes de terres non stabilisées ont pu voir passer leur résistance en compression, de 5.7 MPa avec une humidité à 5% à 2.3 MPa à une humidité à 95%.

C'est par la capillarité que l'eau va donc remonter au sein du matériau et s'infiltrer au sein des pores. Pour résoudre ces soucis, il est important d'avoir un compactage important ainsi qu'une granulométrie adaptée qui permettra de réduire un maximum les pores. La surface de l'élément construit devra elle aussi être lisse ne permettant pas à l'eau de venir s'infiltrer. Une forte densité permettra de résoudre ce souci ainsi que l'utilisation de ciment dans la composition qui diminuera un maximum les pores en réagissant avec l'eau du mélange. C'est pour cela que les problèmes de capillarité sont moindres sur les terres stabilisées (Meek et al., 2020).

La condensation sur les surfaces intérieures est aussi un phénomène augmentant l'impact de l'humidité dans le matériau. La terre possède de bonnes qualités d'absorption et de désorption de vapeur ce qui fait du matériau un excellent régulateur d'humidité ambiante avec une valeur constante autour de 50%. C'est aussi

malheureusement, à cause de cela que la présence de condensation peut survenir lorsqu'une forte différence de température entre l'intérieur et l'extérieur existe (Birznieks Lauris, 2013)

Le mur doit être conçu de manière à éviter les points de rosées au sein du matériau. Des protections peuvent être appliquées sur les éléments comme des hydrofuges empêchant ainsi l'infiltration de l'eau ou encore la mise en place de système évitant au mur d'être en contact direct avec l'eau.

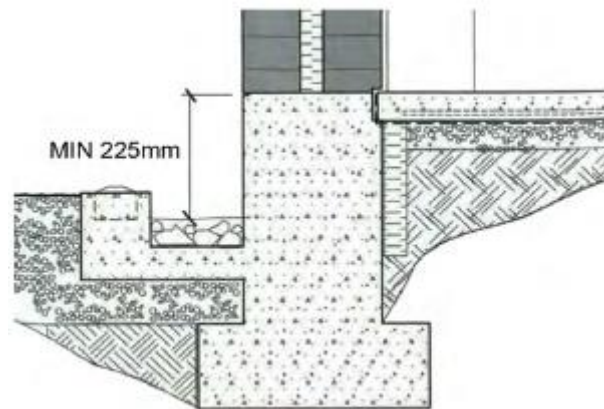


Figure 10: Décaissement du sol près des murs en terre (source : Birznieks 2013)

2.2.4 Durabilité du matériau face à l'érosion et au gel/dégel

L'étude de la durabilité sur le sujet a déjà été traitée depuis de nombreuses années lorsque l'on se réfère au pisé. Le défaut majeur de la terre damée en termes de durabilité est l'érosion qui vient impacter fortement les structures (Minke, 2006).

L'érosion est causée par l'énergie de la pluie qui vient s'abattre sur les murs. Plusieurs facteurs peuvent aggraver ce phénomène comme l'intensité des pluies, l'angle d'attaque sur le mur ou encore la rugosité de celui-ci. Une des solutions de protection peut être une avancée de toiture couvrant ainsi le mur de la pluie (Laneyrie Cléo, 2014). De nombreux tests sont réalisés pour étudier la résistance à l'érosion de la terre stabilisée ou non comme par exemple le test du goutte à goutte ou le test au jet d'eau sous pression (Bui Quoc-Bao, 2008).

L'étude de cas concrets de bâtiments existants en pisé stabilisé ou non permet de voir l'évolution au cours du temps de l'impact de l'eau sur nos murs. C'est le cas dans l'étude de Bui qui a mesuré une érosion de 5 à 10 mm sur un mur de pisé non stabilisé, exposé durant 20 ans à un climat humide continental. Domenico Gallipoli extrapole les résultats de cette étude pour en donner une simplification : 25 à 80 mm de surface peuvent être érodés sur une période de 100 ans pour un élément non stabilisé.

Narloch a quant à lui étudié plus particulièrement les effets de l'érosion sur la terre stabilisée. Ces tests sont réalisés sur des éprouvettes possédant soit un mélange granulaire composé principalement de sable soit composé de graviers. La quantité de ciment varie ensuite entre les différentes éprouvettes pour juger de l'efficacité de la stabilisation sur la résistance face à l'érosion.

Mixture Symbol	Sand	Gravel	Silt + Clay	Cement	Water
703 0% CEM I	1465	0	628	0	209
703 6% CEM I	1391	0	596	119	211
703 9% CEM I	1357	0	582	174	211
433 0% CEM I	893	670	670	0	156
433 6% CEM I	830	622	622	124	176
433 9% CEM I	792	594	594	178	194

Tableau 7 : Composition des éprouvettes test de l'étude de Narloch (source : Narloch & Woyciechowski, 2020)

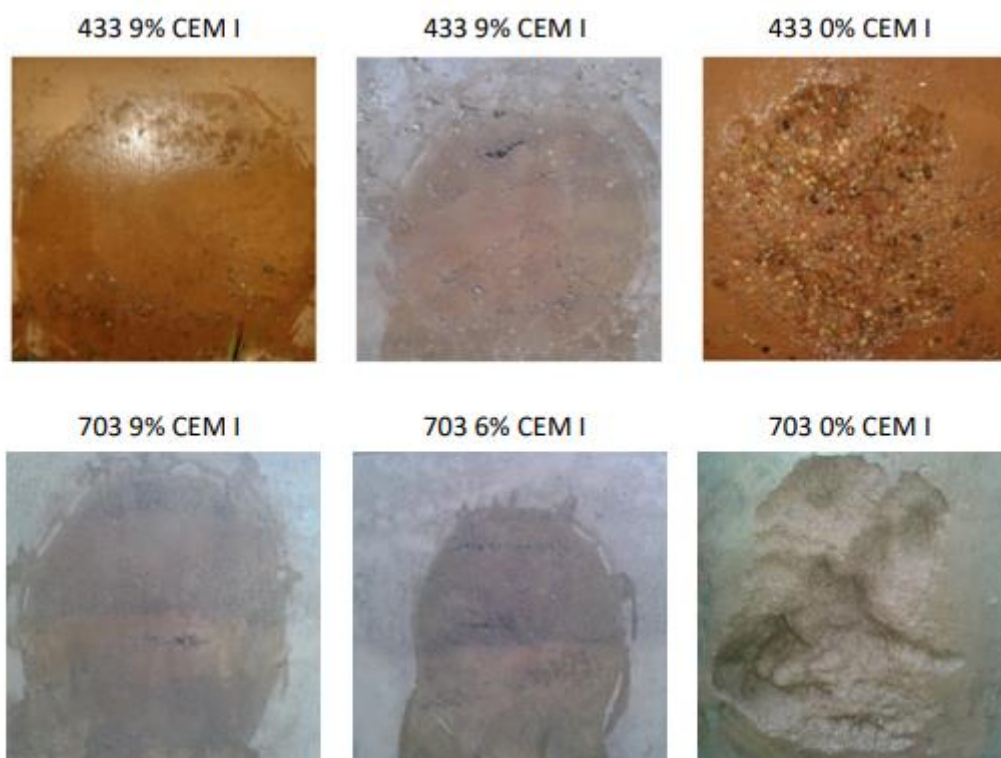


Figure 11 : Surfaces des éprouvettes suite aux tests d'érosion (source : Narloch & Woyciechowski, 2020)

Test Time, [min]	433	703	433	703	433	703
	9% CEM I		6% CEM I		0% CEM I	
Depth of erosion D, mm						
15	1	0	1	0	3	24
30	1	1	2	0	9	33
45	1	2	2	0	15	45
60	1	2	2	0	20	53
Ratio of susceptibility to water erosion	1	1	1	1	2	3
Test conditions set for Phase II						
Time of water exposure in [min]	4	4	4	4	2	1
Number of cycles	6					

Tableau 8 : Profondeur d'atteinte de l'érosion lors des tests de Narloch (source : Narloch & Woyciechowski, 2020)

L'ajout de ciment impacte fortement la résistance du matériau face à l'érosion en passant de 20 mm à 2 mm pour un test de 60 minutes sur un ajout de 6% de ciment au mélange (tableau 8). Les résultats prouvent qu'il n'est pas nécessaire de mettre une grande quantité de ciment car entre 6 et 9%, l'érosion a le même impact.

Le second test de durabilité d'un élément en terre est la résistance face aux périodes de gel/dégel. L'association du problème d'humidité à des périodes de gel dégel peut amener le matériau à de sérieux dommages ainsi qu'à une augmentation de la quantité d'eau qu'il peut absorber. C'est durant la période de séchage que le matériau est le plus vulnérable car il possède une importante saturation en eau et cela peut causer de graves problèmes mécaniques pour la stabilité et la durabilité de l'édifice. Une étude a pu mettre en évidence ce type de dommages sur des constructions réalisées en Auvergne-Rhône-Alpes, région de France (Traoré et al., 2021). Les problèmes liés au gel/dégel sont associés à deux grandes catégories : l'écaillage en surface et le gel interne. La répétition de cycles de gel/dégel détériore le matériau jusqu'à la perte totale de résistance.

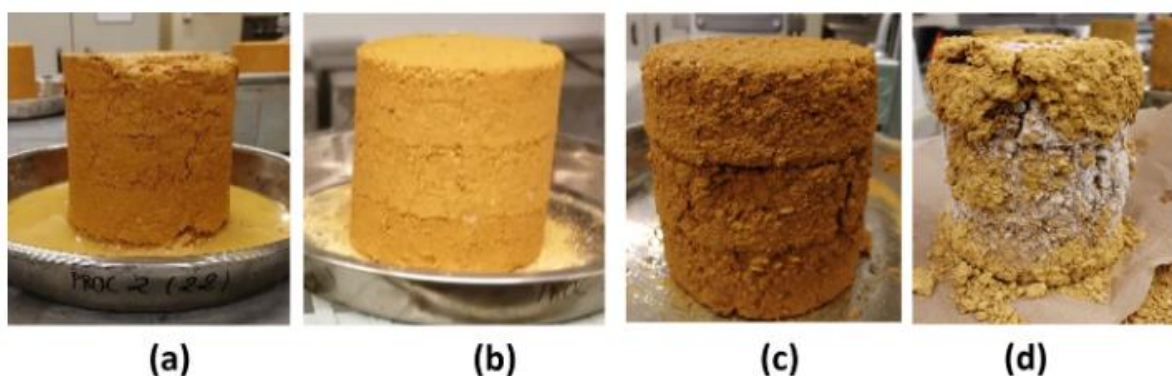


Figure 12 : : Eprouvettes après les tests d'érosion ((a) : 1 cycle ; (b) : 2 cycles ; (c) : 3 cycles ; (d) : 4 cycles) (source : Traoré et al., 2021)

Les nombreuses études cherchant à caractériser ce problème s'intéressent surtout à la perte de masse et volume des échantillons comme présenté dans la figure 12. Des tests de compression permettent d'étudier la perte en résistance dû à l'impact des cycles.

Le tableau ci-dessous reprend la même étude produite pour l'impact de l'érosion par Narloch.

Criterion and Critical Value		0 % Cement		6 % Cement		9 % Cement	
		703	433	703	433	703	433
Linear shrinkage < 0.5%		0.46%	0.42%	0.36%	0.34%	0.33%	0.24%
Resistance to water erosion	Ratio of susceptibility to water erosion ≤ 2	3	2	1	1	1	1
	Surface condition after exposure to water	Deep losses on the surface of the whole sample		No damage			
Wet to dry compressive strength ratio > 0.33		Not tested		0.33	0.44	0.42	0.43
Frost resistance after 25 cycles	Compressive strength decrease < 20%	Not tested		100%	100%	5.8%	6.3%
	Mass loss < 5%	Not tested		7.24%	7.24%	6.36%	2.51%

Tableau 9 : : Sommaire des résultats des tests de durabilité (Source : Narloch & Woyciechowski, 2020)

D'après les résultats de l'étude, il est important de renforcer le matériau avec du ciment, mais il faudra aussi utiliser des granulats avec différentes dimensions.

2.3. Utilisation à l'échelle de la construction du « rammed earth »

Depuis les années 1980, le pisé redevient un matériau de plus en plus présent sur nos territoires, de par ses avantages thermiques, de son côté esthétique original mais aussi du fait de la réutilisation du sol présent sur place. Aujourd'hui, plus d'un tiers de la population mondiale vit au sein de constructions en terre (Taghiloha Ladan, 2013).

Le pisé n'est pas un matériau qui sera mis en avant grâce à ses capacités porteuses, il ne permettra pas de produire des bâtiments de grandes hauteurs. C'est pour cela que généralement ce type de matériau est utilisé à une échelle plus locale pour des habitations. Mais les procédés permettant d'améliorer les sols sont aujourd'hui fortement présents. Car en effet, dans une idée d'urbanisation et intensification des centres de vie, il est important de réaliser des quartiers densifiés avec des logements de grandes hauteurs.

Les procédés de stabilisation des terres ont permis de dépasser ce stade et ainsi de permettre au pisé stabilisé de devenir un produit majeur dans le futur de la construction. Des constructions de plus de neuf mètres de hauteur sont aujourd'hui réalisées. Le côté résistant thermique, non toxique et résistant au feu fait de ce matériau une solution appropriée pour la fabrication de murs, poteaux et colonnes.

Une entreprise pionnière dans l'utilisation à grande échelle de la terre stabilisée au ciment se trouve au Canada. L'entreprise Sirewall réalise de grandes prouesses avec

des constructions de 30 mètres de haut et des résistances atteignant les 50 MPa. La mise en place de renforcement en métal, bois ou bambou permet au matériau d'obtenir des caractéristiques qu'il ne possédait pas à l'origine comme de la résistance face aux séismes.



Figures 13 : : Exemple d'utilisation du « Sirewall » au musée Narbovia de Narbonne, France (source : narbovia.fr)

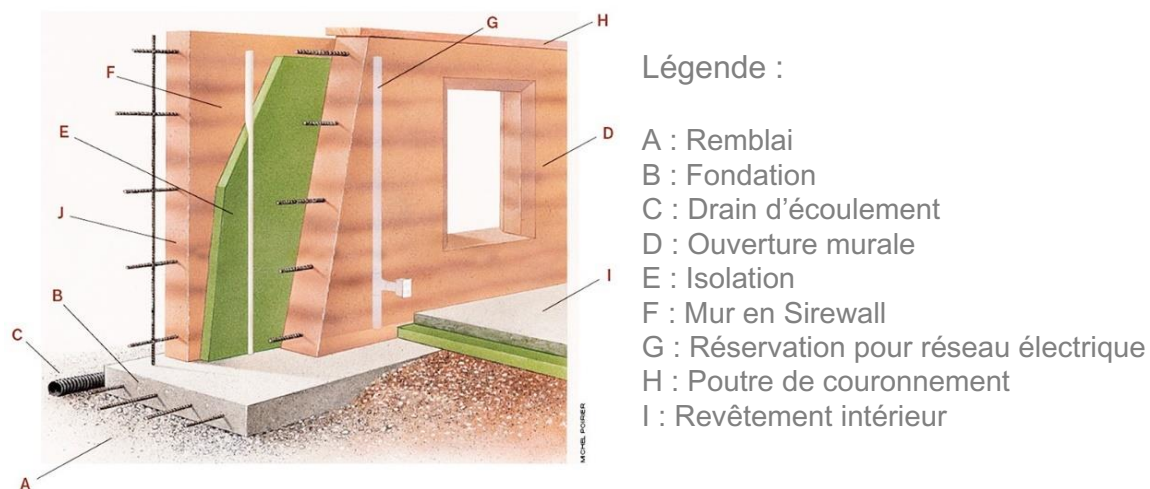


Figure 14: Détail de construction d'un mur en « Sirewall » (source : sirewall.com)

C'est à partir des crises de 1970 que l'impact écologique a commencé à devenir une cause importante à défendre. Le secteur de la construction reste un acteur majeur de ce désastre écologique par son utilisation massive des matières premières naturelles. C'est pour cela que de nombreux architectes et constructeurs cherchent avant tout à une nouvelle méthode durable en mettant en place des matériaux renouvelables et réutilisables tout en appliquant les principes du bio climatisme.

Peter Zumthor est un architecte qui cherche à exploiter au maximum cette méthode de travail et cette approche durable. C'est un des premiers à utiliser le béton damé au sein de ses constructions. Sa chapelle de 12 mètres de haut, construite entre 2005 et 2007 est un exemple des capacités que peut posséder le matériau béton damé.

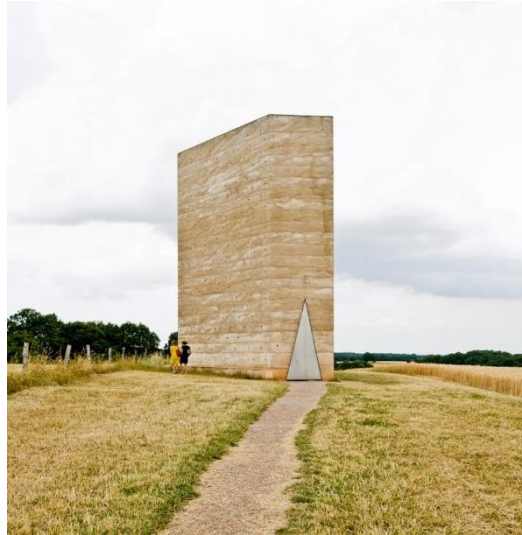


Figure 15 : Construction en Béton damé par Peter Zumthor (source : archdaily.com)

La réutilisation de ce matériau dans notre société actuelle provient de la facilité de réalisation des constructions. La mise en place de la terre ou béton au sein d'un coffrage et damé pneumatiquement ou manuellement, rend la fabrication des éléments constructifs abordable. Malgré tout, selon Birznies, les personnes s'opposant à l'utilisation de ce matériau mettent en avant la lenteur de fabrication par ce processus et aussi les coûts élevés.

La première étape de la réalisation d'un élément en terre se compose d'une analyse et d'une préparation du sol. Pour l'éventualité d'une utilisation de la terre présente sur le site comme le veut cette méthode de construction traditionnellement, il est nécessaire que la terre possède les caractéristiques nécessaires comme le présente la figure 3.

La seconde étape consiste à la confection du coffrage, étape la plus chronophage de la construction. Selon Birznies, 50% du temps de la fabrication des murs en terre repose sur la partie de mise en place des coffrages avec les étapes de pose, alignement, vérification, nettoyage et déplacement vers le prochain lieu de coffrage. Les coffrages doivent être solides pour reprendre les poussées des terres qui apparaissent lors du compactage du mur. La terre damée, de par sa teneur faible en eau, n'est pas un matériau avec lequel il est nécessaire de laisser le coffrage durant quelques jours pour que l'eau réagisse avec le ciment comme un béton classique. Cela permet donc une facilité de décoffrage et de réutilisation rapide des éléments coffrants. Le coffrage ne doit pas non plus dépasser 60 cm de haut pour permettre aux constructeurs de facilement réaliser le damage des couches.

La troisième étape est le compactage du matériau après sa mise en place au sein du coffrage. Le mur damé est composé de plusieurs couches de 15 cm dans la plupart des cas. Le compactage peut se faire par damage pneumatique ou damage manuel qui est plus proche du damage traditionnel que nous retrouvons pour les anciennes constructions en pisé. Le damage pneumatique permet un gain de temps assez considérable mais aussi un contrôle sur la pression exercée lors de la manipulation. Les couches de 15 cm finissent autour de 8 à 10 cm après compactage.



Figure 16 : compactage pneumatique d'un mur en pisé (source : Birznieks, 2013)

Le compactage étant le point clé de la résistance du béton damé, le compactage pneumatique permettra d'atteindre ce résultat performant. Des méthodologies ont pu être élaborées suite à des tests en laboratoire étudiant les meilleures méthodes de compactage. Ces méthodologies sont résumées dans la figure 17. Les tests ont pu définir le poids de l'outil utilisé pour le compactage, la hauteur de chute de l'élément, les dimensions de l'outil dans le cas d'un damage manuel et dans le cas d'un damage pneumatique, des données sur les pressions des pistons et le temps de damage.

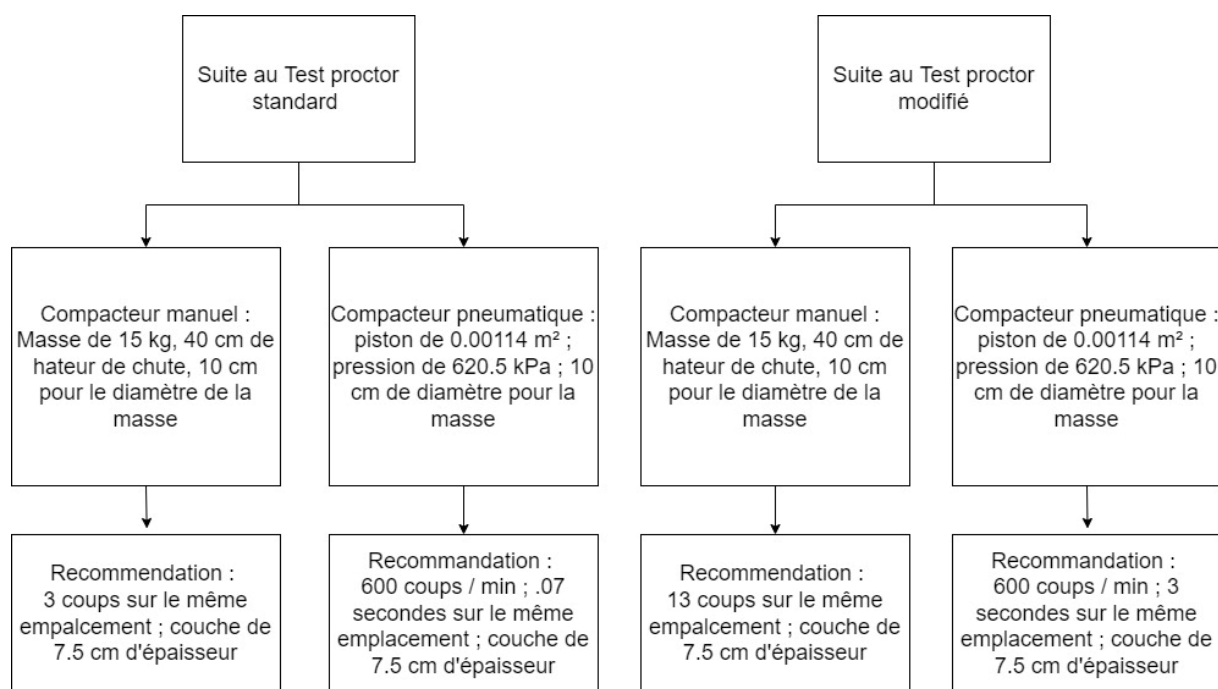


Figure 17 : Recommandations pour le compactage d'éléments en terre damé suite aux tests réalisés en laboratoire. (Source : Taghiloha Ladan, 2013)

Pour une construction plus rapide, une méthode consiste à fabriquer des blocs grâce à une presse manuelle ou hydraulique pour ainsi revenir sur un système de maçonnerie plus classique. Mais dans ce cas, le compactage est manuel. Il est donc de connaître la pression exercée.

2.4. Comportement des murs en béton damé

Très peu de résultats existent à ce jour quant au comportement mécanique des murs en béton damé. Cela persiste à freiner le développement de ce matériau.

L'étude de Bui de 2016, s'est intéressée à ce sujet pour apporter des précisions sur le comportement de ce matériau si particulier. L'étude est orientée autour de la composition, de la stabilisation ou non ainsi que sur la mise en œuvre en couche compactée qui aura certainement un impact sur les différentes résistances. Lors de cette étude, deux murs en pisé ont été soumis à des chargements en compression localisée et deux autres à un chargement horizontal pour étudier le cisaillement plus précisément (Bui, 2015).

Des mesures ponctuelles ainsi que des mesures reprises par capteurs de force et LVDT (transducteur différentiel variable linéaire) ont permis de retranscrire au mieux les résultats.

Pour les essais, des murs de dimensions $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ ont été élaborés par compactage pneumatique. Pour les premiers tests, La compression locale a permis de représenter le cas d'une poutre pouvant prendre appui sur ce mur. Les essais ont été réalisés après 150 jours de séchage pour le mur. Quant aux essais en cisaillement, une charge est appliquée par un vérin à une vitesse de 0.3 mm/minute .

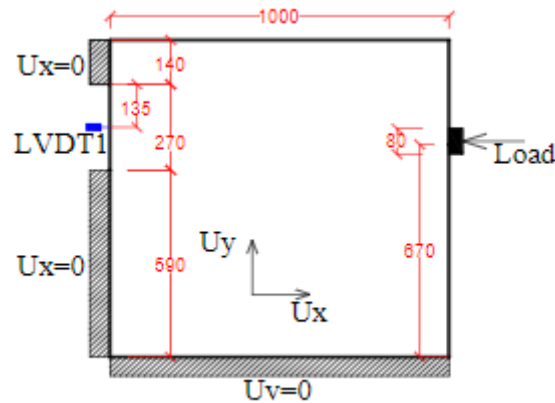


Figure 18: Banc d'essai utilisé pour l'étude du cisaillement (source : Bui, 2015)

En phase de compression localisée, 3 étapes vont être mises en avant. Une première étape est centrée sur un comportement quasi linéaire du matériau jusqu'à 40% de la charge maximale. Durant l'étape 2, une redistribution des efforts apparaît permettant à l'échantillon d'atteindre le point de rupture tout en subissant une diminution de la rigidité. Ce point de rupture est atteint à 110 kN pour un déplacement vertical de 4.5 mm. La dernière étape est la chute de la résistance du mur, c'est là que la rupture apparaît.

L'étude des fissures sur le mur à la fin du test est une étape intéressante. Le même comportement pour les deux murs en compression peut être observé. Tout d'abord des fissures verticales au centre du mur dû à l'effort de compression mis en œuvre sur le mur. Puis des fissures diagonales qui rejoignent le bas du mur au niveau des coins. Cela se rapproche de l'effet de cisaillement. Malgré un compactage du mur par couches, les fissures restent bien droites sans changement de trajectoire comme il est possible de retrouver au sein de maçonnerie.



Figure 20 : Fissuration des murs tests sous compression (source : Bui, 2015)

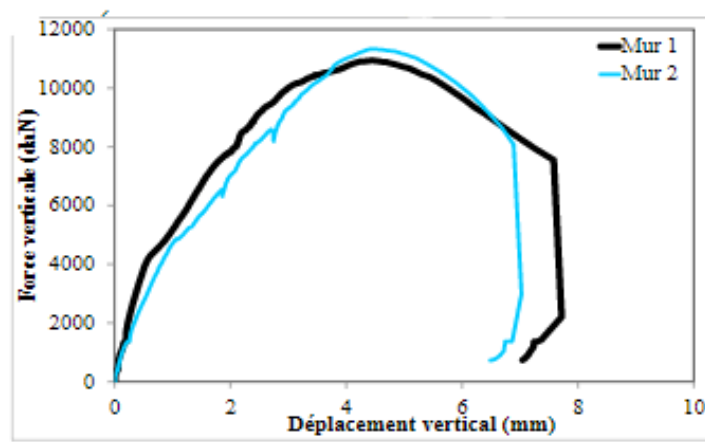


Figure 19 : Déplacement vertical en fonction de la charge appliquée en compression (source : Bui, 2015)

Pour le cisaillement, un comportement quasi linéaire est observé là aussi jusqu'à une force appliquée de 17 kN. A ce seuil, un glissement entre joints important est révélé ce qui amène un changement d'étape dans le comportement. Par la suite, il y aura une évolution plus lente jusqu'à atteindre le point de rupture autour de 23 kN pour un déplacement de 6.63 mm La rupture de l'échantillon sera ensuite observée.

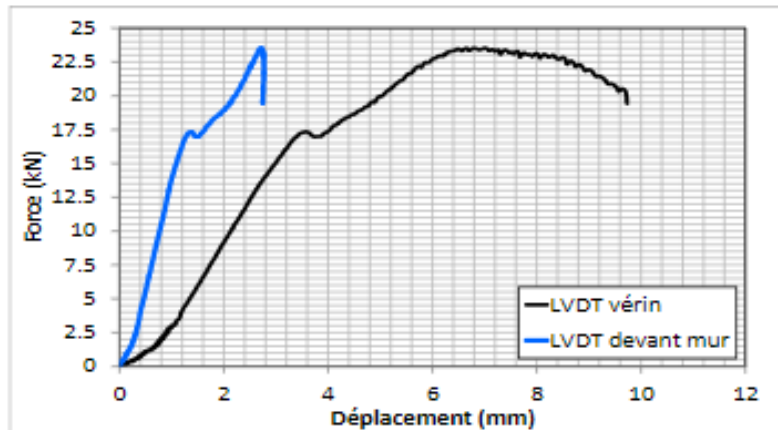


Figure 21 : Déplacement des capteurs en fonction de la charge appliquée en cisaillement (source : Bui, 2015)

Pour l'étude des fissures dans le cas du chargement en cisaillement, des fissures horizontales apparaissent tout d'abord, caractéristiques de la perte de résistance au niveau des joints entre les couches de matériau (figure 22). Le glissement des couches au niveau du plan de jointure de ce matériau fait de ces zones, les points de faiblesses du matériau dans cette typologie de chargement. Pour les autres fissures, les caractéristiques du cisaillement apparaissent fatalement, c'est-à-dire des fissures à 45° qui rayonnent à partir de la charge et qui traversent les couches comme dans le cas de la compression.

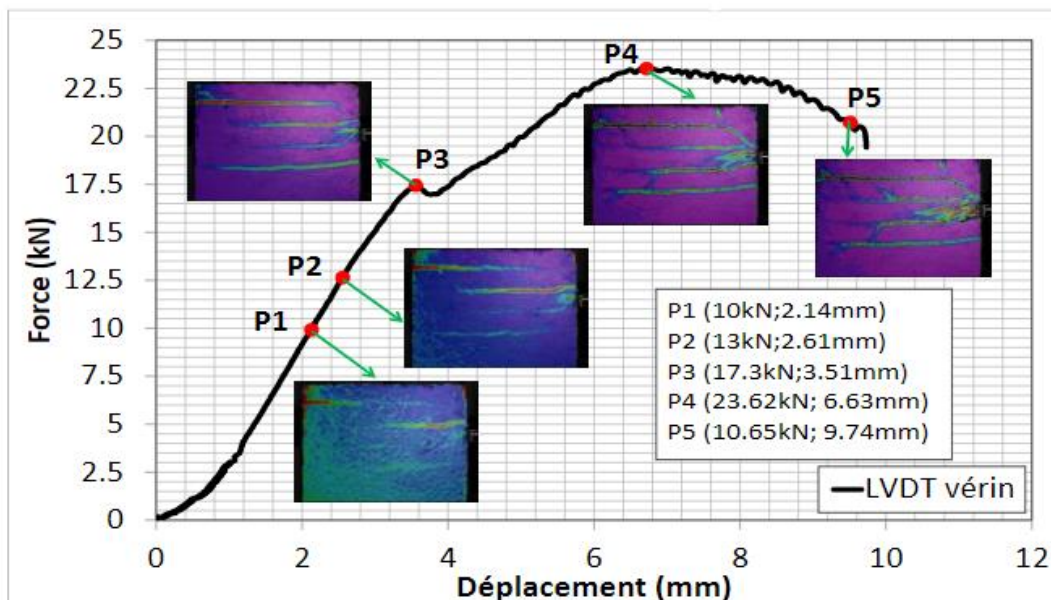


Figure 22: Fissures dans le mur test subissant un cisaillement (source : Bui, 2015)

2.5. Caractéristiques, propriétés et intérêt de l'utilisation des granulats recyclés

De nos jours, les constructions en béton du XX^{ème} siècle atteignent la fin de leur durée d'utilisation. Ils ont besoin d'être rénovés ou détruits en fonction de leur état structurel. L'accélération de l'urbanisation a aussi impacté le monde de la construction avec une augmentation dans les besoins importants de matières premières (Vyncke & Vrijders, 2010).

Avec la volonté de renouveler nos bâtiments et nos voiries, des tonnes de déchets de construction sont produites et laissées à l'abandon. Pour le moment, les éléments de béton ou de construction ne sont vus que comme des éléments sans intérêt et inutiles. Pourtant il est important de savoir que les déchets de constructions ne sont que des matières inertes, possédant des qualités de valorisation importantes. Une seconde vie peut être trouvée pour ces éléments (Kabir et al., 2016).

La comparaison des quantités de déchets produites par grandes puissances mondiales permet de se rendre compte de la situation actuelle. Les Etats-Unis produisent plus de 100 millions de tonnes de déchets de construction par an ce qui représente 30% de leur quantité de déchets. Les pays européens produisent en comparaison une quantité de 86.5 millions de tonnes pour le Royaume-Uni et plus de 20 millions de tonnes pour la Belgique pour les déchets de construction (Rapport optimisation de la gestion des déchets, Véolia)³ (Kabir et al., 2016).

Selon les directives européennes, 70% des déchets de construction devaient être recyclés en 2020. Le recyclage s'est donc accéléré fortement depuis la mise en place de ces directives par l'Europe pour essayer de réduire les productions de déchets. Les Pays-Bas sont le parfait exemple d'un pays qui a su s'adapter à cette situation en recyclant plus de 93% de leurs déchets de construction (Kabir et al., 2016).

Les caractéristiques des granulats recyclés peuvent être regroupées selon 4 grandes catégories (Laneyrie Cléo, 2014) :

- Les matériaux de déconstruction regroupant les éléments en béton sans enduit, plâtre, amiante
- Les matériaux de déconstruction de chaussée regroupant les éléments traités ou non aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, les pierres naturelles
- Les mélanges composites avec les ossatures en béton, les maçonneries avec peu de quantités de plâtre, verre, bois ou plastique.
- Les mélanges hétérogènes du même type mais possédant plus de 10% de matériaux indésirables

³ Source : <https://www.veolia.be/fr/secteur/industries/construction>

Presque 90% des déchets proviennent des deux premiers types de matériaux. Dans le cas des matériaux de béton issus de la déconstruction, il faut savoir que ces éléments auront des caractéristiques bien différentes des granulats naturels. Les granulats seront plus poreux, avec des coefficients d'absorption supérieurs et présentant des zones de transition interfaciales qui sont les points de faiblesse mécanique du béton. Les caractéristiques peuvent varier fortement pour ce type de granulats en fonction de la quantité de ciment qu'ils contiennent encore (Crespo, 2012).

Le projet SeRaMCo a pour objectif de produire des éléments en béton préfabriqué à base de granulats recyclés. Le recyclage des matériaux se développe peu à peu. Diverses certifications existent permettant de normer tous les travaux de valorisation. La certification COPRO évalue l'impact sur l'environnement des déchets en étudiant la présence d'éléments contaminants au sein des granulats comme l'amiante, des métaux lourds ou encore des huiles. La certification BENOR permet d'évaluer les propriétés mécaniques et de la possible utilisation des déchets dans les travaux routiers. La certification CE (certification Européenne) quant à elle, vise à un respect des réglementations en vigueur pour les produits de constructions (Rapport d'activités : granulats recyclés, COPRO).

Une forte hausse de l'activité autour du recyclage a pu être constatée à partir des années 2000. De nos jours, plus de 281 unités de production de granulats recyclés sont en activités donc 261 certifiées COPRO. La figure 24 permet de mettre en avant la grande implication de la Flandres avec plus de 206 unités de production sur leur territoire.

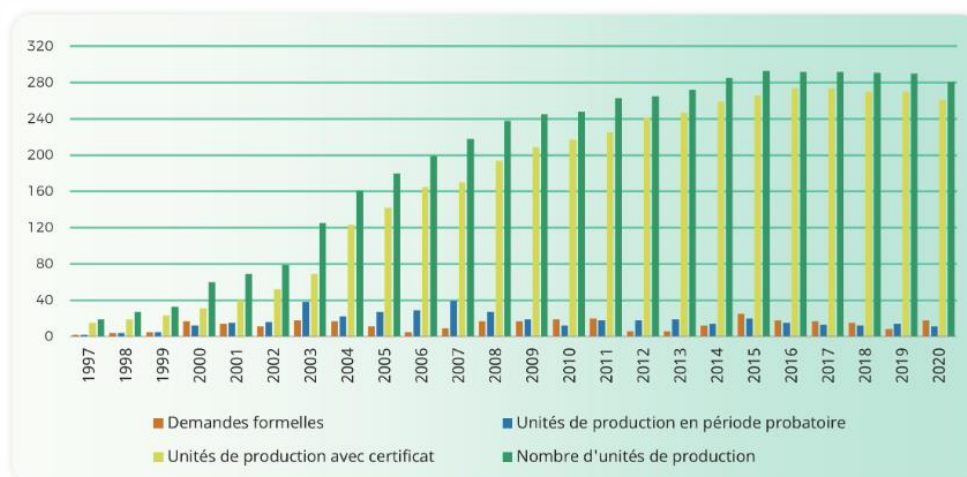


Figure 23 : Evolution du nombre d'unités de productions de granulats recyclés (source : copro.eu)

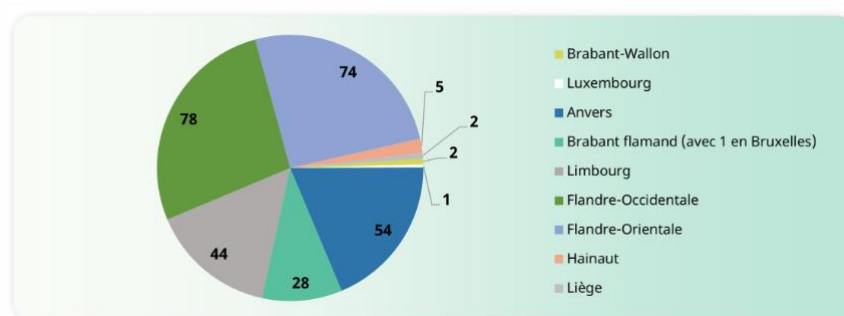


Figure 24 : Répartition sur le territoire Belge des unités de production de granulats recyclés (source : copro.eu)

La quantité de granulats recyclés en 2020 certifiés COPRO est de 13 300 000 tonnes. Une majeure partie correspond aux granulats de béton ainsi qu'aux granulats mixtes. Ces granulats ne sont principalement utilisés qu'en fondations et remblaiement mais les travaux et études appuient le fait qu'une future utilisation en tant que matière première du béton pourra révolutionner le monde de la construction (Rapport d'activités : granulats recyclés, COPRO).

	Site fixe	%	Installation mobile	%
Granulats de béton	4.138.077 tonnes	37	2.820.137 tonnes	47
Granulats de béton de haute qualité	11.836 tonnes	< 1	0 tonne	-
Granulats mixtes	4.297.584 tonnes	38	1.856.923 tonnes	31
Granulat	173.966 tonnes	2	52.246 tonnes	1
Granulats d'enrobés bitumineux non-goudronneux	536.871 tonnes	5	395.697 tonnes	7
Sable de concassage tamisé (dépôts, remblais, gravillons pour sable-ciment conformément à la norme NBN EN 13242)	1.992.990 tonnes	18	780.202 tonnes	13
Sable de concassage tamisé de granulats d'enrobés	9.758 tonnes	< 1	28.786 tonnes	< 1
Sable de concassage	46.135 tonnes	< 1	0 tonne	-
Granulats de béton et d'enrobés	18.312 tonnes	< 1	20.705 tonnes	< 1
Granulats mixtes et d'enrobés	26.047 tonnes	< 1	2.250 tonnes	< 1
Sable de criblage	47.709 tonnes	< 1	0 tonne	-
Granulats de criblage	0 tonne	-	0 tonne	-
Gravats concassés recyclés	0 tonne	-	0 tonne	-

Figure 25 : Typologie des granulats produits (source : copro.eu)

3. Matériaux et essais

3.1. Matériaux et préparation des échantillons

L'objectif est d'obtenir un béton damé assez résistant pouvant atteindre une valeur approximative de 8 MPa sans toutefois requérir à une quantité importante de ciment.

3.1.1 Granulats

Analyse granulométrique

Les granulats sont des granulats recyclés non lavés provenant de l'entreprise TRADECOWALL. S'agissant de matériaux de récupération de chantier, une nouvelle caractérisation complète du matériau était à prévoir, pour obtenir le maximum d'informations avant de l'utiliser.

La première étape consistait en l'analyse granulométrique (figure 26) des granulats. S'agissant de produits de récupération, tous types de matériau de construction peuvent être retrouvés (bois, matières organiques, matières plastiques).



Figure 26 : Tamis utilisés lors de l'étude de granulométrie

Le lavage des granulats fut une étape nécessaire au processus d'analyse granulométrique. En effet, l'échantillon contenait beaucoup d'argile et d'éléments très fins. Le lavage a permis d'éliminer au maximum ces impuretés. Une fois cela, les différents tamis ont été mis en place pour procéder à l'analyse granulométrique reprenant la norme NBN EN 933-1 : 1997. L'analyse reposait sur les tamis suivants :

8 [mm] ; 4 [mm] ; 2 [mm] ; 1 [mm] ; 500 [µm] ; 250 [µm] ; 125 [µm] ; 63 [µm] ; fond

Pour terminer, chaque tamis est pesé pour obtenir une courbe de la quantité de granulats en fonction des différents passants et refus.

Absorption d'eau et densité

Dans cette étape, l'étude a été tournée vers l'analyse de l'absorption des granulats ainsi que de leur densité. Il s'agit d'une caractérisation importante permettant de jauger de la quantité de certains matériaux pour l'étape de formulation. Ainsi la norme NBN EN 1097-6 2000 a été suivie durant cette étude.

Pour réaliser les tests d'absorption, un nouveau lavage des matériaux a dû être fait pour enlever toutes les fines le composant car en effet, il était important de n'avoir des éléments compris qu'entre 0.063mm et 4mm. L'utilisation de tamis durant l'étape de lavage était donc primordiale. Les pycnomètres remplis d'eau ont été ensuite pesés donnant la masse M3. Ensuite, l'échantillon granulaire est placé dans le pycnomètre. Un remplissage en eau jusqu'à la pointe du couvercle est nécessaire pour retirer le maximum d'air dans le pycnomètre.



Figures 27: Pycnomètres utilisés lors de l'étude de l'absorption d'eau des granulats

L'étape suivante consiste à mettre en place les pycnomètres dans un bain à 20°C durant 24hrs +/- 1 heure.

Après 24 heures, les pycnomètres sont retirés de leur bain, séchés puis ensuite pesés pour obtenir la masse M2. Les pycnomètres sont ensuite, vidés et l'échantillon de granulats est placé sur un plateau pour être séché. Le séchage doit être fait avec un souffle d'air chaud permettant de faire évaporer le maximum d'eau en surface du matériau. Pour cela, un sèche-cheveux est utilisé à une certaine hauteur du plateau amenant ainsi une chaleur constante sur l'entièreté de nos éléments. Pour savoir si le matériau était suffisant sec en surface, un test était réalisé avec un cône de métal dans lequel l'échantillon était versé. L'échantillon a été légèrement tassé à l'intérieur du cône et une fois ce dernier retiré, il était important de bien analyser le comportement du matériau : si une pointe en tête apparaissait alors le matériau était prêt. Une fois cela vérifié, la masse M1 pouvait être prise.



Figures 28: Séchage des granulats et vérification de la qualité du séchage

Puis en dernière étape, les éléments ont été placés dans une étuve à 105 C jusqu'à obtenir une masse constante à 24 heures de différence. Cela nous a donné la masse M4.

Le calcul de l'absorption en eau des granulats à 24 heures d'immersion se fait par l'équation suivante :

$$WA_{24} = \frac{100 * (M1 - M4)}{M4} \quad [1]$$

Avec :

M1, la masse de l'échantillon saturée et séchée en surface en grammes

M2, la masse du pycnomètre contenant l'échantillon saturé en grammes

M3, la masse du pycnomètre rempli uniquement d'eau en grammes

M4, la masse de l'échantillon séché

Grâce à cette expérience, il est aussi possible de calculer la densité réelle par séchage en étuve du matériau par l'équation suivante :

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [2]$$

Caractérisation visuelle

Pour cette étape, le lavage des granulats a permis de bien séparer chaque composant de l'échantillon pour juger au mieux visuellement à quel type de famille il appartenait. Suivant la norme EN 933-11, un certain nombre de particules devait être au minimum compté, pour avoir une population assez importante permettant de juger de la composition totale du matériau recyclé. Cette étude a été faite sur 2 échantillons. Chaque élément trié a été ensuite pesé par catégorie permettant d'obtenir la répartition visuelle de chaque élément.



Figure 29: Typologie des éléments retrouvés par caractérisation visuelle

3.1.2 Ciment

Le ciment utilisé durant nos expériences est un ciment Portland CEM I 52.5 N.

3.1.3 Formulation

Dans une démarche d'optimisation et de recherche de performance, les compositions des différents mélanges ont varié que ce soit par la teneur en eau ou en ciment. Le mélange optimisé a donc été choisi selon les meilleures caractéristiques mécaniques, permettant un bon compactage lors de la confection des éprouvettes et utilisant le moins de ciment et d'eau.

Formulations							
	Quantité de granulats		Quantité de ciment		Quantité d'eau		Nombre d'éprouvettes
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	U
Formulation 1	78,4	1490	6,9	130	14,7	279	9 cubes
Formulation 2	77,7	1476	7,8	148	14,6	277	2 cubes
Formulation 3	80,0	1520	10,0	190	10,0	190	6 cubes
Formulation 4	78,4	1490	9,8	186	11,8	224	6 cubes
Formulation 5	76,2	1448	9,5	181	14,3	271	6 cubes
Formulation 6	75,5	1434	9,4	179	15,1	287	6 cubes
Formulation optimisée	80,0	1520	8,0	152	12,0	228	18 cubes

Tableau 10 : Résumé des différentes formulations étudiées pour optimiser le mélange (% des composants sur la masse totale du mélange)

3.1.4 Réalisation des éprouvettes

Après la confection des mélanges vient le façonnage des éprouvettes. Ici, deux méthodes ont été utilisées :

- Une méthode plus communément utilisée lors de la confection des éprouvettes en béton avec des cubes de 15 cm³.
- Une méthode se rapprochant plus de celle utilisée pour la confection des briques de terre crue avec des briques de 30cm * 15cm * 8cm.

La confection de briques est réalisée dans le cadre du travail de fin d'étude de François Wiomont « Comportement des briques en terre comprimées produites à partir de granulats recyclés » (Wiomont, 2022). Les deux études sont donc liées par le même matériau, une comparaison sera faite pour juger de l'impact du compactage sur les caractéristiques du matériau. Dans les deux cas, un damage est réalisé pour compacter correctement le béton. Dans la méthode traditionnelle, l'utilisation d'un plot métallique fixé à un support en bois était la plus appropriée pour compresser au mieux dans l'éprouvette cubique. Les éprouvettes ont été réalisées en plusieurs couches successives avec un compactage entre chaque couche. Puis pour les derniers centimètres, une cale de bois permet de compresser au maximum l'éprouvette en

appliquant sur celle-ci 30 coups à chaque passage. Cette méthode a été répétée sur chaque éprouvette pour bien conserver une même méthode de fabrication.



Figures 30: Dame et éprouvettes utilisées lors du compactage des blocs

Pour la confection des briques, une presse manuelle a permis de façonner avec une compression bien répartie. Les briques sont elles aussi remplies en plusieurs couches manuellement, puis par plusieurs fois le mécanisme est utilisé pour compresser les éprouvettes.



Figure 31: Presse et moule utilisés pour la confection des briques

Pour chaque mélange, le choix de réaliser des éprouvettes cubiques et des briques rectangulaires a été envisagé permettant de comparer la mise en œuvre des mélanges entre les deux méthodes de fabrication. Une comparaison entre les caractéristiques d'absorption d'eau, les résistances mécaniques et en durabilité sera faite. Le

compactage étant différent, il pourrait y avoir un impact sur les propriétés des échantillons.

A la suite de leur réalisation, chaque éprouvette est pesée et placée en chambre humide dans un climat contrôlé. La chambre humide reprend les mêmes conditions que celles présentes dans les normes des tests béton c'est-à-dire une température de 19°C et une humidité fixée à 50%.



Figure 32 : Epreuves cubiques réalisées

3.2. Détermination des propriétés physiques et mécaniques

3.2.1 Absorption et masses volumiques

Les granulats recyclés sont des éléments différents des granulats naturels utilisés dans les mélanges de béton. Il était important de pouvoir étudier l'effet de l'absorption en eau que possède le matériau après réaction avec le ciment.

Lors de son utilisation, ce nouveau matériau aura nécessairement des caractéristiques à atteindre et des performances recherchées. La durabilité des éléments fabriqués par ce mode de construction pourrait être fortement réduite selon l'absorption du matériau.

La méthode utilisée pour l'absorption est en tout point similaire à celle des tests d'absorption pour des éprouvettes en béton. Après la mise en place des éprouvettes en chambre humide pendant 14 jours, celles-ci ont été carottées et redécoupées pour former de nouvelles éprouvettes cylindriques qui ont été, par la suite, placées pendant 14 jours dans un milieu à climat contrôlé. Une fois les 28 jours obtenus, les éprouvettes ont été placées dans un bain d'eau à température contrôlée à 20°C pendant un minimum 7 jours. Ensuite, les éprouvettes ont été pesées pendant plusieurs jours et lorsque la masse ne subissait plus de variation à plus de 0.1%, alors les éprouvettes étaient complètement saturées. Une mesure de la pesée hydrostatique a été aussi réalisée pour obtenir la masse volumique. Les cubes ont ensuite été mis en étuve à 105°C. De

nouvelles pesées ont été ensuite réalisées après 7 jours tout en vérifiant que la variation de masse ne dépassait pas les 0.1%. Une fois cela vérifié, les éprouvettes étaient considérées comme totalement sèches. Les masses volumiques ainsi que les absorptions d'eau ont pu être calculées par les équations suivantes :

Absorption :

$$Abs = \frac{M_{humide} - M_{sèche}}{M_{sèche}} * 100 \quad [3]$$

Avec :

M_{humide} , la masse humide constante de l'éprouvette après immersion

$M_{sèche}$, la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve

Masse volumique à 28 jours :

$$M_{vh} = \frac{M_{humide}}{V} \quad \text{et} \quad M_{vs} = \frac{M_{sèche}}{V} \quad \text{avec} \quad V = \frac{M_{humide} - M_{sous\ eau}}{\rho_w}$$

Avec :

M_{humide} , la masse humide constante de l'éprouvette après immersion

$M_{sèche}$, la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve

$M_{sous\ eau}$, la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique

ρ_w , la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)

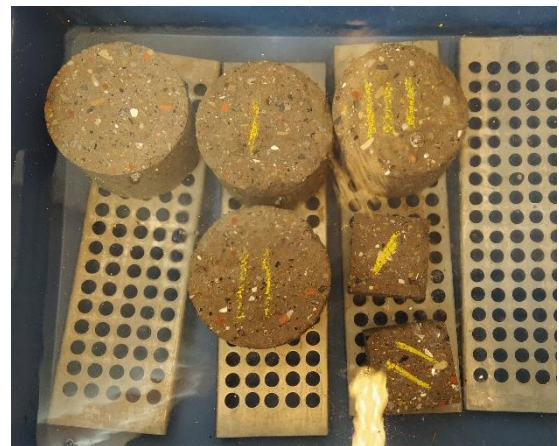


Figure 33: Eprouvettes cylindriques utilisées pour l'étude de l'absorption d'eau des mélanges

3.2.2 Essai de compression

Pour les tests de compression, les normes relatives au béton durci NBN EN 12390-3 : 2002 ont été appliquées. Les éprouvettes ont donc subi une cure de 28 jours en chambre humide permettant l'hydratation et la meilleure réaction possible du ciment au sein du mélange. Une fois cela effectué, les éléments ont été acheminés en laboratoire pour subir les tests de compression sous presse hydraulique reliée directement à un ordinateur qui affiche en direct l'évolution de la charge appliquée au bloc en fonction du déplacement de la platine. La vitesse d'incrémentation de la contrainte était de 0.5 MPa/s. Les tests ont été réalisés sur les éprouvettes cubiques mais aussi sur les briques.

L'un des problèmes majeurs lors de la fabrication des briques provenait du fait que les platines servant à compresser les éléments ne sont pas formées de la même manière. La platine basse est formée d'un dôme ce qui ne permet pas de réaliser des pavés de forme parfaite. Ainsi, pour le test de compression, dans un premier temps les briques ont été sciées, donnant des éprouvettes cubiques de 6.4 cm * 6.4 cm * 6.4 cm et laissant ainsi une face plane pour réaliser les tests. Dans un second temps, l'espace laissé par le dôme de la presse a été comblé avec un mortier refermant ainsi l'espace libre des briques.

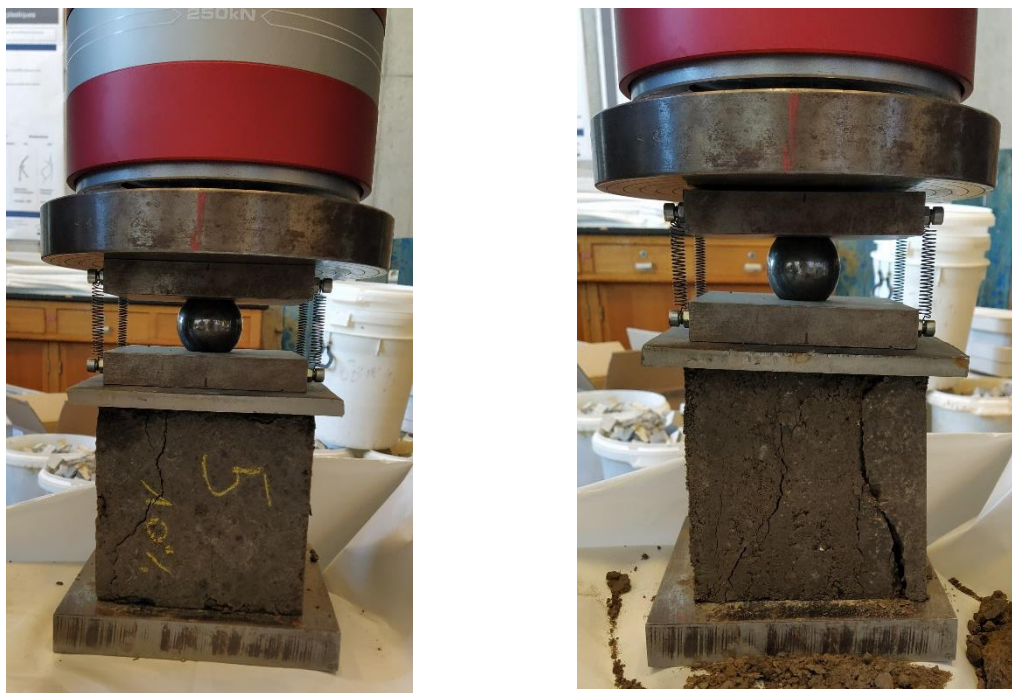


Figure 34 : Tests de compression réalisés sur les éprouvettes cubiques

3.3. Etude des propriétés thermiques et de durabilité

3.3.1 Détermination des propriétés thermiques du matériau

L'étude de la résistance thermique des matériaux est primordiale lorsque l'on s'intéresse plus particulièrement à la consommation énergétique des logements. Aujourd'hui, le confort thermique à l'intérieur des habitations est la préoccupation principale de la population, amenant ainsi une surconsommation des ressources naturelles du globe. Plus de 40% de la consommation énergétique mondiale est concentrée sur le confort thermique (Kazemi & Courard, 2021). Il est donc important de travailler autour de modes constructifs permettant la réduction de ces surconsommations.

Pour réaliser l'étude thermique du béton damé produit avec les fines de recyclage, la norme ISO 9869-1 est utilisée. Un dispositif, composé d'une plaque chauffante et une plaque froide, est utilisé. L'éprouvette de 40 x 40 x 20 cm, réalisé avec la composition optimisée, a été placé au centre de l'appareillage de mesure du transfert thermique entre la plaque chaude (partie inférieure) et la plaque froide (partie supérieure). L'éprouvette est ensuite entourée d'un matériau isolant en polyuréthane.

Dans la suite de l'expérience, l'éprouvette a été compressée entre les plaques en exposant sur le dessus une température froide et sur le dessous la température chaude.

La valeur de conductivité thermique du matériau a été directement mesurée par des capteurs situés dans la plaque chaude. Plus la valeur de la conductivité du matériau est faible, plus le matériau sera capable de résister au flux de chaleur qui le traversera.



Figure 35: appareillage pour le test thermique

A la suite de la mesure de la conductivité thermique, il est possible de calculer la valeur de la résistance thermique R du matériau grâce à la norme ISO 9869-1. Ainsi, la différence de température entre les plaques permet d'obtenir la valeur du ΔT :

$$\Delta T = T_h - T_c$$

Avec T_h , la température de la plaque chaude inférieure en Kelvin

T_c , la température de la plaque froide supérieure en Kelvin

La valeur de la résistance thermique est quant à elle obtenue par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{\sum_{t=0}^m \Delta T^t}{\sum_{t=0}^m q^t} \quad (\text{En } m^2 \cdot ^\circ K/W) \quad [4]$$

Avec :

t , l'intervalle de temps de l'expérience en heures

m , la période minimale requise pour l'expérience en heures

q , la densité de flux thermique en W/m^2

La densité de flux thermique s'obtient par la loi de Fourier grâce à l'équation :

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{l}$$

Avec :

λ , la conductivité thermique du matériau relevée durant l'expérience en $W/m.K$

l , l'épaisseur de l'éprouvette mise dans l'appareillage en m

Ces différentes équations permettront d'obtenir des informations essentielles au comportement thermique du matériau. Mais pour que la valeur R de résistance thermique soit la plus acceptable, la norme ISO 9869-1 impose trois critères à respecter durant l'expérience pour la mesure de la conductivité.

Tout d'abord, la période de prise de mesure doit s'effectuer jusqu'à l'obtention d'une valeur constante de la conductivité thermique. L'ordre de grandeur de l'obtention de cette constante est de 1 à 2 semaines. La conductivité thermique doit rester constante sur plus de 72 heures pour clôturer l'expérience.

Ensuite il est nécessaire de vérifier que la valeur de conductivité obtenue à la fin de l'expérience ne soit pas différente de plus ou moins 5% de la valeur reprise 24 heures plus tôt.

Pour terminer, la valeur finale ne doit pas être différente de plus ou moins 5% de la valeur moyenne obtenue sur les 2 derniers tiers de l'expérience.

3.3.2 Essai de durabilité

3.3.2.1 Erosion

Le défaut majeur à retenir de l'analyse des constructions en terre damées au cours des siècles est la faible résistance face aux risques d'érosion. La stabilisation a permis de réduire ce phénomène.

Pour examiner plus particulièrement l'érosion sur une éprouvette de dimension 40 x 40 x 20 cm du matériau étudié dans cette recherche, un test d'érosion face à un jet sous pression d'eau a été effectué en suivant la norme NZS 4298 : 1998 (New Zealand, 1998). Un jet d'eau sous pression de 50 kPa a érodé une éprouvette pendant 1 heure. Des vérifications toutes les 15 minutes ont été effectuées pour enregistrer la valeur de la profondeur d'érosion du jet. La profondeur a été relevée en millimètres.

Suivant la norme NZS 4298 : 1998, des critères d'érodabilité ont ensuite été vérifiés en fonction de la profondeur d'érosion de l'éprouvette pour déterminer la faiblesse du matériau.

Propriété	Critère	Index d'érodabilité
Profondeur d'érosion D (en mm/h)	$0 \leq D < 20$	1
	$20 \leq D < 50$	2
	$50 \leq D < 90$	3
	$90 \leq D < 120$	4
	$D \geq 120$	5

Tableau 11: Critères d'érodabilité

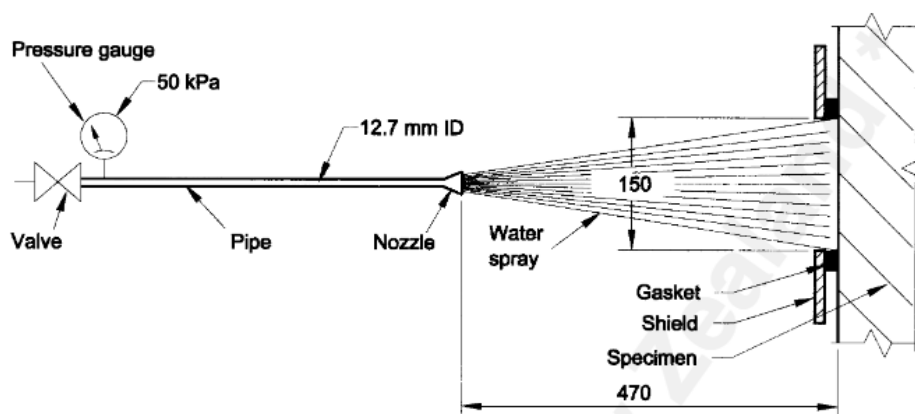


Figure 36: appareillage pour le test d'érosion

Suite à des soucis dans le calendrier de réalisation des éprouvettes, le test a été réalisé sur un matériau n'ayant été placé en cure que durant 7 jours. La norme précise quant à elle qu'il était nécessaire de réaliser une cure de 28 jours pour laisser le temps au matériau de réagir avec le ciment. Il sera donc important de prendre cela en compte dans les résultats.

3.3.2.2 Gel/Dégel

Comme le montre le tableau 2, seule la norme ASTM D 560 traite de la résistance face aux risques de gel/dégel de la terre damée. Les tests de cette étude ont donc été centrés sur la norme américaine.

Le test de gel/dégel se base sur la perte de masse et de volume des éprouvettes après une cure de 7 jours en chambre humide (à 21°C et humidité relative à 100%). Les échantillons ont été soumis à 12 cycles de gel/dégel avec pour caractéristiques :

- 24 heures d'exposition à -23°C pour la phase de gel
- 23 heures d'exposition en chambre humide pour la phase de dégel

Durant la phase de dégel, les éprouvettes ont été placées dans des bacs contenant une petite quantité d'eau. Ainsi les échantillons possédaient une face dans 5 mm d'eau permettant une absorption d'eau du matériau par remontée capillaire. L'effet combiné du gel/dégel aux remontées capillaires, défaut notable des murs damés, a pu être étudié plus particulièrement.

Entre chaque changement de phase, la masse des éprouvettes a été mesurée. A la fin des phases de gel, il a été important de broser légèrement les éprouvettes pour retirer les particules du matériau écaillé à la suite du cycle.

4. Analyse des résultats

4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques

4.1.1 Caractérisation des granulats

4.1.1.1 Granulométrie

Durant l'analyse granulométrique, deux échantillons ont été étudiés. Les moyennes obtenues sont visibles au tableau 12.

Diamètre des tamis	Moyenne des refus	Pourcentage des refus	Masse des particules fines (Mi-1 - Mrefus)	Pourcentage cumulé ((Mi-1 - Mrefus)/Mtotale)
mm	g	%	g	%
8	17	1,7	1039	98,4
6,3	38	3,6	1001	94,8
4	72	6,8	929	88
2	110	10,4	819	77,6
1	82,5	7,8	736,5	69,7
0,5	73	6,9	663,5	62,8
0,25	134	12,7	529,5	50,1
0,125	161	15,2	368,5	34,9
0,063	70,5	6,7	337	31,9
0,001	31,5	2,98	266,5	25,24
Fond	266,5	25,24	0	0
Total	1056	100		

Tableau 12: analyse granulométrique des granulats recyclés

L'élément qui doit tout d'abord être mis en avant, c'est la grande part de fines de dimensions inférieures à 0.001 mm. Le matériau est un matériau possédant de grandes quantités de fines que ce soit des fines issues du recyclage classique des bétons mais aussi d'éléments terreux (limons et argiles). Lorsque Birznieks (Birznieks Lauris, 2013) présente l'analyse de la granulométrie des matériaux à utiliser pour la terre damée, il indique une certaine répartition des granulats avec :

- 8 à 14% pour le diamètre < 0.002 mm
- 12 à 21% pour du 0.002 à 0.06 mm
- 30 à 45% pour le 0.06 à 2 mm
- 20 à 30% pour du diamètre 2 à 20 mm

Pour Taghiloha, des proportions de 30% pour les argiles/limons (diamètre inférieur à 0.06mm) et 70% pour les sables (diamètre entre 0.06 et 2 mm) sont préférables pour la réalisation d'éléments en terre (Taghiloha Ladan, 2013).

D'après le tableau 12, plus de 25 % de l'échantillon a un diamètre inférieur à 0.001 mm et 32 % ont un diamètre inférieur à 0.06 mm. En ce qui concerne les fines, l'échantillon respecte donc les préconisations de Taghiloha mais il en possède trop en comparaison de l'étude de Birznieks.

Pour les particules de plus grandes dimensions, le matériau étudié est dans les critères de Birznieks mais ne correspond plus aux valeurs de Taghiloha pour qui les granulats de plus de 5 mm ne devraient pas être présent au sein du mélange.

Les granulats étant composés de plus de particules fines, il y aura beaucoup moins de vides au sein du matériau une fois le mélange effectué. Le matériau sera plus dense et plus compact grâce à cela.

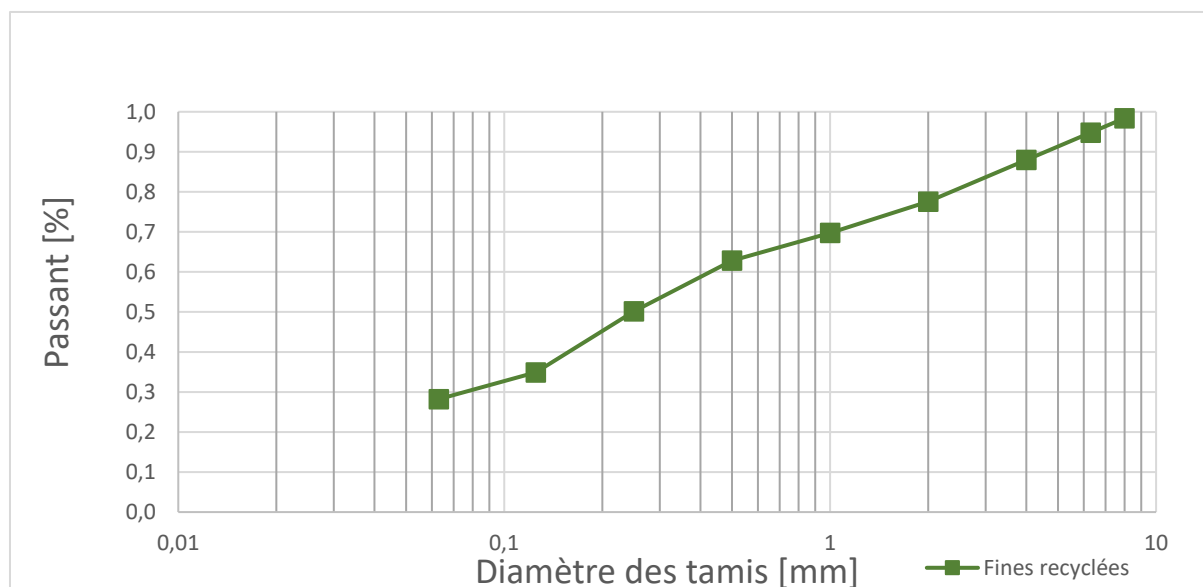


Figure 37: Courbe granulométrique

4.1.1.2 Absorption des granulats

L'étude de la densité des granulats ainsi que de leur absorption d'eau permettra une optimisation de la formulation du mélange. La valeur d'absorption d'eau modifiera en effet la quantité d'eau mise en œuvre dans le mélange car une partie de cette eau sera absorbée par les granulats et ne réagira donc pas avec le ciment et ne participera pas à l'ouvrabilité du mélange.

La norme NBN 15-001 régit les propriétés physiques des granulats mixtes recyclés de type B+, ce qui correspond au matériau utilisé dans cette étude. La densité doit être supérieure à une valeur minimale de 1700 kg/m³ pour les granulats mixtes et doit posséder une valeur d'absorption inférieure à 15%. Pour Laneyrie, la valeur d'absorption d'eau des granulats recyclés doit se situer entre 3 et 12% mais cela varie fortement en fonction de l'origine du béton « parent », c'est-à-dire du béton qui a

permis de produire les granulats recyclés. En comparaison, les granulats naturels utilisés plus généralement dans les bétons courants possèdent une absorption d'eau de 0.5 à 3%. Cette différence en absorption provient des résidus de mortier encore présent sur les granulats. Le mortier étant plus poreux que la pierre naturelle, il va augmenter l'absorption des granulats. La performance mécanique recherchée lors de la réalisation du béton originel peut aussi influencer l'absorption d'eau des granulats recyclés. Plus le granulat naturel sera petit, plus la surface spécifique sera élevée et donc plus il y aura de mortier sur les granulats augmentant ainsi les zones poreuses des granulats recyclés (Laneyrie Cléo, 2014).

L'étude des granulats recyclés issus de Tradecowall a permis d'obtenir la valeur de 3.96% d'absorption d'eau moyenne sur les deux échantillons (tableau 13). Pour la masse volumique à l'état sec, la valeur se situe à 2389 kg/m³ de moyenne sur les deux échantillons. Les normes sont donc bien respectées concernant l'utilisation de ce matériau.

Absorption eau et masse volumique				
		Unité	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse surface sèche	M1	g	806	824,3
Masse pycnomètre avec échantillon	M2	g	2060	2102
Masse pycnomètre rempli d'eau	M3	g	1582	1606
Masse sèche après étuve	M4	g	773	795
Masse volumique absolue	ρ_a	kg/m ³	2620,3	2658,9
Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve	ρ_{rd}	kg/m ³	2356,7	2421,6
Masse volumique saturée à surface sèche	ρ_{ssd}	kg/m ³	2457,3	2510,8
Coefficient absorption d'eau	W_{a24}	%	4,269	3,686

Tableau 13: Absorption d'eau et densité des granulats recyclés

Lors de l'expérience suivant la norme 1097-6, les fines sont éliminées pendant le lavage. L'absorption de ces éléments est donc négligée durant ce test. Faisant partie de plus de 30% de notre mélange granulaire, l'absorption d'eau de ces éléments n'est pas estimée et impactera donc le reste des résultats.

4.1.1.3 Caractérisation visuelle des granulats

L'essai réalisé selon la norme EN 933-11 a permis de déterminer la composition des granulats de manière visuelle. Les échantillons ont été lavés et pesés pour ne conserver qu'un minimum de 1000 particules et une taille de granulats supérieures à 4 mm.

La norme EN 12620 « granulats pour béton » donne toutes les indications nécessaires sur la composition des granulats recyclés mixtes comme présentée dans

le tableau 14. La composition doit ensuite être analysée pour vérifier les proportions de chaque constituant au sein du mélange granulaire. Les proportions sont quant à elles données par la norme NBN B 15-001 « Béton – spécification, performances, production et conformité ».

Type d'éléments	Description des composants
Rc	Béton Mortier Eléments de maçonnerie
Ru	Graviers non traités Pierres naturelles Granulats traités avec un liant hydraulique
Rb	Eléments argileux (briques, tuiles) Eléments silicate de calcium Béton cellulaire
Ra	Matériaux bitumineux
Rg	Verre
X	Divers : bois, métal, plastique, plâtre

Tableau 14: Présentation des constituants de granulats recyclés

Chaque catégorie de constituant doit respecter des proportions massiques au sein du mélange granulaire qui va être utilisé en matière première du mélange. Les proportions sont présentées dans le tableau 15, résumant les quantités de matériaux obtenus durant la caractérisation visuelle. La quantité la plus importante à retrouver correspond aux éléments de béton « Rc » ainsi que les graviers et pierres naturelles « Ru ». Plus de 50 % de la masse totale doit contenir des « Rc » et au moins 70% de la totalité doit quant à elle être composée de « Rcu », mélange entre les éléments en béton et les pierres naturelles. La norme impose par ailleurs des quantités pour les éléments qui pourraient venir diminuer les capacités mécaniques du matériau comme les éléments bitumineux, les éléments argileux ou les éléments organiques.

L'étude des granulats recyclés de chez Tradecowall respecte tous les critères de la norme avec plus de 56 % d'éléments en béton. Il y a très peu d'éléments néfastes au mélange avec 10% d'éléments argileux, et 2.78 % d'éléments divers. Mais il est important de prendre en compte le fait que la caractérisation visuelle passe avant tout par une observation et il est parfois complexe de bien juger de la typologie des éléments.

Type de granulats	Masse	Pourcentage	Norme	
	g	%	%	
Rc	65,6	56,90	>= 50	>= 70
Ru	34,1	29,58		
Rb	11	9,54	<= 30	
Ra	1	0,87	<= 5	
Rg	0,4	0,35	<= 0,5	
X	3,2	2,78		
Total	115,3	100		

Tableau 15: répartition des éléments composants le matériau

4.1.2 Densité et capacité d'absorption du béton damé

L'étude de la densité des différents mélanges réalisés au cours de la recherche est très importante car la densité influe sur la durabilité du mode constructif ainsi que sur les résistances mécaniques. Les densités sont étudiées en faisant varier la quantité d'eau et la quantité de ciment des mélanges.

Densités											
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Volume	Masse (1 jour)	Densité (1 jour)	Masse (28 jours)	Densité (28 jours)
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	m ³	Kg	Kg/m ³	Kg	Kg/m ³
1	78,4	1490	6,9	130	14,7	279	0,00338	6,744	1998,32	6,888	2040,89
2	77,7	1476	7,8	148	14,6	277		6,571	1946,86	6,703	1986,07
3	80,0	1520	10,0	190	10,0	190		5,842	1730,91	6,039	1789,23
4	78,4	1490	9,8	186	11,8	224		6,512	1929,38	6,726	1992,79
5	76,2	1448	9,5	181	14,3	271		6,414	1900,44	6,500	1925,93
6	75,5	1434	9,4	179	15,1	287		6,551	1941,04	6,756	2001,78

Tableau 16: Moyennes des densités à 1 jour et 28 jours en fonction de la composition du mélange

Les éprouvettes ont toutes été placées en cure dans une chambre humide durant les 28 jours. L'augmentation de la densité entre le 1er jour de cure et le 28ème provient de l'absorption d'eau des éprouvettes lors de cette cure.

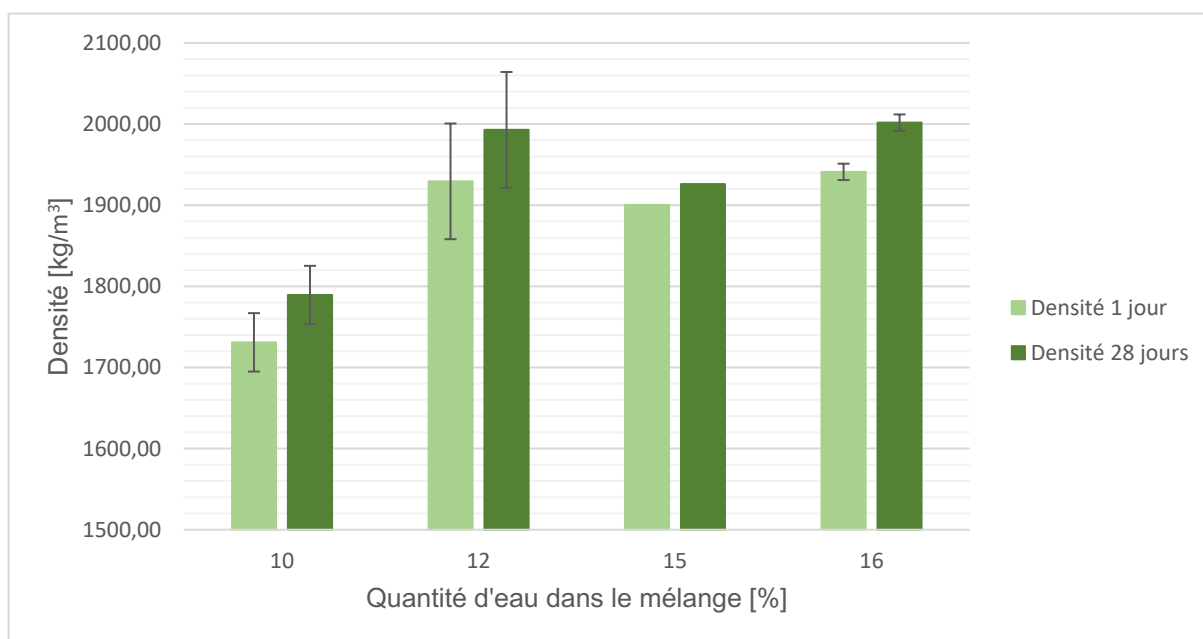


Figure 38 : Densités en fonction de la teneur en eau du mélange à 1 jour et 28 jours de cure.

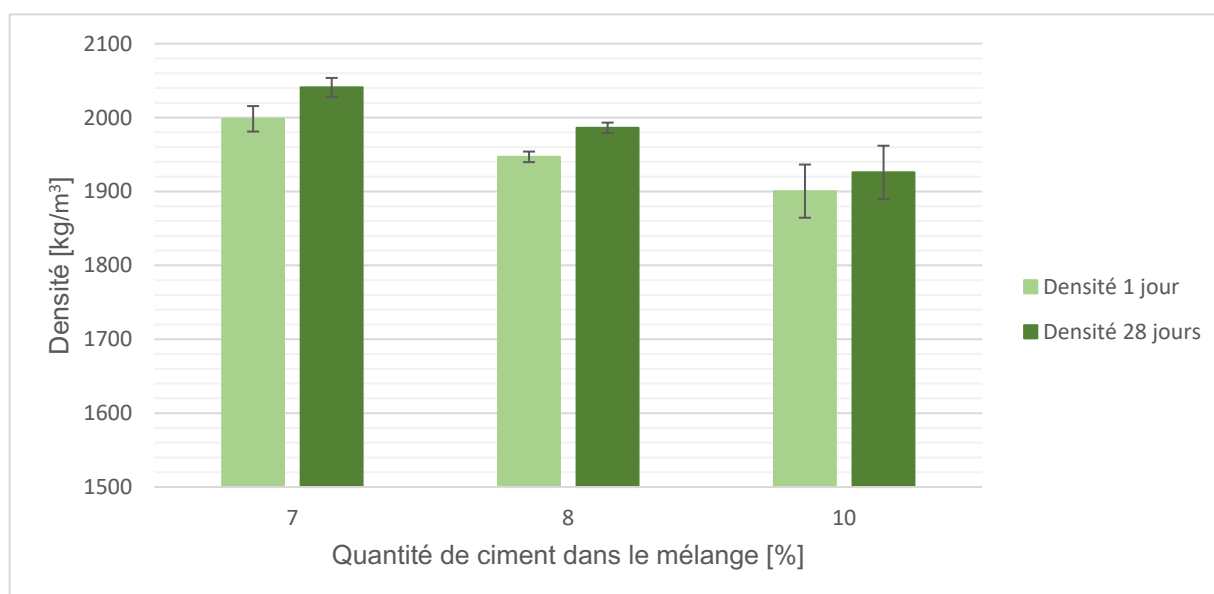


Figure 39: Densités en fonction de la teneur en ciment du mélange à 1 jour et 28 jours de cure

Les matériaux utilisés pour la fabrication des éprouvettes ont tous été placés en étuve durant une semaine pour sécher. A la suite de cela, ils ont été directement introduits au mélange. La teneur en eau n'ayant jamais été vérifiée avant leur introduction il est possible qu'une certaine quantité d'eau était encore contenue dans les matériaux. Il est important de prendre cela en compte pour la suite des résultats

car la quantité d'eau utilisée pourrait être supérieure à la quantité calculée dans la formulation.

Comme le montre la figure 38, lorsque la quantité d'eau varie dans le mélange, la densité change avec elle. En effet, lorsque la teneur en eau du mélange passe de 10 à 12%, la densité va passer de 1790 à 1990 kg/ m³ à 28 jours. Mais lorsque la teneur augmente encore, une stagnation autour de 2000 kg/ m³ se forme.

Le mélange à 15% présente une densité de 1925 kg/ m³. Cela peut s'expliquer par un mauvais compactage des éprouvettes pour ce mélange mais aussi, comme le montre l'annexe ..., par un nombre réduit d'éprouvettes pour ce mélange. En effet le mélange 76.2/9.5/14.3 est une composition élaborée pour les briques de béton damé. L'étude des briques fabriquées avec ce matériau fait partie de l'étude de François Wiomont « Comportement des briques en terre comprimée produites à partir de granulats recyclés » (Wiomont, 2022). L'étude se différencie principalement par la confection des éprouvettes grâce à une presse manuelle. La brique étant retirée directement du moule après sa confection, il était important que le mélange soit assez résistant dès le compactage. Or, lors de la production du mélange 80/10/10, il était difficile de réaliser les briques car le matériau était trop sec, un nouveau calcul a été effectué pour réaliser la composition 76.5/9.5/14.3 avec les granulats restants ne permettant ainsi de produire que deux éprouvettes cubiques.

L'influence de la quantité d'eau se fait principalement sur le compactage en modifiant fortement l'ouvrabilité du mélange. Si la quantité d'eau devient trop importante, il sera très compliqué de réaliser un compactage homogène et de qualité. A l'inverse, si le matériau est trop sec, il est compliqué de bien le compacter car il n'y a pas assez de cohésion dans le mélange.

Lorsque la variation se fait plutôt sur la quantité de ciment comme le démontre le tableau 39, le mélange passe d'une densité à 28 jours de 2040 kg/ m³ pour une quantité de ciment à 7% à 1986 kg/m³ pour une quantité de ciment à 8%. Lorsque la quantité de ciment est de 10%, la densité atteint 1925 kg/ m³. La différence de 100 kg/ m³ ne permet pas de juger de l'impact de la quantité de ciment sur la densité du mélange. La mise en œuvre est par contre influencée par la masse de ciment qui va radicalement changer la mise en œuvre du matériau en le rendant plus sec ou plus liquide. Comme le montre le graphique 39, pour une proportion de ciment de 7% avec 15% d'eau, le matériau semble bien dense et donc qu'il y a pu y avoir un bon compactage. A l'inverse, le mélange avec 10 % de ciment et 15 % était sans doute plus sec et donc plus difficile à mettre en œuvre.

Malgré les quelques variations en fonction de la quantité d'eau ou encore de la quantité de ciment, la densité reste dans l'ordre de grandeur des critères définis dans les études scientifiques sur le matériau « Terre damée ». Selon Taghiloha, la densité du matériau terre damée se situe entre 1800 et 2200 kg/ m³. Chaque éprouvette de cette étude se trouve dans cet ordre de grandeur après une cure de 28 jours (Taghiloha Ladan, 2013).

Moyenne des absorptions d'eau										
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Masse saturée	Masse après séchage	Volume	Absorption d'eau
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	kg	kg	m ³	%
Eprouvette 1	80	1490	7	130	15	279	2,292	1,970	0,0011	16
Eprouvette 1		1476	8	148	15	277	2,257	1,925	0,0011	17
Eprouvette 1		1520	10	190	10	190	2,129	1,811	0,0011	18
Eprouvette 1		1490	10	186	12	224	2,296	1,997	0,0011	15
Eprouvette 1		1448	10	181	15	271	1,170	0,991	0,0006	19
Eprouvette 1		1434	10	179	16	287	2,250	1,897	0,0011	19

Tableau 17: Moyenne des absorptions d'eau des éprouvettes en fonction de la formulation choisie.

L'absorption d'eau du matériau après la cure de 28 jours a été étudiée permettant de juger de l'influence de la quantité d'eau ou de ciment sur celle-ci. D'après les résultats du tableau 17, plus la quantité de ciment augmente, plus l'absorption augmente. La valeur de la quantité d'eau ajoutée au mélange est une valeur totale. La quantité d'eau effective va être plus faible après l'absorption des granulats. Il est important de prendre en compte le fait que les granulats recyclés sont composés de plus de 25% de fines. L'absorption de ces fines n'ayant pas été calculé, une inconnue reste présente sur la quantité d'eau effective restante pour la réaction avec le ciment. L'eau était en quantité inférieure à ce que prévoyaient les formulations.

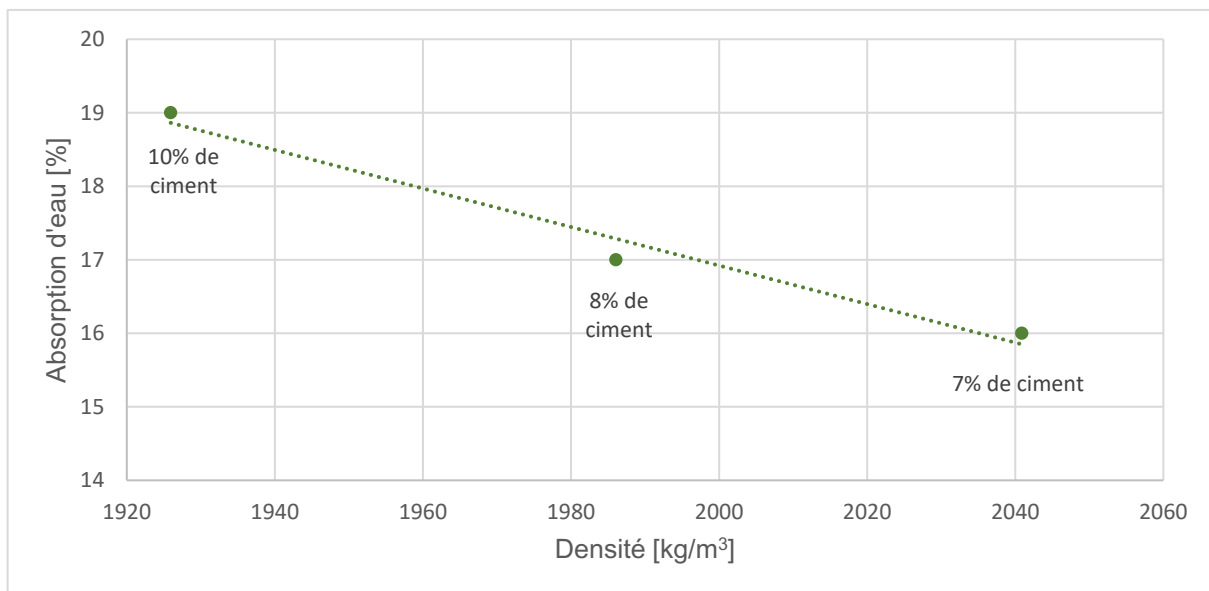


Figure 40: Absorption d'eau des éprouvettes en fonction de leur densité et de la quantité de ciment.

Comme le montre le graphique 38, plus la teneur en ciment diminue, plus la densité du matériau augmente et plus le taux d'absorption du mélange diminue. Le matériau est de plus en plus compact lorsque la teneur en ciment diminue amenant ainsi une

diminution de la quantité de vides dans le matériau et ainsi une diminution de la quantité d'eau que le matériau peut absorber.

4.1.3 Caractéristiques mécaniques

Selon Taghiloha, la résistance en compression du matériau « terre damée » dépend principalement de la qualité des granulats et de leur provenance lorsqu'il s'agit de granulats recyclés (Taghiloha Ladan, 2013). La quantité de vides au sein du matériau après compactage ainsi que des conditions de cure influent aussi sur la résistance. Lorsque la stabilisation au ciment est mise en œuvre dans la composition, une résistance de plus de 5 MPa devrait être obtenue (Ciancio, 2012).

Resistance en compression à 28 jours avant optimisation										
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		E1	E2	E3	Fc moy
	%	kg/m3	%	kg/m3	%	kg/m3	MPa	MPa	MPa	MPa
1	78,4	1490	6,9	130	14,7	279	7,75	6,85	8,06	7,55
2	77,7	1476	7,8	148	14,6	277	6,66	5,1	5,78	5,85
3	80	1520	10	190	10	190	4,47	2,35	2,93	3,25
4	78,4	1490	9,8	186	11,8	224	9,98	5,28	10,67	8,64
5	76,2	1448	9,5	181	14,3	271	6,54			6,54
6	75,5	1434	9,4	179	15,1	287	8,58	7,4	8,44	8,14

Tableau 18: Résistance en compression en fonction de la composition du mélange (E1 : éprouvette 1, E2 : éprouvette 2, E3 : éprouvette 3)

La résistance en compression a donc été analysée en fonction de la proportion de ciment et d'eau mis en œuvre dans la composition du mélange. La résistance possède un lien important avec la densité, car avec un matériau plus compact, la résistance en compression est plus forte. La variable humaine a aussi joué lors de la fabrication des éprouvettes. Le nombre important d'éprouvettes à réaliser ainsi que la quantité d'effort à mettre en œuvre pour réaliser le compactage ont influencé la qualité de la manipulation. Cela se répercute sur la densité des éprouvettes.

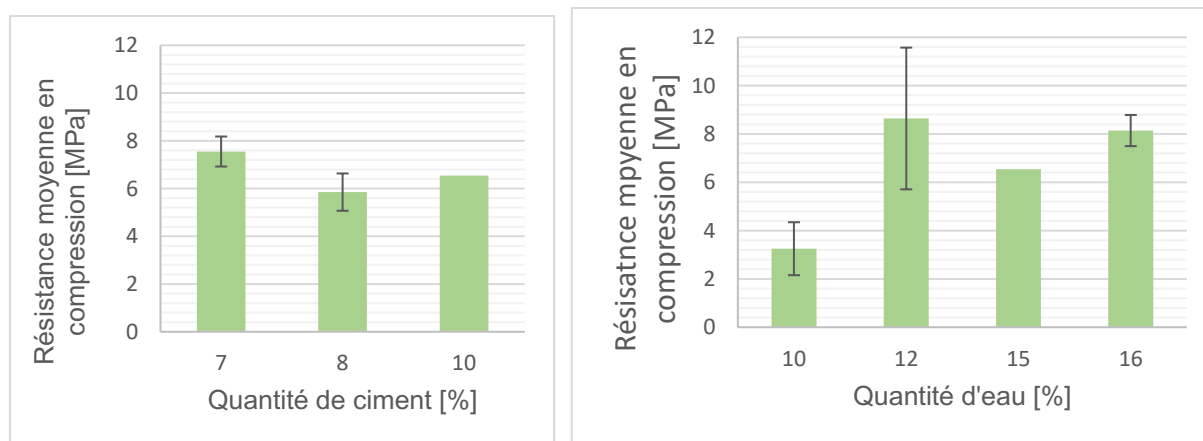


Figure 41: Résistance en compression en fonction de la quantité de ciment et la quantité d'eau dans le mélange.

Comme l'illustre la figure 41, si la quantité de ciment augmente, la résistance diminue entre 7 et 8 % de ciment. Cela peut s'expliquer par la diminution forte de la densité entre ces deux types d'éprouvettes. Avec un matériau moins compact et une faible augmentation de la quantité de ciment, la résistance diminue. Mais lorsque passe à 10%, malgré une forte baisse de la densité, la quantité de ciment devient assez important pour augmenter de nouveau la résistance mécanique du mélange. Le mélange sera aussi plus sec favorisant le compactage contrairement au mélange possédant 7 et 8 % de ciment.

Pour une quantité d'eau de 10% dans le mélange, la résistance mécanique en compression simple est assez faible avec 3.25 MPa. Cela se traduit par un matériau très sec, n'apportant pas assez d'eau pour l'hydratation de la pâte de ciment, partie la plus important pour une bonne solidarisation du squelette granulaire du béton et donc de bonnes propriétés mécaniques. Lorsque la quantité passe à 12%, la résistance mécanique en compression augmente fortement à 8.64 MPa. Dans ce cas, il s'agit d'une bonne optimisation entre la quantité d'eau et de ciment. Le ciment a pu réagir entièrement avec l'eau formant ainsi un matériau résistant. Si l'on compare ce résultat aux valeurs de l'étude de Anysz, pour une composition de 10 % de ciment et 13% d'eau, la résistance en compression est de 7.03 MPa. La composition 78.4/9.8/11.8 semble être la plus appropriée que ce soit en termes de résistance mais aussi de mise en œuvre car avec 16% d'eau le matériau devient difficilement compactable (Anysz & Narloch, 2019).

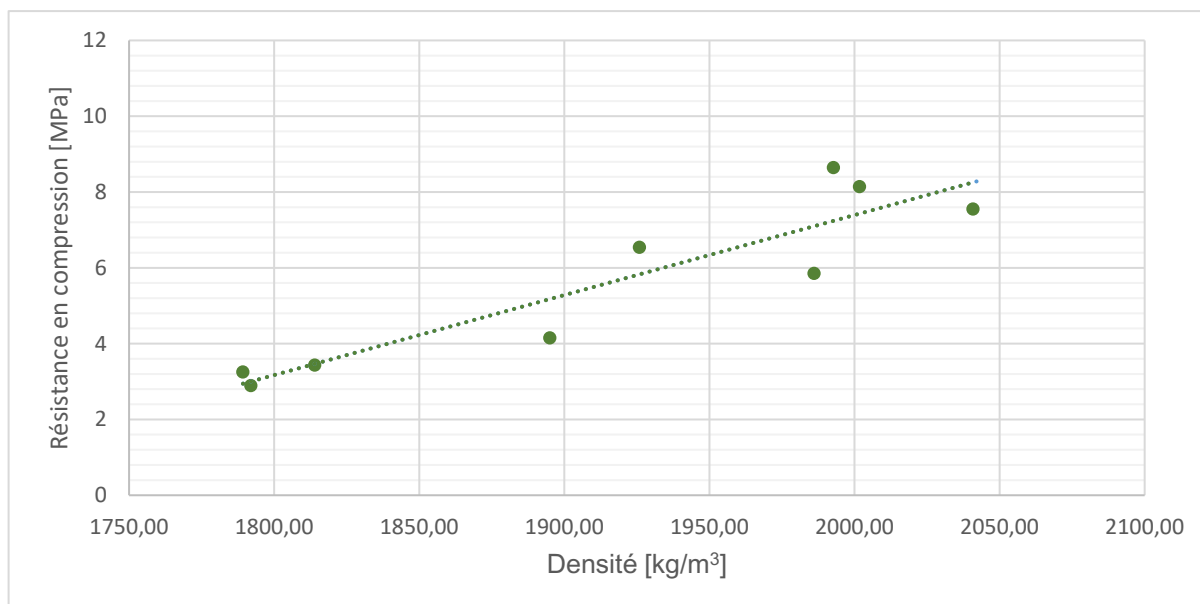


Figure 42: Résistance en compression en fonction de la densité des éprouvettes

Les résistances en compression du matériau varient entre 3 et 8 MPa. Ces résistances comme le montre la figure 40 sont principalement liées au compactage et donc à la densité des éprouvettes. Plus le matériau sera dense, plus la résistance en compression sera forte. La quantité de ciment et la quantité d'eau n'influencent donc pas directement la résistance en compression mais plutôt la mise en œuvre du matériau au sein des éprouvettes. Avec un matériau trop sec ou trop liquide, le compactage manuel sera difficile à réaliser avec pour résultat un élément qui s'effrite facilement dans le cas d'un mélange sec ou alors un élément trop visqueux dans le cas d'un mélange trop liquide.

4.1.4 Propriétés du mélange optimisé

Suite aux analyses des différents mélanges produits, une recherche a été faite autour d'une composition optimisée liant une bonne résistance en compression, une bonne ouvrabilité du mélange ainsi qu'une composition écologique et durable minimisant les proportions en ciment et eau.

Le choix s'est porté sur une composition de 80% de granulats recyclés, 8% de ciment et 12% d'eau après analyse des résultats. Ainsi, 18 éprouvettes cubiques ont été réalisées ainsi que deux murs de 40 x 40 x 20 cm et 15 briques de béton damé.

Densité moyenne										
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Masse (1 jour)	Densité (1 jour)	Masse (28 jours)	Densité (28 jours)
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	kg	kg/m ³	kg	kg/m ³
Mélange optimisé	80	1520	8	152	12	228	6,094	1805,7	6,215	1841,4

Tableau 19: Moyenne des densités à 1 jour et à 28 jours pour le mélange optimisé

En ce qui concerne la densité moyenne de la composition optimisée, une valeur de 1841 kg/ m³ est obtenue. Cette densité est comprise dans l'ordre de grandeur des résultats précédents mais aussi des valeurs cibles des différentes études présentées dans l'état de l'art. Malgré cela, la valeur est plus faible que pour le mélange à 10% de ciment et 12% d'eau.

Resistance en compression après optimisation										
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		E1	E2	E3	Fc moy
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa
1 jour	80	1520	8	152	12	228	1,48	1,32	1,81	1,54
7 jours							2,83	3,1	3,46	3,13
28 jours							4,15	2,89	3,24	3,43

Tableau 20: Résistance en compression pour le mélange optimisé en fonction du nombre de jours de cure (E1 : éprouvette 1, E2 : éprouvette 2, E3 : éprouvette 3)

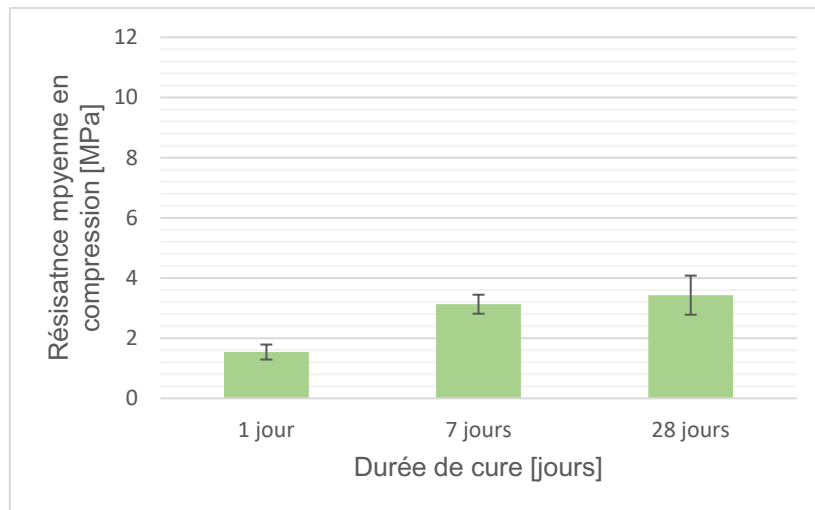


Figure 43: Résistance en compression en fonction de la durée de la cure

Pour la résistance en compression du mélange optimisé, seulement 3.43 MPa sont atteints par les échantillons à 28 jours. Cette valeur est bien plus faible que les résistances obtenues avec les échantillons précédents. Le fait que les fines argileuses absorbent une partie de la quantité d'eau prévue pour l'hydratation influence le mélange final. La quantité d'eau de l'hydratation devient trop faible, diminuant la quantité de pâte de ciment.

L'une des réponses à apporter en ce qui concerne la faible résistance en compression peut venir de différents soucis obtenus lors de la fabrication du mélange optimisé. Les granulats recyclés étant très humides avec plus de 50% de teneur en eau, il était important de le faire sécher en étuve avant son incorporation aux mélanges comme pour les autres formulations. Mais un problème mécanique est survenu sur l'étuve avant la phase de réalisation des éprouvettes, empêchant ainsi le séchage correct des granulats. Une adaptation a donc été faite de la formulation en mesurant la teneur en eau des granulats avant leur incorporation au mélange. Cela a amené une diminution de la quantité d'eau apportée au mélange. La teneur en eau du mélange optimisé a donc été plus contrôlée que lors de la fabrication des éprouvettes pour les mélanges dont les quantités de ciment et d'eau varient.

Dans ce cas de figure où la quantité d'eau a été plus contrôlée, le matériau était donc plus sec que ce qui était recherché avec l'optimisation. Il était donc plus difficile à mettre en œuvre, plus difficile de le compacter et donc moins résistant.

Densités et résistance en compression														
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Volume	Masse (28 jours)	Densité 28 jours	Résistance en compression à 28 jours				
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	m ³	Kg	Kg/m ³	E1	E2	E3	E4	Fc moy
										MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Mélange optimisé	80	1520	8	152	12	228	0,00335	6,434	1921	3,86	5,19	5,13	3,05	4,31

Tableau 21: Densité moyenne et résistance en compression des briques en béton damé (Wiomont, 2022)

Pour les briques en terre damée, la même formulation a été utilisée. Les comportements physique et mécanique sont donc comparables. Le tableau 21 montre tout d'abord une densité plus élevée, signe d'un compactage plus important pour la presse manuelle. Ce matériau plus compact que pour les éprouvettes cubiques, est bien plus résistant, avec 4.3 MPa de moyenne à 28 jours. Le compactage par presse est donc plus efficace que le compactage manuel effectué avec une dame pour cette formulation. La presse va permettre vraiment d'imposer une force plus importante grâce au bras de levier a contrario des dames manuelles qui après un certain nombre de coups, ne permettent plus d'améliorer le compactage.

4.2. Caractéristiques thermiques et durabilité du béton damé

4.2.1 Mesure de la conductivité et de la résistance thermique

La conductivité thermique a été mesurée lors d'un test suivant la norme ISO 9869-1. La valeur obtenue est de 0.271 W/m.°K. Pour avoir une indication de la qualité de la conductivité thermique du matériau, une comparaison peut être faite sur des matériaux existants. La brique de terre cuite Porothersm est une brique largement utilisée dans le secteur de la construction de nos jours. La conductivité thermique de ce matériau pour une épaisseur de 20 cm est autour de 0.26 W/m.°K. Si l'on s'intéresse aux blocs de béton creux, pour une épaisseur de 20 cm, une valeur de 0.87 W/m.°K peut être retrouvée sur les documents fabricants. En ce qui concerne la terre damée stabilisée, le travail de recherche de Bui Quoc-Bao en tableau 6 donne une valeur de conductivité thermique de 0.5 W/m.°K pour une éprouvette de 20 cm d'épaisseur (Bui Quoc-Bao, 2008).

Les matériaux utilisés en comparaison ne sont pas des matériaux possédant des qualités en termes d'isolation thermique. Une isolation supplémentaire est mise en place lors de leur utilisation permettant d'augmenter fortement la résistance thermique du mur. Toutefois, le matériau composé de fines issues du recyclage possède une conductivité comparable au Porothersm et bien meilleure que celle des blocs de béton creux. En plus de cela, les briques et blocs sont posés et liés grâce au mortier formant des joints qui peuvent amener des pertes thermiques. L'utilisation du béton damé permet de créer des murs uniformes sans jointures diminuant ainsi les possibles pertes thermiques.

4.2.2 Résistance face à l'érosion

Le test de résistance à l'érosion s'est déroulé sur une éprouvette de 40 * 40 * 20 cm. Suite à des soucis sur le planning des différentes expériences, l'éprouvette n'aura subi qu'une cure de 10 jours sur les 28 recommandés. Les résultats du test ont été comparés à l'index de la norme provenant de Nouvelle-Zélande (tableau 11) (New Zealand, 1998).



Figures 44: Mise en place avant le test d'érosion

Le test s'est déroulé durant 1 heure. Pour produire le jet d'eau servant à éroder le matériau, un tuyau a été relié au réseau du laboratoire du Sart-Tilman. Selon la norme NZS 4298 – 1998, la pression minimale pour réaliser le test est de 50 kPa. Or la pression d'eau garantie par la CILE (Compagnie intercommunale Liégeoise des eaux) sur le réseau est entre 2 et 10 Bars (200 à 1000 kPa). La CILE indique aussi que sauf cas exceptionnel, que la pression au robinet est de 3 Bar (300 kPa). La pression a donc toujours été au minimum supérieure à celle imposée par la norme NZS.



Figures 45: Réalisation du test d'érosion et résultat

A la fin du test, une mesure de la profondeur d'érosion est réalisée, permettant de juger de la résistance du matériau. Pour le matériau réalisé dans cette étude, le test n'a provoqué aucun dommage à l'éprouvette comme le montre la figure 45. Dans l'étude de Narloch, le test a été réalisé sur un matériau composé d'un mélange granulaire dont la granulométrie est comprise entre 0.002 mm et 2.0 mm et d'une

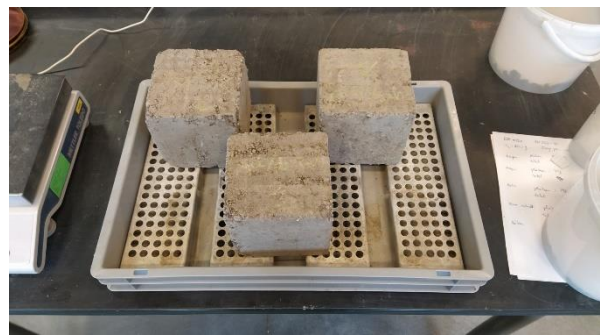
teneur en ciment variant entre 0 et 9%. Aucun dommage n'a pu être observé sur les éprouvettes tests lorsque la teneur en ciment était de 6 et 9 %. Mais pour le test réalisé sur une éprouvette sans ciment, il a eu plus de 53 mm d'érosion. Le ciment a donc permis d'augmenter fortement la résistance du matériau que ce soit dans le cas de Narloch mais aussi de cette étude (Narloch & Woyciechowski, 2020).

4.2.3 Résistance face au gel / dégel

La résistance du matériau face aux périodes de gel et de dégel est encore en cours de test au moment de la publication du travail de fin d'étude. Pour l'avancement actuel, 6 cycles de gel et de dégel ont pu être réalisés. N'ayant pas la possibilité de réaliser des cycles durant les week-ends et les jours fériés, les éprouvettes ont été placées dans un sac fermé permettant de fixer la teneur en eau des éprouvettes (figure 46). Aucun dégât surfacique n'est visible à la moitié de l'expérience. Aucune perte de masse n'a été constatée. En comparaison de cela, sur la figure 12 présentant l'expérience de Traoré, une éprouvette de terre damée stabilisée est fortement détériorée après seulement 4 cycles. Le matériau semble donc bien résistant face aux problématiques de gel et de dégel.



Figure 46 : Eprouvettes en chambre humide durant les périodes de non-test



Figures 47 : Eprouvettes en phase de dégel et de gel

4.3. Discussion de l'utilisation du béton damé dans le monde de la construction

L'utilisation du béton damé en tant que matériau de construction constitue le point de recherche de cette étude. Les premiers résultats obtenus montrent que pour obtenir un mode de construction résistant et performant, il est nécessaire de passer par un bon compactage. Comme le montrent les résultats de la densité des éprouvettes en tableau 16, le compactage du matériau peut être difficile à réguler lorsqu'elle se fait de manière manuelle sans imposer de réglementations. La teneur en eau et en ciment du mélange va influencer grandement la mise en œuvre du matériau au sein du coffrage sans toutefois affecter la résistance du matériau. Il est donc important de mettre en place des normes sur les méthodes de fabrication du matériau avec un compactage contrôlé. La méthode de compactage par presse pneumatique permet d'avoir un suivi de la force de pression exercée sur le matériau et du nombre de coups donnés. En rendant le mode de construction non plus manuelle mais automatisé avec la mise en place d'une méthode pneumatique, un gain dans la vitesse d'exécution se fera. La méthode pneumatique permet de compacter des couches de plus grandes épaisseurs. Car le point négatif majeur de la construction en terre et béton damé reste le temps de fabrication.



Figure 48: Réalisation de murs en terre damée avec un compactage pneumatique (source : architectureterrebois.fr)

L'utilisation du béton damé en tant que matériau de construction impose des propriétés mécaniques et thermiques. Dans cette étude, les valeurs de résistance en compression des différentes éprouvettes ont pu prouver que le matériau possède de bonnes capacités avec des résistances variant entre 4 et 10 MPa. L'influence de la densité sur ces valeurs montre qu'avec un compactage contrôlé et optimisé, la résistance pourra être supérieure à ces valeurs tout en ne conservant qu'une quantité de ciment et d'eau minimale. Makara Long met en avant les similitudes entre ce matériau et la maçonnerie classique. Le comportement mécanique est en effet

similaire. Les blocs de béton qui sont aujourd'hui beaucoup utilisés en tant que matériaux de constructions possèdent des valeurs de résistance entre 8 MPa et 12 MPa (source : Belblock.be)⁴. Le béton damé produit avec des fines issues du recyclage peut donc être utilisé en tant que matériau pour la maçonnerie. Pour les performances en termes de durabilité, le béton damé se rapproche de nombreux matériaux utilisés dans le secteur de la construction. Il possède de meilleures caractéristiques en résistance thermique que le bloc de béton creux. Le béton damé est un matériau fortement résistant à l'érosion. Il pourrait donc être utilisé en tant que mode de construction.

⁴ Source : <http://www.belblock.be/fr/resistance-a-la-compression.html#:~:text=Les%20blocs%20de%20ma%C3%A7onnerie%20en%20b%C3%A9ton%20d'une%20r%C3%A9sistance%20%C3%A0,12%20%C3%A0%2025%20N%2Fmm%C2%B2.>

5. Conclusion

5.1. Synthèse

Durant ce travail de fin d'étude, le béton damé incorporant des fines issues du recyclage des déchets de constructions a été étudié. Les propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité ont été analysées pour améliorer la connaissance de ce matériau. Une comparaison a été faite avec les modes de constructions existants comme la maçonnerie et la terre damée, pour juger de la possible utilisation du béton damé dans le secteur de la construction.

Les résistances mécaniques du béton damé se situent dans les ordres de grandeurs de la terre stabilisée avec des valeurs comprises entre 4 MPa et 11 MPa. La teneur en eau et en ciment influence principalement l'ouvrabilité du mélange. Le compactage sera plus difficile à réaliser si le mélange est trop sec ou trop humide diminuant ainsi sa densité et sa résistance en compression. Ses performances thermiques, avec une conductivité de 0.271 W/m.°K, sont comparables à des matériaux souvent utilisés aujourd'hui comme la brique en terre cuite alvéolaire. La durabilité de ce matériau est fortement améliorée lorsque l'on ajoute du ciment au mélange. Dans notre cas, les tests d'érosion et de durabilité face au gel/dégel ont montré que le matériau était résistant avec aucun impact sur les éprouvettes lors des deux expériences.

Les méthodes de fabrication des éprouvettes ont prouvé que le compactage manuel ne permettait pas de réaliser une compression suffisamment homogène. L'énergie de compactage mise en œuvre par le fabricant et le nombre de coups produit sur l'éprouvette influent le résultat final. C'est pour cela que l'on peut retrouver pour la même formulation, des éprouvettes avec des densités de 1860 kg/m³ et de 2000 kg/m³. La mise en place d'un compactage contrôlé, avec des pressions fixes et une bonne répartition de la force de compactage, permettront d'obtenir de meilleurs résultats de densité et donc de résistance.

Avec une utilisation de 100% de granulats recyclés, le béton damé possède de bonnes propriétés thermomécaniques et de durabilité. L'utilisation d'une méthode écologique de construction associée à la valorisation des déchets de construction est un projet à envisager pour le futur du secteur de la construction.

5.2. *Limites de l'étude et perspectives d'avenir*

Les granulats recyclés provenant de chantiers différents, avec des teneurs en eau variant dues au stockage, il peut être compliqué de réaliser le béton damé suivant une réglementation précise. De nombreuses analyses doivent être effectuées pour les granulats permettant d'adapter les formulations. Certains granulats pourront contenir plus de mortier que d'autres, d'autres auront une plus grande proportion de fines

argileuses. L'adaptation des méthodes de compactage lors de la fabrication des murs avec des méthodes pneumatiques permettrait d'améliorer les performances du matériau mais ne correspondrait plus aux valeurs d'origine de la terre stabilisée. L'utilisation de la terre sur le site et le compactage manuel permettait de faciliter le mode de construction. Mais pour une utilisation à une plus grande échelle du béton damé, il est nécessaire de développer des méthodes plus efficaces de fabrication. La recherche doit être portée sur d'autres aspects mécaniques comme la résistance en traction et au cisaillement, les effets d'actions de forces combinées. La formulation optimisée a aussi été produite suite aux résultats de compression et de densité. Ainsi les tests de durabilité n'ont été réalisés que sur un mélange avec une composition fixe. L'influence de la variation de la quantité d'eau ou encore de la proportion de granulats recyclés par rapport à une quantité totale de granulat pourrait être intéressante à étudier en termes de durabilité.

La faible quantité de normes ne permet pas aussi de réaliser les expériences dans de bonnes conditions. Malgré une utilisation du matériau datant de plusieurs dizaines d'années, il reste très peu d'informations et de réglementations en comparaison à des matériaux comme le béton, le bois ou l'acier.

Le secteur de la construction cherche de nouvelles solutions pour améliorer les performances écologiques et durables de nos bâtiments. L'amélioration de nos connaissances sur les matériaux permet d'envisager de nouvelles méthodes de valorisation réduisant ainsi l'impact écologique de la construction mondiale. Malgré les défauts du matériau que ce soit sur l'origine variante des granulats recyclés, le coût et le temps de fabrication, le béton damé doit devenir un matériau d'avenir.

6. Liste des figures

Figure 1 : Maison à colombage produite avec du torchis (source : Build-green.fr)	10
Figures 2: Façonnage de briques de terre comprimées (source : amaco.org)	10
Figure 3: Procédures à réaliser pour déterminer de la possible stabilisation d'un sol (résultat du test en compression supérieur à 2 MPa) (source : Burroughs, 2010)	13
Figure 4 : Réalisation en terre damée stabilisée (source : narbovia.fr)	13
Figure 5 : Réalisation en béton damé (source : actu.epfl.ch)	13
Figure 6 : Comparaison des propriétés mécaniques de la terre damée stabilisée, non stabilisée, du béton ainsi que de la maçonnerie (source : Birznieks Lauris, 2013)	15
Figure 7 : Résistance en compression simple et densité en fonction de la teneur en granulats recyclés (source : Arrigoni et al., 2018)	18
Figure 8 : Influence de la masse thermique dans le confort du bâtiment (source : Bui Quoc-Bao, 2008)	18
Figure 9 : Comparaison des conductivités thermiques entre la terre damée stabilisée ou non, le béton et la maçonnerie (source : Birznieks Lauris, 2013)	20
Figure 10: Décaissement du sol près des murs en terre (source : Birznieks 2013)	21
Figure 11 : Surfaces des éprouvettes suite aux tests d'érosion (source : Narloch & Woyciechowski, 2020)	22
Figure 12 : : Eprouvettes après les tests d'érosion ((a) : 1 cycle ; (b) : 2 cycles ; (c) : 3 cycles ; (d) : 4 cycles) (source : Traoré et al., 2021)	23
Figures 13 : : Exemple d'utilisation du « Sirewall » au musée Narbovia de Narbonne, France (source : narbovia.fr)	25
Figure 14: Détail de construction d'un mur en « Sirewall » (source : sirewall.com)	25
Figure 15 : Construction en Béton damé par Peter Zumthor (source : archdaily.com)	26
Figure 16 : compactage pneumatique d'un mur en pisé (source : Birznieks, 2013)	27
Figure 17 : Recommandations pour le compactage d'éléments en terre damé suite aux tests réalisés en laboratoire. (Source : Taghiloha Ladan, 2013)	28
Figure 18: Banc d'essai utilisé pour l'étude du cisaillement (source : Bui, 2015)	29
Figure 19 : Déplacement vertical en fonction de la charge appliquée en compression (source : Bui, 2015)	30
Figure 20 : Fissuration des murs tests sous compression (source : Bui, 2015)	30
Figure 21 : Déplacement des capteurs en fonction de la charge appliquée en cisaillement (source : Bui, 2015)	31
Figure 22: Fissures dans le mur test subissant un cisaillement (source : Bui, 2015)	31
Figure 23 : Evolution du nombre d'unités de productions de granulats recyclés (source : copro.eu)	33

Figure 24 : Répartition sur le territoire Belge des unités de production de granulats recyclés (source : copro.eu)	34
Figure 25 : Typologie des granulats produits (source : copro.eu)	34
Figure 26 : Tamis utilisés lors de l'étude de granulométrie	35
Figures 27: Pycnomètres utilisés lors de l'étude de l'absorption d'eau des granulats	36
Figures 28: Séchage des granulats et vérification de la qualité du séchage	37
Figure 29: Typologie des éléments retrouvés par caractérisation visuelle	38
Figures 30: Dame et éprouvettes utilisées lors du compactage des blocs	40
Figure 31: Presse et moule utilisés pour la confection des briques	40
Figure 32 : Eprouvettes cubiques réalisées	41
Figure 33: Eprouvettes cylindriques utilisées pour l'étude de l'absorption d'eau des mélanges	42
Figure 34 : Tests de compression réalisés sur les éprouvettes cubiques	43
Figure 35: appareillage pour le test thermique	44
Figure 36: appareillage pour le test d'érosion	46
Figure 37: Courbe granulométrique	49
Figure 38 : Densités en fonction de la teneur en eau du mélange à 1 jour et 28 jours de cure.	53
Figure 39: Densités en fonction de la teneur en ciment du mélange à 1 jour et 28 jours de cure	53
Figure 40: Absorption d'eau des éprouvettes en fonction de leur densité et de la quantité de ciment.	55
Figure 41: Résistance en compression en fonction de la quantité de ciment et la quantité d'eau dans le mélange.	56
Figure 42: Résistance en compression en fonction de la densité des éprouvettes	57
Figure 43: Résistance en compression en fonction de la durée de la cure	59
Figures 44: Mise en place avant le test d'érosion	61
Figures 45: Réalisation du test d'érosion et résultat	61
Figure 46 : Eprouvettes en chambre humide durant les périodes de non-test	62
Figures 47 : Eprouvettes en phase de dégel et de gel	62
Figure 48: Réalisation de murs en terre damée avec un compactage pneumatique (source : architectureterrebois.fr)	63

7. Liste des tableaux

Tableau 1 : Consommation énergétique pour différents types de constructions (source : Morel, 2001)	11
Tableau 2 : Normes mondiales pour l'étude de la terre damée. (Source : Narloch & Woyciechowski, 2020).....	14
Tableau 3 : Propriétés mécaniques de la terre damée associée à différents stabilisants (source : Meek et al., 2021).....	16
Tableau 4 : Comparaison des propriétés mécaniques de la terre damée avec une variation de sa composition (source : Anysz & Narloch, 2019).....	16
Tableau 5 : Comparaison de la résistance en compression simple pour différentes compositions de béton damé (source : Long Makara, 2021)	17
Tableau 6: Comparaison de la résistance thermique en fonction de la taille de l'échantillon de pisé (source : Bui Quoc-Bao, 2008)	19
Tableau 7 : Composition des éprouvettes test de l'étude de Narloch (source : Narloch & Woyciechowski, 2020).....	22
Tableau 8 : Profondeur d'atteinte de l'érosion lors des tests de Narloch (source : Narloch & Woyciechowski, 2020).....	23
Tableau 9 : : Sommaire des résultats des tests de durabilité (Source : Narloch & Woyciechowski, 2020).....	24
Tableau 10 : Résumé des différentes formulations étudiées pour optimiser le mélange (% des composants sur la masse totale du mélange)	39
Tableau 11: Critères d'érodabilité	46
Tableau 12: analyse granulométrique des granulats recyclés	48
Tableau 13: Absorption d'eau et densité des granulats recyclés	50
Tableau 14: Présentation des constituants de granulats recyclés	51
Tableau 15: répartition des éléments composants le matériau	52
Tableau 16: Moyennes des densités à 1 jour et 28 jours en fonction de la composition du mélange.....	52
Tableau 17: Moyenne des absorptions d'eau des éprouvettes en fonction de la formulation choisie.	55
Tableau 18: Résistance en compression en fonction de la composition du mélange (E1 : éprouvette 1, E2 : éprouvette 2, E3 : éprouvette 3)	56
Tableau 19: Moyenne des densités à 1 jour et à 28 jours pour le mélange optimisé	58
Tableau 20: Résistance en compression pour le mélange optimisé en fonction du nombre de jours de cure (E1 : éprouvette 1, E2 : éprouvette 2, E3 : éprouvette 3)	58
Tableau 21: Densité moyenne et résistance en compression des briques en béton damé (Wiomont, 2022).....	60

8. Bibliographies

- Anysz, H., & Narloch, P. (2019). Designing the composition of cement stabilized rammed earth using artificial neural networks. *Materials*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/ma12091396>
- Arrigoni, A., Beckett, C. T. S., Ciano, D., Pelosato, R., Dotelli, G., & Grillet, A. C. (2018). Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.025>
- Arrigoni, A., Simoni, G., Dotelli, G., Pelosato, R., & Caruso, M. (2019). Rammed Earth stabilised with waste materials: A sustainable and resistant solution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012019>
- Birznies Lauris. (2013). *Designing and building with compressed earth*.
- Bui Quoc-Bao. (2008). *Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques*.
- Bui, T. T. (2015). *Behavior of rammed earth walls undercompression or shear stress*.
- Ciano, D. (Daniela), & Beckett, C. (Christopher). (2013). *Rammed earth construction : cutting-edge research on traditional and modern rammed earth*.
- Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. In *Acta Geotechnica* (Vol. 12, Issue 3, pp. 463–478). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- Hall, M., & Allinson, D. (2008). Assessing the moisture-content-dependent parameters of stabilised earth materials using the cyclic-response admittance method. *Energy and Buildings*, 40(11), 2044–2051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.009>
- Kabir, S., Al-Shayeb, A., & Khan, I. M. (2016). Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. *Procedia Engineering*, 145, 1518–1525. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.191>
- Kazemi, M., & Courard, L. (2021). Modelling hygrothermal conditions of unsaturated substrate and drainage layers for the thermal resistance assessment of green roof: Effect of coarse recycled materials. *Energy and Buildings*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111315>
- Laneyrie Cléo. (2014). *Valorisation des déchets de chantiers du BTP :comportement à haute température des béton desgranulats recyclés*.
- Long Makara. (2021). *Rammed Concrete with Recycled Fine Aggregates*. <https://lib.uliege.behttps://matheo.uliege.be>
- Meek, A. H., Beckett, C. T. S., & Elchalakani, M. (2020). Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent. *Construction and Building Materials*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120629>
- Meek, A. H., Elchalakani, M., Beckett, C. T. S., & Dong, M. (2021). Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: A study of mechanical properties, flexure and bond strength. *Construction and Building Materials*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122303>

- Minke, G. (2006). *Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture*.
- Morel, J. C., Mesbah, A., Oggero, M., & Walker, P. (2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. In *Building and Environment* (Vol. 36). www.elsevier.com/locate/buildenv
- Narloch, P., & Woyciechowski, P. (2020). Assessing cement stabilized rammed earth durability in a humid continental climate. *Buildings*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/buildings10020026>
- New Zealand, S. (1998). *NZS 4298: Materials and workmanship for earth buildings*.
- Siyimane Mohaine. (2018). *Etude des propriétés thermiques et mécaniques des bétons isolants structurels incorporant des cénoosphères*.
- Taghiloha Ladan. (2013). *Rammed earth mixed with recycled aggregate as a construction material*.
- Traoré, L. B., Ouellet-Plamondon, C., Fabbri, A., McGregor, F., & Rojat, F. (2021). Experimental assessment of freezing-thawing resistance of rammed earth buildings. *Construction and Building Materials*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121917>
- Vyncke, J., & Vrijders, J. (2010). *Recycling of C&D Waste in Belgium: State-of-the-Art and Opportunities for Technology Transfer*. <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>

9. Annexes

Annexe 1 : Méthode traditionnelle de fabrication d'un mur en pisé (Taghiloha Ladan, 2013)









Annexe 2 : Analyse granulométrique de l'échantillon 1 de granulats recyclés

Annexe 3 : Analyse granulométrique de l'échantillon 2 de granulats recyclés

Annexe 4 : Mesure des densités pour les différentes formulations testées

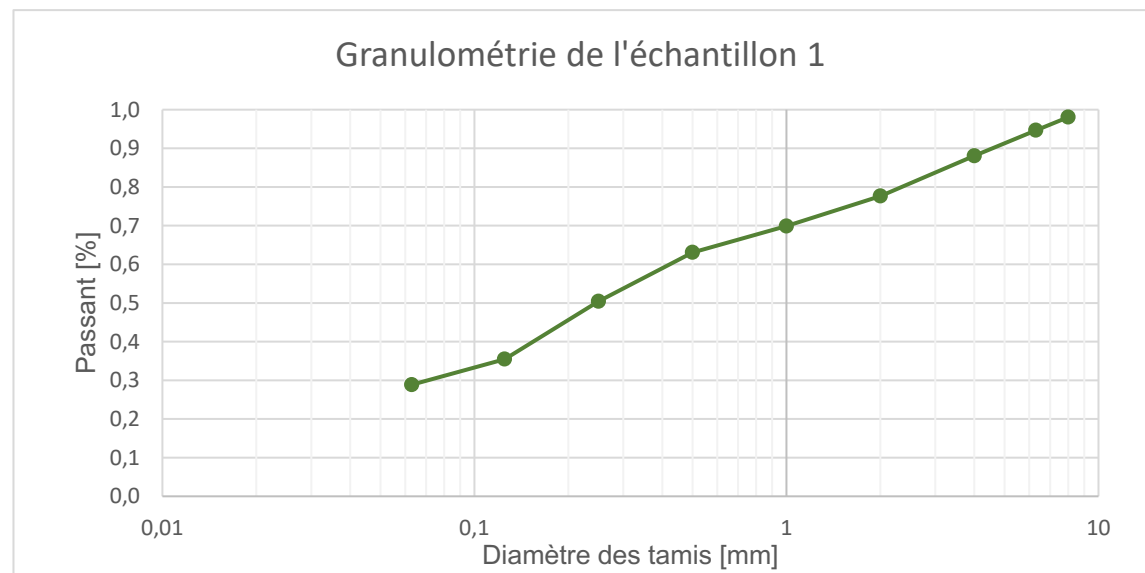
Annexe 5 : Mesure des densités pour la formulation optimisée

Annexe 6 : Absorption d'eau pour les différentes formulations testées

<p>1.Saving the soil</p>  <p>Mesh 1.5 x 1.5 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aerate the soil • Remove lumps, stones and pebbles 	<p>5.Pouring the soil in the form</p>  <ul style="list-style-type: none"> • The soil present must be loosened and slightly humid • Pour layers of only 12 cm thickness
<p>2.Measuiring the components</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Measure all components(soli ,sand, stabilizer) • Fill the containers with accuracy, as per specifications 	<p>6.Checking the layer thickness</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Before ramming, use a layer gauge (Φ6mm MS rod) to check the thickness of the loose soil • Leave evenly the layer (add or remove some soil)
<p>3.Mixing the components</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Pour in order ,soil, sand and stabilizer • First mix dry,2 times • Add water and mix wet,2 times 	<p>7.Ramming</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Ram first on the sides of the panels, and then in the center • Ram the loose soil till you hear a clear sharp sound
<p>4.Setting up the form</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Check with the plumb line that panels are vertical 	<p>8.Removing the panels</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Immediately after finishing the ramming, dismantle the form and proceed further in the same way • Never keep a form in place over night

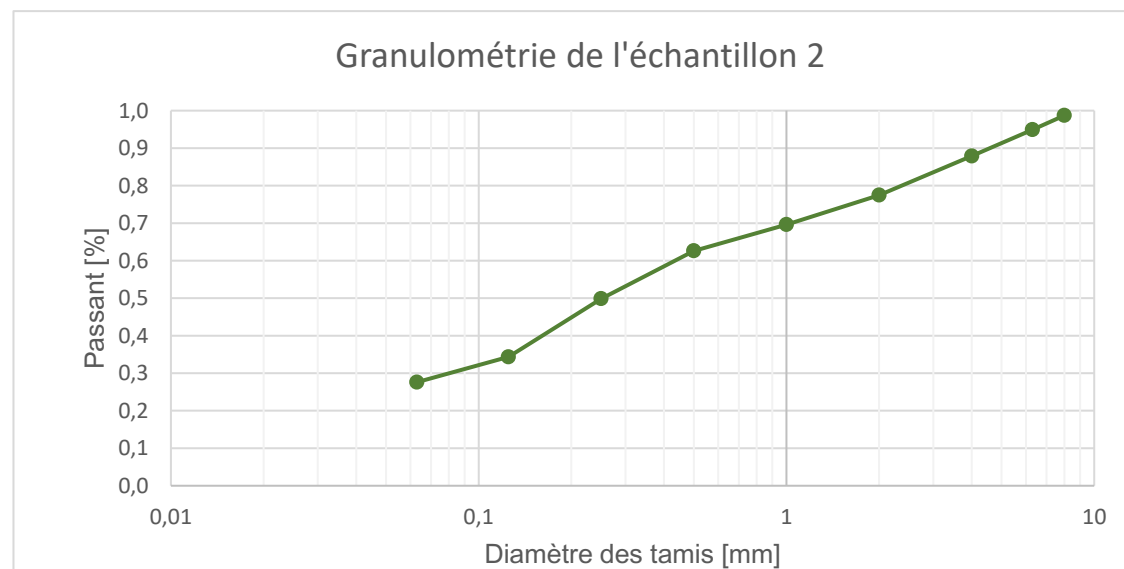
Annexe 2 : Analyse granulométrique de l'échantillon 1 de granulats recyclés

Diamètre des tamis	Masse des refus	Pourcentage des refus	Masse des particules fines (Mi-1 - Mrefus)	Pourcentage cumulé ((Mi-1 - Mrefus)/Mtotale)
mm	g	%	g	%
8	20	2%	1009	0,981
6,3	35	3%	974	0,947
4	68	7%	906	0,880
2	107	10%	799	0,776
1	80	8%	719	0,699
0,5	70	7%	649	0,631
0,25	130	13%	519	0,504
0,125	154	15%	365	0,355
0,063	68	7%	297	0,289
0,001	20	2%	277	0,269
Fond	277	27%	0	0,000
Total	1029	100%		



Annexe 3 : Analyse granulométrique de l'échantillon 2 de granulats recyclés

Diamètre des tamis	Moyenne des refus	Pourcentage des refus	Masse des particules fines (Mi-1 - Mrefus)	Pourcentage cumulé ((Mi-1 - Mrefus)/Mtotale)
mm	g	%	g	%
8	14	1,3%	1069	0,987
6,3	41	3,8%	1028	0,949
4	76	7,0%	952	0,879
2	113	10.4%	839	0,775
1	85	7.8%	754	0,696
0,5	76	7%	678	0,626
0,25	138	12.7%	540	0,499
0,125	168	15.5%	372	0,343
0,063	73	6.7%	299	0,276
0,001	43	4%	256	0,236
fond	256	23.6%	0	0,000
Total	1083	100%		



Annexe 4 : Mesure des densités pour les différentes formulations testées

Densités											
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Volume	Masse (1 jour)	Densité (1 jour)	Masse (28 jours)	Densité (28 jours)
	%	kg/m3	%	kg/m3	%	kg/m3	m³	Kg	Kg/m³	Kg	Kg/m³
Eprouvette CS 28 jrs 1	78,4	1490	6,9	130	14,7	279	0,003375	6,692	1982,81	6,852	2030,22
Eprouvette CS 28 jrs 2								6,807	2016,89	6,936	2055,11
Eprouvette CS 28 jrs 3								6,734	1995,26	6,876	2037,33
Eprouvette CS 28 jrs 1	77,7	1476	7,8	148	14,6	277		6,556	1942,52	6,701	1985,48
Eprouvette CS 28 jrs 2								6,488	1922,37	6,680	1979,26
Eprouvette CS 28 jrs 3								6,668	1975,70	6,728	1993,48
Eprouvette CS 28 jrs 1	80	1520	10	190	10	190		5,8	1718,52	5,980	1771,85
Eprouvette CS 28 jrs 2								5,797	1717,63	6,002	1778,37
Eprouvette CS 28 jrs 3								5,644	1672,30	5,841	1730,67
Eprouvette CS 90 jrs 1								5,944	1761,19	6,164	1826,37
Eprouvette CS 90 jrs 2								5,967	1768,00	6,132	1816,89
Eprouvette CS 90 jrs 3								5,899	1747,85	6,113	1811,26
Eprouvette CS 28 jrs 1	78,4	1490	9,8	186	11,8	224		6,622	1962,07	6,826	2022,52
Eprouvette CS 28 jrs 2								6,143	1820,15	6,451	1911,41
Eprouvette CS 28 jrs 3								6,77	2005,93	6,900	2044,44
Eprouvette CS 28 jrs	76,2	1448	9,5	181	14,3	271		6,414	1900,44	6,500	1925,93
Eprouvette CS 28 jrs 1	75,5	1434	9,4	179	15,1	287		6,564	1944,89	6,758	2002,37
Eprouvette CS 28 jrs 2								6,52	1931,85	6,721	1991,41
Eprouvette CS 28 jrs 3								6,569	1946,37	6,789	2011,56

Annexe 5 : Mesure des densités pour la formulation optimisée

Densité											
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		Volume	Masse (1 jour)	Densité (1 jour)	Masse (28 jours)	Densité (28 jours)
	%	kg/m3	%	kg/m3	%	kg/m3	m ³	Kg	Kg/m ³	Kg	Kg/m ³
Eprouvette CS 1jr 1	80	1520	8	152	12	228	0,003375	5,959	1765,63	6,139	1819
Eprouvette CS 1jr 2								5,959	1765,63	6,048	1792
Eprouvette CS 1jr 3								6,103	1808,30	6,200	1837
Eprouvette CS 7jrs 1								6,036	1788,44	6,170	1828
Eprouvette CS 7jrs 2								5,982	1772,44	6,139	1819
Eprouvette CS 7jrs 3								6,089	1804,15	6,230	1846
Eprouvette CS 28 jrs 1								6,335	1877,04	6,396	1895
Eprouvette CS 28 jrs 2								5,91	1751,11	6,048	1792
Eprouvette CS 28 jrs 3								6,018	1783,11	6,122	1814
Eprouvette CS 90 jrs 1								6,328	1874,96	6,416	1901
Eprouvette CS 90 jrs 2								6,047	1791,70	6,217	1842
Eprouvette CS 90 jrs 3								6,38	1890,37	6,521	1932
Eprouvette gel/dégel 1								6,334	1876,74	6,433	1906
Eprouvette gel/dégel 2								5,968	1768,30	6,076	1800
Eprouvette gel/dégel 3								5,967	1768,00	6,067	1798

Annexe 6 : Absorption d'eau pour les différentes formulations testées

Absorption d'eau											
	Quantité Granulats		Quantité ciment		Quantité eau		1ère pesée saturée	2ème pesée saturée	Masse après séchage	Volume	Absorption d'eau
	%	kg/m3	%	kg/m3	%	kg/m3	kg	kg	kg	m3	%
Eprouvette 1	78,4	1490	6,9	130	14,7	279	2,29	2,292	1,995	0,0011	14,89
Eprouvette 2							2,301	2,301	1,966	0,0011	17,04
Eprouvette 3							2,283	2,284	1,948	0,0011	17,25
Eprouvette 1	77,7	1476	7,8	148	14,6	277	2,24	2,242	1,909	0,0011	17,44
Eprouvette 2							2,244	2,246	1,912	0,0011	17,47
Eprouvette 3							2,282	2,283	1,953	0,0011	16,90
Eprouvette 1	80	1520	10	190	10	190	2,097	2,099	1,787	0,0011	17,44
Eprouvette 2							2,133	2,135	1,799	0,0011	18,67
Eprouvette 3							2,153	2,154	1,846	0,0011	16,70
Eprouvette 1	78,4	1490	9,8	186	11,8	224	2,272	2,274	1,964	0,0011	15,78
Eprouvette 2							2,317	2,318	2,018	0,0011	14,87
Eprouvette 3							2,297	2,297	2,01	0,0011	14,28
Eprouvette 1	76,2	1448	9,5	181	14,3	271	2,291	2,292	1,952	0,0011	17,43
Brique 1							0,602	0,603	0,504	0,0003	19,58
Brique 2							0,614	0,615	0,516	0,0003	19,26
Eprouvette 1	75,5	1434	9,4	179	15,1	287	2,234	2,234	1,873	0,0011	19,27
Eprouvette 2							2,266	2,266	1,92	0,0011	18,02