

Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés

Auteur : Wiomont, François

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

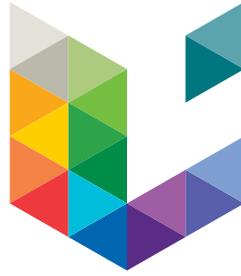
Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14340>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès restreint sur le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Par conséquent, seule une utilisation à des fins strictement privées, d'enseignement ou de recherche scientifique est autorisée conformément aux exceptions légales définies aux articles XI. 189 et XI. 190. du Code de droit économique. Toute autre forme d'exploitation (utilisation commerciale, diffusion sur le réseau Internet, reproduction à des fins publicitaires, ...) sans l'autorisation préalable de l'auteur est strictement interdite et constitutive de contrefaçon.



Université de Liège
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés

*Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
de master en Ingénieur Civil des Constructions*

Auteur
WIOMONT François

Promoteur
COURARD Luc

Membres du jury
ATTIA Shady
HUBERT Julien
MIHAYLOV Boyan
VAN BENNEKOM Henri

Année académique 2021-2022

Abstract

This work focuses on the study of the behavior of compressed bricks produced from recycled fine aggregates.

The construction sector is responsible for 38% of the global CO_2 emissions. The production of waste by the sector is defined as the largest source of waste by volume in Europe (1/3 of the EU waste stream). 850 [Mt] of construction and demolition waste was recorded in the European Union in 2014. There is a need to valorize what was called "waste" into a resource. The recovery of construction and demolition waste tends to reduce the environmental impact of the construction sector and limits the use of natural raw materials.

The objective of this work is to reproduce the methods of compressed earth bricks in order to design compressed bricks produced from recycled fine aggregates. On the one hand, the recycled fine aggregates were characterized by a series of tests. On the other hand, the bricks produced from recycled fine aggregates were subjected to mechanical performance and durability tests. The compressed bricks will be compared to existing building materials.

The results show that unwashed recycled fine aggregates cannot be incorporated into conventional concrete according to European standards. Nevertheless, no contra-indication is formulated for their use in compressed bricks.

The mechanical performance of compressed bricks produced from recycled fine aggregates is comparable to conventional masonry blocks of low strength. For a quantity higher than 8 % of cement, the compressive strengths of recycled bricks are in the order of 5 [Mpa].

However, the bricks have a high water absorption by immersion (in the range of 15.6 to 21.5 %). Compressed bricks also have low abrasion resistance. This abrasion resistance does not validate the minimum standards applied to compressed earth bricks.

Finally, compressed bricks produced from recycled fine aggregates remain a material of the future. The results obtained during the tests are encouraging. Compressed bricks deserve further study before they can be used in construction.

Keywords : recycled aggregates, compressed earth brick, construction and demolition waste.

Résumé

Ce travail s'axe sur l'étude du comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés.

Le secteur de la construction est responsable de 38% des émissions globales de CO_2 . La production de déchets par le secteur est définie comme la plus grande source de déchets en volume d'Europe (1/3 du flux de déchets en Union européenne). 850 [Mt] de déchets de construction et de démolition ont été enregistrés en Union européenne en 2014. Il est nécessaire de valoriser ce qui était appelé des "déchets" en une ressource. La valorisation des déchets de construction et de démolition tend à réduire l'impact environnemental du secteur de la construction et limite l'utilisation des matières premières naturelles.

L'objectif de ce travail est de reproduire les méthodes des briques de terre comprimée afin de concevoir des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. D'une part, les granulats fins recyclés ont été caractérisés par une série d'essais. D'autre part, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ont été soumises à des essais de performances mécaniques et de durabilité. Les briques comprimées seront comparées aux matériaux de construction existants.

Il en ressort que les granulats fins recyclés non-lavés ne peuvent être incorporés dans un béton classique selon les standards européens. Néanmoins, aucune contre-indication n'est formulée quant à leur utilisation en briques comprimées.

Les performances mécaniques des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés sont comparables aux blocs de maçonnerie classique de faible résistance. Pour une quantité supérieure à 8% de ciment, les résistances en compression des briques recyclées sont de l'ordre de 5 [Mpa].

Cependant, les briques ont une forte absorption d'eau par immersion (de l'ordre de 15,6 à 21,5%). Les briques comprimées ont aussi une faible résistance à l'abrasion. Cette résistance à l'abrasion ne valide pas les standards minimums appliqués aux briques de terre comprimée.

Finalement, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés restent un matériau d'avenir. Les résultats obtenus lors des essais sont encourageants. Les briques comprimées mériteraient une étude plus approfondie avant de pouvoir être utilisées en construction.

Mots clés : granulats recyclés, brique de terre comprimée, déchets de construction et de démolition.

Lexique

BTCs : "briques de terre comprimée"

BTC : "brique de terre comprimée"

Remerciements

Par ces quelques mots, je souhaite remercier les différentes personnes qui m'ont épaulé durant ce travail.

Tout d'abord, ce travail a été rendu possible grâce à mon promoteur, le Professeur Luc Courard qui a soutenu et dirigé mon travail.

Ensuite, je remercie tout le corps académique ayant participé à l'élaboration de ce travail. Je remercierai plus particulièrement M. Julien Hubert pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son aide dans l'élaboration de mon travail de fin d'études.

Merci aussi à l'ensemble du personnel technique : Amaury Daras et Lucille Hennaut, sans qui la plupart des essais n'auraient pas été envisageables.

Je remercie Clément et Matteo pour les moments passés en leur compagnie durant la partie expérimentale de ce travail.

Finalement, je tiens à remercier plus particulièrement mes amis et ma famille. Merci à eux de m'avoir soutenu et encouragé. Merci pour leur présence durant mes 5 années d'études. Tout simplement, merci pour tout.

François W.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | État de l'art | 5 |
| 2.1 | Blocs de maçonnerie | 5 |
| 2.1.1 | Blocs de béton | 5 |
| 2.1.2 | Blocs de terre cuite alvéolés | 6 |
| 2.2 | Granulats recyclés | 7 |
| 2.2.1 | Contexte | 7 |
| 2.2.2 | Caractérisations | 7 |
| 2.2.3 | Utilisations | 9 |
| 2.2.4 | Transformation de déchets de construction et de démolition en granulats recyclés | 11 |
| 2.3 | La terre crue | 15 |
| 2.3.1 | L'architecture en terre | 15 |
| 2.3.2 | Avantages de la terre crue | 16 |
| 2.3.3 | Limitations de la terre crue | 18 |
| 2.3.4 | Techniques utilisées et modes d'utilisation | 19 |
| 2.3.5 | Brique de terre comprimée stabilisée | 22 |
| 2.4 | Blocs de béton recyclé pressés | 33 |
| 2.4.1 | Fabrication | 33 |
| 2.4.2 | Matériaux | 33 |
| 2.4.3 | Propriétés des blocs | 34 |
| 2.4.4 | Application | 38 |
| 3 | Méthodologie | 39 |
| 3.1 | Introduction | 39 |
| 3.2 | Caractérisations des matériaux | 39 |
| 3.2.1 | Caractérisation des granulats fins recyclés | 39 |
| 3.2.2 | Eau | 45 |
| 3.2.3 | Ciment | 45 |
| 3.3 | Fabrication des briques | 45 |
| 3.3.1 | Mélanges de béton utilisés | 45 |
| 3.3.2 | Préparation des mélanges de béton | 46 |
| 3.3.3 | Teneur en eau optimale | 46 |
| 3.3.4 | Presse manuelle | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.5 | Cure des briques | 49 |
| 3.4 | Caractérisations des briques | 49 |
| 3.4.1 | Détermination de la masse volumique | 49 |
| 3.4.2 | Essais de compression | 50 |
| 3.4.3 | Essai de flexion : éprouvettes 4*4*16[cm] | 52 |
| 3.4.4 | Essai de chute | 53 |
| 3.4.5 | Test d'abrasion | 55 |
| 3.4.6 | Absorption d'eau sur éprouvettes cubiques | 56 |
| 3.4.7 | Absorption d'eau par capillarité | 57 |
| 4 | Résultats et discussions | 59 |
| 4.1 | Caractérisations des granulats fins recyclés | 59 |
| 4.1.1 | Analyse granulométrique | 59 |
| 4.1.2 | Densité et absorption | 61 |
| 4.1.3 | Essai d'inspection visuelle | 62 |
| 4.1.4 | Résumé des analyses | 64 |
| 4.2 | Caractérisations des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés | 65 |
| 4.2.1 | Processus de fabrication des briques | 65 |
| 4.2.2 | Masse volumique | 67 |
| 4.2.3 | Résistance en compression | 72 |
| 4.2.4 | Tests de chute | 77 |
| 4.2.5 | Résistance en traction | 78 |
| 4.2.6 | Absorption d'eau par immersion | 79 |
| 4.2.7 | Absorption d'eau par capillarité | 82 |
| 4.2.8 | Test d'abrasion | 83 |
| 5 | Conclusion | 85 |
| | Bibliographie | 91 |
| | Annexe A | 92 |
| | Annexe B | 93 |
| | Annexe C | 96 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Émissions globales de CO_2 et consommations d'énergie par secteur [1] . . . | 1 |
| 1.2 | Déchets de démolition [5] | 3 |
| 2.1 | Bloc de béton plein et bloc de béton creux [8] | 6 |
| 2.2 | Bloc de terre cuite alvéolé [9] | 6 |
| 2.3 | Site de production d'agrégats wallon | 7 |
| 2.4 | Composition des granulats recyclés de maçonnerie et des débris d'enrobés hydrocarbonés [10] | 8 |
| 2.5 | Comparaison de granulats recyclés et non-recyclés [11] | 9 |
| 2.6 | Empierrement de granulats recyclés [10] | 10 |
| 2.7 | Fondation de voirie grâce aux granulats recyclés [10] | 10 |
| 2.8 | Transformation de déchets de construction en granulats recyclés [18] | 11 |
| 2.9 | Circularité : immeuble ZIN à Bruxelles [19] | 12 |
| 2.10 | Murs en béton damé recyclé du PotIngé [12] | 13 |
| 2.11 | Mélanges de béton utilisés par Makara Long [12] | 14 |
| 2.12 | Maison de 3 étages en terre crue [21] | 15 |
| 2.13 | Énergie grise des différents matériaux de construction [25] | 16 |
| 2.14 | Température intérieure et extérieure d'une maison fabriquée en terre crue [26] | 17 |
| 2.15 | Mur réalisé en terre crue [27] | 18 |
| 2.16 | Résistances en compression caractéristiques de la terre crue, du béton et des briques de maçonnerie [25] | 19 |
| 2.17 | Résistances en tension caractéristiques de la terre crue, du béton et des briques de maçonnerie [25] | 19 |
| 2.18 | Presse hydraulique et presse manuelle [30] [31] | 20 |
| 2.19 | Méthodes d'utilisation de la terre dans les constructions [32] | 21 |
| 2.20 | Maison construite en BTC stabilisée à hauteur de 5% de ciment [33] . . . | 22 |
| 2.21 | Terre utilisable pour la construction de bloc comprimé [34] | 23 |
| 2.22 | Squelette d'une brique en terre crue comprimée [25] | 23 |
| 2.23 | Courbes granulométriques idéales pour un bloc de terre comprimé stabilisé [36] | 24 |
| 2.24 | Relation entre la densité et la résistance à la compression d'une BTC stabilisée [36] | 26 |
| 2.25 | Courbe de Proctor [20] | 26 |
| 2.26 | Critères de résistance minimale d'une BTC [42] | 27 |
| 2.27 | Absorption d'eau d'une BTC stabilisée [43] | 28 |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|------|--|----|
| 2.28 | Durabilité d'un bloc de terre crue stabilisée au ciment [28] | 28 |
| 2.29 | Composition des échantillons de terre crue stabilisée [28] | 29 |
| 2.30 | Tests d'abrasion à la brosse de fer sur des BTCs stabilisées [44] | 29 |
| 2.31 | Énergie grise des BTCs stabilisées [46] | 30 |
| 2.32 | Comparaison des émissions de $C0_2$ des matériaux de construction [47] | 31 |
| 2.33 | Comparaison des caractéristiques d'un bloc en terre crue aux matériaux de construction [34] | 32 |
| 2.34 | Blocs de béton recyclé [6] | 33 |
| 2.35 | Granulats fins recyclés produits à partir de déchets de brique et de béton [6] | 34 |
| 2.36 | Résultats des résistances en compression pour des échantillons en fonction de leur teneur en granulats fins recyclés [6] | 35 |
| 2.37 | Résultats des résistances en flexion pour des échantillons en fonction de leur teneur en granulats fins recyclés [6] | 35 |
| 2.38 | Absorption des blocs en fonction de leur teneur en granulats recyclés [48] | 36 |
| 2.39 | Émissions de $C0_2$ en fonction des mélanges [52] | 37 |
| 2.40 | Comparaison de blocs creux traditionnels et recyclés [6] | 37 |
| 2.41 | Gravats suite à un tremblement de terre à Haïti [53] | 38 |
| | | |
| 3.1 | Colonne de tamis sur la plateforme vibrante | 41 |
| 3.2 | Nature des éléments selon la norme NBN 12620 [57] | 42 |
| 3.3 | Division des différentes natures d'éléments [54] | 42 |
| 3.4 | Pycnomètre utilisé [55] | 43 |
| 3.5 | Pycnomètre rempli dans un bain d'eau [55] | 43 |
| 3.6 | Séchage des granulats grâce à un léger courant d'air chaud [55] | 44 |
| 3.7 | État de surface sèche [55] | 44 |
| 3.8 | Exemples d'état de surface sèche [58] | 45 |
| 3.9 | Test de teneur optimale en eau [29] | 47 |
| 3.10 | Presse manuelle TERSTARAM [30] | 48 |
| 3.11 | Dimension de la brique : vue en plan | 48 |
| 3.12 | Dimension de la brique : vue en coupe longitudinale | 49 |
| 3.13 | Bloc de mortier normalisé | 50 |
| 3.14 | Brique dont l'encoche est remplie de mortier normalisé | 50 |
| 3.15 | Essai de compression sur un cube de 65 [mm] | 51 |
| 3.16 | Essai de compression sur "deux demi-briques empilées" | 52 |
| 3.17 | Essai de compression sur "deux demi-briques empilées" | 52 |
| 3.18 | Essai de flexion 3 points [42] | 53 |
| 3.19 | Test de chute d'une brique de type "drop test"[29] | 54 |
| 3.20 | Test de chute d'une brique sur site (hauteur de chute : 1 [m]) [64] | 55 |
| 3.21 | Test d'abrasion [34] | 55 |
| 3.22 | Type de brosse d'abrasion : vue de profil[34] | 56 |
| 3.23 | Absorption d'eau réalisée sur des éprouvettes cubiques | 57 |
| 3.24 | Test d'absorption capillaire[34] | 58 |
| | | |
| 4.1 | Comparaison de courbes granulométriques | 60 |
| 4.2 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques de briques | 69 |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|------|---|-----|
| 4.3 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques des briques | 71 |
| 4.4 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques sèches | 72 |
| 4.5 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les résultats des tests de compression | 75 |
| 4.6 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les résultats des tests de compression | 76 |
| 4.7 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les résultats d'absorption d'eau par immersion | 81 |
| 4.8 | Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les résultats d'absorption d'eau par immersion | 82 |
| 4.9 | Absorption capillaire des briques R-VIII | 83 |
| | | |
| 5.1 | Déchets de construction et de démolition en Europe [2] | 92 |
| 5.2 | Normes des constructions en terre [32] | 93 |
| 5.3 | Résistances en compression d'échantillons de terre crue stabilisée[37] | 94 |
| 5.4 | Produits préfabriqués existants sur le marché[32] | 95 |
| 5.5 | Mélanges à faible énergie grise de béton recyclé [52] | 95 |
| 5.6 | Description des éléments de l'inspection visuelle [54] | 98 |
| 5.7 | Quantité des composants du mélange R-C-IV | 100 |
| 5.8 | Mélange R-C-IV | 100 |
| 5.9 | Brique comprimée réalisée avec le mélange R-C-IV | 101 |
| 5.10 | Quantité des composants du mélange R-C-V | 102 |
| 5.11 | Mélange R-C-V | 102 |
| 5.12 | Brique comprimée réalisée avec le mélange R-C-V | 103 |
| 5.13 | Quantité des composants du mélange R-E-VI | 104 |
| 5.14 | Mélange R-E-VI | 104 |
| 5.15 | Brique comprimée réalisée avec le mélange R-E-VI | 105 |
| 5.16 | Essai de teneur en eau optimale du mélange R-E-VI | 105 |
| 5.17 | Quantité des composants du mélange R-E-VII | 106 |
| 5.18 | Mélange R-E-VII | 107 |
| 5.19 | Brique comprimée réalisée avec le mélange R-E-VII | 108 |
| 5.20 | Essai de teneur en eau optimale du mélange R-E-VII | 108 |
| 5.21 | Mélange R-VIII | 109 |
| 5.22 | Brique comprimée réalisée avec le mélange R-VIII | 110 |
| 5.23 | Essai de teneur en eau optimale du mélange R-VIII | 110 |
| 5.24 | Essai de teneur en eau optimale du mélange R-VIII | 110 |
| 5.25 | Résultat de test de chute d'une brique de type REF-I | 114 |
| 5.26 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-II | 114 |
| 5.27 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-III | 115 |
| 5.28 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-IV | 115 |
| 5.29 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-V | 115 |
| 5.30 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-E-VI | 116 |
| 5.31 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-E-VII | 116 |
| 5.32 | Résultat de test de chute d'une brique de type R-VIII | 116 |

TABLE DES FIGURES

5.33 Résultat du test d'abrasion sur la brique R-VIII-12 120

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Comparaison des blocs de béton et des blocs de terre cuite alvéolés [7] . . . | 5 |
| 2.2 | Composition des granulats mixtes et des granulats de béton de la norme NBN EN 15-001 | 8 |
| 2.3 | Proportion des différents constituants de la terre [35] | 24 |
| 3.1 | Tamis utilisés pour l'essai granulométrique | 40 |
| 3.2 | Mélanges utilisés | 46 |
| 4.1 | Résultat d'analyse granulométrique des granulats fins recyclés | 59 |
| 4.2 | Détermination de la densité et de l'absorption d'eau des granulats fins recyclés [55] | 61 |
| 4.3 | Résultats d'inspection visuelle des granulats fins recyclés [54] | 63 |
| 4.4 | Résultats des essais de teneur en eau optimale | 65 |
| 4.5 | Synthèse des masses volumiques des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés | 68 |
| 4.6 | Étude de l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques . . | 69 |
| 4.7 | Étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques | 70 |
| 4.8 | Etude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques sèches . | 71 |
| 4.9 | Synthèse des résistances en compression des briques | 73 |
| 4.10 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests de compression | 74 |
| 4.11 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests de compression | 76 |
| 4.12 | Synthèse des résultats des tests de chute | 77 |
| 4.13 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests de chute | 78 |
| 4.14 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests de chute | 78 |
| 4.15 | Résumé des essais de flexion sur les briques de type R-VIII | 79 |
| 4.16 | Synthèse des résultats d'absorption d'eau par immersion | 80 |
| 4.17 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests d'absorption d'eau par immersion | 80 |
| 4.18 | Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests d'absorption d'eau par immersion | 81 |
| 4.19 | Résultats des tests d'abrasion | 83 |
| 5.1 | Analyse granulométrique des granulats fins recyclés | 97 |
| 5.2 | Résultats de l'essai d'inspection visuelle des différents échantillons [54] . . . | 99 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.3 | Masses volumiques des briques comprimées réalisées | 112 |
| 5.4 | Masses volumiques des briques comprimées réalisées de type R-VIII | 113 |
| 5.5 | Masses volumiques sèches des briques R-VIII | 114 |
| 5.6 | Résultats obtenus des essais d'absorption d'eau par immersion | 117 |
| 5.7 | Résultats d'absorption d'eau par immersion de la brique R-VIII-7 | 118 |
| 5.8 | Masses des briques R-VIII lors de l'essai d'absorption capillaire | 119 |

Chapitre 1

Introduction

Le secteur de la construction est responsable de 38% des émissions globales de CO_2 et de 35% de l'énergie mondiale consommée en 2019. Comme présenté à la FIGURE 1.1, l'industrie de la construction des bâtiments (manufactures des matériaux, transports ...) représente à elle seule 10% des émissions mondiales. De plus, les émissions directes et indirectes de CO_2 des bâtiments résidentiels ou non-résidentiels pèsent pour 28% des émissions.

Les émissions de CO_2 liées au secteur de la construction ne cessent d'augmenter depuis 2010. L'augmentation continue des rejets de CO_2 est en partie due au fait que les zones d'essor du secteur de la construction sont dépendantes des énergies fossiles. [1] Enfin, la majorité de la consommation d'énergie (22%) provient des constructions résidentielles (FIGURE 1.1).

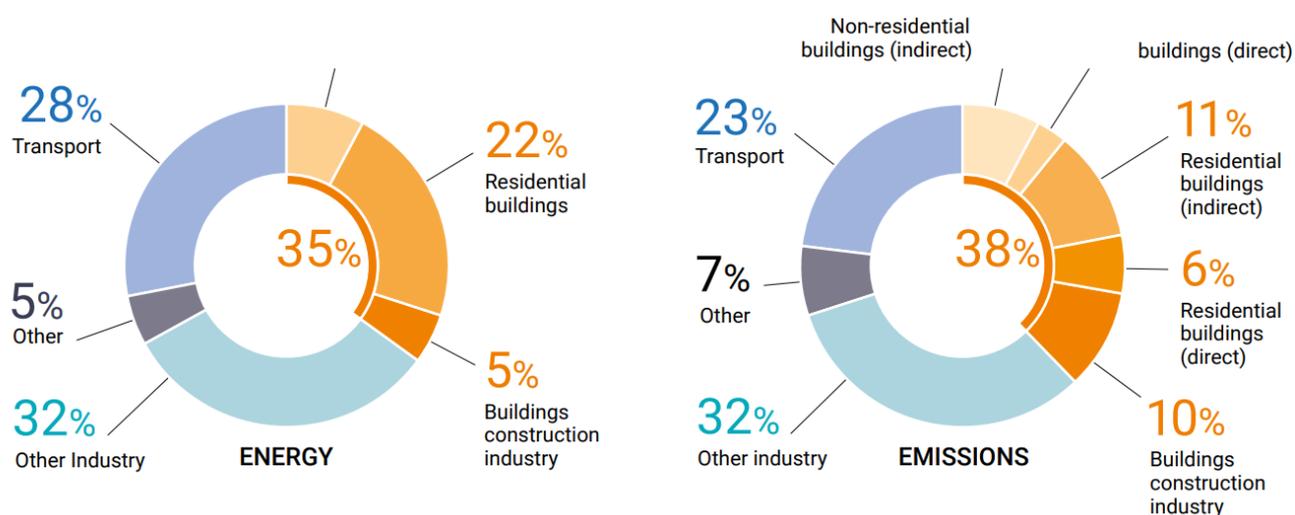


FIGURE 1.1 – Émissions globales de CO_2 et consommations d'énergie par secteur [1]

De plus, le domaine de la construction engendre énormément de déchets en Union européenne. La production de déchets par le secteur est définie comme étant la plus grande source de déchets en volume d'Europe (1/3 du flux de déchets en Union européenne). La

majeure partie de ces déchets de construction est considérée comme inerte (tels que le béton, les briques et les céramiques). Ces matériaux inertes peuvent être réutilisés après recyclage comme agrégats d'un béton. [2]

850 [Mt] de déchets issus du secteur de la construction ont été enregistrées en Union européenne en 2014. Cela correspond à 1.7 tonnes par an par habitant. A contrario, en 2015, la demande en granulat en Union européenne est de 2700 [Mt]. Il est évident qu'il faut encourager la valorisation des déchets de construction en matériaux utilisables. Afin d'accélérer cette transition, des mesures peuvent être mises en œuvre : taxer les sables et granulats non-recyclés, certifier la qualité des sables et granulats recyclés, la mise en place d'aides gouvernementales concernant l'utilisation de béton recyclé, etc. [2]

Les quantités de déchets annoncées par les différents pays de l'Union européenne doivent être analysées avec un certain regard critique. Les terres d'excavation et les pierres ne sont pas considérées de la même façon d'un pays à l'autre. Certains pays considèrent les terres d'excavation et les pierres comme des déchets de construction tandis que d'autres pays ne les considèrent pas comme tels.

En Belgique, les 3 régions (Bruxelles-Capitale, Flandre, Wallonie) ne sont pas coordonnées dans un cadre obligatoire. L'intégralité des chiffres annoncés ci-dessous se retrouve à la FIGURE 5.1 de l'annexe A.

A Bruxelles-Capitale, 480 000 tonnes de déchets de construction et démolition ont été produites.

En Flandre, les déchets de construction et de démolition sont de 15 [Mt] en 2014 (40% de béton non-armé, 12% d'asphalte, 40% de maçonnerie). En Wallonie, les déchets de construction et démolition produits en 2013 se situent entre 5 et 7 [Mt] (25% de béton non-armé, 13% de béton armé, 13% d'asphalte, 45% de résidu mixte). Sur tout le territoire, 22 [Mt] de déchets de construction et démolition sont générées chaque année. [2]

En 2019, 22 [Mt] de sable et agrégats recyclés ont été produites en Belgique (réparties sur 350 sites de production).[3] La partie nord de la Belgique est plus performante en termes de recyclage d'agrégats. En 2018, 15 [Mt] d'agrégats recyclés ont été produites en région flamande contre 4 [Mt] en Wallonie. [4] Ces chiffres peuvent s'expliquer par une présence plus importante du nombre de carrières en Wallonie. Une carrière est présente tous les 40 [km] en Wallonie, alors qu'en Flandre une carrière est présente tous les 70 [km]. [2]



FIGURE 1.2 – Déchets de démolition [5]

Intérêts de l'utilisation des matériaux recyclés

La production de déchets de construction et de démolition est considérée comme le plus gros flux de déchets en Europe.[2] L'avancée de l'urbanisation et l'augmentation des catastrophes naturelles sont responsables de l'accroissement de la production de déchets de construction et de démolition à l'échelle mondiale. Il est nécessaire de valoriser ce qui était appelé des "déchets" en ressources. Les déchets de construction inertes (briques, céramiques, bétons, etc.) ont principalement servi dans les décennies passées de matériaux de remplissage et de soubassement.

La tendance du "upcycling" est la revalorisation d'un matériau en un objet de plus grande valeur. Il est temps de considérer les déchets de construction et de démolition comme de futurs composants d'un béton recyclé. A l'heure actuelle, la Chine a publié une norme nationale régissant l'utilisation des agrégats grossiers recyclés et de nombreuses publications existent sur l'utilisation de granulats fins recyclés. [6]

D'un autre côté, des méthodes ancestrales de construction comme celle de la terre crue s'inscrivent dans un cadre de conservation des ressources et de respect de l'environnement. Ces méthodes reviennent au goût du jour et sont réadaptées au monde d'aujourd'hui. En effet, plusieurs études traitent de l'incorporation des déchets de construction et de démolition aux méthodes de terre crue. C'est dans une optique de durabilité et de diminution de l'impact environnemental que le secteur de la construction doit s'inscrire.

Objectifs de recherche

L'objectif principal de recherche est de caractériser la résistance et la durabilité des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés non-lavés. Afin de réaliser ces briques, il faudra définir un mélange optimal de béton contenant une majeure partie

de granulats fins recyclés ainsi que de l'eau et du ciment. Ensuite, les briques seront obtenues en comprimant ce mélange à l'aide d'une presse manuelle. La méthode de production utilisée se rapproche fortement de celle des briques de terre comprimée (BTCs) stabilisées. Enfin, une comparaison sera faite entre les briques recyclées, les BTCs stabilisées et les matériaux traditionnels de construction. Cette comparaison aura pour objectif de déterminer l'intérêt qu'ont les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés.

Questions de recherche

L'objectif de recherche de ce travail de fin d'études est d'étudier le comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. Les questions de recherches liées au sujet sont :

- Les granulats fins recyclés non-lavés sont-ils adaptés à la fabrication de briques comprimées stabilisées ?
- Les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés non-lavés sont-elles comparables aux blocs de maçonnerie traditionnels ?
- Quel avenir a ce matériau dans le secteur de la construction ?

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Blocs de maçonnerie

Cette section présente les caractéristiques techniques des blocs de maçonnerie classiques. Parmi les blocs de maçonnerie, une distinction est faite entre les blocs porteurs et non-porteurs. Les blocs porteurs auront une fonction structurelle dans le bâtiment.

Une série de blocs de maçonnerie est disponible sur le marché. Les blocs disponibles sont : blocs de terre cuite, blocs silico-calcaire, blocs de béton, blocs de pierres naturelles, blocs de béton cellulaire, etc... Les normes européennes qui régissent les blocs de maçonnerie sont les normes NBN EN 771-1,2,...,6.

Cette section ne s'intéressera qu'aux blocs de béton et aux blocs de terre cuite. Un tableau comparatif des deux éléments figure à la TABLE 2.1.

| | Masse volumique apparente [kg/m ³] | Résistance à la compression moyenne [Mpa] | Résistance à l'adhérence au cisaillement [MPa] | Absorption capillaire |
|-------------------------------|--|---|--|----------------------------------|
| Blocs de béton | 1200-2200 | 5-25 | >0,15 | <8g/m ² s |
| Blocs de terre cuite alvéolés | +/- 1200 | 10-25 | / | 0.8<IW [kg/m ² min]<3 |

TABLE 2.1 – Comparaison des blocs de béton et des blocs de terre cuite alvéolés [7]

2.1.1 Blocs de béton

Les blocs de béton classiques sont triés en différentes catégories : leur type (plein ou creux visible à la FIGURE 2.1), leur largeur, leur application (mur apparent ou non-apparent), leur résistance et leur masse volumique.

Généralement, un bloc de béton est composé en masse de 87% de granulat, 7 % de ciment et 6% d'eau. La masse volumique apparente d'un bloc de béton varie entre 1200 et 2200 [kg/m²]. Celle-ci dépend principalement de la structure du bloc (plein ou creux)

et des caractéristiques du béton. La résistance moyenne d'un bloc de béton est comprise entre 5 et 25 [Mpa]. Les blocs de béton de résistance en compression de 8 [Mpa] sont courants. [7]

L'absorption capillaire des blocs de béton (application extérieure) doit être inférieure à 8 [g/m^2s]. [7] Cette absorption est réalisée sur la face exposée et est mesurée sur une période de 10 minutes selon la norme EN-772-11.



FIGURE 2.1 – Bloc de béton plein et bloc de béton creux [8]

2.1.2 Blocs de terre cuite alvéolés

Le bloc de terre cuite alvéolé est représenté à la FIGURE 2.2.

Un bloc de terre cuite est obtenu par cuisson de l'argile à des températures avoisinant les 1000 ° Celsius. La couleur rouge caractéristique des blocs est due à l'oxydation des minerais de fer présents dans l'argile. La masse volumique apparente d'un bloc en terre cuite est comparable à celle d'un bloc de béton creux. Sa résistance en compression moyenne se situe entre 10 [Mpa] et 25 [Mpa].

L'absorption capillaire d'un élément en terre cuite est définie par absorption d'eau de leur face de pose sur une période de 1 minute. La valeur obtenue d'absorption capillaire définira le choix du mortier de pose. [7]

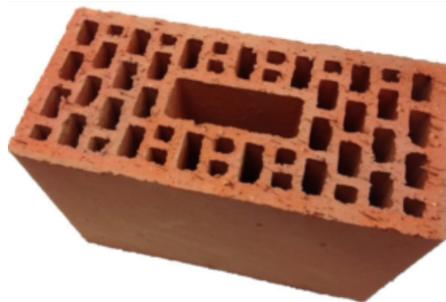


FIGURE 2.2 – Bloc de terre cuite alvéolé [9]

2.2 Granulats recyclés

2.2.1 Contexte

La valorisation des déchets de construction vient d'une volonté de réduction générale de l'impact du secteur de la construction sur l'environnement. De plus en plus de normes et méthodes sont développées afin de valoriser les déchets de construction en matériaux utilisables.

Depuis le 1er janvier 2006, tous les déchets de construction et de démolition non-dangereux doivent être recyclés. Depuis cette date, la mise en enfouissement des déchets de construction et de démolition est interdite. [10]

Un site d'extraction de granulats wallon est visible à la FIGURE 2.3 . L'extraction de granulats naturels va se faire par détonations d'explosifs sur une paroi rocheuse. Il est évident que la production de granulats naturels a un coût énergétique élevé et provoque énormément de nuisances à l'environnement. De plus, les détonations d'explosifs se font toutes les 2 semaines en moyenne sur ce genre de site. Elles peuvent donc engendrer des nuisances aux riverains (sonores et vibratoires). Les pouvoirs publics sont de plus en plus réticents à accorder des permis d'exploitation pour la création de nouvelles carrières.



FIGURE 2.3 – Site de production d'agrégats wallon

Dès lors, il est indispensable de privilégier le recyclage des déchets de construction en agrégats recyclés plutôt que la production d'agrégats naturels. A l'heure actuelle, 30 % des granulats produits en Belgique sont des granulats recyclés.[2]

2.2.2 Caractérisations

Les compositions des granulats recyclés de béton, de débris mixtes, de maçonnerie, de débris d'enrobés hydrocarbonés sont données par les normes NBN EN 15-001 et NBN EN 13242 à la FIGURE 2.4 et au TABLEAU 2.2.

| Norme NBN 15-001 | | |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Constituants | Granulats mixtes de type B+ | Granulats de béton de type A+ |
| | Pourcentage en masse requis [%] | Pourcentage en masse requis [%] |
| Rc | ≥ 50 | ≥ 90 |
| Ru | / | |
| Rcu | ≥ 70 | ≥ 95 |
| Rb | ≤ 30 | |
| Ra | ≤ 5 | ≤ 1 |
| XRg | ≤ 2 | $\leq 0,5$ |
| FL | ≤ 2 | ≤ 2 |

TABLE 2.2 – Composition des granulats mixtes et des granulats de béton de la norme NBN EN 15-001

| Composition (NBN EN 13242 + A1) | Granulats de débris de maçonnerie | | Granulats de débris d'enrobés hydrocarbonés | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---|-------------------|
| | Teneur [%] | Catégorie | Teneur [%] | Catégorie |
| Rc | non requis | Rc_{NR} | non requis | Rc_{NR} |
| Rc + Ru + Rg | < 50 | $Rcug_{Déclarée}$ | < 50 | $Rcug_{Déclarée}$ |
| Rb | > 50 | $Rb_{Déclarée}$ | ≤ 10 | Rb_{10-} |
| Ra | ≤ 5 | Ra_{5-} | ≥ 50 | Ra_{50-} |
| Rg | ≤ 2 | Rg_{2-} | ≤ 2 | Rg_{2-} |
| X | ≤ 1 | X_{1-} | ≤ 1 | X_{1-} |
| FL | ≤ 5 | FL_{5-} | ≤ 5 | FL_{5-} |

FIGURE 2.4 – Composition des granulats recyclés de maçonnerie et des débris d'enrobés hydrocarbonés [10]

Les granulats mixtes de type B+ et les granulats de béton de type A+ sont destinés à être des composants d'un béton. Tandis que les granulats de débris de maçonnerie et de débris d'enrobés hydrocarbonés sont plutôt destinés à d'autres usages (remblais, etc...)

Les différents constituants sont donnés par la norme EN 12620 :

- Rc = béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton.
- Ru = granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques.
- Rb = éléments en argile cuite (ex. : briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant.
- Ra = matériaux bitumineux.
- Rg = verre.
- X = autres : matériaux cohérents, plastique, plâtre et divers (métaux, bois).
- FL = matériau flottant en volume.

Selon les standards européens, une distinction est faite entre deux types d'agrégats : les agrégats fins (le diamètre granulaire est inférieur à 4 [mm]) et les agrégats grossiers (le diamètre granulaire est supérieur à 4 [mm]). A la FIGURE 2.5 se trouvent des agrégats recyclés fins et grossiers. L'apparence visuelle d'un sable fin recyclé de béton sera plus grisâtre qu'un sable naturel.



FIGURE 2.5 – Comparaison de granulats recyclés et non-recyclés [11]

Les masses volumiques des granulats fins et grossiers sont de l'ordre de 1970 à 2140 [kg/m^3] et de 2120 à 2430 [kg/m^3] respectivement. La densité des granulats recyclés va dépendre de la composition des particules présentes. Une quantité importante de particules de céramique ou de particules de briques de terre cuite a tendance à diminuer la densité des granulats. [12]

De manière générale, les granulats recyclés auront une densité plus faible que les granulats non-recyclés et une plus forte absorption d'eau.[13]

Wonjun Park met en évidence la plus forte absorption d'eau des granulats recyclés. L'absorption des granulats naturels fins et grossiers est de 0.92 et 0.91 % respectivement. Tandis que l'absorption des granulats de béton recyclé fins et grossiers est de 5.17% et de 2.16% respectivement.[11] La plus forte absorption des granulats recyclés vient de la forme des particules recyclées et de leur nature. Dans le cas de fines de béton recyclé, une forte absorption granulaire peut être expliquée par une forte teneur en pâte de ciment et une plus grande porosité des particules contenues dans les fines recyclées.[14]

2.2.3 Utilisations

Les applications des agrégats recyclés vont dépendre des matériaux constituant les granulats et de leur niveau de raffinement. Les granulats peuvent être utilisés comme matériaux de masse :

- Sous fondation de bâtiment industriel

- Fondation de bâtiment
- Empierrement (FIGURE 2.6)
- Fondation d'une voirie (FIGURE 2.7)
- Matériaux Autocompactants Réexcavables (MAR)

[10]



FIGURE 2.6 – Empierrement de granulats recyclés [10]



FIGURE 2.7 – Fondation de voirie grâce aux granulats recyclés [10]

Néanmoins, dans les réutilisations ci-dessus, il ne s'agit que de remblais ou d'empierrement. Une des valorisations des granulats recyclés la plus intéressante est de valoriser ceux-ci comme des composants d'un béton. De ce fait, un travail de normalisation sur ces granulats doit être réalisé. Cette valorisation a pour effet de réduire l'énergie grise et l'impact environnemental d'un béton.

Le pourcentage de granulats recyclés va influencer sur la résistance finale d'un béton. A quantité égale d'eau et de ciment, un béton composé à 100% de granulats recyclés aura de moins bonnes performances.

En raison de leurs meilleures caractéristiques, les granulats grossiers recyclés s'intègrent plus facilement à une composition de béton classique. Pour les granulats recyclés de béton, les granulats grossiers de béton recyclé ont une fraction de fines ($<63 [\mu\text{m}]$) et une teneur en pâte de ciment plus faible que les granulats fins de béton recyclé. Les fines recyclées ($<63 [\mu\text{m}]$) de béton, en raison de leur forte absorption d'eau, sont moins évidentes à intégrer dans une composition de béton classique. De façon générale, la teneur en pâte de ciment augmente lorsque la fraction granulaire diminue. La teneur en pâte de

ciment influe sur les propriétés des agrégats car il s'agit d'un matériau poreux et de faible densité. [15]

Huseyin Yılma s'est intéressé aux évolutions de propriétés du béton liées à l'intégration de granulats fins recyclés. Il en ressort que pour une quantité de granulats fins recyclés inférieure à 20%, aucun changement significatif de résistance n'est remarqué. [16] Dans le travail de Z. Zhao, des essais de durabilité (absorption capillaire et carbonatation) ont été réalisés sur des bétons contenant une fraction de granulats fins recyclés. Il s'avère qu'une fraction de granulats fins recyclés inférieure à 30% n'affecte pas les résultats de durabilité. [17]

2.2.4 Transformation de déchets de construction et de démolition en granulats recyclés

La FIGURE 2.8 représente le processus de traitement de déchets de construction et de démolition en granulats recyclés.



FIGURE 2.8 – Transformation de déchets de construction en granulats recyclés [18]

Le processus de transformation des déchets de construction et de démolition en granulats est composé de différentes phases de broyages et de tris. Premièrement, les déchets de construction sont broyés dans un broyeur mécanique. Ensuite, ils sont concassés (par exemple à l'aide d'un broyeur à impact). Après, un tri manuel et magnétique est opéré afin d'enlever les impuretés et les métaux. Finalement, après un dernier passage dans un broyeur mécanique, les granulats sont triés en fonction de leurs diamètres.

Les fines ($<63 [\mu\text{m}]$) contenues dans les granulats recyclés des déchets de démolition peuvent être réduites par des processus de lavage des granulats. Les fines de granulats de déchets de démolition et de construction recyclés ont souvent un taux de sulfate trop élevé. Le taux de sulfate élevé est souvent dû à la présence de plâtre (composé de gypse :

CaSO₄ .2H₂O). La norme européenne EN-206 préconise 0.2% de sulfate soluble dans les agrégats recyclés.[18]

Exemple d'application des granulats recyclés : Immeuble ZIN

L'immeuble ZIN est un bâtiment bruxellois s'implantant sur un site déjà occupé par les tours WTC. L'objectif de la construction de l'immeuble est de diminuer au maximum l'empreinte écologique du nouveau bâtiment notamment en recyclant des déchets de démolition des tours WTC.

Le projet de l'immeuble ZIN est une première dans le BENELUX concernant les coulées de béton circulaire C2C (cradle to cradle)¹. L'idée du béton circulaire est de récupérer les gravats de démolition pour les recycler en granulats utilisables pour le nouveau projet de construction. 30 000 tonnes de gravats ont été récoltées et transformées (la transformation s'est faite par des entreprises en périphérie du bâtiment) en 3 500 tonnes de granulats A+. Ces granulats recyclés ont permis d'obtenir 30.000 tonnes de béton certifié C2C silver (contenant 30% de granulats recyclés). Le béton C2C est un béton respectueux de l'environnement et recyclable.[19] Le processus de réalisation du béton C2C silver est présenté à la FIGURE 2.9.

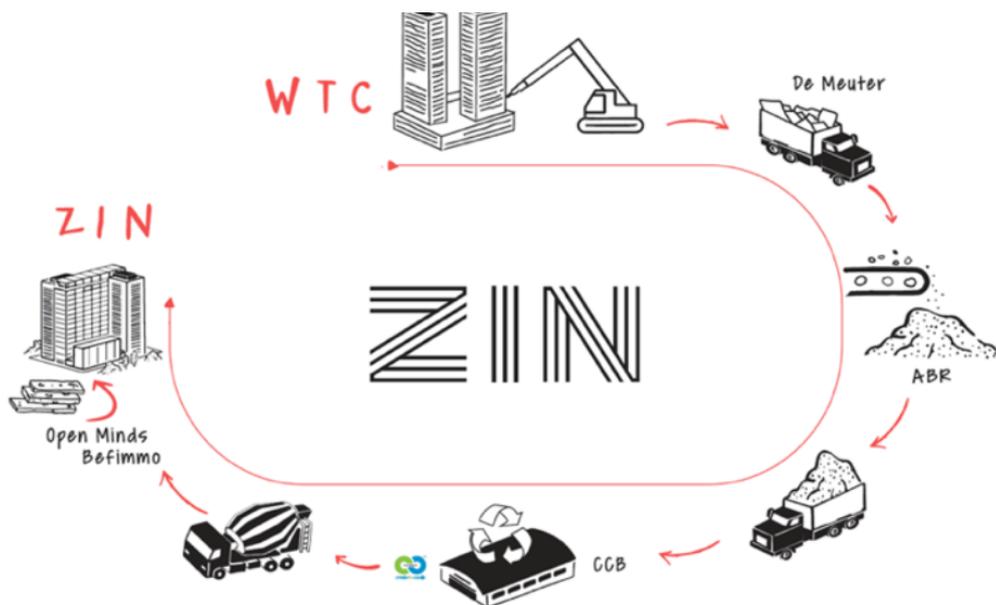


FIGURE 2.9 – Circularité : immeuble ZIN à Bruxelles [19]

Béton damé recyclé

Dans le cadre d'un travail de fin d'études, Makara Long a travaillé sur du béton damé recyclé. Le but de son travail était de rechercher une composition optimale de mélange afin de réaliser un mur en béton damé recyclé par la méthode du pisé² (visible à la FIGURE 2.10). Les granulats utilisés étaient des granulats fins recyclés (0/8 [mm]) de pré-scalpage non-lavés fournis par la société TRADECOWALL.

1. Littéralement "du berceau au berceau", concept d'éco-conception.

2. Voir SECTION 2.3.4.

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

La composition optimale est celle qui minimise l'énergie grise du béton et maximise la résistance en compression. L'objectif était de diminuer au maximum l'apport en eau et en ciment tout en conservant des performances intéressantes.



FIGURE 2.10 – Murs en béton damé recyclé du PotIngé [12]

3

Les différentes compositions de béton réalisées sont présentées à la FIGURE 2.11. La composition R5 est celle qui a été utilisée pour réaliser le mur de la FIGURE 2.10. Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de 15cm de côtés. Le béton est damé dans l'éprouvette à l'aide d'une dame en bois à bout métallique. La résistance

3. Le PotIngé est un potager communautaire de l'Uliège.

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

en compression de l'échantillon R5 atteint 6.81 [Mpa]. Cette résistance est supérieure à la résistance d'un bloc de béton de faible résistance (5 [Mpa]). Il n'est donc pas impensable d'envisager R5 comme un matériau de construction à part entière composé à 100 % de granulats fins recyclés.

| 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 |

FIGURE 2.11 – Mélanges de béton utilisés par Makara Long [12]

2.3 La terre crue

La construction en terre crue est une méthode ancestrale fortement utilisée et respectueuse de l'environnement. La construction en terre est durable en raison de son abondance, de sa recyclabilité et de sa faible énergie grise sur son cycle de vie.

Au cours des derniers siècles, un remplacement progressif de ce mode de construction traditionnel s'est fait au profit des modes de construction du XXe siècle (béton armé, acier,...). Néanmoins dans certaines régions du monde, la construction en terre crue reste très répandue. La terre présente de bonnes caractéristiques techniques et permet même de rendre l'atmosphère des maisons plus saine.[20]



FIGURE 2.12 – Maison de 3 étages en terre crue [21]

2.3.1 L'architecture en terre

C'est principalement dans les pays aux climats chauds et secs avec une quantité de bois limitée que se retrouve la majorité des constructions dont les murs porteurs sont en terre. Les murs en terre offrent à la fois de bonnes résistances mais aussi une bonne isolation contre la chaleur.[22]

Les premières maisons en terre connues se trouvent dans le sud-ouest de l'Asie. Elles auraient été construites en 6000 avant J.-C.[22]

Les premières illustrations de constructions en terre d'Egypte datent de 1500 avant J.-C. Lors des crues annuelles du Nil, les boues aux abords du fleuve deviennent molles et malléables. En période d'étiage, les abords du fleuve redeviennent secs et très durs. L'idée est de réaliser des briques avec cette boue molle et de les faire sécher au soleil afin de les rendre dures. Cette technique de brique séchée au soleil a été utilisée pour les voûtes du tombeau de Ramsès II en 1300 avant J.-C.[22]

En Chine, des sols riches en argile présentant d'excellentes caractéristiques en matière de construction sont largement présents. Une partie de la Grande Muraille de Chine a été construite en terre en 220 avant J.-C.[22]

Au cours des siècles passés, les méthodes de construction traditionnelles ont été remplacées au fur et à mesure par les méthodes de construction d'aujourd'hui. Malgré tout, un renouveau s'installe dans le monde de la construction s'inscrivant dans une démarche de valorisation des matériaux locaux.

En Europe, la crise de l'énergie de 1973 accélère le processus de transition vers des méthodes moins gourmandes en énergie.[23]

Actuellement, de nombreuses normes existent afin de codifier l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Comme le montre la FIGURE 5.2 de l'annexe B, la France, l'Australie, l'Allemagne, la Nouvelle-Zélande... possèdent leurs propres normes en matière de constructions en terre.

2.3.2 Avantages de la terre crue

Coût énergétique

L'avantage de la construction en terre crue est son faible coût carbone. L'avantage principal est que la matière première peut être trouvée sur site. Dans la plupart des cas, les constructions se font avec de la terre locale afin de réduire les coûts de transport. Selon G. Minke, la préparation, le transport et la manutention de terre crue sur place ne représentent que 1/100ème de l'énergie de la production, du transport et de la manutention de briques cuites ou du béton armé. De plus, arrivée en fin de cycle de vie, la construction en terre est facilement recyclée et pourra être réutilisée pour d'autres constructions. [24] [20]

Une classification de l'énergie grise de différents matériaux de construction a été réalisée par la "NIBE" (Netherlands Institute for Building Biology and Ecology) (visible à la FIGURE 2.13). Dès lors, la terre crue (stabilisée ou non au ciment) a une énergie grise nettement inférieure aux autres matériaux de construction. La terre crue stabilisée a une énergie grise comprise entre 0.14 et 0.42 [MJ/kg]. Tandis que le béton aura une énergie grise de 1-1.3 [MJ/kg] soit de 2 à 10 fois plus que celle de la terre crue stabilisée.

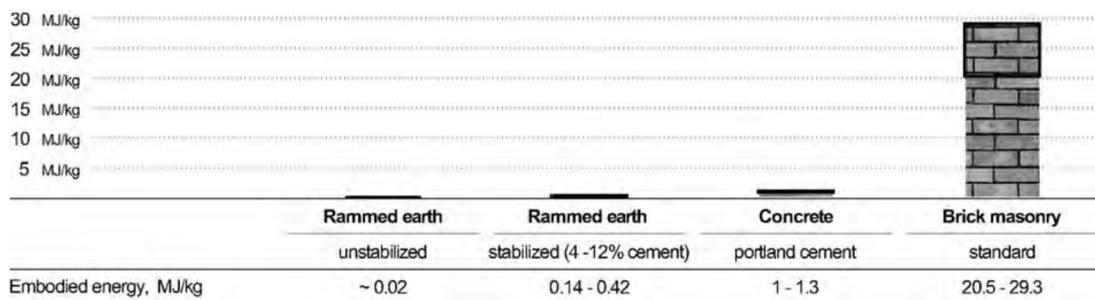


FIGURE 2.13 – Énergie grise des différents matériaux de construction [25]

Confort et isolation

Un mur en terre crue possède de bonnes capacités thermiques. L'inertie thermique d'un mur en terre permet de réguler la température intérieure d'une maison. Visible à la

FIGURE 2.14, la température d'une pièce intérieure d'une maison non chauffée dont les murs sont faits en terre crue ne varie que très peu⁴.

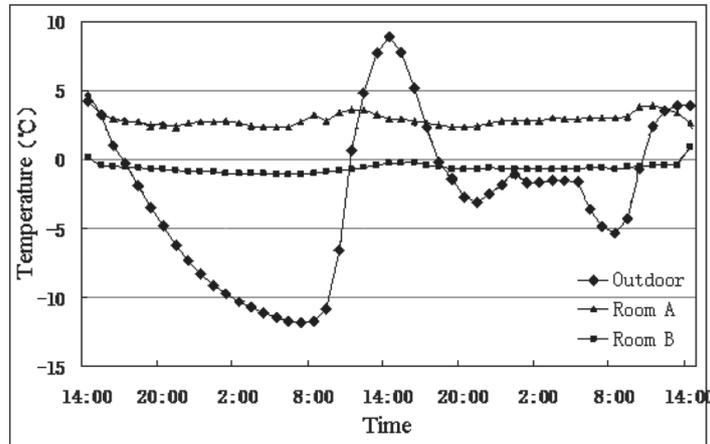


FIGURE 2.14 – Température intérieure et extérieure d'une maison fabriquée en terre crue [26]

Il est important dans une maison de conserver une humidité relative de l'air ambiant de 40 % à 70%. Les murs en terre crue ont d'excellentes capacités d'absorption et de désorption d'humidité de l'air ambiant. Dès lors, ils permettent de maintenir l'humidité d'une habitation de manière assez stable. [20]

Il a été prouvé scientifiquement que la terre crue permet d'absorber des polluants dans l'air et ainsi de contribuer à maintenir l'air ambiant sain. Néanmoins, très peu d'études existent à ce sujet. [20]

La terre crue présente aussi d'excellentes capacités acoustiques. Dense et poreuse, elle est idéale pour une application d'insonorisation dans un studio d'enregistrement ou une salle de concert. L. Birznieks mentionne aussi le fait que la terre crue posséderait d'excellentes caractéristiques en termes de réverbérations sonores. [25]

Esthétique

La terre peut prendre différentes couleurs en fonction de sa composition, de sa région ou même des pigments naturels ajoutés. A la FIGURE 2.15, un mur construit en terre de différentes teintes par la méthode du pisé⁵ est présenté. De par la méthode de construction et les différents coloris de terres utilisés, les résultats obtenus peuvent être très esthétiques.

4. Les températures mesurées sont celles d'une maison non chauffée en terre crue de la province de Shaanxi. La différence de température d'une pièce à l'autre dépend de son orientation par rapport au soleil et de sa disposition dans la maison. [26]

5. Définition à la SECTION 2.3.4.



FIGURE 2.15 – Mur réalisé en terre crue [27]

2.3.3 Limitations de la terre crue

La limitation principale de la terre crue est sa résistance en compression. Elle dépend de plusieurs paramètres :

- La nature du sol
- La façon dont la structure en terre crue a été réalisée
- La densité caractéristique de la terre
- L'indice de vide de la terre
- État de saturation durant le test de compression
- La force de compaction
- La durée de la cure et le type de cure
- ... [28]

Les différentes résistances caractéristiques en compression de la terre crue stabilisée ou non, du béton et des briques de maçonnerie sont présentées à la FIGURE 2.16. La résistance en compression de la terre crue non stabilisée est de l'ordre de 0.5 à 5 [Mpa], alors que la résistance en compression de la terre crue stabilisée⁶ est de l'ordre de 3 à 20 [Mpa]. De manière générale, la résistance en compression de la terre crue stabilisée/non-stabilisée sera moins bonne que le béton. Néanmoins, la résistance en compression de la terre crue stabilisée est comparable aux briques classiques de maçonnerie.

6. Voir SECTION 2.3.4.

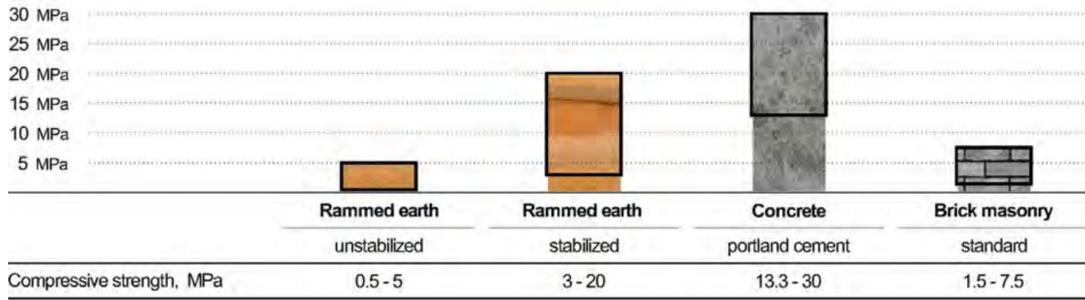


FIGURE 2.16 – Résistances en compression caractéristiques de la terre crue, du béton et des briques de maçonnerie [25]

A la FIGURE 2.17 sont présentées les différentes résistances caractéristiques en traction de la terre crue stabilisée ou non, du béton et des briques de maçonnerie. La résistance en traction de la terre crue stabilisée est de l'ordre de 0.3 à 2.6 [Mpa]. Cette résistance en traction est comparable à celle du béton (non armé).

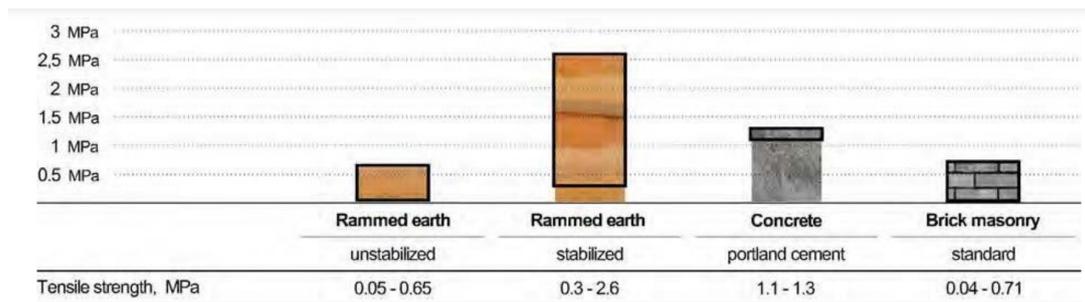


FIGURE 2.17 – Résistances en tension caractéristiques de la terre crue, du béton et des briques de maçonnerie [25]

Il est aisé de comparer le comportement de la terre crue à celui du béton. La terre crue aura de meilleures performances en compression plutôt qu'en traction.

Pour des constructions en terre crue non stabilisée, il est dès lors difficilement envisageable de construire un bâtiment de plus de 2 ou 3 étages en raison des caractéristiques de résistances mécaniques.[29]

2.3.4 Techniques utilisées et modes d'utilisation

Il existe de nombreuses façons de valoriser la terre en construction. Les 3 grands axes de valorisation présentés à la FIGURE 2.19 sont : la transformation en briques, l'utilisation de la terre dans une structure existante comme matériau de remplissage, la terre comme structure monolithique.

L'utilisation de la terre dans une structure existante va se caractériser par l'ajout de la terre comme matériau de remplissage ou comme enduit. La terre ici prendra principalement une fonction non-structurale du bâtiment.

Il est possible d'utiliser la terre comme structure porteuse unique. Plusieurs façons de procéder existent :

- découper directement des briques dans un bloc de terre
- verser de la terre dans un coffrage
- monter un mur en terre sans coffrage
- méthode du pisé

La méthode du pisé est une méthode de construction qui consiste à tasser de la terre par couches de 10 à 15 cm à l'aide d'une dame (pneumatique ou mécanique) dans un coffrage.

Les BTCs sont des briques de terre comprimée. Les BTCs sont obtenues par compression de la terre grâce à une presse manuelle ou hydraulique. A la FIGURE 2.18 se trouvent deux illustrations de presse hydraulique/automatique et manuelle.



FIGURE 2.18 – Presse hydraulique et presse manuelle [30] [31]

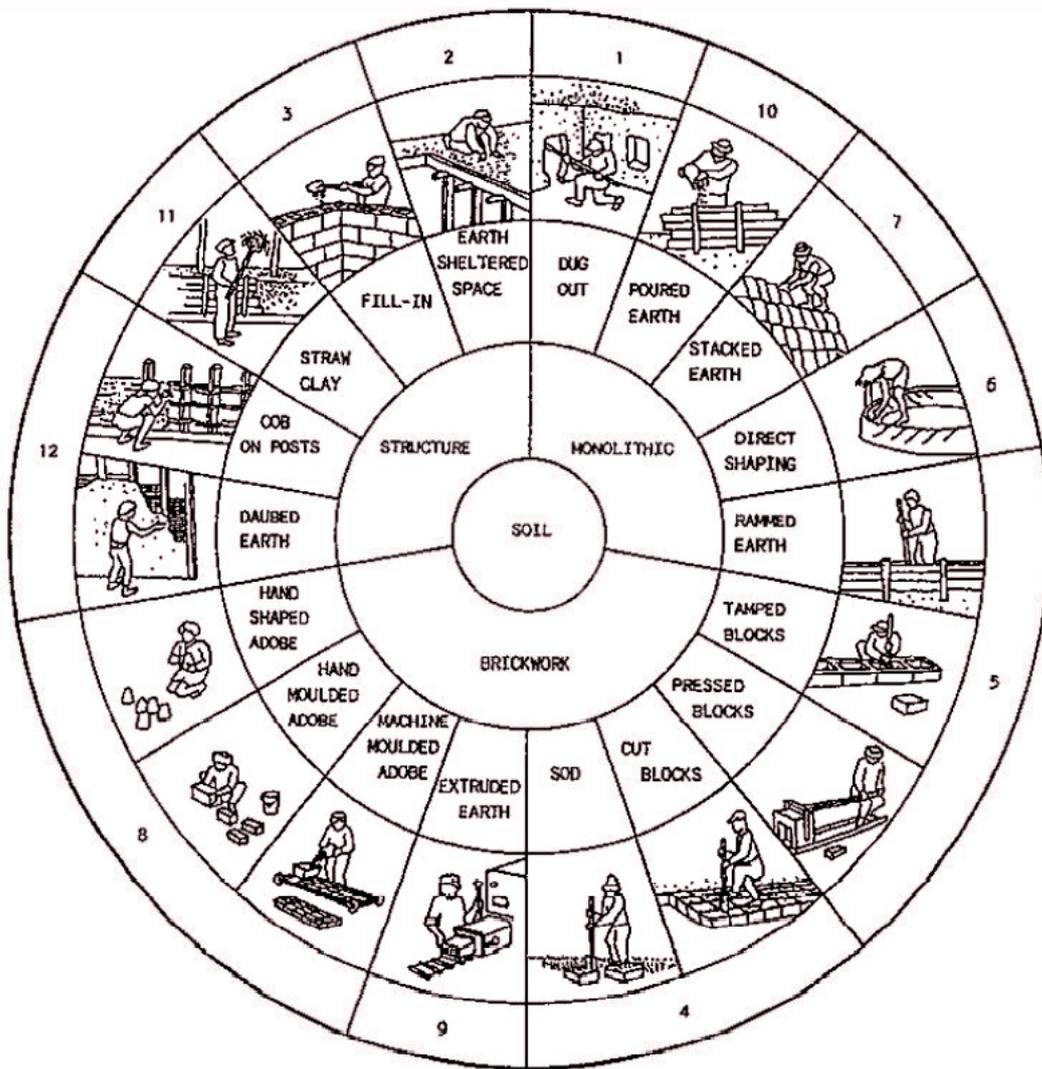


FIGURE 2.19 – Méthodes d'utilisation de la terre dans les constructions [32]

Un marché existe pour les produits préfabriqués en terre ou les mélanges normalisés de terre. L'avantage de ces produits est la normalisation de ceux-ci.

Il est dès lors possible d'envisager avec ce genre de produit, un usage et des marchés plus larges que ceux qu'offre l'auto-construction. G Guiffrida offre une liste (FIGURE 5.4 de l'annexe B) de toute une série de produits préfabriqués à base de terre :

- Panneau d'isolation en terre
- Une base de terre standardisée
- Des panneaux standardisés
- ...

[32].

2.3.5 Brique de terre comprimée stabilisée

La brique de terre comprimée (BTC) stabilisée est un élément de maçonnerie produit à base de terre et d'un liant comprimé à l'aide d'une presse manuelle ou hydraulique.

La BTC stabilisée est un excellent matériau de construction en raison de ses caractéristiques techniques et de sa durabilité. Comme pour les matériaux en terre, l'énergie grise et l'impact environnemental général sont très faibles.

Une maison finaliste des "world habitat awards 2001" est présentée à la FIGURE 2.20 . Ce Bâtiment a été construit grâce à des BTCs stabilisées au ciment (5% de ciment).



FIGURE 2.20 – Maison construite en BTC stabilisée à hauteur de 5% de ciment [33]

Classification du sol

A la FIGURE 2.21, trois zones de profondeur de sol différentes sont décrites. La terre provenant de la zone 2 et 3 sera utilisée pour réaliser les BTCs. En effet, dans la zone 1 trop de matières organiques sont présentes et risqueraient de nuire au comportement de la brique.

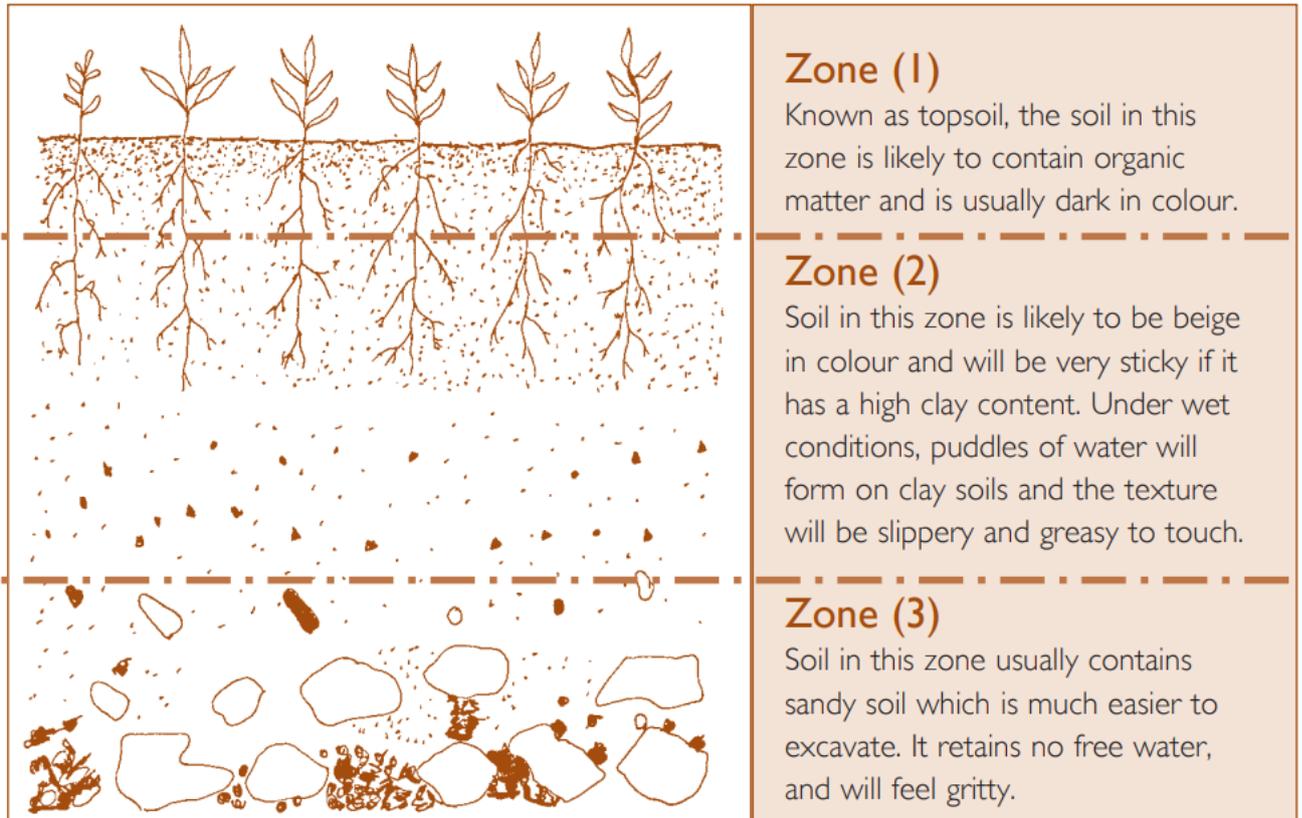


FIGURE 2.21 – Terre utilisable pour la construction de bloc comprimé [34]

La terre est constituée de particules grossières et fines. Les particules grossières sont de diamètres supérieurs à 0.08mm (gravier et sable). Les particules fines sont de diamètres inférieurs à 0.08mm (sable, argile et limon). Les particules grossières vont assurer une inertie et la base du squelette de la brique. Les matériaux fins quant à eux agissent comme un liant remplissant les vides du squelette (illustré à la FIGURE 2.22)[34].

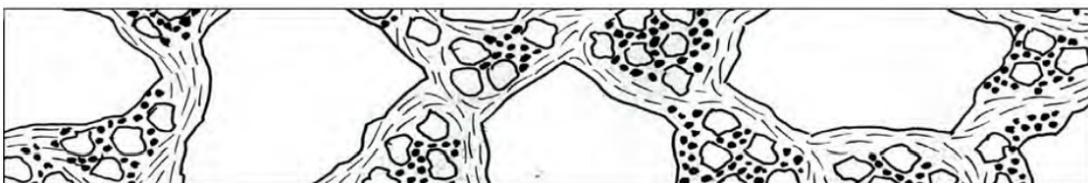


FIGURE 2.22 – Squelette d'une brique en terre crue comprimée [25]

Le sable (diamètre granulaire compris entre 2[mm] et 0.06[mm]), le limon (diamètre granulaire compris entre 0.06[mm] et 0.002[mm]) et l'argile (diamètre granulaire inférieur à 0.002 [mm]) sont les éléments constituant la terre. Une maximisation de la quantité de sable, de limon et d'argile doit être réalisée dans le but d'obtenir le meilleur squelette granulaire afin de garantir de meilleures performances. [34]

En général, les proportions des composants de la terre destinées à réaliser des BTCs sont reprises dans le TABLEAU 2.3.

| | Gravier [%] | Sable [%] | Limon [%] | Argile [%] |
|------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Proportion | 0-40 | 25-85 | 10-25 | 8-30 |

TABLE 2.3 – Proportion des différents constituants de la terre [35]

B. V. Venkatarama Reddy propose une série de compositions de briques en terre crue stabilisée (7% de ciment). La résistance en compression optimale est obtenue pour : 10.5% d'argile, 72.7% de limon, 16.8% de sable. De manière générale, un mélange contenant entre 10 et 16 % d'argile est optimal. A la FIGURE 2.23 sont présentées 2 courbes granulométriques idéales pour une brique de terre crue comprimée stabilisée. [24]

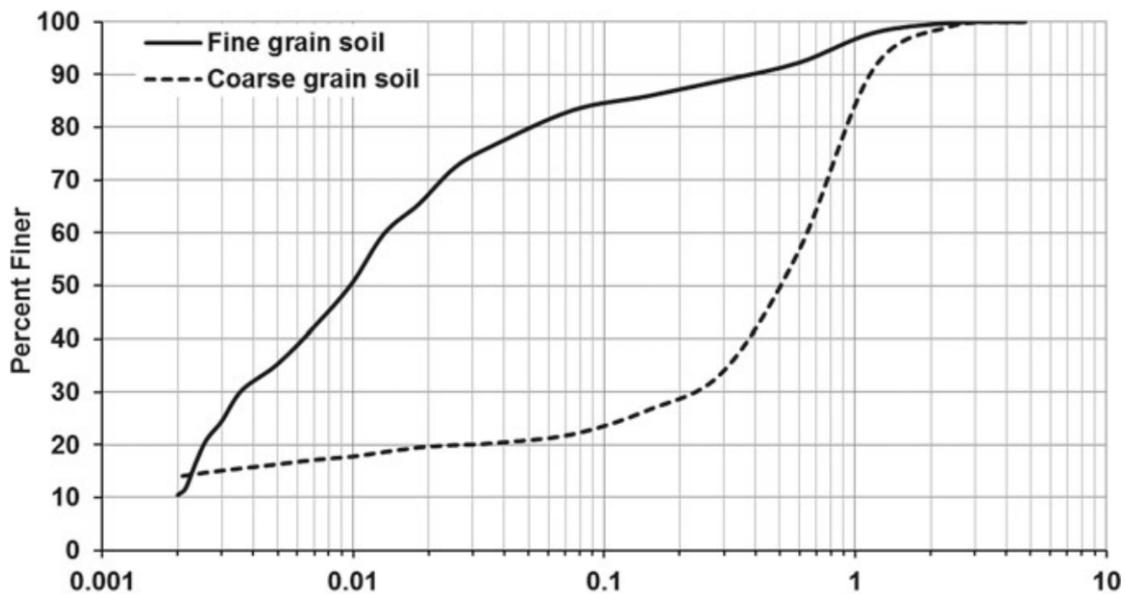


FIGURE 2.23 – Courbes granulométriques idéales pour un bloc de terre comprimée stabilisée [36]

Stabilisation

La stabilisation améliore les caractéristiques des briques. Entre autres, la durabilité et la résistance mécanique des BTCs stabilisées sont améliorées par la stabilisation. Les trois grands modes de stabilisation sont la stabilisation physique, mécanique et chimique.

La stabilisation physique s'obtient par la modification de la texture de la terre. Celle-ci peut se faire en optimisant la taille des particules ou en ajoutant des fibres. Les fibres ajoutées à la terre peuvent provenir de végétaux (fibres de gombo, pailles, etc.), d'origine synthétique (nylon, etc.) ou d'origine animale (cheveux, poils, etc.). Finalement, cette méthode de stabilisation aura pour effet de diminuer le retrait et d'améliorer la résistance en traction de la brique comprimée. [35]

La stabilisation mécanique vise à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure. L'objectif de cette méthode est de diminuer la porosité, augmenter la densité et la compressibilité. Finalement, cette méthode de stabilisation aura pour effet d'augmenter la résistance à l'érosion de la brique comprimée. [35]

La stabilisation chimique s'obtient par l'ajout d'agent chimique. L'ajout de liant hydraulique (chaux ou ciment) permet de fixer la matrice structurale de la terre par des réactions d'hydratation. [35]

— La stabilisation physique

La stabilisation physique est illustrée à la section précédente. Elle consiste à stabiliser le matériau en définissant une courbe granulométrique optimale.

Wojciech Rogala a réalisé une série d'échantillons de terre crue stabilisée visible à la FIGURE 5.3 de l'annexe B. La résistance finale ne dépendra pas seulement de la quantité de ciment mais aussi de la distribution granulométrique du mélange. C'est-à-dire que les pourcentages d'argile, de sable, de limon et de gravier auront une influence directe sur la résistance en compression. Pour les mélanges présentés à la FIGURE 5.3 de l'annexe B, les quantités de ciment variant de 6 à 9 %, les résistances en compression obtenues sont de 6.65 à 13.04 [Mpa]. [37]

— La stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est obtenue grâce à la compaction. La compaction permet d'augmenter la densité de la brique en réduisant les vides de la terre.

La densité d'une brique comprimée va dépendre de sa force de compaction. La norme ARS 670 donne les intensités de compaction suivantes : "très faible pression = 1 à 2 [N/mm²], faible pression = 2 à 4 [N/mm²], pression moyenne = 4 à 6 [N/mm²], haute pression = 6 à 10 [N/mm²], hyper pression = 10 à 20 [N/mm²], méga pression > 20 [N/mm² ". [38]

En général, la densité d'une brique de terre crue comprimée stabilisée est comprise entre 1800 et 2000 [kg/m³]. [39] Plus la compaction sera importante, plus la densité de la brique sera élevée. Le graphique de la FIGURE 2.24 représente la relation liant la densité à la résistance en compression. La résistance en compression d'un bloc en terre crue comprimée dépendra donc de l'intensité de compaction. La relation entre la densité et la résistance en compression d'une BTC stabilisée est pratiquement linéaire (visible à la FIGURE 2.24).

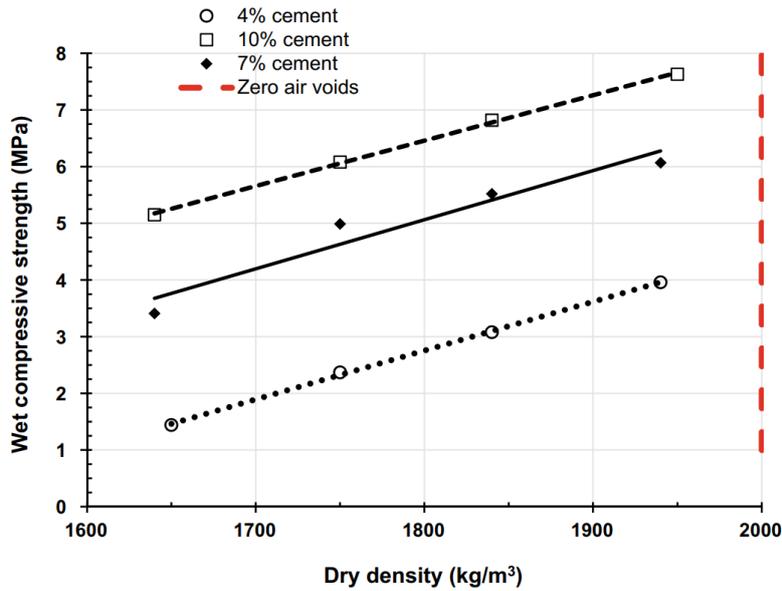


FIGURE 2.24 – Relation entre la densité et la résistance à la compression d’une BTC stabilisée [36]

La courbe de Proctor est définie à la FIGURE 2.25. Elle définit la quantité d’eau optimale afin de maximiser la densité d’une BTC. Cette courbe exprime la relation entre la quantité d’eau d’un mélange et sa densité sèche sous une certaine compaction. Dès lors, la quantité d’eau optimale d’une brique comprimée est celle qui maximise la densité sèche de celle-ci.

Jean-Claude Morel cite que la teneur optimale en eau d’une BTC est comprise entre 8 à 15%. [40]

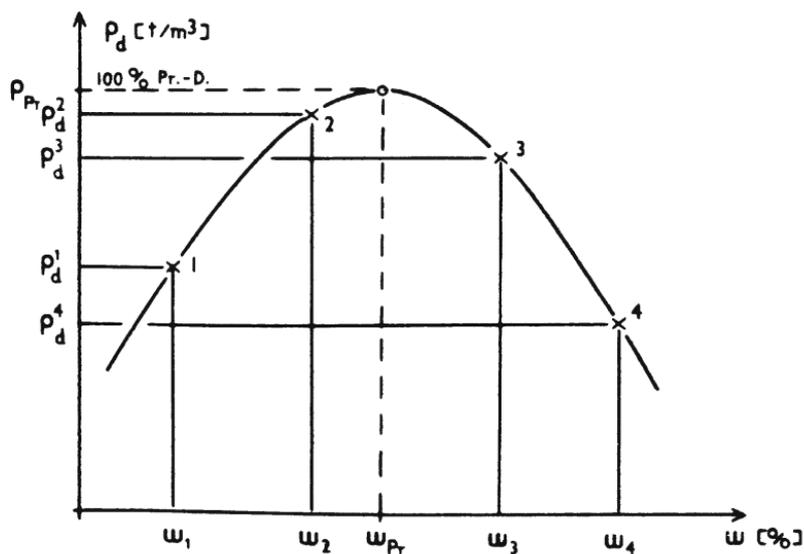


FIGURE 2.25 – Courbe de Proctor [20]

— La stabilisation chimique

Les liants les plus courants sont : le ciment et la chaux. La stabilisation au ciment apporte durabilité, résistance, augmente l'imperméabilité et réduit le retrait des BTCs. [34] La réaction d'hydratation à la base du durcissement du ciment Portland est :



Le choix du liant et la quantité de liant ajoutée dépendront du type de sol et de la résistance souhaitée. Pour un sol ayant une fraction argileuse très grande, il est préférable de stabiliser la terre à la chaux. Pour un sol ayant une fraction argileuse plus faible, il est préférable de stabiliser la terre au ciment.[36] [34]

En général, la quantité de ciment ajoutée se situe entre 3 et 18%. Néanmoins, la plupart des articles scientifiques s'accordent sur le fait que la quantité de ciment maximum optimale se situe entre 8 et 10%. [35]

Le graphique de la FIGURE 2.24 démontre que l'augmentation du pourcentage de ciment à densité égale favorise la résistance en compression de la BTC stabilisée. Une brique stabilisée au ciment atteint une résistance en compression de 4, 6 et 7.5 [Mpa] pour des pourcentages de ciment valant respectivement 4, 7 et 10 %. [36]

Des alternatives plus respectueuses de l'environnement peuvent être employées afin de stabiliser les briques. Ces stabilisants sont : les résidus de carbure de calcium, les cendres de balle de riz, etc. Des analyses de leurs performances de stabilisation sont proposées dans l'étude de Philbert Nshimiyimana. [41]

Critères de résistances en compression

Il existe de nombreuses normes qui régissent les BTCs stabilisées et non stabilisées. Ces normes définissent les résistances minimales des BTCs (visibles à la FIGURE 2.26).

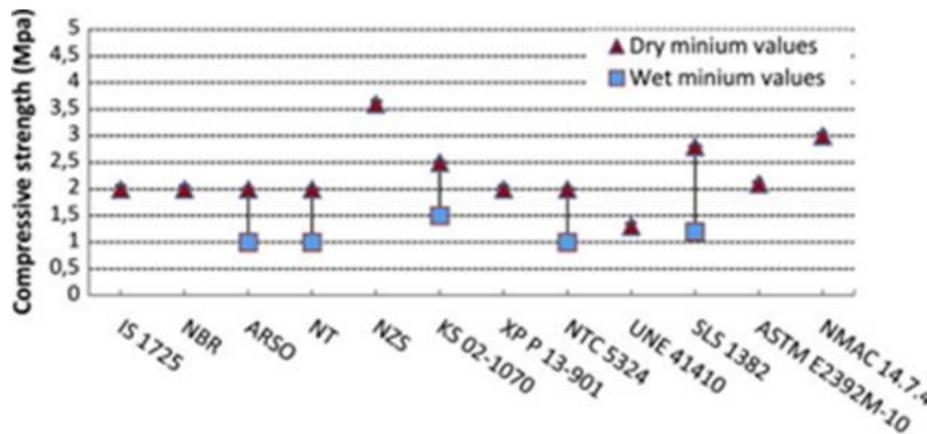


FIGURE 2.26 – Critères de résistance minimale d'une BTC [42]

Les normes (NZS, NBR, NTC 5324) sont destinées aux BTCs stabilisées au ciment.[42] A la FIGURE 2.26, les résistances minimales prescrites des briques en terre comprimées

stabilisées à l'état sec varient entre 2 [MPa] et 3 [MPa]. Les résistances en compression des BTCs stabilisées à l'état humide sont de l'ordre de 1 [Mpa]. Il est important de spécifier que chaque norme définit la taille des éprouvettes d'essai.

Absorption d'eau

P. Meukam a réalisé des essais d'absorption d'eau sur des BTCs stabilisées. Les variables du test sont la durée d'immersion et le pourcentage de stabilisation des briques (visibles à la FIGURE 2.27).

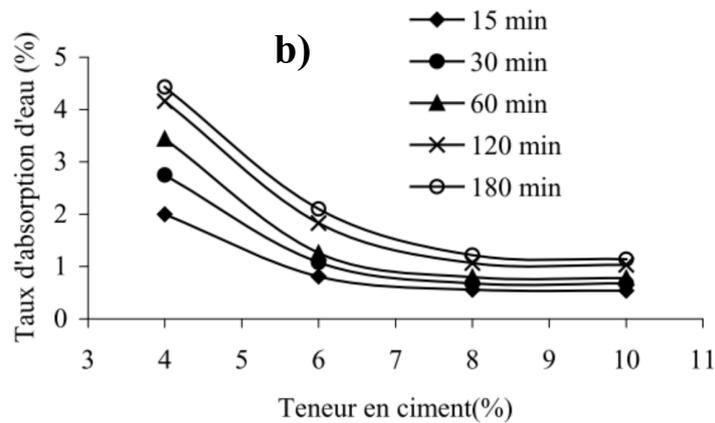


FIGURE 2.27 – Absorption d'eau d'une BTC stabilisée [43]

Durabilité

Des tests de durabilité sur des échantillons de bloc de terre comprimée ont été réalisés par P. Woyciechowski. Les résultats de ces tests sont disponibles à la FIGURE 2.28. Les tests réalisés sont : la mesure du retrait, la résistance à l'érosion, le ratio de résistance en compression à l'état sec et humide et la résistance aux cycles de gel/dégel. [28]

Les compositions des différents échantillons sont présentées à la FIGURE 2.29.

| 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 |
| | 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% |
| | Mass loss < 5% | Not tested | | 7.24% | 7.24% | 6.36% |

FIGURE 2.28 – Durabilité d'un bloc de terre crue stabilisée au ciment [28]

| 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 |

FIGURE 2.29 – Composition des échantillons de terre crue stabilisée [28]

L'échantillon 433 9% CEMI contenant 30% de gravier et 9% de ciment valide toutes les conditions des tests (FIGURE 2.29). Pour cet échantillon, son retrait est de 0.24% (inférieur à 0.5%), sa perte de masse après les cycles de gel/dégel est de 2.51%. La FIGURE 2.28 démontre que la quantité de ciment dans une BTC stabilisée va influencer sur sa durabilité dans une région humide.

La FIGURE 2.30 illustre les résultats d'un test d'abrasion sur des BTCs stabilisées. Le test a été réalisé selon la norme ASTM D559, 1989. Il est conseillé d'obtenir une perte de masse inférieure à 5% pour des BTCs exposées à des milieux humides. Ce critère est respecté pour des pourcentages de ciment égaux ou supérieurs à 8 %. [44]

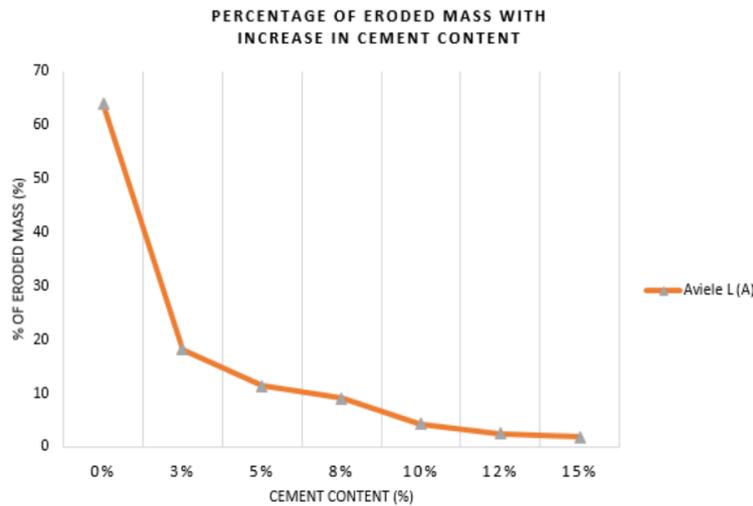


FIGURE 2.30 – Tests d'abrasion à la brosse de fer sur des BTCs stabilisées [44]

La durabilité de la BTC dépend aussi de la composition de la terre. Un optimum doit être trouvé concernant la répartition granulométrique des particules de la terre.[45]

Coût

Le coût d'une BTC stabilisée est extrêmement difficile à définir. En effet, il dépend de nombreux paramètres : le coût de la main-d'œuvre, la méthode de production, le lieu de production et le pourcentage de stabilisation.

Afin de produire une BTC stabilisée, il faut de la terre, de l'eau, du ciment et une presse. La quantité de ciment incorporée dans la brique fait évidemment varier le coût de

la brique. Plus la quantité de ciment est importante, plus le coût de la brique augmente. Le coût de la terre peut être négligeable si elle est prélevée sur le site de construction.

Enfin, le pays de production influera énormément sur le coût de la brique comprimée stabilisée. Dans un pays faiblement développé, l'opération de production de la brique sera peu coûteuse en raison du faible coût de la main-d'œuvre. Pour ces pays, une production de briques à l'aide de presse manuelle peut être envisagée. Dans un pays développé, il sera plus difficile de réduire les coûts de production en raison du coût de la main-d'œuvre. Dès lors, une opération de fabrication plus industrielle avec le moins de manutention possible est privilégiée afin de réduire les coûts de production.[34]

Là où la BTC stabilisée s'avère intéressante sur le plan budgétaire est en auto-construction⁷ d'une maison uni-résidentielle. En effet, le coût d'une brique pourra être réduit à l'amortissement de la presse, à la quantité de ciment incorporé et à la quantité d'eau (négligeable dans les pays humides).

Questions environnementales

Satprem Maini a étudié l'empreinte environnementale des BTCs (stabilisées à 5%) en les comparant aux briques de terre cuites.

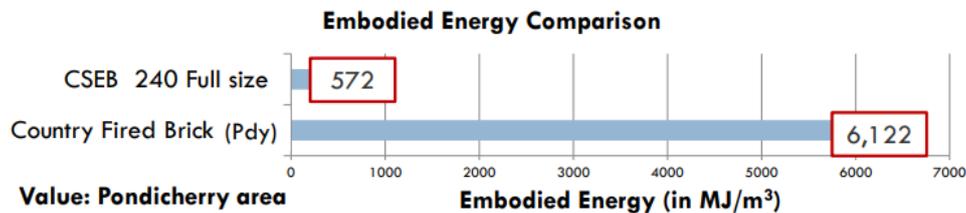


FIGURE 2.31 – Énergie grise des BTCs stabilisées [46]

La FIGURE 2.31 compare l'énergie grise de production des BTCs stabilisées aux briques de terre cuite. Il en ressort que l'énergie grise de production des BTCs stabilisées est 10 fois moindre que celle des briques de terre cuite selon Satprem Maini. [46]

Dans l'étude de A. Rahman, une comparaison des rejets de [kg CO_2 /tonnes] des matériaux de construction est établie. Cette comparaison se trouve à la FIGURE 2.32.

7. Construire sa maison soi-même.

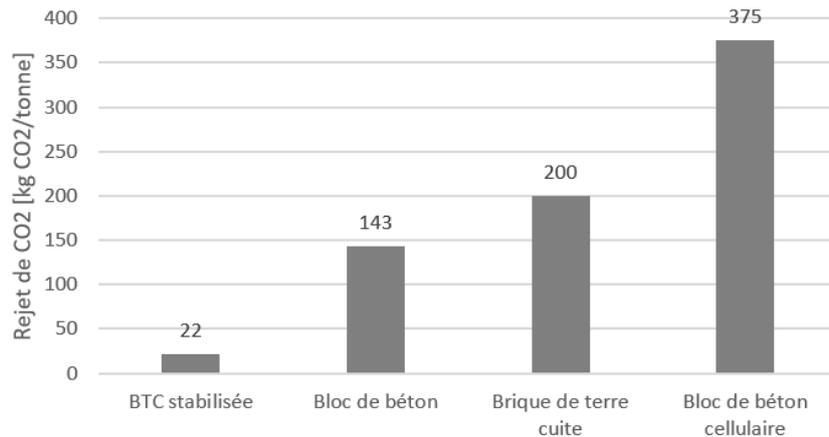


FIGURE 2.32 – Comparaison des émissions de CO_2 des matériaux de construction [47]

Il ressort que les BTCs stabilisées au ciment émettent pour leur production plus de 10 fois moins de kilogrammes de CO_2 par tonne que les éléments de maçonnerie en terre cuite et les blocs de béton. Les émissions de CO_2 nécessaires à la production d'une tonne de BTCs stabilisées sont de 22 [kg CO_2 /tonne] tandis que celles de blocs de béton sont de 200 [kg CO_2 /tonne]. [47]

Un des avantages de l'utilisation des BTCs stabilisées est donc son faible coût environnemental. Néanmoins, la quantité de ciment des briques va énormément influencer sur le coût énergétique de celles-ci car le ciment a une très grande énergie grise. Or, dans un bloc de béton classique, la quantité de ciment est de 7% (150 [kg/m³]). Cela signifie qu'une stabilisation supérieure à 7% d'une brique en terre crue comprimée stabilisée reviendrait à utiliser plus de ciment qu'un bloc de béton traditionnel. [39]

Comparaison des BTCs stabilisées à d'autres matériaux de construction

A la FIGURE 2.33 se trouve un tableau comparant des BTCs stabilisées à d'autres éléments de maçonnerie.

| Property | Compressed stabilised earth blocks | Fired clay bricks | Calcium silicate bricks | Dense concrete blocks | Aerated concrete blocks | Lightweight concrete blocks |
|---|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Wet compressive strength (MN/m ²) | 1 - 40 | 5 - 60 | 10 - 55 | 7 - 50 | 2 - 6 | 2 - 20 |
| Moisture movement (%) | 0.02 - 0.2 | 0.00 - 0.02 | 0.01 - 0.035 | 0.02 - 0.05 | 0.05 - 0.10 | 0.04 - 0.08 |
| Density (kg/m ³) | 1700 - 2200 | 1400 - 2400 | 1600 - 2100 | 1700 - 2200 | 400 - 950 | 600 - 1600 |
| Thermal conductivity W/m°C | 0.81 - 1.04 | 0.70 - 1.30 | 1.10 - 1.60 | 1.00 - 1.70 | 0.10 - 0.20 | 0.15 - 0.70 |
| Durability against rain | good to very poor | excellent to very poor | good to moderate | good to poor | good to moderate | good to poor |

FIGURE 2.33 – Comparaison des caractéristiques d'un bloc en terre crue aux matériaux de construction [34]

Le TABLEAU de la FIGURE 2.33 s'axe sur 5 points de comparaison : la résistance en compression, les mouvements d'humidité, la densité, la conductivité thermique, la durabilité contre la pluie.

La valeur minimale de résistance en compression d'une brique comprimée stabilisée est moindre que celle d'un bloc de construction classique. Cependant, la résistance maximale d'une BTC stabilisée est comparable à celle d'un bloc de béton classique.

Au niveau des mouvements d'humidité, les valeurs maximales sont au-dessus de la moyenne vis-à-vis des autres éléments de construction. Par contre, la valeur minimale des mouvements d'humidité est comparable aux éléments de construction classique.

De plus, concernant le spectre de densité, les BTCs stabilisées sont parmi les matériaux de construction les plus lourds.

Enfin, la capacité isolante et la durabilité contre la pluie d'une brique en terre comprimée stabilisée est comparable à celle d'une brique de terre cuite.

Globalement, les BTCs stabilisées présentent des propriétés comparables à celles des matériaux de maçonnerie classique.

2.4 Blocs de béton recyclé pressés

Dans un contexte de valorisation des déchets de construction et de démolition, cette section présente des blocs de béton produits à l'aide de déchets de démolition recyclés et pressés.

2.4.1 Fabrication

Des presses mécaniques ou hydrauliques (voir FIGURE 2.18) peuvent être employées pour la conception de blocs pressés. Dans l'industrie, les presses vibro-compactantes sont les plus répandues. Elles vont vibrer et compacter le matériau afin d'assurer une qualité optimale du bloc fini. Les blocs présentés à la FIGURE 2.34 sont issus d'une presse vibro-compactante.



FIGURE 2.34 – Blocs de béton recyclé [6]

La FIGURE 2.34 montre la façon dont les blocs sont entreposés. Les plaques sur lesquelles se trouvent les blocs sont celles qui ont servi de fond de presse lors du vibro-pressage. Ainsi, il est aisé de transporter les blocs après leur pressage. En effet, le bloc sera démoulé instantanément après son compactage et restera très fragile lors de ses premières heures. D'après les standards nationaux chinois, il est recommandé de laisser reposer les blocs 24h00 avant de pouvoir les manipuler. Ensuite, ces blocs sont disposés en piles (inférieures à 1.4m-1.6m) aspergées d'eau au moins 6 fois par jour. [6]

2.4.2 Matériaux

Dans la plupart des articles cités de cette section, les granulats proviennent de produits de démolition broyés traités ou non.

Dans l'étude de Lijun Yang, les granulats fins utilisés sont produits à partir de briques et de composants en béton broyés dont le diamètre passant est inférieur à 4,75 [mm] (FIGURE 2.35). [6]

Le travail de Manuel Contreras Llanes se penchera sur l'utilisation de granulats provenant d'un centre de recyclage de déchets de construction en Espagne. Les granulats seront broyés et séparés de leurs impuretés. Une classification en 2 fractions granulaires est réalisée : les granulats dont le diamètre passant est inférieur à 4.8mm (agrégats fins) et les granulats dont le diamètre passant est compris entre 4.8 et 12 mm. [48]



FIGURE 2.35 – Granulats fins recyclés produits à partir de déchets de brique et de béton [6]

Une pratique proposée par Manuel Contreras Llanes est de trier les granulats recyclés. Le but est de réduire la quantité de particules nuisibles à la résistance du béton recyclé final. Le tri se fait mécaniquement et a pour but d'améliorer les caractéristiques du béton recyclé. [48]

2.4.3 Propriétés des blocs

Résistances mécaniques

Lijun Yang a étudié l'influence de l'incorporation de granulats recyclés produits à partir de briques et de composants en béton. Dans un premier temps, l'étude est réalisée en remplaçant la proportion de granulats fins naturels par des granulats fins recyclés (taux de substitutions 0%, 30%, 60% et 100%) tout en conservant les granulats grossiers naturels. Ensuite, l'étude s'est penchée sur le remplacement complet des granulats fins et grossiers naturels par des granulats fins et grossiers recyclés. Pour chacun des blocs réalisés le taux de granulats fins est de 75% (25% de granulats grossiers). Les séries MU10 et MU7.5 sont composées à 100% d'agrégats recyclés. Elles ne changent que par leur W/C ⁸ de 0.57 et 0.73 respectivement. [6]

Les proportions des matériaux dans le béton MU7.5 (100% de granulats recyclés) sont : ciment 9.2%, eau 6.7 %, granulats fins 63.37%, granulats grossiers 20.69 %.

A la FIGURE 2.36 et 2.37 sont présentés les résultats de résistance en compression et en flexion des blocs creux.

8. Rapport massique eau/ciment.

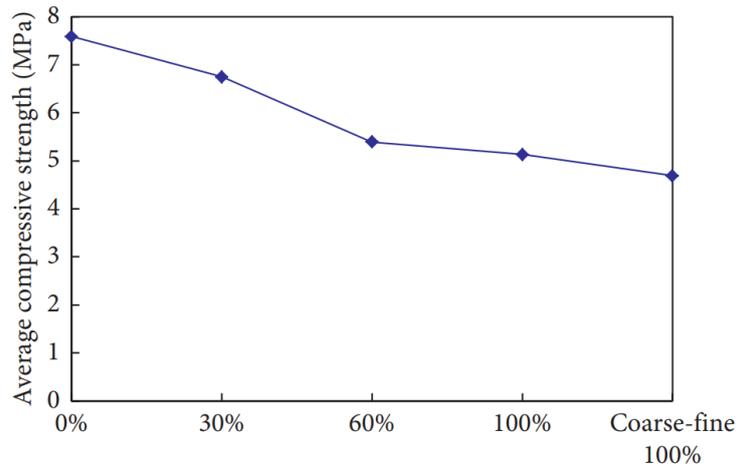


FIGURE 2.36 – Résultats des résistances en compression pour des échantillons en fonction de leur teneur en granulats fins recyclés [6]

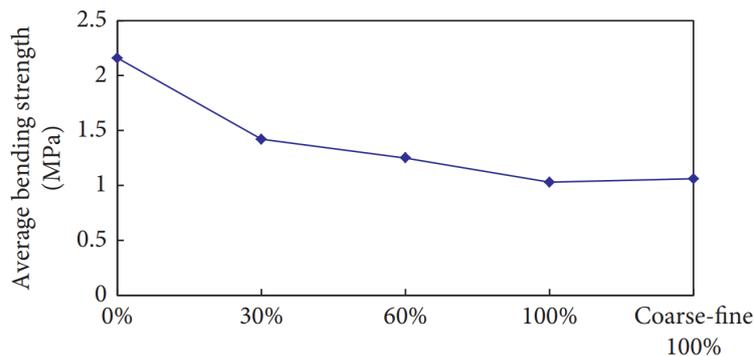


FIGURE 2.37 – Résultats des résistances en flexion pour des échantillons en fonction de leur teneur en granulats fins recyclés [6]

L'augmentation de la teneur en granulats fins recyclés a un impact négatif sur la résistance en compression et en flexion des blocs (visible aux FIGURES 2.36 et 2.37). Cette diminution de résistance était attendue en raison de la nature des fines recyclées. Le processus de fabrication des granulats recyclés fait qu'ils contiennent plus de terre que les granulats fins naturels. [6]

Lorsque le taux de remplacement de granulats recyclés dans le béton est de 100%, les résistances en flexion sont pratiquement divisées par deux et les résistances en compression sont divisées pratiquement par 1,5. Malgré cela, Lijun Yang mentionne que le mode de fêlure des bétons ne change pas de composition en composition.

Une expérience similaire a été réalisée par M.M. Sabai, il s'agit de l'étude de blocs comprimés manuellement produits à partir de granulats recyclés (à partir de déchets de construction en Tanzanie) stabilisés au ciment. M.M. Sabai indique que 80% de ses échantillons (contenant 98% de granulats recyclés) atteignent 7 MPa de résistance en compression.[49]

Des résultats pratiquement similaires ont été obtenus dans l'étude de Manuel Contreras Llanes. [48]

Absorption d'eau par immersion

L'étude de Manuel Contreras Llanes prouve que l'augmentation de la proportion de granulats recyclés issus de déchets de construction et de démolition tend à augmenter l'absorption⁹ des blocs réalisés.

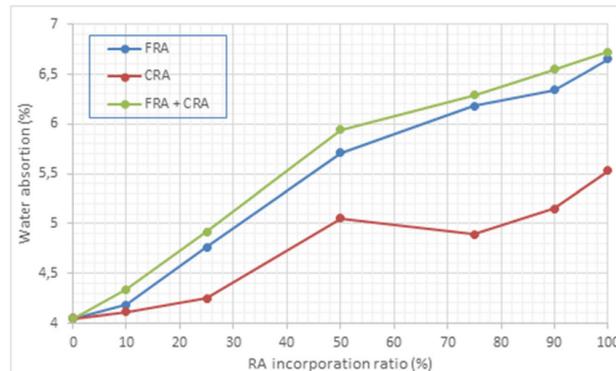


FIGURE 2.38 – Absorption des blocs en fonction de leur teneur en granulats recyclés [48]

L'absorption des blocs est d'autant plus importante quand la fraction de fines recyclées augmente (FIGURE 2.38). La porosité apparente suit les mêmes tendances. [48]

Durabilité

Des tests de durabilité ont été effectués par Gyanendra Kumar Attri. Il en résulte que l'utilisation de granulats recyclés de béton vieux de 63 ans affecte très peu les comportements de durabilité (abrasion et UPV). [50]

Dangerosité

Il est important que le béton recyclé réalisé ne présente pas de danger pour l'être humain et l'environnement. Dès lors, des tests doivent être réalisés sur l'ensemble des composants du béton. Dans le cas d'un béton à base de granulats recyclés provenant de déchets de construction et de démolition, les granulats recyclés doivent être analysés avec précaution. Les granulats peuvent être analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif afin de détecter d'éventuels polluants dans les agrégats les rendant dangereux.

Questions environnementales

Selon Varela Alberte, en remplaçant 50% des granulats par des granulats recyclés de déchets de construction et de démolition dans un bloc de construction classique, les émissions de CO_2 sont réduites de 43%. [51]

9. Réalisée selon UE-EN 12390-7.

Outre la réduction de CO_2 , le remplacement des granulats recyclés a de nombreux avantages écologiques. Cela permet de réduire la production de granulats naturels, de préserver les ressources naturelles et de diminuer le nombre de tonnes de déchets du secteur de la construction.

Cette section présente exclusivement des briques comprimées stabilisées au ciment produites à partir de granulats recyclés de déchets de construction et de démolition. Bien que le ciment soit un excellent moyen de stabiliser les briques, il reste un matériau à haute énergie grise. Md. Uzzal Hossain propose des solutions de blocs stabilisés avec différents types de liants et granulats. Les mélanges sont présentés à la FIGURE 5.5 de l'annexe B. [52]

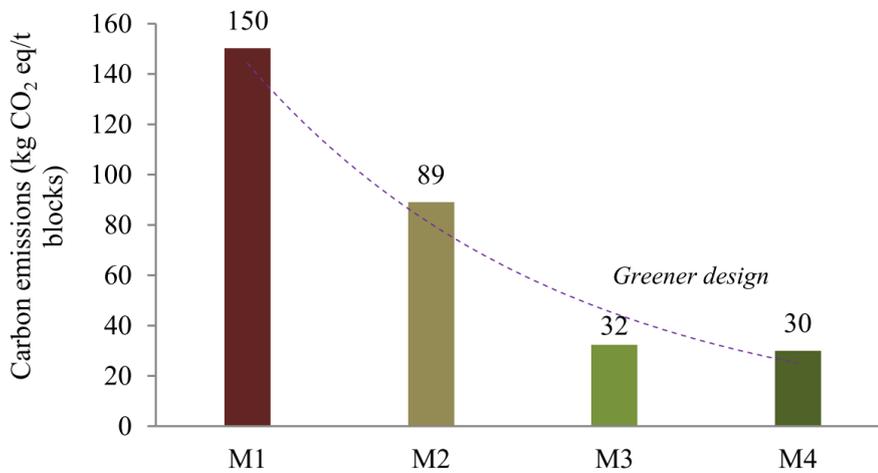


FIGURE 2.39 – Émissions de CO_2 en fonction des mélanges [52]

Il est intéressant de noter que le mélange le moins énergétique est celui utilisant les proportions suivantes : 0.5-0.5-7 ("concrete slurry waste" déchets de coulis de béton-granulats naturels fins-granulats fins recyclés). Ce mélange atteint une résistance en compression supérieure à 7 [MPa].

Comparaison des blocs de béton recyclé et des blocs de béton ordinaires

| | Ordinary concrete hollow block | Recycled fine aggregate concrete hollow blocks with different replacement rates | Recycled concrete hollow block |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Compressive strength | MU5.0–20.0 | MU7.5–10.0 | MU7.5–10.0 |
| Bulk density (kg/m ³) | 1200–1400 | 1100–1250 | 1100–1200 |

FIGURE 2.40 – Comparaison de blocs creux traditionnels et recyclés [6]

Finalement, un bloc pressé fait à partir de matériaux recyclés aura généralement une densité et une résistance plus faibles. Néanmoins, il reste quand même possible de satisfaire les conditions de résistance d'un bloc classique en remplaçant les agrégats naturels par des agrégats recyclés fins et grossiers. [52]

2.4.4 Application

Il serait intéressant de voir ce matériau comme un matériau d'urgence lors de catastrophes naturelles dans des pays défavorisés. Les gravats de béton d'un tremblement de terre peuvent être transformés en les concassant sur place afin d'obtenir des granulats recyclés. Dès lors, ces granulats pourraient être transformés en briques ou en blocs avec des outils assez simples. Des logements de fortune seraient ainsi bâtis avec les gravats concassés ramassés sur place afin de répondre à une crise urgente.



FIGURE 2.41 – Gravats suite à un tremblement de terre à Haïti [53]

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les matériaux et leurs caractéristiques ainsi que les équipements et les différents tests de caractérisations réalisés sur les briques. Il s'agit d'une synthèse des différents travaux de laboratoire réalisés afin d'obtenir des résultats en vue de répondre aux questions de recherche.

Dans un premier temps, l'étude s'est concentrée sur la caractérisation des granulats fins recyclés. Ensuite, un travail d'optimisation des proportions de ciment, d'eau et de granulats a été réalisé. Ainsi, un mélange optimal est défini sur des critères de résistance et de minimisation d'énergie grise du matériau obtenu. Plusieurs tests de caractérisation applicables aux BTCs ont été réalisés sur les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. L'objectif est de comparer ce nouveau matériau aux comportements des BTCs stabilisées ainsi que de définir ses futures applications dans la construction.

Ce chapitre s'axe sur 3 sections :

- La caractérisation des matériaux présente les composants des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. Des tests de caractérisations sont définis pour les granulats fins recyclés.
- La section sur la fabrication des briques présente les outils et les moyens nécessaires à la fabrication de briques comprimées.
- La caractérisation des briques présente les tests de caractérisations. Ceux-ci s'axent principalement sur les caractéristiques de résistance et de durabilité.

3.2 Caractérisations des matériaux

3.2.1 Caractérisation des granulats fins recyclés

Les granulats fins recyclés sont issus de déchets de démolition broyés. Il s'agit de granulats fins non-lavés de préscalpage dont le diamètre passant maximum est de 8[mm].

Les granulats fins recyclés utilisés ne sont pas destinés et applicables à une composition de béton classique. Aucune information sur leurs propriétés n'est disponible. Dès lors, un travail de caractérisation sera nécessaire afin de déterminer les caractéristiques des granulats fins recyclés. Trois caractérisations ont été réalisées : un essai granulométrique, une inspection visuelle, un essai de densité et d'absorption réalisé à l'aide d'un pycnomètre. L'essai d'inspection visuelle a été réalisé par Matteo Angeli.[54] L'essai de densité et d'absorption réalisé à l'aide d'un pycnomètre a été réalisé par Clément Kerckhove.[55]

Granulométrie

La norme NBN EN 933-1 a été utilisée afin de déterminer la courbe granulométrique des granulats recyclés. Le principe du test granulométrique consiste à diviser un échantillon d'agrégats en différentes classes de taille granulométrique définies. Il est réalisé à l'aide de tamis à mailles décroissantes emboîtés les uns dans les autres. [56]

Premièrement, la masse minimale de l'échantillon est prescrite selon la taille maximale des particules présentes dans les granulats fins recyclés. Dès lors, pour des particules ayant un diamètre de maximum 8 [mm], la masse de l'échantillon doit être de minimum 600 [grammes] (masse M1). [56]

Ensuite, l'échantillon est lavé. Pour ce faire, l'ensemble de l'échantillon est passé au tamis de 63 [μm]. Le but étant que l'eau passant à travers le tamis de 63 [μm] soit claire. Après séchage de l'échantillon préalablement lavé, sa masse est définie comme la masse M2.

L'échantillon de masse M2 est placé dans une colonne de tamis. Celle-ci est présentée à la TABLE 3.1. Cette colonne sera placée sur une plateforme vibrante afin d'accélérer le processus de tris des granulats dans les différents tamis.

| |
|-----------------------|
| couvercle |
| 8 [mm] |
| 4 [mm] |
| 2 [mm] |
| 1 [mm] |
| 500 [μm] |
| 250 [μm] |
| 125 [μm] |
| 63 [μm] |
| fond |

TABLE 3.1 – Tamis utilisés pour l'essai granulométrique



FIGURE 3.1 – Colonne de tamis sur la plateforme vibrante

Enfin, les différentes masses de granulats présentes dans les tamis sont pesées. R1 est la masse de granulats présents dans le tamis avec le plus grand diamètre d'ouverture (maille de 8 [mm]). R2 est la masse de granulats contenus dans le tamis juste en-dessous (maille de 4 [mm]). Dès lors R1,...,R9 correspondent aux masses de granulats contenus dans chaque tamis.

Le pourcentage de fines (<63 [μm]) est obtenu grâce à l'équation :

$$f = \frac{(M1 - M2) + P}{M1} 100[\%]$$

[56]

où :

- M1 est la masse de l'échantillon sec
- M2 est la masse séchée du refus au tamis de 63[μm]
- P est la masse de fines dans le contenant à la base de colonne de tamis

Inspection visuelle

La méthode de l'inspection visuelle vise à déterminer les différentes matières présentes dans les granulats recyclés.

Afin de réaliser ce test, l'échantillon est lavé de la même façon qu'à la SECTION 3.2.1. Seules les particules non-flottantes plus grandes que 2 [mm] sont considérées et triées. Les particules sont pesées et triées visuellement selon leur nature comme à la FIGURE 3.3. Selon la norme EN-933-11, au moins 1000 particules doivent être inspectées.

Les natures d'éléments sont les suivantes :

| Constituants | Description |
|--------------|--|
| Rc | Béton, produits en béton, mortier Éléments de maçonnerie en béton |
| Ru | Granulats non liés, Pierre naturelle Granulats traités aux liants hydrauliques |
| Rb | Éléments en argile cuite (Ex : briques et tuiles) Éléments en silicate de calcium Béton cellulaire non flottant |
| Ra | Matériaux bitumineux |
| FL | Matériau flottant en volume |
| X | Autres : Matériaux cohérents (par exemple, argile, sol) Divers : métaux (ferreux et non ferreux), Bois, matière plastique et caoutchouc non flottants Plâtre |
| Rg | Verre |

FIGURE 3.2 – Nature des éléments selon la norme NBN 12620 [57]



FIGURE 3.3 – Division des différentes natures d'éléments [54]

Densité et absorption d'eau

La norme EN 1097-6 a été utilisée afin de déterminer la masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau des granulats grâce à la méthode du pycnomètre.



FIGURE 3.4 – Pycnomètre utilisé [55]

Les pycnomètres utilisés lors de l'expérimentation sont présentés à la FIGURE 3.4.

Premièrement, la prise d'essai est immergée dans un pycnomètre préalablement rempli d'eau. Il faut ajouter de l'eau jusqu'au débordement du pycnomètre. Après, il faut refermer le pycnomètre en veillant à ne pas emprisonner de l'air à l'intérieur de celui-ci. Ensuite, le pycnomètre est placé dans un bain d'eau durant 24h00 (FIGURE 3.5).

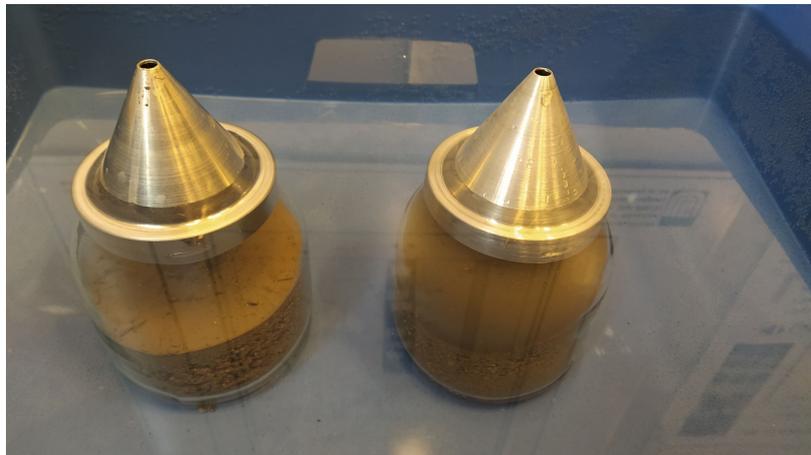


FIGURE 3.5 – Pycnomètre rempli dans un bain d'eau [55]

Après, le pycnomètre est retiré du bain d'eau. Il convient de sécher les parois extérieures avant de le peser (M_2).

Ensuite, la majeure partie de l'eau recouvrant la prise d'essai est décantée et le contenu du pycnomètre est vidé sur un plateau.

Enfin, la prise d'essai sera exposée à un courant d'air chaud dans un plateau (visible à la FIGURE 3.6).



FIGURE 3.6 – Séchage des granulats grâce à un léger courant d'air chaud [55]

Les granulats seront séchés afin de ne plus observer d'humidité en surface sur ceux-ci et qu'ils n'adhèrent pas entre eux. Pour s'assurer que l'échantillon a atteint l'état de surface sèche, il faut réaliser le "test d'effondrement du cône" (visible à la FIGURE 3.8). L'échantillon sec sera tassé dans un moule conique. Si le cône s'effondre lors du soulèvement du moule, l'échantillon est saturé et a atteint l'état de surface sèche (exemple à la FIGURE 3.7). La masse de l'échantillon saturé et de surface sèche est dénommée M_1 . M_4 sera la masse de cette prise d'essai après avoir été séchée dans une étuve jusqu'à obtenir une masse constante.



FIGURE 3.7 – État de surface sèche [55]



FIGURE 3.8 – Exemples d'état de surface sèche [58]

La masse volumique réelle séchée à l'étuve :

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Le coefficient d'absorption d'eau après une immersion de 24h00 :

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} 100$$

Où M_3 est la masse d'un pycnomètre rempli d'eau.

3.2.2 Eau

De l'eau potable a été utilisée pour tous les mélanges présentés dans la SECTION 3.3.

3.2.3 Ciment

Le ciment utilisé pour tous les mélanges présentés dans la SECTION 3.3 est du ciment de type CEM I 52.5 N.

3.3 Fabrication des briques

Cette section s'intéresse au processus de fabrication des briques et au type de cure.

3.3.1 Mélanges de béton utilisés

Au TABLEAU 3.2, les différents mélanges de béton réalisés sont présentés.

Le mélange REF-I est le mélange de référence. [12]

Les mélanges R-C visent à étudier l'impact de la variation de la quantité de ciment des mélanges. L'objectif est de garder la quantité d'eau et de granulats constante en masse par rapport au mélange REF-I.

Les mélanges R-E visent à faire varier la quantité d'eau tout en gardant toutes les autres variables constantes en masse par rapport au mélange REF-I.

R-VIII est le mélange final défini.

| | Pourcentages massiques des éléments du mélange | | | Exemples de quantités massiques des mélanges | | |
|---------|--|------------|--------------------------|--|-------------|---------------------------|
| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Eau [kg] | Ciment [kg] | Granulat fin recyclé [kg] |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 15 | 10 | 80 |
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | 15 | 5 | 80 |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 15 | 15 | 80 |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 15 | 7 | 80 |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 15 | 8 | 80 |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 12 | 10 | 80 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 16 | 10 | 80 |
| R-VIII | 12 | 8 | 80 | 12 | 8 | 80 |

TABLE 3.2 – Mélanges utilisés

3.3.2 Préparation des mélanges de béton

Les mélanges sont réalisés grâce à un malaxeur à béton suivant la procédure de malaxage :

1. Humidifier la cuve.
2. Ajouter la totalité des granulats fins recyclés dans la cuve.
3. 30 secondes de malaxage.
4. Ajouter la moitié de l'eau.
5. 2 minutes de malaxage.
6. 2 minutes de repos + ajout du ciment.
7. 30 secondes de malaxage.
8. Ajouter le reste d'eau.
9. 90 secondes de malaxage.

3.3.3 Teneur en eau optimale

Pour chaque mélange, un "drop test" est réalisé selon la norme NZS 4298 :1998. [29] Ce test consiste à évaluer la teneur optimale en eau pour un mélange de terre crue stabilisée.

Le test de teneur en eau optimale consiste à faire tomber une boulette de mélange sur un sol dur à une hauteur de 1m50 comme le montre la FIGURE 3.9. [29]

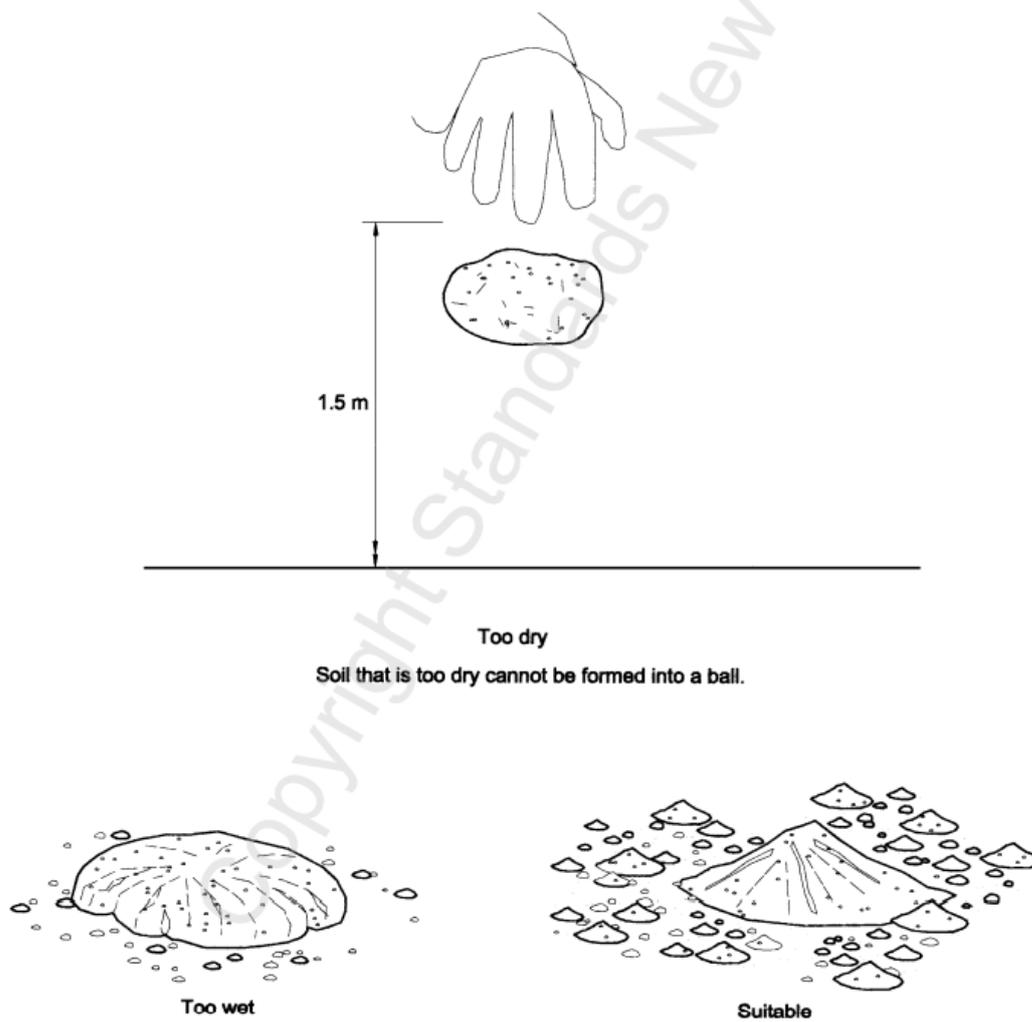


FIGURE 3.9 – Test de teneur optimale en eau [29]

Si la boulette s'écrase sur le sol comme une galette compacte, alors le mélange contient trop d'eau (visible à la FIGURE 3.9). Si la boulette forme des petites pyramides sur le sol, alors le mélange contient la bonne quantité d'eau. Un mélange trop sec conduira à une désintégration de la boulette sur le sol et un éparpillement de celle-ci.

3.3.4 Presse manuelle

Afin de réaliser les briques comprimées, une presse manuelle a été utilisée. La presse est une machine provenant de chez APPRO-TECHNO de la gamme TERSTARAM visible à la FIGURE 3.10.



FIGURE 3.10 – Presse manuelle TERSTARAM [30]

Cette presse manuelle est de taille moyenne et permet la réalisation de différentes gammes de briques et tuiles en fonction du moule inséré. Cette presse a été conçue pour sa robustesse et sa facilité d'entretien. Elle a été fabriquée afin de correspondre aux besoins des pays tropicaux. Toutes les pièces sont mécano-soudées, elles ne demandent pas de grandes connaissances pour être entretenues et réparées. La presse dispose d'une poussée théorique maximale de 15.000 kg. En utilisation normale, la valeur théorique de production de briques est de 700 briques/jour.[30]

Les moules montés sur la presse sont destinés à réaliser des briques de 29,5[cm]x 14[cm]x 9[cm] à encoche. Aux FIGURES 3.11 et 3.12, les dimensions de la brique vue en plan ainsi que les dimensions de la brique en coupe longitudinale sont présentées.

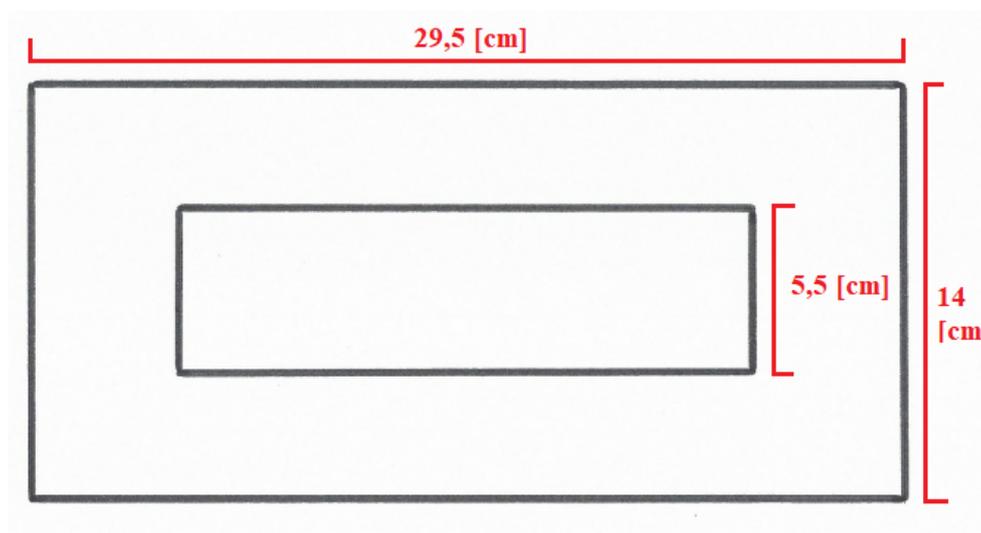


FIGURE 3.11 – Dimension de la brique : vue en plan

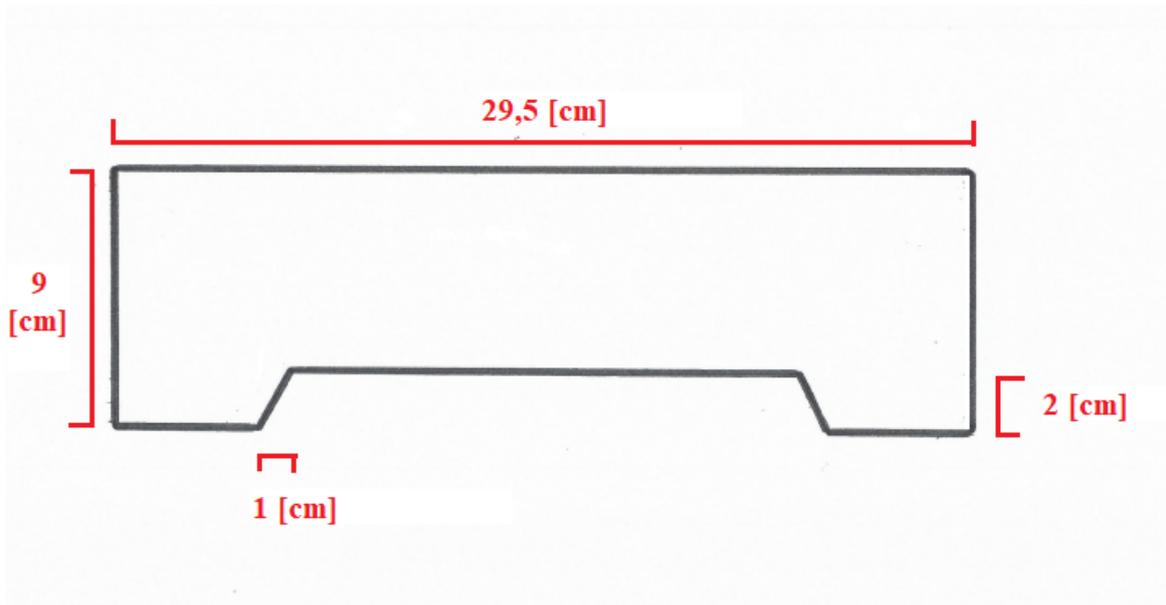


FIGURE 3.12 – Dimension de la brique : vue en coupe longitudinale

3.3.5 Cure des briques

La cure des briques est réalisée en chambre humide à atmosphère contrôlée (température de 20 ± 1 °C et 95 ± 2 % d'humidité) pendant 28 jours.

3.4 Caractérisations des briques

Cette section s'intéresse à la caractérisation des briques après leur conception.

3.4.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique est définie par le rapport entre la masse et le volume de la brique. La masse volumique est définie pour toutes les briques à 0 jour de cure et à 28 jours de cure.

L'encoche de certaines briques doit être remplie de mortier normalisé à 14 jours de cure afin de réaliser des tests de compression (explication à la SECTION 3.4.2). Dès lors, afin de déterminer la masse volumique de ces briques à 28 jours sans prendre en compte le poids du mortier, il faut connaître la masse volumique du mortier. Alors, un échantillon cubique de mortier est réalisé en parallèle du remplissage des briques afin de connaître sa masse volumique (FIGURE 3.13).



FIGURE 3.13 – Bloc de mortier normalisé



FIGURE 3.14 – Brique dont l'encoche est remplie de mortier normalisé

3.4.2 Essais de compression

La presse utilisée pour tous les essais de compression est une presse uni-axiale INSTRON 5585. Pour tous les essais réalisés, la vitesse de mise en charge est de $0,5 [(N/mm^2)/s]$ car la résistance attendue des briques est inférieure à $10 [N/mm^2]$ (selon la norme EN 772-1 + A1).[59]

Essai sur cubes de 65 [mm]

L'essai de compression est réalisé sur des cubes de 65 [mm] de côté découpés dans les briques (visible à la FIGURE 3.15). La vitesse de mise en charge est de $0,5 [(N/mm^2)/s]$.

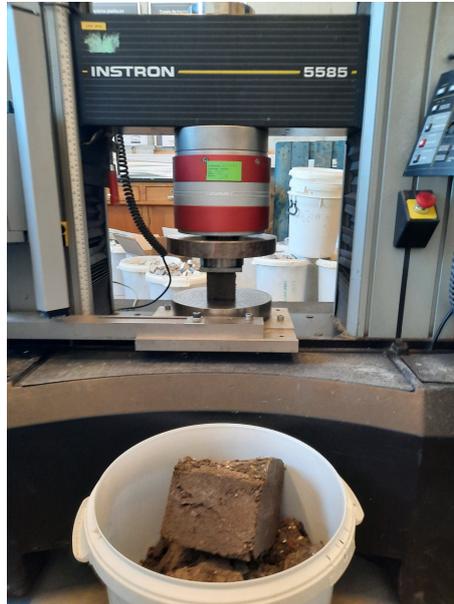


FIGURE 3.15 – Essai de compression sur un cube de 65 [mm]

Essai sur "2 demi-briques empilées"

Tout d'abord, l'encoche de la brique doit être remplie de mortier afin d'éviter la concentration de contraintes aux bords de l'encoche. Selon la norme NZS4298 :1998, l'encoche des briques doit être remplie de mortier 14 jours après leur fabrication. Ce mortier doit avoir 14 jours de cure avant d'être testé à la compression. De plus, le mortier aura un rapport de 4 :1 [sable/ciment de Portland] avec un rapport $E/C = 0,5^1$. [29]

L'essai de compression réalisé sur "2 demi-briques empilées" s'inspire du mode opératoire proposé par le RILEM.[60] Le but de l'essai est de définir la résistance en compression d'un élément de maçonnerie. Ainsi, l'essai de compression est réalisé sur deux demi-briques posées l'une sur l'autre et séparées par une couche de mortier. Le but de ce test est de doubler le rapport d'éclatement de l'éprouvette. [61]

Le mortier sert principalement à répartir les charges de façon uniforme entre les deux demi-briques. Or, les briques comprimées réalisées ont des faces lisses. Ainsi, il n'est pas nécessaire de poser une couche de mortier entre les deux demi-briques. Aussi, l'ajout de mortier viendrait rompre la continuité du matériau. [62]

L'essai réalisé pour ce travail de fin d'études est le même que celui proposé par David Miraucourt. L'idée est de réaliser un test de compression sur 2 demi-briques superposées (FIGURES 3.16 et 3.17). La vitesse d'application de la charge de compression est de $0,5 [(N/mm^2)/s]$. [62]

1. $E/C : \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse de ciment}}$.



FIGURE 3.16 – Essai de compression sur "deux demi-briques empilées"



FIGURE 3.17 – Essai de compression sur "deux demi-briques empilées"

3.4.3 Essai de flexion : éprouvettes 4*4*16[cm]

L'essai de flexion (3 points) est réalisé selon la norme NF XP P13-901 [63]. Dès lors, une barrette de 4*4*16 [cm] sera placée sur 2 appuis espacés de 10cm et chargée en son centre (FIGURE 3.18). La vitesse de chargement définie par la norme est de 300 [N/min].

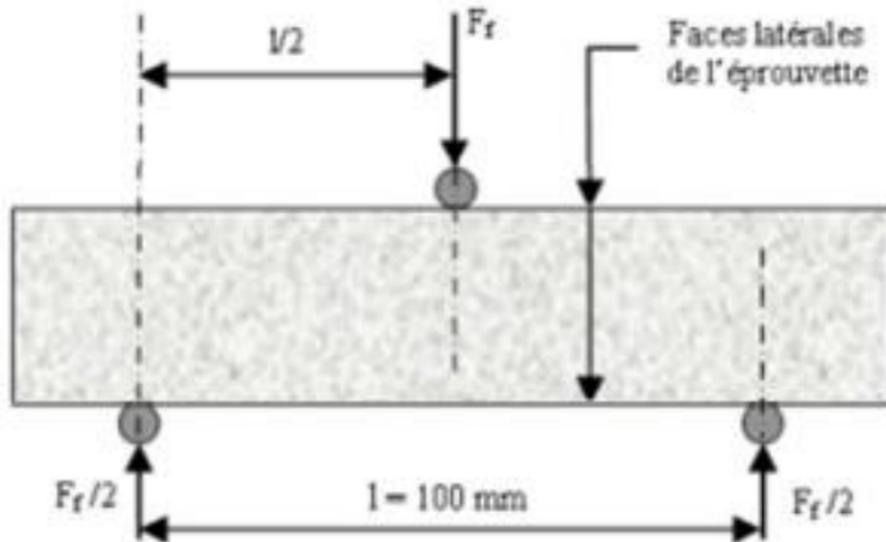


FIGURE 3.18 – Essai de flexion 3 points [42]

Si F est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion de l'éprouvette, le moment de rupture vaut $FL/4$. La contrainte de traction maximale à la rupture de l'éprouvette pour un moment de rupture de $FL/4$ est obtenue à l'ÉQUATION 3.1 :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b^3} \quad (3.1)$$

où :

- F : la charge appliquée au centre de l'éprouvette
- b : la largeur de l'éprouvette (40[mm] de côté)
- L : la distance séparant les 2 appuis (100 [mm])

3.4.4 Essai de chute

Essai de chute NZS 4298 :1998

Ce test consiste à évaluer la résistance d'une BTC stabilisée par un test de chute. Cette procédure a été réalisée selon la norme NZS 4298 :1998.

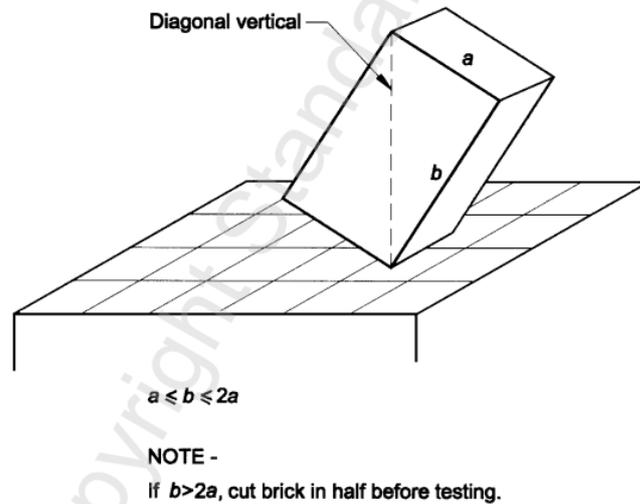


FIGURE 3.19 – Test de chute d’une brique de type "drop test"[29]

Le test consiste à faire tomber une brique sur sa tranche (visible à la FIGURE 3.19). Des recommandations de taille de briques sont mentionnées. Si la longueur de la brique est deux fois plus grande que sa largeur alors il conviendra de la couper en deux dans le sens de la longueur.

Le test est réussi si la brique ne se casse pas en morceaux de même grandeur et si des morceaux de plus de 100 [mm] ne se décrochent pas de la brique.

Test de chute sur site (hauteur de chute : 1 [m])

Un autre test de chute consiste à faire tomber une brique à plat d’un mètre de haut. Ce test est conçu afin de définir la qualité d’une brique. Ce test est applicable sur chantier sans avoir recours à des outils spécifiques. L’essai est présenté à la FIGURE 3.20.



FIGURE 3.20 – Test de chute d’une brique sur site (hauteur de chute : 1 [m]) [64]

Le test est réussi si la brique ne se fissure pas et ne se brise pas.

3.4.5 Test d’abrasion

Le test d’abrasion est réalisé selon le standard français NF XP P13-901 [63]. L’objectif de ce test est de déterminer le coefficient d’abrasion C_a (ÉQUATION 3.2) . Pour ce faire, une brosse normalisée de 25 [mm] d’épaisseur (FIGURE 3.22) sera utilisée afin d’engendrer une force de friction sur la brique. La brosse définira un chemin de friction sur toute la longueur de la brique (29,5 [cm]) à une cadence d’un aller-retour par seconde pendant 1 minute. La force constante appliquée sur la brosse pendant l’abrasion de la brique est une masse de 3 [kg].

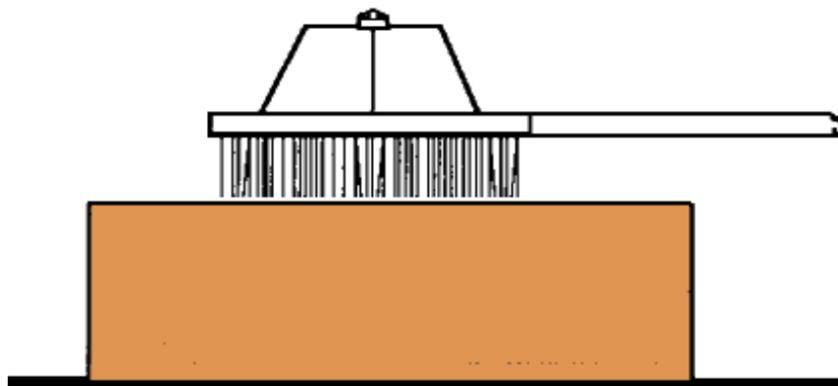


FIGURE 3.21 – Test d’abrasion [34]

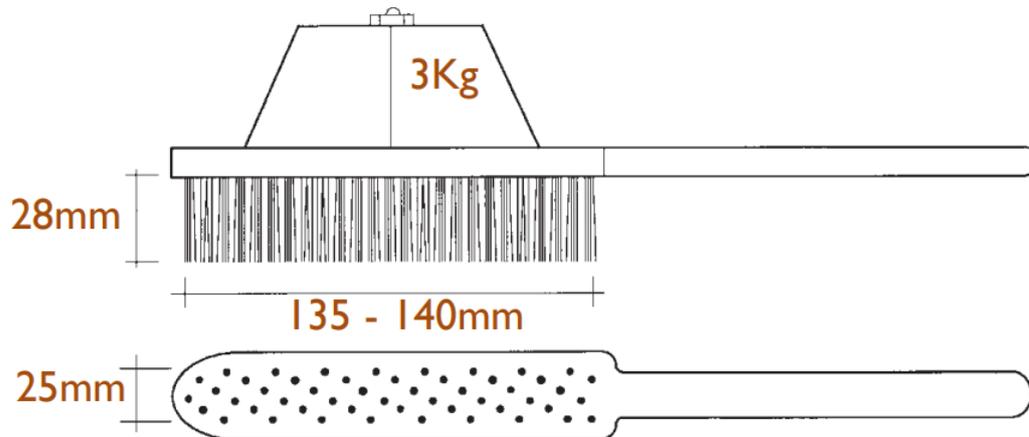


FIGURE 3.22 – Type de brosse d’abrasion : vue de profil[34]

Le coefficient d’abrasion C_a (ÉQUATION 3.2) définit le rapport entre la surface d’abrasion et la différence de masse de la brique engendrée par l’abrasion. Plus le coefficient C_a est grand, plus la brique est résistante à l’abrasion.

$$C_a = \frac{S}{m_1 - m_2} = [cm^2/g] \quad (3.2)$$

où :

- S : Surface d’abrasion [cm^2]
- m_1 : masse de la brique avant le test [g]
- m_2 : masse de la brique après le test d’abrasion [g]

3.4.6 Absorption d’eau sur éprouvettes cubiques

L’absorption d’eau des briques est déterminée sur des éprouvettes cubiques de 65 [mm] obtenues par découpe d’une brique à 28 jours de cure.

La norme NBN B 15-215 :1989 impose que les essais d’absorption d’eau soient réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 113 [mm] de diamètre par 115 [mm] de hauteur. Cependant, il n’est pas possible d’obtenir cette taille d’éprouvette avec les briques réalisées. Dès lors, les essais d’absorption d’eau ont été réalisés avec des éprouvettes cubiques de 65 [mm].

Afin de déterminer la masse saturée des échantillons, il faut immerger les échantillons dans de l’eau à une température constante de 20° jusqu’à obtenir une masse saturée constante. La masse saturée constante est obtenue lorsque la différence de masse de deux pesées à 24h00 d’intervalle diffère de moins de 0,1%.

Ensuite, afin d’obtenir la masse sèche de l’échantillon, il faut placer l’échantillon dans une étuve à 105° Celsius jusqu’à obtenir une masse sèche constante. La masse sèche constante est obtenue lorsque la différence de masse de deux pesées à 24h00 d’intervalle de la masse sèche diffère de moins de 0,1%.

Pour terminer, l'absorption des blocs est définie par l'ÉQUATION 3.3 :

$$Absorption = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} * 100 = [\%] \quad (3.3)$$

- m_{humide} : masse saturée de l'échantillon
- $m_{sèche}$: masse sèche de l'échantillon

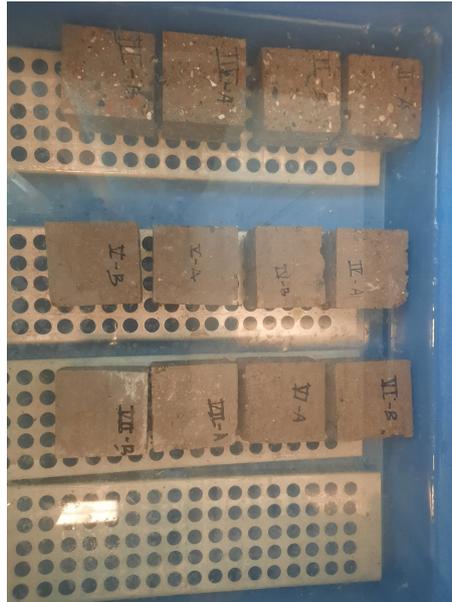


FIGURE 3.23 – Absorption d'eau réalisée sur des éprouvettes cubiques

3.4.7 Absorption d'eau par capillarité

Le test d'absorption d'eau par capillarité est réalisé selon le standard français NF XP P13-901. [63] L'objectif de ce test est de définir un coefficient d'absorption capillaire C_b (ÉQUATION 3.4). Pour ce faire, une brique à l'état sec sera placée sur 4 pieds ajustables afin de ne l'immerger que de 5 [mm] dans de l'eau potable. Un réservoir d'eau sera utilisé afin de garder la hauteur d'immersion de la brique constante. Toutes les 10 minutes, la masse de la brique (m_h) est définie jusqu'à l'observation d'une tendance de stabilisation.

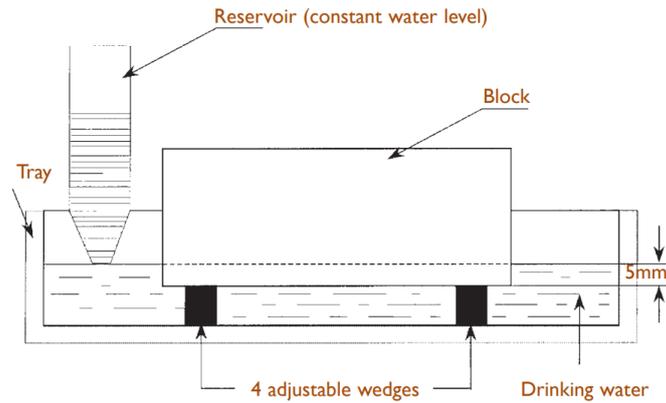


FIGURE 3.24 – Test d’absorption capillaire[34]

Le coefficient d’absorption C_b (ÉQUATION 3.4) définit le rapport entre la masse d’eau absorbée par capillarité sur le temps et la surface d’exposition. Ce coefficient est souvent exprimé sur une période de 10 minutes.

$$C_b = \frac{100(m_h - m_d)}{S\sqrt{t}} = [g/cm^2 \cdot min^{0.5}] \quad (3.4)$$

où :

- S : Surface d’immersion de la brique [cm^2]
- t : temps d’immersion [min]
- $(m_h - m_d)$ = Masse d’eau absorbée par capillarité [g]

Chapitre 4

Résultats et discussions

4.1 Caractérisations des granulats fins recyclés

4.1.1 Analyse granulométrique

La méthodologie de l'analyse granulométrique des granulats fins recyclés est présentée à la SECTION 3.2.1. Elle a été réalisée sur deux échantillons. Les résultats des deux échantillons sont disponibles au TABLEAU 5.1 de l'annexe C.

Le TABLEAU 4.1 est une moyenne des résultats des analyses granulométriques des deux échantillons. La dernière colonne du tableau exprime le pourcentage de particules passant en fonction de l'ouverture des tamis. Ainsi, grâce à ce tableau, la courbe granulométrique des granulats fins recyclés peut être tracée.

| Ouverture des tamis [mm] | Masse de refus Ri [g] | Pourcentage de refus [%] (100 Ri/M1) | Pourcentage cumulé s'écoulant [%] $100 - \sum(100 \cdot Ri/M1)$ |
|--|-----------------------|---|--|
| 8 | 17 | 1,6 | 98,4 |
| 6,3 | 38 | 3,6 | 94,8 |
| 4 | 72 | 6,8 | 88,0 |
| 2 | 110 | 10,4 | 77,6 |
| 1 | 82,5 | 7,8 | 69,7 |
| 0,5 | 73 | 6,9 | 62,8 |
| 0,25 | 134 | 12,7 | 50,1 |
| 0,125 | 161 | 15,2 | 34,9 |
| 0,063 | 70,5 | 6,7 | 28,2 |
| | | | |
| Masse totale moyenne des essais M1 [g] | 1056 | | |

TABLE 4.1 – Résultat d'analyse granulométrique des granulats fins recyclés

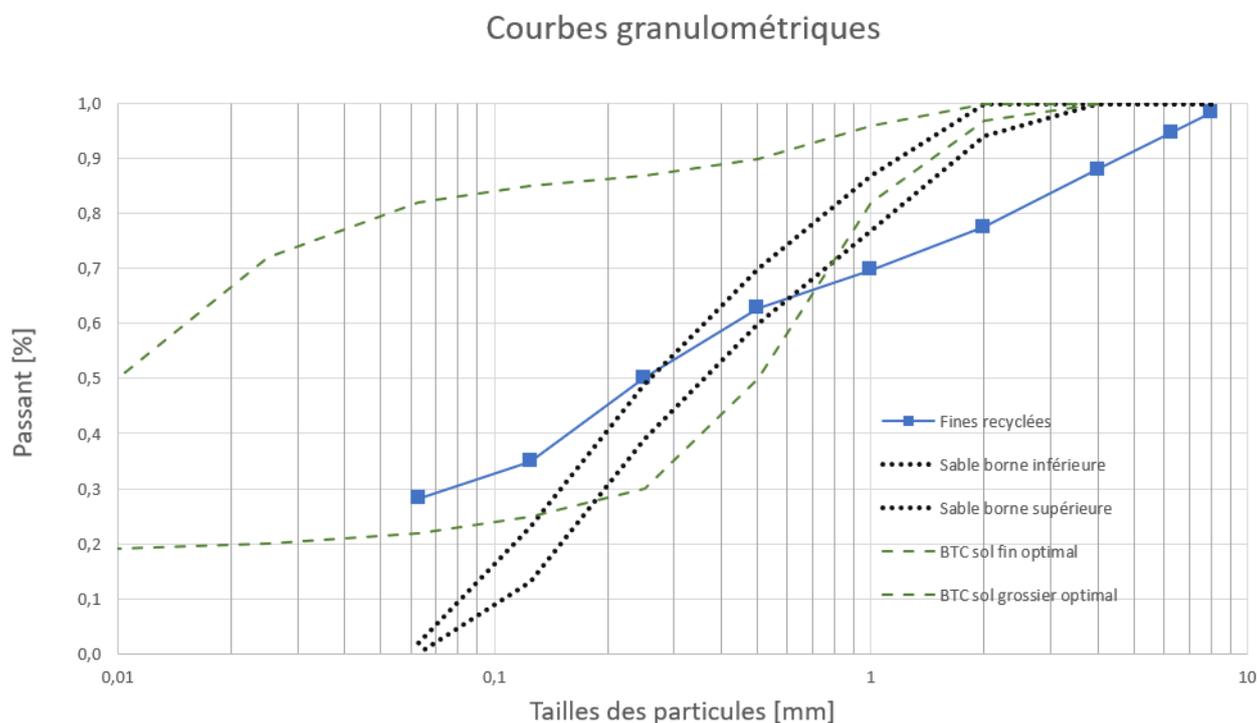


FIGURE 4.1 – Comparaison de courbes granulométriques

A la FIGURE 4.1, les courbes granulométriques représentées sont :

- Les granulats fins recyclés (en bleu).
- La borne granulométrique inférieure et supérieure d'un sable naturel (en noir).
- Deux mélanges fins et grossiers de BTCs stabilisées (en vert).

Tout d'abord, le pourcentage de fines ($<63[\mu\text{m}]$) des granulats fins recyclés est de : $f = 28,2[\%]$. La norme NBN EN 12620 préconise une teneur en fines non-nocive de maximum 3% pour les sables. Dès lors, selon la norme NBN EN 12620, il n'est pas conseillé d'utiliser les granulats fins recyclés comme un composant d'un béton classique. Néanmoins, la teneur en fines ($<63[\mu\text{m}]$) est comprise entre 20 et 80 [%] pour les BTCs stabilisées au ciment (FIGURE 4.1). Par analogie, la quantité de fines ($<63[\mu\text{m}]$) contenue dans les granulats fins recyclés est acceptable pour la réalisation de briques comprimées.

Les particules de plus de 2 [mm] représentent 23,4 [%] des particules contenues dans les granulats fins recyclés. Alors que les particules de plus de 2 [mm] représentent entre 0 et 5 [%] pour les sables ou les mélanges de BTC. Dans le cadre de la réalisation de briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés, cela peut être problématique. En effet, une fraction granulaire trop importante de particules de plus de 2 [mm] peut nuire aux résistances des briques comprimées. De fait, une fraction trop élevée de particules de gros diamètres peut augmenter l'indice des vides des briques comprimées.

Afin de résoudre ce problème, il faut réduire la fraction granulaire des éléments de gros diamètres des granulats fins recyclés. Une solution est de tamiser les granulats à l'aide d'un tamis de 2 [mm] d'ouverture.

Il est aussi important de noter que 50 [%] des particules des granulats fins recyclés sont plus petites que 0,25 [mm]. C'est aussi le cas pour les sables naturels et certains mélanges de BTCs.

4.1.2 Densité et absorption

La méthodologie de l'essai calculant la densité et l'absorption des granulats fins recyclés figure à la SECTION 3.2.1.

L'ensemble des résultats de ce test est repris au TABLEAU 4.2.

| Echantillon | Masse granulats superficiellement secs | Masse pycnomètre avec granulats | Masse pycnomètre rempli d'eau | Masse sèche des granulats | Masse volumique séchée à l'étuve | Coefficient absorption d'eau |
|-------------|--|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | M1 [g] | M2 [g] | M3 [g] | M4 [g] | ρ_{rd} [kg/m ³] | Wa24 [%] |
| 1 | 806 | 2060 | 1582 | 773 | 2356,7 | 4,3 |
| 2 | 824,3 | 2102 | 1606 | 795 | 2421,6 | 3,7 |
| Moyenne | / | / | / | / | 2389,1 | 4,0 |

TABLE 4.2 – Détermination de la densité et de l'absorption d'eau des granulats fins recyclés [55]

Il ressort que la masse volumique moyenne des granulats fins recyclés est de 2389,1 [kg/m³].

Les granulats fins recyclés étudiés sont moins denses qu'un sable naturel en considérant que la masse volumique d'un sable naturel est de 2700 [kg/m³]. De façon générale, la masse volumique des granulats fins recyclés est plus faible que celle des granulats fins naturels. Ceci est dû à la nature des particules des granulats recyclés. Les natures des particules présentes dans les granulats fins recyclés sont présentées à la SECTION 4.1.3.

De plus, la masse volumique des granulats fins recyclés est supérieure aux masses volumiques minimales requises de la norme NBN EN 15-001. En effet, les masses minimales des "granulats de béton de type A+" et des "granulats mixtes de types B+" sont de, respectivement, 2200 [kg/m³] et 1700 [kg/m³].

Deuxièmement, l'absorption moyenne des granulats fins recyclés est de 4 [%]. Cette valeur est comparable à l'absorption des granulats fins de béton recyclé présentés à la SECTION 2.2.2.

Aussi, l'absorption des granulats fins recyclés est inférieure aux valeurs d'absorption d'eau maximales des granulats recyclés selon la norme NBN EN 15-001. La norme européenne impose une absorption d'eau des granulats inférieure à 10 [%] pour les "granulats de béton de type A+" et inférieure à 15 [%] pour les "granulats mixtes de types B+".

4.1.3 Essai d'inspection visuelle

La méthodologie de l'essai d'inspection visuelle est décrite à la SECTION 3.2.1. L'objectif de l'essai est de déterminer le pourcentage massique des constituants présents dans les granulats fins recyclés. Les granulats de plus de 2[mm] seront triés et pesés. Les particules fines ($<63[\mu\text{m}]$) ne sont pas triées mais sont prises en compte dans le calcul de pourcentage massique comme étant un constituant de classe "X". En effet, les granulats fins recyclés sont un matériau de pré-scalpage. Dès lors, les fines ($<63[\mu\text{m}]$) peuvent contenir une grosse fraction de "terreux" (limon, argile). Les classes des constituants sont présentées à la SECTION 3.2.1.

Afin de réaliser l'essai, deux prises d'échantillons ont été faites et sont répertoriées au TABLEAU 5.2 de l'annexe C.

Au TABLEAU 5.2 figurent les différentes natures d'éléments définies lors de l'inspection visuelle. Une photo de chaque élément déterminé lors de l'inspection visuelle est disponible à la FIGURE 5.6 de l'annexe C. Le lien entre les éléments et leur classe est défini selon la norme NBN EN 12620.

| Éléments | Dénomination selon la norme NBN EN 12620 |
|-------------------|--|
| Pierre jaune | Ru |
| Pierre calcaire | Ru |
| Bois et plastique | X |
| Béton 1 | Rc |
| Béton 2 | Rc |
| Bitume | Ra |
| Céramique | X |
| Pierre naturelle | Ru |
| Verre | Rg |
| Brique | Rb |

Au TABLEAU 4.3 sont repris les résultats de l'essai d'inspection visuelle. Les pourcentages massiques ont été calculés comme une moyenne des pourcentages massiques des deux échantillons. De plus, le taux moyen de fines par échantillon est de 28 % de la masse de chaque échantillon. Le taux de fines sera pris en compte dans le calcul de pourcentages massiques en considérant les fines comme un constituant "X".

| Constituants | Moyenne des masses des échantillons [g] | Pourcentage massique [%] | | Norme NBN 15-001 | | | |
|--------------|---|-----------------------------|--------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | | | | Granulats de béton de type A+ | | Granulats mixtes de type B+ | |
| | | | | Pourcentage requis [%] | OK\ NOK | Pourcentage requis [%] | OK\ NOK |
| Rc | 90,15 | 55,60 | 55,60 | ≥ 90 | NOK | ≥ 50 | OK |
| Ru | 12,8 | 7,89 | 7,89 | | | | |
| Rcu | | | 63,49 | ≥ 95 | NOK | ≥ 70 | NOK |
| Rb | 11,15 | 6,88 | 6,88 | | | ≤ 30 | OK |
| Ra | 0,9 | 0,56 | 0,56 | ≤ 1 | OK | ≤ 5 | OK |
| Rg | 0,55 | 0,34 | 0,34 | | | | |
| X | 1,2 | 28,74 | 28,74 | | | | |
| XRg | | | 29,1 | ≤ 0,5 | NOK | ≤ 2 | NOK |
| FL | | | | ≤ 2 | \ | ≤ 2 | \ |

TABLE 4.3 – Résultats d'inspection visuelle des granulats fins recyclés [54]

Les résultats d'inspection visuelle du TABLEAU 4.3 sont comparés aux pourcentages minimums des constituants des granulats recyclés définis par la norme NBN 15-001. De ce fait, les granulats fins recyclés sont comparés aux pourcentages des constituants des "Granulats de béton de type A+" et des "Granulats mixtes de type B+".

Les granulats fins recyclés étudiés ne valident aucune condition pour être nommés "Granulats de béton de type A+". Néanmoins, les granulats fins recyclés valident 3 conditions des "Granulats mixtes de type B+". Les conditions non-validées sont les pourcentages requis de "Rcu" et de "XRg". Les pourcentages maximums de "Xrg" sont largement dépassés. Cela est dû à la grande présence de fines ($<63 \mu\text{m}$) dans les granulats fins recyclés étudiés. Dès lors, la condition de pourcentage de constituant "Rcu" est pratiquement atteinte ($63,49 [\%] < 70 [\%]$).

Il est important de noter que les fines ($<63 \mu\text{m}$) des granulats fins étudiés sont considérées comme un constituant "X". Ce test ne prend pas en compte la composition des particules fines des granulats ($<63 \mu\text{m}$). En effet, les particules fines sont considérées comme nuisibles car elles peuvent contenir une grosse fraction de "terreux" (argile, limon). Par contre, ces particules fines peuvent contenir des réactifs (favorables concernant la résistance finale du béton). Néanmoins, les fines de déchets de démolition contiennent souvent un taux de sulfate trop élevé à cause de la présence de plâtre.

La conclusion de cet essai est que les granulats fins recyclés étudiés dans le cadre de ce travail de fin d'études ne correspondent pas aux critères des granulats recyclés des normes européennes. Ainsi, les granulats fins étudiés ne peuvent pas être des composants d'un béton classique.

Par contre, aucune contre-indication n'est formulée quant à l'utilisation des granulats fins recyclés comme composant principal de briques comprimées stabilisées.

4.1.4 Résumé des analyses

Les granulats fins recyclés ont une masse volumique de 2389,1 [kg/m³] et une absorption d'eau de 4[%].

Ensuite, le pourcentage de fines (<63 [μm]) est de 28 [%] et la granulométrie des granulats fins recyclés n'est pas comparable aux granulométries des sables naturels.

Enfin, le résultat d'inspection visuelle démontre que les granulats fins recyclés étudiés sont proches des compositions "des granulats mixtes de type B+".

4.2 Caractérisations des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés

4.2.1 Processus de fabrication des briques

Confection des mélanges

Afin de réaliser des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés, il faut préparer un mélange de "béton". Les différents composants (eau, ciment et les granulats fins recyclés) sont pesés dans des seaux. Les différents volumes de chaque composant par mélange sont représentés aux FIGURES 5.7, 5.10, 5.13 et 5.17 de l'annexe C.

Ensuite, le mélange est réalisé suivant la procédure de malaxage définie à la SECTION 3.3.2.

A la fin de la procédure de malaxage, les mélanges sont placés dans des brouettes (FIGURES 5.8, 5.11, 5.14, 5.18 et 5.21 de l'annexe C). A ce stade, l'apparence du mélange est déjà déterminante. Si le mélange ressemble à du sable sans cohésion, il est trop sec. A l'inverse, si le mélange est luisant et s'agglomère dans la brouette, il est trop humide.

Test de chute : teneur optimale en eau "drop test"

Des tests de chute ont été réalisés pour tous les mélanges de type "R-E" et le mélange de type "R-VIII". Pour rappel, les mélanges "R-E" ont pour objectif d'étudier les changements de caractéristiques des briques pour des variations de quantité d'eau en gardant les masses des autres composants constantes. La méthodologie de cet essai figure à la SECTION 3.3.3.

Le test de teneur en eau optimale est normalement utilisé pour la confection des BTCs. Dans le cadre de ce travail, le même test sera appliqué aux mélanges de briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. L'objectif est de déterminer si ce test est applicable et efficace pour des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. Les photos prises durant les essais se trouvent aux FIGURES 5.16, 5.20 et 5.24 de l'annexe C. Les résultats des tests de teneur optimale en eau sont présentés au TABLEAU 4.4.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Fines de béton recyclé [%] | Test de chute : Teneur optimal en eau des mélanges | Masse volumique sèche des briques réalisées [kg/m^3] |
|---------|---------|------------|----------------------------|--|--|
| REF-1 | 14,3 | 9,5 | 76,2 | / | 1658,6 |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | Réussi/trop sec | 1649,3 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | Trop humide | 1618,3 |
| R-VIII | 12 | 8 | 80 | Réussi/trop sec | 1593 |

TABLE 4.4 – Résultats des essais de teneur en eau optimale

Les essais de teneur optimale en eau des mélanges R-E-VI et R-VIII présentent un taux

d'éparpillement important. Malgré tout, des pyramides pointues de mélange se sont quand même formées. Les essais sont donc pratiquement réussis mais seront notés "Réussi/trop sec".

L'essai de teneur optimale en eau du mélange R-E-VII est raté. La boulette de mélange s'est écrasée sur le sol en forme de disque compact. Le mélange est donc trop humide.

Cet essai a pour objectif de définir la quantité d'eau optimale du mélange afin de maximiser la compaction. L'objectif final de ce test est de limiter la porosité et de maximiser la masse volumique sèche d'une brique comprimée.

Le TABLEAU 4.4 exprime la relation entre l'essai de teneur en eau optimale et la masse volumique sèche des briques¹. Un test de teneur optimale en eau pour le mélange REF-I aurait permis d'affirmer qu'un test réussi maximise la masse volumique sèche d'une brique. La teneur en eau du mélange R-VIII est peut-être un peu trop faible. Une teneur en eau plus élevée (13 ou 14 %) aurait peut-être permis d'obtenir une masse volumique sèche plus élevée.

Confection des briques

La confection des briques est réalisée grâce à une presse manuelle "Terstaram" de l'entreprise APPRO-TECHNO. La poussée théorique maximale de la presse est de 15 tonnes. Dès lors, la contrainte maximale de compaction théorique en $[N/mm^2]$ d'une brique (14 [cm] de largeur et 29,5 [cm] de longueur) est obtenue :

$$\sigma_{max} = \frac{15 * 10^3 * g}{140 * 295} = \frac{15 * 10^3 * 9,81}{140 * 295} = 3,56[N/mm^2]$$

La contrainte maximale de compaction de la presse est de 3,56 [Mpa]. D'après la norme ARS 670, la presse est donc dans la catégorie des presses à "faible pression". Les presses les plus performantes peuvent comprimer les blocs à plus de 20 [Mpa].

De plus, étant une presse manuelle, la pression appliquée n'est pas constante d'une brique à l'autre. En effet, la pression appliquée dépend de l'intensité que l'opérateur exerce sur la presse. Ceci peut avoir des effets néfastes sur la suite des recherches de ce travail. De fait, un objectif de ce travail est de déterminer la composition optimale des mélanges. Néanmoins, cela peut entraîner des erreurs d'interprétation de résultats si la force de compaction n'est pas constante pour toutes les briques réalisées.

Un facteur relevé pendant la fabrication des briques est que le volume de mélange ajouté dans la presse n'est pas constant.

Premièrement, cela engendre que les hauteurs des briques ne sont pas régulières. La hauteur des briques varie entre 8 et 9,5 [cm]. Tandis que la norme NZS4298 prévoit des tolérances de dimensions (hauteur) de l'ordre de +/- 2 [mm]. [29]

Deuxièmement, le poids des briques sera variable d'une brique à l'autre. Le poids dépendra de la quantité de mélange inséré dans le moule qui n'est pas toujours le même

1. Le calcul des masses volumiques sèches des briques est réalisé à la SECTION 4.2.2. Les masses volumiques sèches des briques R-VIII sont calculées au TABLEAU 5.5 de l'annexe C.

d'une brique à l'autre.

Un point à souligner est la cadence de fabrication des briques. Selon la fiche technique de la presse, la cadence maximale est de 700 briques par jour. Alors que la cadence de réalisation de briques lors de ce travail de fin d'études est de 5 briques par demi-journée. La faible cadence de fabrication dépendait de la petite taille du malaxeur et aussi des erreurs de manutention des briques (briques cassées).

De nombreuses briques ont été cassées pendant leur phase de démoulage. Les briques à la sortie du moule restent très fragiles. Il était très difficile de transporter les briques de la presse jusqu'à leur lieu de cure. Par comparaison, les BTCs sont beaucoup plus résistantes lorsqu'elles sortent de la presse. Elles sont plus faciles à manipuler et à transporter jusqu'à leur lieu de cure. Cela démontre que la granulométrie des granulats fins recyclés n'est pas optimisée pour la confection de briques comprimées.

Le dernier mélange (R-VIII) a été choisi par rapport aux conclusions faites pour chacun des essais de caractérisations des briques. Il a été défini comme mélange "optimal". Les briques de ce mélange subiront des tests de caractérisations plus avancés.

4.2.2 Masse volumique

La masse volumique des briques est un bon indicateur de la résistance mécanique et de la durabilité des briques comprimées.

Il a été démontré que la densité était liée à la résistance en compression des briques. Une meilleure résistance à la compression est observée pour des briques dont la densité est plus élevée. De plus, la compaction permet de diminuer la porosité des briques.

Les masses volumiques des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ont été déterminées suivant la méthodologie de la SECTION 3.4.1. La masse volumique est mesurée pour toutes les briques à 0 jour et à 28 jours de cure humide. En raison de la cure humide des briques, la masse volumique à 28 jours est une masse volumique "humide". En effet, durant la cure humide, les briques vont en partie se saturer en eau.

La précision de calcul des masses volumiques des briques n'est pas toujours optimale. Des erreurs d'approximation de la masse volumique peuvent être causées par l'irrégularité de la surface des briques. Aussi, des erreurs d'approximation de la masse volumique peuvent survenir pour les briques dont l'encoche est remplie de mortier normalisé. En effet, la masse volumique de ces briques est calculée en retirant le poids de mortier contenu dans l'encoche. Néanmoins, l'approximation du poids de mortier contenu dans l'encoche (SECTION 3.4.1) peut manquer de précision.

L'ensemble des masses volumiques des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés se trouve aux TABLEAUX 5.3 et 5.4 de l'annexe C.

Le TABLEAU 4.5 est une table synthétique reprenant les masses volumiques moyennes des briques de chaque mélange réalisé.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Masse volumique moyenne à 0 jour [kg/m^3] | Masse volumique moyenne à 28 jours de cure humide [kg/m^3] |
|---------|---------|------------|--------------------------|---|--|
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 1945,4 | 1978,2 |
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | 1976,9 | 1990,1 |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 2021,5 | 2048,2 |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 1990,7 | 2032,4 |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 1907,0 | 1941,8 |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 1857,5 | 1962,4 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 1988,5 | 2000,8 |
| R-VIII | 12 | 8 | 80 | 1810,4 | 1899,5 |

TABLE 4.5 – Synthèse des masses volumiques des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés

Les masses volumiques humides à 28 jours de cure des briques comprimées recyclées sont comprises entre 1899,5 et 2048,2 [kg/m^3]. L'augmentation de masse volumique en 28 jours de cure humide est comprise entre 0,6 [%] et 5,6 [%] (respectivement R-E-VII et R-E-VI).

Les masses volumiques humides des briques comprimées recyclées sont plus faibles que celles des bétons classiques. La masse volumique d'un béton classique est de l'ordre de 2400 [kg/m^3]. Par contre, elles sont comparables à celles des BTCs stabilisées. La masse volumique des BTCs stabilisées est comprise entre 1700 et 2200 [kg/m^3].

Pour toutes les briques réalisées, les masses volumiques à 28 jours de cure sont plus élevées que les masses volumiques à 0 jour. Ceci est dû à la cure humide. En effet, la brique se sature en eau pendant la cure. Cela engendre une augmentation de masse.

Clément Kerckhove a réalisé des éprouvettes de béton damé manuellement à l'aide d'une dame métallique. Ces éprouvettes sont réalisées en damant le mélange par couche uniforme dans des éprouvettes cubiques de 15 [cm] de côté. Il a réalisé 15 éprouvettes de béton damé avec le mélange de type R-VIII. La masse volumique moyenne de ces blocs à 0 jour est de 1807 [kg/m^3] et à 28 jours de cure humide est de 1841 [kg/m^3]. [55] Par comparaison, la masse volumique moyenne des briques comprimées R-VIII est de 1810,4 [kg/m^3] à 0 jour et de 1899,5 [kg/m^3] à 28 jours de cure humide. Les masses volumiques moyennes des blocs et des briques sont pratiquement égales. Ainsi, la force de compaction est pratiquement la même pour une compaction manuelle à la dame ou une compaction à la presse mécanique.

La suite de cette section s'intéresse aux évolutions des masses volumiques des briques en fonction de la quantité de ciment et de la quantité d'eau.

L'influence de la quantité de ciment sur la masse volumique est étudiée en faisant varier la masse de ciment tout en gardant les masses des autres composants fixes (l'eau et

les granulats fins recyclés). Les variations de masse sont réalisées en partant du mélange de référence REF-I. Les mélanges R-C sont destinés à cette étude.

La même démarche est réalisée afin d'étudier l'influence de la quantité d'eau. Les mélanges R-E sont destinés à cette étude.

Influence de la quantité de ciment

Le TABLEAU 4.6 présente les résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques des briques comprimées réalisées. Les masses volumiques des briques sont étudiées pour des mélanges allant de 5[%] à 13,6 [%] de ciment.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Masse volumique moyenne à 0 jour [kg/m ³] | Masse volumique moyenne 28 jours de cure humide [kg/m ³] |
|---------|---------|------------|--------------------------|---|--|
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | 1976,9 | 1990 |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 1990,7 | 2032,4 |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 1907,0 | 1941,8 |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 1945,4 | 1978,1 |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 2021,5 | 2048 |

TABLE 4.6 – Étude de l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques

La FIGURE 4.2 est un graphique illustrant l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques humides à 28 jours et les masses volumiques à 0 jour des briques.

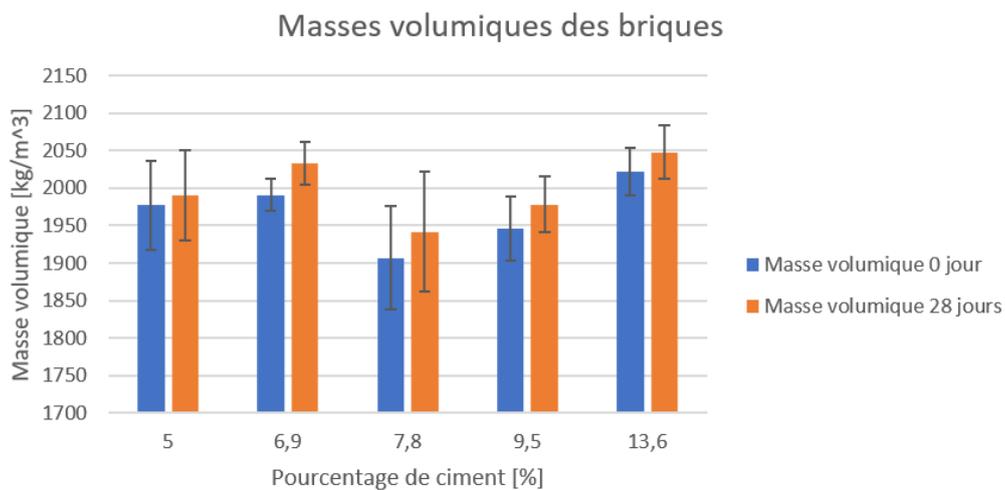


FIGURE 4.2 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les masses volumiques de briques

Une première constatation est que l'écart-type des masses volumiques des briques des différents mélanges est très élevé. Ce grand écart-type peut être dû à une compaction non-uniforme d'une brique à l'autre. De plus, une mauvaise approximation du poids du mortier contenu dans l'encoche de certaines briques peut être à l'origine d'erreurs d'approximation des masses volumiques.

Les briques dont les masses volumiques (0 jour et 28 jours) sont les plus élevées sont celles composées de 13,6 [%] de ciment. Dès lors, les briques dont les masses volumiques (0 jour et 28 jours) sont les plus élevées sont celles qui ont le pourcentage de ciment le plus élevé.

Aucune conclusion ne peut être formulée sur la relation liant la diminution de masse volumique d'une brique à la diminution de quantité de ciment. En effet, les briques de séries R-C-II et R-C-IV (5 et 6,9 [%] de ciment) ont des masses volumiques plus élevées (0 jour et 28 jours) que les briques R-C-V et REF-1 (7,8 et 9,5 [%] de ciment).

Néanmoins, il n'était pas attendu que la masse volumique R-C-IV (6,9 [%] de ciment) soit plus élevée que la masse volumique R-C-V (7,8 [%] de ciment) à 0 jour. L'influence de l'irrégularité de la compaction entre chaque brique peut expliquer ce phénomène. Aussi, il se peut que la teneur en eau des granulats fins recyclés ait été mal approximée. En effet, la teneur en eau des granulats était considérée à 0 [%] après leur passage en étuve. De ce fait, il se peut que les masses d'eau par mélange durant l'étude ne soient pas constantes.

Influence de la quantité d'eau

Le TABLEAU 4.7 présente les résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques des briques comprimées réalisées. Les masses volumiques des briques sont étudiées pour des mélanges allant de 11,8[%] d'eau à 15,1 [%].

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Masse volumique moyenne à 0 jour [kg/m^3] | Masse volumique moyenne 28 jours de cure humide [kg/m^3] |
|---------|---------|------------|--------------------------|---|--|
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 1857,5 | 1962,4 |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 1945,4 | 1978,2 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 1988,5 | 2000,8 |

TABLE 4.7 – Étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques

La FIGURE 4.3 est un graphique illustrant l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques humides à 28 jours et les masses volumiques à 0 jour des briques.

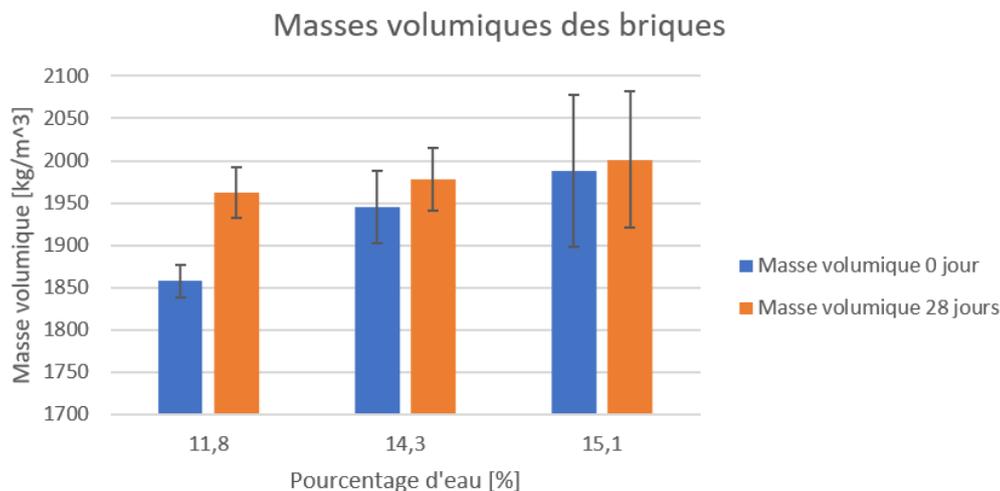


FIGURE 4.3 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques des briques

Les masses volumiques (0 et 28 jours) des briques augmentent lorsque le pourcentage d'eau augmente. Dès lors, aucune conclusion ne peut être réalisée sur l'influence de la quantité d'eau sur la qualité de la compaction des briques à partir de FIGURE 4.3.

Aussi, le pourcentage de masse volumique gagné en 28 jours de cure humide est de 0,6 [%], 1,6 [%] et 5,6 [%] (respectivement pour les briques de type R-E-VII, REF-1 et R-E-VI). Donc, plus le pourcentage d'eau des mélanges est élevé, moins les briques se satureront en eau pendant la cure humide.

Le TABLEAU 4.8 présente les masses sèches des briques R-VI-3, REF-I-1 et R-VII-3.

| | Masse sèche [g] | Masse volumique sèche [kg/m^3] |
|---------|-----------------|------------------------------------|
| R-VI-3 | 5855 | 1649,3 |
| REF-I-1 | 5203 | 1658,6 |
| R-VII-3 | 5745 | 1618,3 |

TABLE 4.8 – Etude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques sèches

La FIGURE 4.4 est un graphique illustrant l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques sèches des briques.

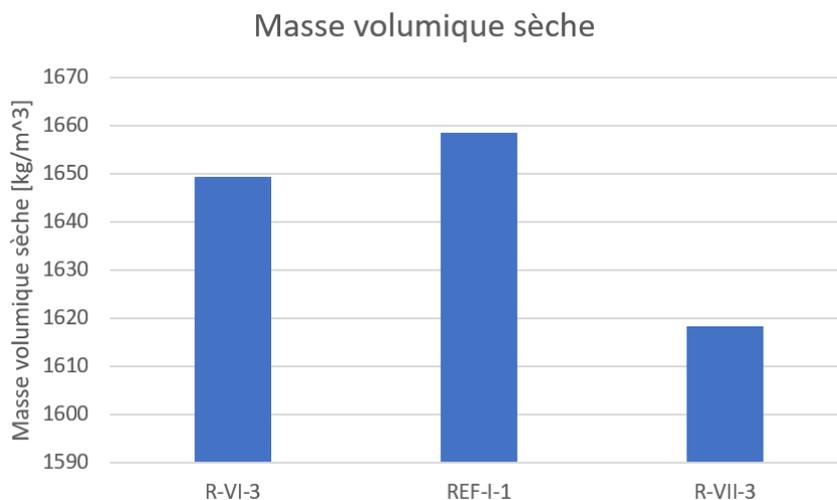


FIGURE 4.4 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les masses volumiques sèches

La masse volumique sèche de la brique REF-I-1 (14,3 [%] d'eau) est plus élevée que les masses volumiques sèches des briques R-VI-3 (11,6 [%] d'eau) et R-VII-3 (15,1 [%] d'eau).

Malgré qu'il s'agisse de données d'échantillons isolés, il semblerait que la teneur en eau du mélange REF-I-1 soit optimale. En effet, les masses volumiques des briques de teneur en eau inférieure (R-VI-3) ou supérieure (R-VII-3) sont plus faibles. Comme pour les BTCs, une teneur en eau optimale (définie par la courbe de proctor) maximise la masse volumique sèche.

4.2.3 Résistance en compression

Les résistances en compression ont été évaluées sur des échantillons à 28 jours de cure humide. Deux essais sur les briques sont distingués : l'essai sur cube de 65 [mm] et l'essai sur "2 demi-briques empilées". Les méthodologies de ces deux essais sont présentées à la SECTION 3.4.2. Un troisième essai est présenté dans cette section. Il s'agit d'un essai de compression réalisé sur des éprouvettes cubiques de 15 [cm]. Les éprouvettes ont été réalisées par Clément Kerckove en damant le mélange avec une dame métallique dans un coffrage cubique. [55] La vitesse de mise en charge est la même que pour les essais présentés à la SECTION 3.4.2.

Le résultat de compression simple (cubes de 65 [mm]) par type de mélange est obtenu en faisant la moyenne des résultats de 6 cubes provenant d'une même brique. Les briques utilisées sont les briques REF-I-3, R-C-II-1, R-C-III-1, R-C-IV-2, R-C-V-3, R-C-VI-1, R-C-VII-2 et R-C-VIII-11.

Les résultats de compression simple des essais de "2 demi-briques empilées" sont obtenus pour les échantillons REF-2, R-C-IV-1, R-C-V-1, R-C-VI-2, R-C-VII-1. Le résultat de compression simple des essais de "2 demi-briques empilées" des briques de type R-VIII

CHAPITRE 4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

est obtenu par la moyenne des résultats des essais réalisés sur les échantillons R-VIII-2 (5,13 [Mpa]), R-VIII-5 (5,19 [Mpa]), R-VIII-6 (3,05 [Mpa]).

Le TABLEAU 4.9 est un synthèse des résultats des essais de compression simple.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Résultat de compression simple à 28 jours de cure humide [Mpa] | | |
|---------|---------|------------|--------------------------|--|-------------------------|--|
| | | | | Cube 65 [mm] | 2 demi-briques empilées | Cube 15[cm] de coté de béton damé à la main [55] |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 7,85 | 5,95 | 3,25 |
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | 4,76 | | |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 10,51 | | |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 3,33 | 2,89 | 7,55 |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 7,14 | 5,55 | 5,85 |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 5,08 | 5,31 | 8,64 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 5,91 | 3,73 | 8,14 |
| R-VIII | 12 | 8 | 80 | 3,86 | 4,46 | 3,43 |

TABLE 4.9 – Synthèse des résistances en compression des briques

Premièrement, les résistances en compression sur tous les types d'échantillons de chaque mélange sont plus élevées que 2 [Mpa]. Ainsi, tous les échantillons répondent au critère de résistance minimale en compression simple de la norme NZS4298 (norme s'appliquant aux BTCs stabilisées).

Deuxièmement, les résistances des échantillons de type "2 demi-briques empilées" sont pour la plupart plus faibles que les résistances des échantillons cubiques de 65 [mm]. Ceci peut s'expliquer par leur facteur de forme. Le facteur de forme s'exprime comme suit : $F_m = \frac{\text{section comprimée}}{\text{surface totale latérale}}$. Plus ce rapport sera élevé, plus la résistance en compression sera surestimée. Le facteur de forme est de $F_m=0,25$ pour un cube. Le facteur de forme du montage de 2 demi-briques empilées provenant d'une brique de 9cm de hauteur est de $F_m = \frac{140*147,5}{2*(180*140)+2*(180*147,5)} = 0,2$. Dès lors, le facteur de forme est plus élevé pour les cubes de 65 [mm] que pour le montage de "2 demi-briques empilées". Il est donc attendu que les résistances en compression des cubes de 65 [mm] soient plus élevées que celles des " 2 demi-briques empilées" pour un même type de mélange.

Enfin, la plupart des résistances en compression des échantillons cubiques réalisés à la dame sont du même ordre de grandeur que les échantillons réalisés à la presse manuelle. Il a été prouvé à la SECTION 4.2.2 que la force de compaction était pratiquement la même entre les deux méthodes (à la dame ou à la presse manuelle). Les différences de résistances sont dues à la non-uniformité de compaction des deux méthodes. Aussi, les résistances sont comparées pour des tailles différentes d'échantillons .

La résistance moyenne en compression des échantillons du mélange optimisé R-VIII est de 3,86 et 4,46 [Mpa] (respectivement sur cubes de 65 [mm] et sur "2 demi-briques empilées"). Ces résistances sont inférieures à celles des échantillons R-C-V présentant des compositions pratiquement similaires en ciment. Cet écart peut être dû à la non-uniformité de compaction des briques ou au fait que la quantité d'eau du mélange R-C-V est plus optimale.

Influence de la quantité de ciment

Le TABLEAU 4.10 présente les résultats de l'analyse de l'influence de la quantité de ciment sur les tests de compression.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Résultat de compression simple à 28 jours de cure humide [Mpa] | |
|---------|---------|------------|--------------------------|--|-------------------------|
| | | | | Cube 65 [mm] | 2 demi-briques empilées |
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | 4,76 | |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 3,33 | 2,89 |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 7,14 | 5,55 |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 7,85 | 5,95 |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 10,51 | |

TABLE 4.10 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests de compression

La FIGURE 4.5 est un graphique reprenant les données du TABLEAU 4.10. Cette figure caractérise l'influence de la quantité de ciment sur l'évolution des résultats des essais de compression simple.

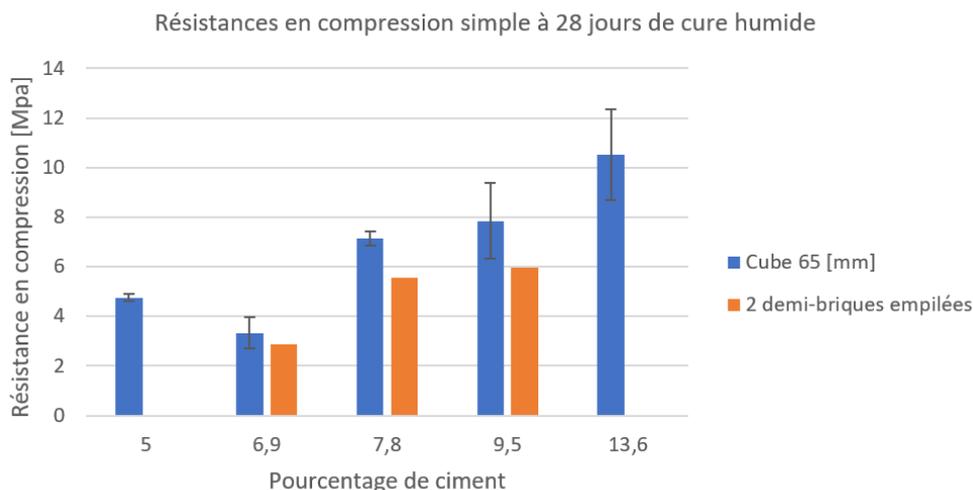


FIGURE 4.5 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les résultats des tests de compression

Pour les échantillons contenant respectivement 6.9, 7.8, 9.5 et 13,6 [%] de ciment, les résistances en compression augmentent lorsque la quantité de ciment augmente.

Les tendances d'augmentation des résistances sont les mêmes pour les tests réalisés sur cubes de 65 [mm] et sur "2 demi-briques empilées". Cela vient affirmer la pertinence des résultats de compression sur "2 demi-briques empilées". En effet, un seul échantillon par type de mélange est réalisé pour les tests de compression sur "2 demi-briques empilées". Il était donc nécessaire de vérifier la pertinence de ces résultats en raison du faible nombre d'échantillons.

Cependant, la résistance moyenne en compression réalisée sur cubes de 65 [mm] est plus élevée pour les échantillons contenant 5 [%] que pour ceux contenant 6,9 [%] de ciment. Cela peut être expliqué par le peu d'essais réalisés et la compaction non-uniforme des briques.

Influence de la quantité d'eau

Le TABLEAU 4.11 présente les résultats de l'analyse de l'influence de la quantité d'eau sur les tests de compression.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Résultat de compression simple à 28 jours de cure humide [Mpa] | |
|---------|---------|------------|--------------------------|--|-------------------------|
| | | | | Cube 65 [mm] | 2 demi-briques empilées |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 5,08 | 5,31 |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 7,85 | 5,95 |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 5,91 | 3,73 |

TABLE 4.11 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests de compression

La FIGURE 4.6 est un graphique reprenant les données du TABLEAU 4.11. Cette figure caractérise l'influence de la quantité d'eau sur l'évolution des résultats des essais de compression simple.

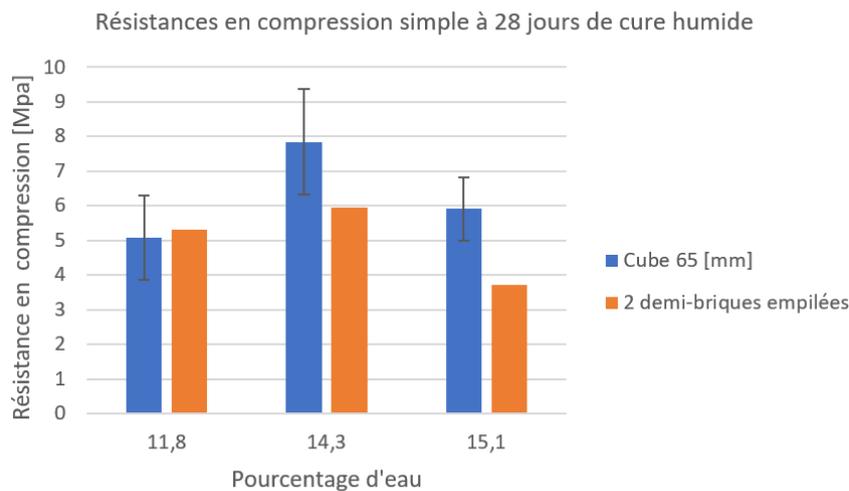


FIGURE 4.6 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les résultats des tests de compression

Tout d'abord, les résistances en compression réalisées sur cubes de 65 [mm] et sur "2 demi-briques empilées" suivent les mêmes tendances d'augmentation et de diminution de résistance en fonction du pourcentage d'eau des mélanges. Cela vient confirmer la pertinence des résultats de compression sur "2 demi-briques empilées".

Ensuite, la moyenne des résistances en compression des briques de type REF-I (14,3 [%] d'eau) est plus grande que la moyenne des résistances en compression des briques de type R-E-VI et R-E-VII (respectivement 11,8 et 15,1 [%] d'eau) pour les deux types d'essai. Il a été démontré que la masse volumique sèche d'un échantillon REF-I est plus élevée que les masses volumiques sèches des échantillons de type R-E-VI et R-E-VII (FIGURE 4.4). Dès lors, les résistances des briques comprimées dépendent de leurs masses volumiques sèches.

4.2.4 Tests de chute

Les photos des résultats des tests de chute (1 [m] de hauteur) des briques se trouvent aux FIGURES 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 et 5.32 de l'annexe C.

Le TABLEAU 4.12 est une synthèse des différents résultats obtenus pour les briques testées aux essais de chute NZS4298 et aux tests de chute de 1 [m] de hauteur. Les tests de chute ont été réalisés sur une seule brique. Les méthodologies des essais sont présentées à la SECTION 3.4.4.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Essai de chute NZS 4298 | Test de chute : hauteur de chute 1[m] |
|-----------|---------|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| REF-I-1 | 14,3 | 9,5 | 76,2 | OK | OK |
| R-C-II-2 | 15 | 5 | 80 | OK | NOK |
| R-C-III-2 | 13,6 | 13,6 | 72,8 | OK | OK |
| R-C-IV-3 | 14,7 | 6,9 | 78,4 | OK | NOK |
| R-C-V-2 | 14,5 | 7,8 | 77,7 | OK | Fissuré |
| R-E-VI-3 | 11,8 | 9,8 | 78,4 | OK | NOK |
| R-E-VII-3 | 15,1 | 9,4 | 75,5 | OK | NOK |
| R-VIII-15 | 12 | 8 | 80 | OK | NOK |

TABLE 4.12 – Synthèse des résultats des tests de chute

La dénomination OK signifie que le test est réussi. La dénomination NOK signifie que le test est raté.

Tout d'abord, toutes les briques testées ont réussi le test de chute NZS4298. Ce test est à l'origine prévu pour des BTCs stabilisées. Il se peut que ce test soit trop permissif pour les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés.

La brique réalisée avec le mélange optimisé R-VIII-15 ne valide pas le test de chute. Un essai réalisé sur un plus grand nombre d'échantillons serait préférable afin de valider ce résultat.

Influence de la quantité de ciment

Le TABLEAU 4.13 résume les résultats des tests de chute en fonction de la quantité de ciment des mélanges.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Essai de chute NZS 4298 | Test de chute : hauteur de chute 1[m] |
|---------|---------|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | OK | NOK |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | OK | NOK |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | OK | Fissuré |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | OK | OK |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | OK | OK |

TABLE 4.13 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests de chute

Toutes les briques testées dont le pourcentage de ciment est strictement supérieur à 7,8 [%] valident le test de chute de 1 [m]. Ce résultat peut s'expliquer par l'augmentation de la résistance des briques lorsque la quantité de ciment augmente. Le résultat du test de chute de l'échantillon R-C-V est pratiquement réussi mais une fissure est apparue à l'issue du test.

Influence de la quantité d'eau

Le TABLEAU 4.14 résume les résultats des tests de chute en fonction de la quantité d'eau des mélanges.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Essai de chute NZS 4298 | Test de chute : hauteur de chute 1[m] |
|---------|---------|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | OK | NOK |
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | OK | OK |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | OK | NOK |

TABLE 4.14 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests de chute

Les briques de type R-E-VI et R-E-VII ont échoué au test de chute de 1[m] de hauteur contrairement à REF-I. Les échantillons suivent les mêmes tendances tant pour les tests de chute que pour les essais de compression simple. En effet, il a été démontré que les échantillons REF-I ont de meilleures performances en compression simple que les 2 autres échantillons. Ainsi la brique de type REF-I obtient un meilleur résultat au test de chute pour les raisons expliquées à la sous-section nommée "Influence de la quantité de ciment" à la SECTION 4.2.3.

4.2.5 Résistance en traction

Le TABLEAU 4.15 reprend les résultats des essais de flexion réalisés sur les briques de type R-VIII. Les essais de flexion sont réalisés sur des barrettes de 4*4*16 [cm] découpées dans les briques. La méthodologie de l'essai est présentée à la SECTION 3.4.3.

| | | Contrainte maximale [Mpa] |
|------------|----------|---------------------------|
| R-VIII | R-VIII-1 | 1,28 |
| | | 1,91 |
| | R-VIII-3 | 1,49 |
| | | 1,91 |
| | R-VIII-4 | 2,22 |
| | Moyenne | 1,76 |
| Ecart-type | 0,4 | |

TABLE 4.15 – Résumé des essais de flexion sur les briques de type R-VIII

Les bornes maximales et minimales des résistances en traction des essais sont de 1,28 et 2,22 [Mpa]. La contrainte de traction moyenne est de 1,76 [Mpa].

La résistance en traction est 3 fois moins grande que la résistance en compression. Cette valeur est très élevée comparée aux bétons classiques. Pour un béton classique non armé, la résistance en traction est 10 fois moins élevée que sa résistance à la compression.

Cette contrainte maximale est similaire aux BTCs stabilisées qui présentent de bonnes caractéristiques en tension. La norme NZS 4298 impose aux briques comprimées une résistance à la traction minimum de : $\sigma > 0,25$ [Mpa]. Ainsi, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés valident ce standard.

4.2.6 Absorption d'eau par immersion

Pour un matériau poreux, la porosité est un critère déterminant concernant sa résistance et sa durabilité. La porosité est le résultat des vides présents dans les granulats et de l'évaporation de l'eau non nécessaire à l'hydratation du ciment. La porosité dépend aussi de l'intensité du compactage.

L'eau interstitielle est l'eau qui n'est pas liée physiquement ou chimiquement dans le matériau. En s'évaporant, l'eau interstitielle forme des pores capillaires. La porosité d'un béton est la somme du volume de ces capillaires.

L'absorption d'eau par immersion permet de caractériser la porosité d'un matériau. Elle permet donc d'évaluer les caractéristiques de résistance et de durabilité. La méthodologie de l'essai est précisée à la SECTION 3.4.6.

Le TABLEAU 5.6 de l'annexe C présente l'ensemble des mesures réalisées pour l'essai d'absorption d'eau par immersion. Tous les essais d'absorption d'eau ont été réalisés sur deux cubes de 65 [mm] d'une même brique à l'exception des briques R-VIII. Les essais d'absorption d'eau des briques R-VIII ont été réalisés sur 8 cubes de 65 [mm] prélevés sur la brique R-VIII-7. Les résultats d'absorption d'eau par immersion de la brique R-VIII-7 sont présentés au TABLEAU 5.7 de l'annexe C.

Le TABLEAU 4.16 est une synthèse des résultats d'absorption d'eau par immersion.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Absorption d'eau par immersion moyenne [%] |
|-----------|---------|------------|--------------------------|--|
| REF-I-3 | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 19,4 |
| R-C-II-1 | 15 | 5 | 80 | 19,0 |
| R-C-III-1 | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 15,6 |
| R-C-IV-2 | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 19,1 |
| R-C-V-3 | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 17,6 |
| R-E-VI-3 | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 21,5 |
| R-E-VII-2 | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 19,1 |
| R-VIII-7 | 12 | 8 | 80 | 16,3 |

TABLE 4.16 – Synthèse des résultats d'absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés est comprise entre 15,6 [%] et 21,5 [%]. L'absorption d'eau par immersion moyenne de R-VIII-7 est de 16,3 [%].

La norme NBN B 15-001 :2004 impose une absorption moyenne par immersion inférieure à 6 [%] pour un béton armé ($E/C=0,5$) pour une classe d'exposition EA2. L'absorption des briques comprimées est donc bien trop élevée pour les standards s'appliquant aux bétons.

L'absorption des BTCs se situe entre 4 et 20 [%]. La plupart des normes s'appliquant aux constructions en terre s'accordent à dire que la valeur d'absorption d'eau par immersion limite est de 20 [%]. Par analogie, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ont une forte absorption d'eau.

Influence de la quantité de ciment

Le TABLEAU 4.17 résume les résultats d'absorption d'eau en fonction de la quantité de ciment.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Absorption d'eau par immersion moyenne [%] |
|-----------|---------|------------|--------------------------|--|
| R-C-II-1 | 15 | 5 | 80 | 19,0 |
| R-C-IV-2 | 14,7 | 6,9 | 78,4 | 19,1 |
| R-C-V-3 | 14,5 | 7,8 | 77,7 | 17,6 |
| REF-I-3 | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 19,4 |
| R-C-III-1 | 13,6 | 13,6 | 72,8 | 15,6 |

TABLE 4.17 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les tests d'absorption d'eau par immersion

Le graphique présenté à la FIGURE 4.7 reprend les données d'absorption d'eau par

immersion du TABLEAU 4.17.

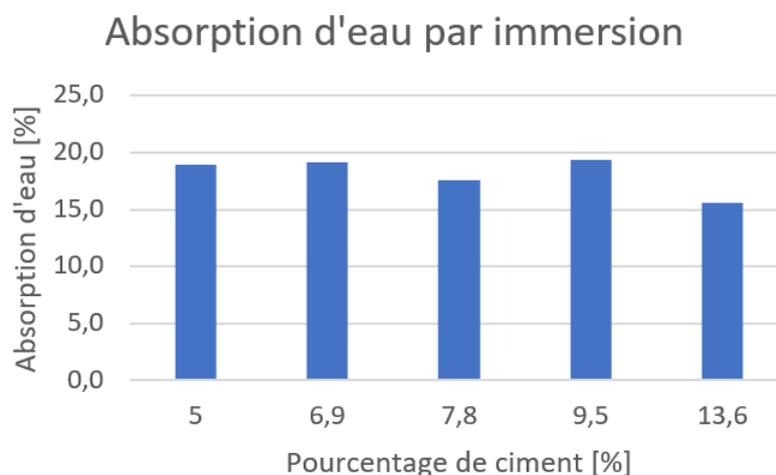


FIGURE 4.7 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité de ciment sur les résultats d'absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion moyenne est de 19 [%] pour les briques contenant 5[%] de ciment et de 15,6 [%] pour les briques contenant 15 [%] de ciment.

Néanmoins, les conditions d'essais (absorption réalisée sur cubes) et le nombre d'échantillons réduits conduisent à des incohérences.

Influence de la quantité d'eau

Le TABLEAU 4.18 résume les résultats d'absorption d'eau en fonction de la quantité de ciment.

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | Absorption d'eau par immersion moyenne [%] |
|-----------|---------|------------|--------------------------|--|
| R-E-VI-3 | 11,8 | 9,8 | 78,4 | 21,5 |
| REF-I-3 | 14,3 | 9,5 | 76,2 | 19,4 |
| R-E-VII-2 | 15,1 | 9,4 | 75,5 | 19,1 |

TABLE 4.18 – Résultats de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les tests d'absorption d'eau par immersion

Le graphique présenté à la FIGURE 4.8 reprend les données d'absorption d'eau par immersion du TABLEAU 4.18.

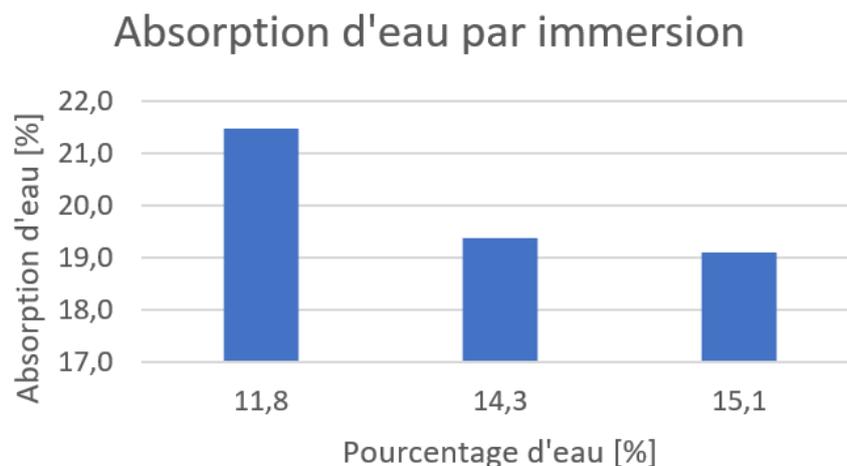


FIGURE 4.8 – Graphique de l'étude de l'influence de la quantité d'eau sur les résultats d'absorption d'eau par immersion

Pour un béton classique, l'absorption d'eau dépend de sa masse volumique sèche. Un béton de faible densité sèche présente généralement une porosité plus importante.

Par analogie, les résultats attendus d'absorption d'eau doivent être inversement proportionnels aux courbes de masses volumiques sèches. Néanmoins, les résultats montrent que l'absorption d'eau des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés est inversement proportionnelle au pourcentage d'eau contenu dans les mélanges.

De par les conditions d'essais (absorption réalisée sur cubes de 65 [mm]) et le nombre d'échantillons réduits, il se peut que les résultats d'absorption ne soient pas représentatifs.

4.2.7 Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé sur les briques R-VIII-8, R-VIII-9 et R-VIII-10. Les résultats de l'essai sont repris au TABLEAU 5.8 de l'annexe C.

La FIGURE 4.9 représente l'absorption capillaire moyenne des trois briques testées. Le coefficient "Cb" maximum, défini par la norme XP P13-901, est de 23,8 [$g/cm^2 min^{0,5}$].

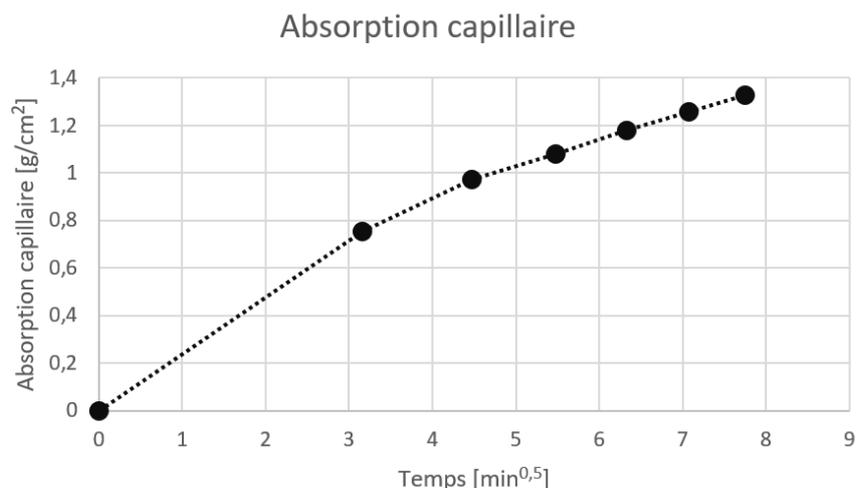


FIGURE 4.9 – Absorption capillaire des briques R-VIII

Selon la norme XP P13-901, les BTCs sont faiblement capillaires lorsque le coefficient d'absorption capillaire est inférieur à $20 \text{ [g/cm}^2 \text{ min}^{0,5}]$. Par comparaison aux BTCs, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ne sont pas considérées comme faiblement capillaires.

Selon la norme EN-772-11, la valeur maximale d'absorption capillaire d'un bloc de béton à usage extérieur est de $8 \text{ [g/m}^2\text{s}]$. Les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ne valident pas ce critère.

4.2.8 Test d'abrasion

L'essai d'abrasion a été réalisé selon la norme XP P13-901. La méthodologie de l'essai est présentée à la SECTION 3.4.5. Les résultats des tests d'abrasion réalisés sur 3 briques de type R-VIII se trouvent au TABLEAU 4.19. La FIGURE 5.33 de l'annexe C est une photo prise après l'essai d'abrasion de la brique R-VIII-12.

| | Masse avant abrasion [g] | Masse après abrasion [g] | Perte de masse [%] | Ca [cm ² /g] |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| R-VIII-12 | 6593 | 6574 | 0,29 | 3,88 |
| R-VIII-13 | 6603 | 6576 | 0,41 | 2,73 |
| R-VIII-14 | 6381 | 6352 | 0,46 | 2,54 |
| Moyenne | | | 0,39 | 3,05 |

TABLE 4.19 – Résultats des tests d'abrasion

La norme XP P13-901 est une norme s'appliquant aux BTCs. Le coefficient d'abrasion des BTCs doit être supérieur à $7 \text{ [cm}^2\text{/g]}$ afin de respecter les critères de durabilité de la norme XP P13-901. Pour des BTCs stabilisées à 9% de ciment, le coefficient d'abrasion est de l'ordre de $20 \text{ [cm}^2\text{/g]}$.

CHAPITRE 4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Or, le coefficient d'abrasion moyen des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés est de 3,05 [cm^2/g]. Ce coefficient d'abrasion est inférieur au standard des BTCs.

Le faible coefficient d'abrasion des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés peut s'expliquer par le fait que la granulométrie des granulats fins utilisés n'est pas optimale pour la confection de briques comprimées. En effet, il a été prouvé que la fraction d'élément supérieur à 2 [mm] des granulats fins était bien plus importante que pour des BTCs.

Chapitre 5

Conclusion

Ce travail étudie le comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés non-lavés. L'objectif de ce travail est de reproduire les méthodes des BTCs afin de confectionner des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. D'une part, les granulats fins recyclés ont été caractérisés par une série d'essais. D'autre part, les briques produites à partir de granulats fins recyclés ont été soumises à des essais servant à les comparer aux matériaux de construction existants.

Les essais de caractérisation démontrent que les granulats fins recyclés non-lavés ne peuvent être incorporés dans un béton classique selon les standards européens. La fraction de fines ($<63 \mu\text{m}$) est beaucoup trop élevée comparée aux standards européens. Aussi, les granulats fins recyclés ne répondent pas aux critères de pourcentages de constituants minimums des granulats recyclés définis par les normes européennes.

La résistance en compression des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés est comparable aux blocs de maçonnerie de faible résistance. Pour une quantité de ciment comprise entre 8 et 10 [%], la plupart des briques atteignent 5 [Mpa].

La résistance en traction des briques valide les résistances requises données par les standards de briques en terre crue. La résistance en traction d'une brique comprimée stabilisée à 8[%] de ciment produite à partir de granulats fins recyclés est de 1,76 [Mpa].

L'absorption d'eau par immersion d'une brique produite à partir de granulats fins recyclés est très élevée. Cette absorption (comprise entre 15,6 [%] et 21,5 [%]) est comparable à une brique de terre crue qui présente une forte absorption.

La résistance à l'abrasion des briques comprimées recyclées est un point à améliorer. Le test de la brosse de fer applicable aux BTCs a été utilisé afin de définir la résistance à l'abrasion des briques comprimées recyclées. Il en ressort que les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ne valident pas les standards minimums définis par les normes des BTCs.

Malgré tout, l'utilisation des granulats fins recyclés étudiés reste prometteuse. La forte utilisation des ressources naturelles et l'empreinte énergétique du secteur de la construction sont considérables. A contrario, les déchets de construction et de démolition représentent 1/3 du flux de déchets en Union européenne. Il est donc nécessaire d'envisager

ces déchets comme de futurs matériaux de construction.

L'utilisation de granulats recyclés provenant de déchets de construction est un domaine d'avenir. Les normes ne cessent d'évoluer afin de pouvoir proposer de nouvelles applications à ce qui était appelé des déchets. Des efforts sont réalisés afin de rendre le secteur de la construction plus vert. C'est dans ce sens que la recherche doit continuer à avancer et proposer de nouvelles alternatives quant aux matériaux de demain.

Limites

Ce travail étudie les propriétés mécaniques et de durabilité des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. La plupart des propriétés mécaniques et de durabilité ont été testées selon des normes s'appliquant aux BTCs. Il n'existe pas de norme ni de recommandation s'appliquant aux briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés. Aussi, le faible nombre d'échantillons et le faible nombre d'essais limitent les éventuelles conclusions que l'on pourrait tirer.

Recommandations

Les granulats fins recyclés ont été utilisés dans l'état où ils ont été reçus. Il aurait été intéressant de reproduire une courbe granulométrique optimisée à la confection de briques comprimées avec ces granulats. De ce fait, une courbe granulaire optimisée aurait peut-être permis d'atteindre de meilleures performances mécaniques et de durabilité.

Aussi, il serait intéressant d'étudier une section de mur complète réalisée à l'aide de briques comprimées recyclées. Enfin, des analyses peuvent être faites sur l'optimisation du choix du mortier de maçonnerie.

Perspective

Ce travail de fin d'études m'a permis de m'intéresser aux méthodes de construction plus respectueuses de l'environnement. L'application des granulats fins recyclés aux méthodes de construction en terre est un sujet très intéressant qui mérite d'être approfondi et étudié.

- [12] Long MAKARA. « Rammed Concrete with Recycled Fine Aggregates ». 2021 (pages 9, 13, 14, 45).
- [13] Torben C. HANSEN et Henrik NARUD. « Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate ». In : *Concrete International* 5(1) (1983), p. 79-83 (page 9).
- [14] Behera M., Minocha A.K., Bhattacharyya S.K. et Reyazur Rahman M. « Influence of SCMs on Flow Properties of Self-compacting Mortar Made with Recycled Fine Aggregate ». In : *Lecture Notes in Civil Engineering* 58 (2020), p. 143-155 (page 9).
- [15] Marta Sánchez de JUAN et Pilar Alaejos GUTIÉRREZ. « Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate ». In : *Construction Building Material* 23(2) (2009), p. 872-877 (page 11).
- [16] Yaprak HASBI, Aruntaş HÜSEYİN, Demir I., Simsek OSMAN et Durmuş GÖKHAN. « Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties ». In : *International Journal of the Physical Sciences* 6(10) (2011), p. 2455-2461 (page 11).
- [17] Zhao Z., Courard L., Michel F., Delvoie S., Bouarroudj M. E., Colman C. et Xiao J. « Properties of concrete with recycled construction and demolition waste : a research experience in Belgium ». In : *J. Xiao, Sustainable Structures and Materials*. China Architecture and Building Press (2018) (page 11).
- [18] L. COURARD, M.K. BOUARROUDJ, Ch. COLMAN, A. GRELLIER, Z. ZHAO, F. MICHEL, J. HUBERT, D. BULTEEL et S. REMOND. « Recycling fine particles from construction and demolition wastes : characterization and effects on concrete performances ». In : *Recycling and waste management Online Summit* (2021). URL : https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/265122/1/ULiege_LC_Nov18_slides.pdf (visité le 09/05/2022) (pages 11, 12).
- [19] « Première coulée de béton circulaire dans le Benelux ». 2022. URL : <https://zin.brussels/fr/news/premiere-coulee-de-beton-circulaire-dans-le-benelux/> (visité le 29/04/2022) (page 12).
- [20] Gernot MINKE. « Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture ». Birkhäuser – Publishers for Architecture. 2006 (pages 15-17, 26).
- [21] D. CIANCIO et C. BECKETT. « Rammed Earth Construction Cutting-Edge Research on Traditional and Modern Rammed Earth ». CRC press. 2015 (page 15).
- [22] Horst SCHROEDER. « Sustainable Building with Earth ». Springer. 2016 (page 15).
- [23] Actes du COLLOQUE INTERNATIONAL DE L'UNESCO SUR LA CONSERVATION DE L'ARCHITECTURE DE TERRE DU PATRIMOINE MONDIAL. « L'architecture de terre dans le monde d'aujourd'hui ». world heritage convention papers 36. 2012 (page 16).
- [24] B. V. Venkatarama REDDY. « Compressed Earth Block Rammed Earth Structures ». Springer. 2022 (pages 16, 24).
- [25] Lauris BIRZNIKS. « Designing and building with compressed earth ». 2013 (pages 16, 17, 19, 23).
- [26] R. HU et J. LIU. « Rescuing a sustainable heritage : Prospects for traditional rammed earth housing in China today and tomorrow ». In : *Rammed Earth Construction-*

- Proceedings of the 1st International Conference on Rammed Earth Construction* (2015), p. 27-32 (page 17).
- [27] « Colors Of the Earth : Ghana’s Incredible, Rammed Earth Walls ». 2022. URL : <https://www.archdaily.com/914736/colors-of-the-earth-the-incredible-designs-of-rammed-earth-walls-in-ghana> (visité le 19/04/2022) (page 18).
- [28] Piotr NARLOCH et Piotr WOYCIECHOWSKI. « Assessing Cement Stabilized Rammed Earth Durability in A Humid Continental Climate ». In : *Buildings* 10 n2 :26 (2020) (pages 18, 28, 29).
- [29] Standards new ZEALAND. « Materials and workmanship for earth buildings ». NZS 4298 :1998. 1998 (pages 19, 46, 47, 51, 54, 66).
- [30] « presse manuelle TERSTARAM ». URL : https://www.appro-techno.be/fr/page_presse-manuelle-terstaram_29.aspx (visité le 04/04/2022) (pages 20, 48).
- [31] « PRESSE AUTOMATIQUE TERSTAMATIQUE ». 2022. URL : https://www.appro-techno.be/fr/page_presse-terstamatique_66.aspx (visité le 19/04/2022) (page 20).
- [32] Giuffrida GIADA, Caponetto ROSA et Cuomo MASSIMO. « An overview on contemporary rammed earth buildings : technological advances in production, construction and material characterization ». In : *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. Éditions Parenthèses 296(1). 012018 (2019) (pages 21, 93, 95).
- [33] « Vikas Community at Auroville ». URL : <https://world-habitat.org/world-habitat-awards/winners-and-finalists/vikas-community-at-auroville/> (visité le 07/05/2022) (page 22).
- [34] Doctor E.A.ADAM et Professor A.R.A.AGIB. « Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan ». United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2001 (pages 23, 27, 30, 32, 55, 56, 58).
- [35] Bernard Morino GANOU KOUNGANG. « Construction en brique de terre comprimée et granulats biosourcés : une solution pour un habitat durable à Douala ». 2021 (pages 24, 25, 27).
- [36] B. V. Venkatarama REDDY. « Compressed Earth Block Rammed Earth Structures ». Springer. 2022 (pages 24, 26, 27).
- [37] Wojciech ROGALA, Hubert ANYSZ et Piotr NARLOCH. « Designing the Composition of Cement-Stabilized Rammed Earth with the Association Analysis Application ». In : *Materials* 14(6) (2021) (pages 25, 94).
- [38] « ARS 670 : 1996 - Compressed earth blocks - Standard for terminology ». Norme. 1996 (page 25).
- [39] H. N. ABHILASH. « Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE ». Springer. 2022 (pages 25, 31).
- [40] Jean-Claude MOREL. « Performance mécaniques de l’adobe ». 2009 (page 26).

- [41] Nshimiyimana PHILBERT. « Effect of the type of clay earthen materials and substitution materials on the physico mechanical properties and durability of compressed earth blocks ». 2020 (page 27).
- [42] Lavie Arsène Mango ITULAMYA. « Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée ». 2019 (pages 27, 53).
- [43] P. MEUKAM. « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique des bâtiments ». 2004 (page 28).
- [44] C. EGENTI et J. M. KHATIB. « EFFECTS OF SHELL ELEMENT ON SHELLED COMPRESSED EARTH MASONRY UNITS ». In : *First International Conference on Bio-based Building Materials* (2015) (page 29).
- [45] O. IZEMMOURENA et A. GUETTALA. « Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra ». In : *MATEC Web of Conferences 11 : 02001* (2014) (page 29).
- [46] Satprem MAINI. « Building the future with earth using compressed stabilized earth block (CESB) ». Auroville earth institute UNESCO chair earthen architecture. 2012. URL : <https://www.grihaindia.org/events/ncgd/2012/pdf/satprem.pdf> (visité le 09/05/2022) (page 30).
- [47] Fetra Venny RIZA, Ismail Abdul RAHMAN et Ahmad Mujahid Ahmad ZAIDI. « A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB) ». In : *International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)* (2010), p. 999-1004 (page 31).
- [48] Manuel Contreras LLANES, Maximina Romero PÉREZ et Manuel Jesús Gázquez GONZÁLEZ. « Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving ». In : *Environ Sci Pollut Res 29* (2022), p. 9826-9840 (pages 33, 34, 36).
- [49] M.M. SABAI, M.G.D.M. COXN, R.R. MATO, E.L.C. EGMOND et J.J.N. LICHTENBERG. « Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania ». In : *Resources. Conservation and Recycling 72* (2013), p. 9-19 (page 35).
- [50] Gyanendra Kumar ATTRI, R.C. GUPTA et Sandeep SHRIVASTAVA. « Impact of recycled concrete aggregate on mechanical and durability properties of concrete paver blocks ». In : *Materials Today : Proceedings 42(2)* (2021), p. 975-981 (page 36).
- [51] Varela Alberte EP. « Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición ». Universidad Politécnica de Catalunya, Spain. 2012 (page 36).
- [52] Md. Uzzal HOSSAIN, Dongxing XUAN, S. Thomas NG et Ben AMOR. « Designing sustainable partition wall blocks using secondary materials : A life cycle assessment approach ». In : *Journal of Building Engineering 43* (2021) (pages 37, 38, 95).
- [53] « Haïti : le témoignage bouleversant de l'écrivain Dany Laferrière ». URL : https://www.lemonde.fr/ameriques/article/2010/01/16/haiti-le-temoignage-bouleversant-de-l-ecrivain-dany-laferriere_1292475_3222.html (visité le 04/05/2022) (page 38).

- [54] Matteo ANGELI. « aggregate analysis and brick production of waste material ». Université de Liège. 2022 (pages 40, 42, 63, 98, 99).
- [55] Clément KERCKHOVE. « Comportement thermomecanique de murs en béton damé avec fines de recyclage ». Université de Liège. 2022 (pages 40, 43, 44, 61, 68, 72, 73).
- [56] « NBN EN 933-1 Test for geometrical properties of aggregates ». European standard, norme européenne. 2012 (pages 40, 41).
- [57] Norme EUROPÉENNE. « NBN EN 12620+A1 Granulats pour béton ». 2008 (page 42).
- [58] « EN 1097-6 :2022 ». European standard, norme européenne. 2022 (page 45).
- [59] « EN 772-1 + A1 ». European standard, norme européenne. 2015 (page 50).
- [60] M. OLIVIER, A. MESBAH, Z. El GHARBI et J.C. MOREL. « Mode opératoire pour la réalisation d’essais de résistance sur blocs de terre comprimée ». In : *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* 30 (1997), p. 515-517 (page 51).
- [61] Jean-Claude MOREL, Abalo PKLA et Peter WALKER. « Compressive strength testing of compressed earth blocks ». *Construction and building materials*. 2007, p. 303-309 (page 51).
- [62] David MIRAUCOURT. « Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso ». 2017 (page 51).
- [63] XP P13-901. « Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons, Définitions-Spécifications-Méthodes d’essais-Conditions de réception ». 2001 (pages 52, 55, 57).
- [64] « Testing Bricks at Site | Quality of Clay Bricks | Visual and Experimental Tests for Quality Bricks ». URL : <https://civildigital.com/testing-bricks-at-site-quality-of-clay-bricks-visual-and-experimental-tests-for-quality-bricks/> (visité le 09/05/2022) (page 55).

Annexe A

Table 1. Quantitative data on the market of recycled and natural sands and aggregates in NW European countries. Abbreviations: C&DW = construction and demolition wastes; CBTC = concrete-bricks-tiles-ceramics; N/A = not applicable; RS&A = recycled sands and aggregates; modified from [4].

| | Belgium | | | | France | Germany | Luxembourg | Netherlands | | | |
|---|----------|---------|----------|----------------------------|-------------------|---------|------------------|---|----------|----|-------|
| | Flanders | | Wallonia | | | | | | Brussels | | Total |
| | Yes | No | Yes | No | | | | | Yes | No | |
| Waste production | 15 | 5-7 | 0.5 | -22 | 64 | 83.5 | 0.5-0.6 | 23.2 | | | |
| Quantity of inert C&DW excl. soils and stones (in Mtyr) | 2.3 | 1.4-2.0 | 0.4 | -1.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9-1.0 | 1.4 | | | |
| Quantity of inert C&DW excl. soils and stones (in t/capita) | 12.6 | 4.1-5.7 | 0.4 | 17.1-18.7 | -38 | 54.6 | 0.25-0.3 | 19-20 | | | |
| Quantity of CBTC (in Mtyr) | 2.0 | 1.1-1.6 | 0.3 | 1.5-1.6 | -0.6 | 0.7 | 0.4-0.5 | 1.1-1.2 | | | |
| Quantity of CBTC (in t/capita) | 13 | 3.5 | -0 | 16.5 | 21.4 ^a | 66 | 1.8 ^b | 18 ^c | | | |
| Quantity RS&A (in Mtyr) | 2.0 | 1.0 | -0 | 1.5 | 0.3 ^a | 0.8 | 3.1 ^b | 1.0 ^c | | | |
| Quantity RS&A (in t/capita) | 87 | 50-70 | | -75 | 33 ^a | 79 | | 78 ^c | | | |
| Proportion of RS&A compared to the quantity of inert C&DW (excl. soils and stones) (in %) | 46 | 6 | | 18-20 | 7 ^a | 13 | | 18-25 ^d | | | |
| Proportion of RS&A compared to total production of sands & aggregates (in %) | | | | | | | | | | | |
| Ban for inert C&DW landfilling | Yes | Yes | N/A | N/A | No | No | No | Yes | | | |
| Number of recycling plants | -200-250 | -100 | | -350 | -400 | 2,073 | -30 | -150 | | | |
| Type of facilities | | | | 80% stationary, 20% mobile | | | Mainly mobile | 35% crushing, 20% sorting, 45% crushing & sorting | | | |
| Density of recycling plants (per 1,000 km ²) | -16 | -5 | | -11 | -0.6 | -6 | -12 | -4 | | | |
| Quantity of natural aggregates and sands (in Mtyr) | 15 | 55-60 | 0 | 70-75 | 300 | 450 | -1 | 55-80 ^d | | | |
| Quantity of natural aggregates and sands (in t/capita) | 2 | 15-17 | 0 | 6-7 | 4-5 | 5 | -2 | 3-5 ^d | | | |
| Number of extraction sites | | | | -200 | -2,300 | -3,000 | -13 | -295 | | | |
| Density of extraction sites (per 1,000 km ²) | | | | -7 | -4 | -8 | -5 | -7 | | | |

^a The French production of RS&A is largely underestimated since the quantity of on-site recycled materials in not taken into account in the national statistics and is difficult to estimate accurately.

^b The referred quantity of RS&A in Luxembourg is largely overestimated since it includes excavated soils and stones.

^c The referred quantity of RS&A in the Netherlands is produced by BRSS's members (national federation of C&DW recyclers). This quantity could be slightly underestimated.

^d The referred data is calculated for the regular extraction activity of natural materials in the Netherlands.

FIGURE 5.1 – Déchets de construction et de démolition en Europe [2]

Annexe B

| Nation | Standards | Guidelines | Earth technique | | | |
|------------------------|---|---|-----------------|-----|-------|-----|
| | | | RE | CEB | Adobe | COB |
| Australia | | HB 195 (2002) | x | x | x | - |
| France | XP P 13-901 (2001) | | - | x | - | - |
| Germany | | Lehmbau Regeln (1999) | x | x | x | - |
| New Mexico | NMAC 14.7.4 (2000) | | x | x | x | - |
| New Zealand | NZS 4297 (1998) NZS 4298 (1998) NZS 4299 (1998) | | x | x | x | - |
| Peru | N E.080 | | x | - | x | - |
| Regional Africa | ARSO (1996) | | - | x | - | - |
| Spain | UNE 41410(2008) | | - | x | - | - |
| United Kingdom | | Rammed Earth Design and Construction Guideline (2004) | x | - | - | - |
| Zimbabwe | SAZS 724 (2001) | | x | - | - | - |

FIGURE 5.2 – Normes des constructions en terre [32]

| No | Clay(%) | Silt(%) | Sand(%) | Gravel(%) | Cement(%) | Water(%) | Density(kg/m ³) | Compressive_strength(Mpa) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|----------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2062.04 | 6.65 |
| 2 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2058.33 | 6.69 |
| 3 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2070.37 | 6.85 |
| 4 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2063.58 | 6.87 |
| 5 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2090.74 | 7.22 |
| 6 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2070.37 | 7.27 |
| 7 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2075.93 | 7.82 |
| 8 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2065.74 | 7.89 |
| 9 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 6.0% | 8.0% | 2062.04 | 7.89 |
| 10 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2055.56 | 7.95 |
| 11 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2069.44 | 8.69 |
| 12 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2062.96 | 9.56 |
| 13 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2071.30 | 9.87 |
| 14 | 15.9% | 14.9% | 31.0% | 38.2% | 9.0% | 8.0% | 2079.63 | 10.18 |
| 15 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2109.35 | 10.80 |
| 16 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2113.55 | 10.88 |
| 17 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2117.76 | 10.96 |
| 18 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2104.67 | 11.17 |
| 19 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2114.95 | 11.25 |
| 20 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2108.41 | 11.36 |
| 21 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 6.0% | 7.0% | 2112.15 | 11.54 |
| 22 | 4.2% | 18.5% | 47.3% | 30.0% | 9.0% | 7.0% | 2082.24 | 13.04 |

FIGURE 5.3 – Résistances en compression d'échantillons de terre crue stabilisée[37]

| Type of Product | Use | Picture of the product | Materials |
|---------------------------------|---|--|---|
| Cladding earth panels | Counterwalls, false ceilings and partitions |  | Matrix: clay, sand, natural fibers Reinforcement: glass fiber net or juta net |
| Insulations earth panels | Insulation panels for walls |  | Matrix: clay, sand, natural fibers Reinforcement: glass fiber net or juta net |
| Radiating earth panels | Radiating Panels with coils, for walls and ceilings |  | Matrix: clay, sand, natural fibers Reinforcement: glass fiber net Internal multilayer pipe |
| Radiating earth panels | Electrically powered radiating panels |  | Matrix: clay, sand, natural fibers Reinforcement: glass fiber net Internal pierced carbon fiber film |
| Ready-made mixed for RE | Rammed earth walls or cladding made on site |  | Matrix: clay, sand, gravel Stabilizers: Portland Cement, Lime, Aluminosilicates |
| Prefabricated RE panels | Rammed earth walls or cladding |  | Matrix: clay, sand, gravel Stabilizers: Portland Cement, Lime, GGBS (Ground granulated blast furnace slag), Aluminosilicates |

FIGURE 5.4 – Produits préfabriqués existants sur le marché[32]

| Type of mixture | Binder | | | | Aggregate | |
|-----------------|--------|------|------|------|-----------|------|
| | OPC | CSW | GBFS | FA | FRCA | RGA |
| M1 | 1 | – | – | – | – | 7.00 |
| M2 | 0.50 | 0.50 | – | – | 3.5 | 3.5 |
| M3 | – | 0.50 | 0.50 | – | 5.0 | 2.0 |
| M4 | – | 0.50 | – | 0.50 | 7.00 | – |

FIGURE 5.5 – Mélanges à faible énergie grise de béton recyclé [52]

Annexe C

Analyse granulométrique

| Ouverture des tamis [mm] | Masse de refus Ri Echantillon 1 [g] | Masse de refus Ri Echantillon 2 [g] | Moyenne des refus Ri des Echantillons [g] | Pourcentage de refus [%] : (100 Ri/M1) | Pourcentage cumulé s'écoulant [%] (100-SOMME(100*Ri/M1)) |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|
| 8 | 20 | 14 | 17 | 1,6 | 98,4 |
| 6,3 | 35 | 41 | 38 | 3,6 | 94,8 |
| 4 | 68 | 76 | 72 | 6,8 | 88,0 |
| 2 | 107 | 113 | 110 | 10,4 | 77,6 |
| 1 | 80 | 85 | 82,5 | 7,8 | 69,7 |
| 0,5 | 70 | 76 | 73 | 6,9 | 62,8 |
| 0,25 | 130 | 138 | 134 | 12,7 | 50,1 |
| 0,125 | 154 | 168 | 161 | 15,2 | 34,9 |
| 0,063 | 68 | 73 | 70,5 | 6,7 | 28,2 |
| Masse totale sèche de l'essai (M1) | 1028,5 [g] | 1081 [g] | | | |

TABLE 5.1 – Analyse granulométrique des granulats fins recyclés

Inspection visuelle

| | |
|---|------------------|
|  | Pierre Jaune |
|  | Pierre calcaire |
|  | Bois |
|  | Béton 1 |
|  | Béton 2 |
|  | Bitume |
|  | Céramique |
|  | Verre |
|  | Pierre naturelle |
|  | Brique |

FIGURE 5.6 – Description des éléments de l'inspection visuelle [54]

| | Echantillon 1 [g] | Echantillon 2 [g] | Catégorie d'éléments | Moyenne des masses des éléments [g] | Pourcentage de masse [%] |
|---|----------------------|----------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| Masse sèche de l'échantillon | 500 | 498 | | | |
| Masse sèche de l'échantillon (>63 [μm]) | 365 | 380 | | | |
| Masse sèche de l'échantillon (>2mm) | 116 | 119 | | | |
| Pierre jaune | 3 | 5,1 | | | |
| Pierre calcaire | 2,5 | 2,3 | Ru | 12,8 | 7,8 |
| Pierre naturelle | 5,5 | 7,2 | | | |
| Céramique | 1 | 1 | X | 1,2 | 28,7 |
| Bois et plastique | 0,2 | 0,2 | | | |
| Béton 1 | 65,6 | 60,6 | | | |
| Béton 2 | 26,1 | 28 | Rc | 90,1 | 55,5 |
| Bitume | 0 | 1,8 | Ra | 0,9 | 0,55 |
| Verre | 0,4 | 0,7 | Rg | 0,55 | 0,33 |
| Brique | 11 | 11,3 | Rb | 11,1 | 6,8 |
| Total | 115,3 | 118,2 | | | |

TABLE 5.2 – Résultats de l'essai d'inspection visuelle des différents échantillons [54]

Confection du mélange R-C-IV



FIGURE 5.7 – Quantité des composants du mélange R-C-IV



FIGURE 5.8 – Mélange R-C-IV



FIGURE 5.9 – Brique comprimée réalisée avec le mélange R-C-IV

Confection du mélange R-C-V



FIGURE 5.10 – Quantité des composants du mélange R-C-V



FIGURE 5.11 – Mélange R-C-V



FIGURE 5.12 – Brique comprimée réalisée avec le mélange R-C-V

Confection du mélange R-E-VI



FIGURE 5.13 – Quantité des composants du mélange R-E-VI



FIGURE 5.14 – Mélange R-E-VI



FIGURE 5.15 – Brique comprimée réalisée avec le mélange R-E-VI



FIGURE 5.16 – Essai de teneur en eau optimale du mélange R-E-VI



Confection du mélange R-E-VII



FIGURE 5.17 – Quantité des composants du mélange R-E-VII



FIGURE 5.18 – Mélange R-E-VII





FIGURE 5.19 – Brique comprimée réalisée avec le mélange R-E-VII



FIGURE 5.20 – Essai de teneur en eau optimale du mélange R-E-VII



Confection du mélange R-VIII



FIGURE 5.21 – Mélange R-VIII





FIGURE 5.22 – Brique comprimée réalisée avec le mélange R-VIII



FIGURE 5.23 – Essai de teneur en eau optimale du mélange R-VIII



FIGURE 5.24 – Essai de teneur en eau optimale du mélange R-VIII

Masses volumiques des briques à 28 jours de cure humide

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | | Hauteur des briques [cm] | Volume [cm ³] | Poids 0 jour [g] | Masse volumique 0 jour [kg/m ³] | Masse volumique moyenne 0 jour [kg/m ³] | Poids 28 jours [g] | Masse volumique 28 jours [kg/m ³] | Masse volumique moyenne 28 jours [kg/m ³] |
|---------|---------|------------|--------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|------------------|---|---|--------------------|---|---|
| REF-I | 14,3 | 9,5 | 76,2 | REF-I-1 | 8 | 3136,84 | 6060 | 1931,9 | 1945,4 | 6153,0 | 1961,5 | 1978,2 |
| | | | | REF-I-2 | 7,5 | 2930,34 | 5600 | 1911,0 | | 5720,0 | 1952,0 | |
| | | | | REF-I-3 | 8,5 | 3343,34 | 6664 | 1993,2 | | 6757,0 | 2021,0 | |
| R-C-II | 15 | 5 | 80 | R-C-II-1 | 9 | 3549,84 | 7256 | 2044,0 | 1976,9 | 7308,0 | 2058,7 | |
| | | | | R-C-II-2 | 9 | 3549,84 | 6849 | 1929,4 | | 6900,0 | 1943,7 | 1990,1 |
| | | | | R-C-II-3 | 9 | 3549,84 | 6948 | 1957,3 | | 6986,0 | 1968,0 | |
| R-C-III | 13,6 | 13,6 | 72,8 | R-C-III-1 | 8,5 | 3343,34 | 6684 | 1999,2 | 2021,5 | 6762,0 | 2022,5 | 2048,2 |
| | | | | R-C-III-2 | 9,5 | 3756,34 | 7677 | 2043,7 | | 7790,0 | 2073,8 | |
| R-C-IV | 14,7 | 6,9 | 78,4 | R-C-IV-1 | 8,5 | 3343,34 | 6724 | 2011,2 | 1990,7 | 6902,6 | 2064,6 | |
| | | | | R-C-IV-2 | 8,5 | 3343,34 | 6582 | 1968,7 | | 6722,6 | 2010,7 | 2032,4 |
| | | | | R-C-IV-3 | 8,5 | 3343,34 | 6661 | 1992,3 | | 6760,0 | 2021,9 | |
| R-C-V | 14,5 | 7,8 | 77,7 | R-C-V-1 | 9 | 3549,84 | 7043 | 1984,0 | 1907,0 | 7215,6 | 2032,6 | |
| | | | | R-C-V-2 | 9 | 3549,84 | 6696 | 1886,3 | | 6794,0 | 1913,9 | 1941,8 |
| | | | | R-C-V-3 | 9 | 3549,84 | 6570 | 1850,8 | | 6670,0 | 1879,0 | |
| R-E-VI | 11,8 | 9,8 | 78,4 | R-E-VI-1 | 8,5 | 3343,34 | 6268 | 1874,8 | 1857,5 | 6671,6 | 1995,5 | |
| | | | | R-E-VI-2 | 9 | 3549,84 | 6517 | 1835,9 | | 6879,6 | 1938,0 | 1962,4 |
| | | | | R-E-VI-3 | 9 | 3549,84 | 6609 | 1861,8 | | 6935,0 | 1953,6 | |
| R-E-VII | 15,1 | 9,4 | 75,5 | R-E-VII-1 | 8,5 | 3343,34 | 6942 | 2076,4 | 1988,5 | 6958,6 | 2081,3 | |
| | | | | R-E-VII-2 | 9 | 3549,84 | 7073 | 1992,5 | | 7103,6 | 2001,1 | 2000,8 |
| | | | | R-E-VII-3 | 9 | 3549,84 | 6733 | 1896,7 | | 6816,0 | 1920,1 | |

TABLE 5.3 – Masses volumiques des briques comprimées réalisées

| | Eau [%] | Ciment [%] | Granulat fin recyclé [%] | | Hauteur des briques [cm] | Volume [cm ³] | Poids 0 jour [g] | Masse volumique 0 jour [kg/m ³] | Masse volumique moyenne 0 jour [kg/m ³] | Poids 28 jours [g] | Masse volumique 28 jours [kg/m ³] | Masse volumique moyenne 28 jours [kg/m ³] |
|--------|---------|------------|--------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|------------------|---|---|--------------------|---|---|
| R-VIII | 12 | 8 | 80 | R-VIII-1 | 9 | 3549,84 | 6378 | 1796,7 | | / | | |
| | | | | R-VIII-2 | 8,5 | 3343,34 | 6106 | 1826,3 | | / | | |
| | | | | R-VIII-3 | 8,5 | 3343,34 | 6208 | 1856,8 | | / | | |
| | | | | R-VIII-4 | 8,5 | 3343,34 | 6242 | 1867,0 | | / | | |
| | | | | R-VIII-5 | 9 | 3549,84 | 6402 | 1803,5 | | / | | |
| | | | | R-VIII-6 | 8,5 | 3343,34 | 5795 | 1733,3 | | / | | |
| | | | | R-VIII-7 | 8,5 | 3343,34 | 6032 | 1804,2 | | | 1859,8 | |
| | | | | R-VIII-8 | 9 | 3549,84 | 6309 | 1777,3 | 1810,4 | | 1848,3 | 1848,6 |
| | | | | R-VIII-9 | 8,5 | 3343,34 | 5935 | 1775,2 | | | 1846,1 | |
| | | | | R-VIII-10 | 9 | 3549,84 | 6453 | 1817,8 | | | 1824,9 | |
| | | | | R-VIII-11 | 9 | 3549,84 | 6534 | 1840,6 | | | 1847,1 | |
| | | | | R-VIII-12 | 9 | 3549,84 | 6533 | 1840,4 | | | 1848,5 | |
| | | | | R-VIII-13 | 9 | 3549,84 | 6303 | 1775,6 | | | 1853,9 | |
| | | | | R-VIII-14 | 8,5 | 3343,34 | 6208 | 1856,8 | | | 1896,0 | |
| | | | | R-VIII-15 | 9 | 3549,84 | 6262 | 1764,0 | | | 1812,8 | |

TABLE 5.4 – Masses volumiques des briques comprimées réalisées de type R-VIII

| | Volume [cm ³] | Masse volumique 28 jours de cure humide [kg/m ³] | Masse sèche 1 [g] | Masse sèche 2 [g] | Masse volumique sèche [kg/m ³] |
|----------|------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|--|
| R-VIII-8 | 3550 | 1848,252316 | 5606 | 5607 | 1579 |
| R-VIII-9 | 3343 | 1846,058133 | 5281 | 5281 | 1580 |
| R-VII-10 | 3550 | 1824,87098 | 5747 | 5746 | 1619 |
| Moyenne | | | | | 1593 |

TABLE 5.5 – Masses volumiques sèches des briques R-VIII

Test de chute : 1 [m] de hauteur



FIGURE 5.25 – Résultat de test de chute d'une brique de type REF-I



FIGURE 5.26 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-II



FIGURE 5.27 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-III



FIGURE 5.28 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-IV



FIGURE 5.29 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-C-V



FIGURE 5.30 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-E-VI



FIGURE 5.31 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-E-VII



FIGURE 5.32 – Résultat de test de chute d'une brique de type R-VIII

Absorption d'eau par immersion

| | Masse saturée en eau 1 [g] | Masse saturée en eau 2 (24h00 d'intervalle avec masse saturée en eau 1) [g] | Pourcentage de différence masses saturées en eau [%] | Masse sèche 1 [g] | Masse sèche 2 (24h00 d'intervalle la masse sèche 1) [g] | Pourcentage de différence masses sèches [%] | Absorption d'eau par immersion [%] | Absorption moyenne [%] |
|-----------|----------------------------|---|--|-------------------|---|---|------------------------------------|------------------------|
| REF-I | 602,44 | 602,91 | 0,078 | 504,17 | 504,13 | -0,008 | 19,54 | 19,4 |
| REF-I | 614,45 | 614,85 | 0,065 | 515,57 | 515,51 | -0,012 | 19,22 | |
| R-C-II-A | 549,7 | 549,14 | -0,102 | 461 | 460,94 | -0,013 | 19,19 | 19,0 |
| R-C-II-B | 555,38 | 555,01 | -0,067 | 467,52 | 467,42 | -0,021 | 18,77 | |
| R-C-III-A | 599,77 | 599,41 | -0,060 | 519,26 | 519,25 | -0,002 | 15,47 | 15,6 |
| R-C-III-B | 598,7 | 598,32 | -0,063 | 517,36 | 517,35 | -0,002 | 15,69 | |
| R-C-IV-A | 589,88 | 589,44 | -0,075 | 492,18 | 492,06 | -0,024 | 19,82 | 19,1 |
| R-C-IV-B | 534,31 | 533,87 | -0,082 | 451,16 | 451,02 | -0,031 | 18,40 | |
| R-C-V-A | 580,85 | 580,55 | -0,052 | 493,68 | 493,67 | -0,002 | 17,63 | 17,6 |
| R-C-V-B | 587,81 | 587,47 | -0,058 | 499,77 | 499,75 | -0,004 | 17,58 | |
| R-E-VI-A | 575,31 | 574,75 | -0,097 | 468,69 | 468,61 | -0,017 | 22,70 | 21,5 |
| R-E-VI-B | 623,13 | 622,93 | -0,032 | 518,03 | 517,98 | -0,010 | 20,27 | |
| R-E-VII-A | 594,15 | 594,06 | -0,015 | 498,57 | 498,53 | -0,008 | 19,17 | 19,1 |
| R-E-VII-B | 628,59 | 627,95 | -0,102 | 527,88 | 527,58 | -0,057 | 19,05 | |

TABLE 5.6 – Résultats obtenus des essais d'absorption d'eau par immersion

| | Masse saturée en eau 1 [g] | Masse saturée en eau 2 (24h00 d'intervalle avec masse saturée en eau 1) [g] | Pourcentage de différence masses saturées en eau [%] | Masse sèche 1 [g] | Masse sèche 2 (24h00 d'intervalle la masse sèche 1) [g] | Pourcentage de différence massique des masses sèches [%] | Absorption d'eau par immersion [%] | Absorption moyenne [%] |
|----------|----------------------------|---|--|-------------------|---|--|------------------------------------|------------------------|
| R-VIII-7 | 594,07 | 593,81 | -0,044 | 513,91 | 513,93 | 0,004 | 15,57 | |
| | 568,57 | 567,40 | -0,206 | 492,05 | 492,03 | -0,004 | 15,43 | |
| | 565,77 | 565,72 | -0,009 | 484,72 | 484,75 | 0,006 | 16,71 | |
| | 567,94 | 567,45 | -0,086 | 487,25 | 487,25 | 0,000 | 16,51 | 16,32 |
| | 604,88 | 604,3 | -0,096 | 518,39 | 518,41 | 0,004 | 16,63 | |
| | 604,65 | 604,2 | -0,074 | 519,92 | 519,96 | 0,008 | 16,25 | |
| | 538,12 | 537,46 | -0,123 | 457,13 | 457,12 | -0,002 | 17,65 | |
| | 568,2 | 567,94 | -0,046 | 490,13 | 490,44 | 0,063 | 15,87 | |

TABLE 5.7 – Résultats d'absorption d'eau par immersion de la brique R-VIII-7

Essai d'absorption capillaire

| | | Masse de la brique lors de l'essai d'absorption capillaire [g] | | | | | |
|-----------|-----------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Masse sèche [g] | 10 [min] | 20 [min] | 30 [min] | 40 [min] | 50 [min] | 60 [min] |
| R-VIII-8 | 5606 | 5920 | 5997 | 6036 | 6071 | 6100 | 6123 |
| R-VIII-9 | 5281 | 5661 | 5755 | 5804 | 5850 | 5891 | 5925 |
| R-VIII-10 | 5747 | 5988 | 6087 | 6134 | 6171 | 6202 | 6228 |

TABLE 5.8 – Masses des briques R-VIII lors de l'essai d'absorption capillaire

Test d'abrasion



FIGURE 5.33 – Résultat du test d'abrasion sur la brique R-VIII-12