

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Valorisation de sable recyclé et de fines de lavage dans des briques comprimées à faible impact environnemental

Auteur : Quarto, Kassandra

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23249>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Valorisation de sable recyclé et de fines de lavage dans des briques comprimées à faible impact environnemental

Travail de fin d'étude réalisé par

Kassandra Quarto

en vue de l'obtention du grade de

master "Ingénieur Civil en Architecture"

Promoteur : **L. COURARD**

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Année académique : 2024–2025

Résumé

Dans un contexte où le secteur de la construction est l'un des principaux producteurs de déchets et contributeurs d'une grande partie des émissions de CO_2 , il est nécessaire d'agir efficacement sur ces problématiques. La consommation des ressources naturelles, notamment du sable naturel, constitue un enjeu environnemental, et l'utilisation de sables recyclés représente une alternative écologique, en continuité avec les recherches déjà menées sur les granulats recyclés.

Ce travail de fin d'études s'inscrit à la suite d'un travail de recherche élaborant des briques comprimées. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de valoriser des sables mixtes recyclés et des fines de lavage en optimisant les formulations les plus prometteuses pour atteindre des résistances à la compression comparables à celles de blocs ou de briques de construction. Ces formulations permettront de produire un matériau résistant et à faible impact environnemental.

Pour ce faire, différents mélanges sont formulés en faisant varier à la fois la teneur en eau, la teneur en ciment et la quantité de matières recyclées. Contrairement aux attentes, la meilleure formulation est celle contenant 30 % de fines de lavage ajoutées. Ce résultat montre une avancée dans la recherche qui révèle un comportement inattendu des fines, comparable à un "granulat". La résistance à la compression du matériau formulé atteint 11,6 MPa. Ces tests sont réalisés après une série d'essais de caractérisation des deux matériaux recyclés. L'influence du mode de cure, de la force et de la vitesse de compaction ainsi que l'absorption d'eau (aux alentours de 19 %) sont analysées, permettant d'atteindre des performances dépassant 15,5 MPa pour une pression de compaction de 15 MPa.

Les résultats montrent qu'il est tout à fait possible de produire des briques à base de matières recyclées, avec des performances dans certains cas supérieures à celles des blocs de béton traditionnels. Ce travail ouvre la voie à d'autres recherches visant à mieux caractériser le nouveau rôle que peuvent prendre les fines, à approfondir l'analyse de cycle de vie du matériau et à envisager sa mise en œuvre sur le terrain.

Mots-clés : sable recyclé, fines de lavage, briques comprimées, optimisation des mélanges, résistance à la compression, durabilité, cure, absorption d'eau.

Abstract

In a context where the construction sector is one of the main producers of waste and a major contributor to CO_2 emissions, it is imperative to take effective action on these issues. The consumption of natural resources, in particular natural sand, is an environmental issue, and the use of recycled sand represents an ecological alternative, in line with the research already carried out on recycled aggregates.

This end-of-studies project follows on from a research project developing compressed bricks. As part of this study, the aim is to make the most of recycled mixed sands and washing fines by optimising the most promising formulations to achieve compressive strengths comparable to those of building blocks or bricks. These formulations will make it possible to produce a resistant material with a low environmental impact.

To achieve this, different mixes are formulated by varying the water content, the cement content and the quantity of recycled materials. Contrary to expectations, the optimal formulation was found to contain 30 % added washing fines. This result represents a breakthrough in research, which has shown that fines behave in an unexpected way, comparable to "aggregates". The compressive strength of the formulated material reached 11.6 MPa. These tests were carried out after a series of characterisation tests on the two recycled materials. The influence of the curing method, the force and speed of compaction and the water absorption (around 19 %) were analysed, resulting in performances in excess of 15.5 MPa for a compaction pressure of 15 MPa.

The results show that it is entirely possible to produce bricks from recycled materials, in some cases with better performance than traditional concrete blocks. This work paves the way for further research aimed at better characterising the new role that fines can take on, further analysing the life cycle of the material and considering its implementation in the field.

Key words : recycled sand, washing fines, compressed bricks, mix optimisation, compressive strength, durability, curing, water absorption.

Remerciements

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mon promoteur, le Professeur Luc Courard, pour son aide précieuse, sa disponibilité tout au long de l'année et ses conseils.

Ensuite, je souhaite remercier tout particulièrement Romain Libert ainsi que Julien Troquay, qui m'ont accompagnée et guidée tout au long de ce travail de recherche. Merci à eux pour leur bienveillance et le temps qu'ils ont consacré à ce projet.

Je tiens également à remercier toute l'équipe du laboratoire, et plus particulièrement Amaury Daras, pour sa disponibilité, son accueil et son aide dans le bon déroulement des essais.

Il est important pour moi de remercier le jury de mon travail de fin d'études, Benoît Bissonnette, Shady Attia ainsi que Sophie Grigoletto pour l'intérêt qu'ils portent à ma recherche.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour le soutien constant qu'ils m'ont apporté, non seulement durant la réalisation de ce travail, mais également tout au long de ces cinq années d'études.

Merci à tous.

Table des matières

Introduction	1
Objectif	3
1 État de l'art	5
1.1 Briques et blocs de construction	5
1.1.1 Maçonnerie en blocs de béton	5
1.1.1.1 Blocs de béton traditionnels	5
1.1.1.2 Blocs de béton cellulaire	6
1.1.1.3 Blocs de béton d'argile expansée	7
1.1.1.4 Briques de laitier	8
1.1.2 Blocs minéraux	9
1.1.2.1 Blocs silico-calcaires	9
1.1.2.2 Blocs de terre cuite	10
1.1.2.3 Blocs de plâtre	12
1.1.3 Blocs écologiques et biosourcés	13
1.1.3.1 Blocs en chaux-chanvre	13
1.1.3.2 Briques de terre comprimée	14
1.1.3.3 Bottes de paille	16
1.1.4 Synthèse des matériaux	18
1.2 Fraction fine recyclée	19
1.2.1 Recyclage des déchets de construction	19
1.2.2 Sables recyclés	21
1.2.2.1 Morphologie et composition	21
1.2.2.2 Masse volumique	21
1.2.2.3 Demande en eau	21
1.2.3 Fines recyclées	22
1.2.3.1 Teneur en fines	22
1.2.3.2 Nature des fines	23
1.2.3.3 Fines de lavage	24
1.2.4 Mortier et béton à base de fraction fine recyclée	24
1.2.4.1 Impact sur les propriétés à l'état frais du béton	25
1.2.4.2 Impact sur les propriétés à l'état durci du béton	26
1.2.5 Briques comprimées à base de fraction fine recyclée	28
1.2.6 Applications	30
1.3 Durabilité	31
1.3.1 Généralités	31
1.3.1.1 Caractérisation de la microstructure	32
1.3.1.2 Propriétés de transport	32
1.3.2 Durabilité des blocs comprimés	33
1.3.2.1 Résistance à la compression humide	33
1.3.2.2 Absorption d'eau	34

1.3.2.3	Résistance à l'érosion	35
1.3.2.4	Résistance à l'abrasion	35
2	Partie expérimentale	37
2.1	Méthodologie	37
2.2	Matériaux	38
2.2.1	Fines recyclées : F0-5	38
2.2.2	Sable recyclé : SMR 0/2	39
2.2.3	Ciment	39
2.2.4	Eau	40
2.3	Caractérisation des matériaux	41
2.3.1	Caractérisation des fines recyclées	41
2.3.1.1	Teneur en eau par séchage en étuve ventilée	41
2.3.1.2	Demande en eau	42
2.3.1.3	Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz	45
2.3.1.4	Granulométrie laser	47
2.3.2	Caractérisation du sable recyclé	48
2.3.2.1	Analyse granulométrique	48
2.3.2.2	Coefficient d'absorption d'eau et masse volumique réelle	49
2.3.2.3	Teneur en eau	51
2.4	Fabrication des briques comprimées	52
2.4.1	Formulation des briques	52
2.4.1.1	Recettes	52
2.4.1.2	Optimisation des recettes	55
2.4.1.3	Recettes optimisées	56
2.4.2	Fabrication des briques	56
2.4.2.1	Protocole de fabrication	56
2.4.2.2	Presse manuelle	57
2.4.2.3	Presse hydraulique	59
2.4.3	Cure des briques	61
2.5	Caractérisation des briques comprimées	62
2.5.1	Caractérisation : Briques comprimées	62
2.5.1.1	Brûlage	62
2.5.1.2	Masse volumique des briques	62
2.5.1.3	Résistance à la compression	63
2.5.2	Caractérisation : Briques optimisées	63
2.5.2.1	Teneur en eau des briques	63
2.5.2.2	Absorption	64
2.5.3	Caractérisation : Brique optimale	65
2.5.3.1	Modes de cure	65
2.5.3.2	Force de compaction	66
2.5.3.3	Vitesse de chargement	67
2.5.3.4	Variabilité	67
3	Résultats et discussions	68
3.1	Caractérisation des matériaux	68
3.1.1	Caractérisation des fines recyclées	68

3.1.1.1	Teneur en eau par séchage en étuve ventilée	68
3.1.1.2	Demande en eau	68
3.1.1.3	Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz	70
3.1.1.4	Granulométrie laser	71
3.1.2	Caractérisation du sable recyclé	72
3.1.2.1	Analyse granulométrique	72
3.1.2.2	Coefficient d'absorption d'eau et masse volumique réelle .	75
3.1.2.3	Teneur en eau	76
3.2	Recettes	78
3.2.1	Presse manuelle	78
3.2.2	Brûlage	79
3.2.3	Choix de la composition à optimiser	80
3.3	Optimisation des recettes	83
3.4	Recettes optimisées	86
3.4.1	Comparaison des résultats estimés et réels	86
3.4.2	Résistance à la compression	88
3.4.3	Masse volumique	89
3.4.4	Teneur en eau	90
3.4.5	Absorption d'eau	91
3.5	Recette optimale	93
3.5.1	Modes de cure	93
3.5.2	Force de compaction	94
3.5.3	Vitesse de chargement	96
3.5.4	Variabilité	97
4	Conclusions	98
4.1	Contributions	98
4.2	Limites	98
4.3	Perspectives	99
	Bibliographie	100
	Normes	105
	Annexes	107
Annexe 1	Quantités des recettes A et B	107
Annexe 2	Résultats - Demande en eau des fines	108
Annexe 3	Résultats - Brûlage des recettes A et B	110
Annexe 4	Résultats - Résistance et masse volumique de la recette A	111
Annexe 5	Résultats - Optimisation des recettes	112
Annexe 6	Résultats - Recettes optimisées	113
Annexe 7	Résultats - Recette optimale	114

Liste des figures

0.1	Composition du gisement de déchets industriels en Wallonie (Gouvernement wallon, 2018)	1
0.2	Structure du travail	4
1.1	Types de blocs en béton (Courard, 2021)	5
1.2	Bloc de béton cellulaire (Cox et al., 2009)	7
1.3	Macrocellules (Cox et al., 2009)	7
1.4	Granulats d'argile expansée (Courard, 2021)	8
1.5	Bloc d'Argex (Courard, 2021)	8
1.6	Brique de laitier perforée (Courard, 2021)	9
1.7	Blocs silico-calcaires (Xella, 2021)	10
1.8	Fabrication des blocs de terre cuite (FBB, s.d.)	11
1.9	Types de briques de terre cuite (Courard, 2021)	12
1.10	Blocs de plâtre (ABLG, 2025)	13
1.11	Cloison en blocs de plâtre (ABLG, 2025)	13
1.12	Blocs de chaux-chanvre (IsoHemp, 2024)	14
1.13	Briques de terre comprimée (Qualitropic, 2024)	15
1.14	Presse de compactage (Mahdad et al., 2014)	15
1.15	Techniques de construction en paille (RFCP, 2016)	17
1.16	Déchets inertes (FEREDECO et al., 2023)	19
1.17	Granulats recyclés (FEREDECO et al., 2023)	20
1.18	Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange (SPW, 2025)	23
1.19	Densité apparente du mortier frais par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)	25
1.20	Densité apparente du mortier durci par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)	26
1.21	Résistance à la compression du mortier durci à 28 jours en fonction du taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)	27
1.22	Résistance à la flexion du mortier durci à 28 jours en fonction du taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)	27
1.23	Absorption d'eau due à l'action capillaire du mortier durci par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)	27
1.24	Relation entre la résistance à la compression et les variations des pourcentages d'eau, de ciment et de granulats fins recyclés (Rayeesulhaq et al., 2024)	28
1.25	Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours (Rayeesulhaq et al., 2024)	29
1.26	Perméabilité, résistance à la compression et porosité (Courard, 2023)	33
1.27	Résistance à la compression humide et sèche pour différents taux de ciment (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016)	33
1.28	Absorption d'eau pour différents taux de ciment (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016)	34
1.29	Test d'abrasion (Wiomont, 2022)	36

2.1	Méthodologie	37
2.2	Blocs de fines initiaux	38
2.3	Big bag	38
2.4	Bidon hermétique	38
2.5	Big bag	39
2.6	Bidon hermétique	39
2.7	Ciment de haut-fourneau	40
2.8	Échantillons pesés	41
2.9	Échantillons dans l'étuve	41
2.10	Fines compressées	42
2.11	Fines humidifiées	43
2.12	Fines broyées pour l'essai de besoin en eau	44
2.13	Essai β_P	45
2.14	Broyeur à disque	46
2.15	Broyage des fines	46
2.16	Mélange eau/fines	48
2.17	Hydro 2000S	48
2.18	Colonne de tamis	49
2.19	Pycnomètre rempli de sable et d'eau	50
2.20	Détermination de la masse réelle saturée à surface sèche	50
2.21	Protocole de fabrication des briques	57
2.22	Presse Terstaram	58
2.23	Double moule carré	58
2.24	Mélange piqué 20 fois	58
2.25	Sens d'utilisation	58
2.26	Première compaction	59
2.27	Deuxième compaction	60
2.28	Démoulage de la brique	60
2.29	Cure des briques	61
2.30	Résistance à la compression des briques	63
2.31	Teneur en eau	64
2.32	Compaction	64
2.33	Absorption d'eau	65
2.34	Modes de cure	66
2.35	Force de compaction	67
3.1	Courbe de Gauss - Demande en eau F0-4	70
3.2	Courbe de Gauss - Masse volumique absolue F0-5	71
3.3	Courbe granulométrique - F5	71
3.4	Valeurs percentiles	72
3.5	Triangle textural (Foot & Sinnett, 2006)	72
3.6	Courbe granulométrique - SMR 0/2	73
3.7	Courbe granulométrique - SMR 0/2 et sable naturel	74
3.8	Courbe de Gauss - Absorption d'eau SMR 0/2	76
3.9	Méthode "classique" et capteur dans la presse	78
3.10	Évolution de la force appliquée en fonction de la dimension du capteur	79

3.11	Evolution de la teneur en eau par brûlage des recettes A et B	79
3.12	Résistance à la compression à 7 jours - Optimisation des recettes	83
3.13	Résistance à la compression à 28 jours - Optimisation des recettes	84
3.14	Fines agglomérées	87
3.15	Agglomérats	87
3.16	Résistance à la compression normalisée (fb) - Comparaison	88
3.17	Masse volumique moyenne - Comparaison	89
3.18	Résistance à la compression en fonction de la masse volumique	90
3.19	Coefficient d'absorption d'eau	92
3.20	Influence du mode de cure sur A8 - Optimale	93
3.21	Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale	95
3.22	Influence de la vitesse de chargement sur A8 - Optimale	96
4.1	Demande en eau $F_{0,r}$	108
4.2	Demande en eau $F_{1,r}$	108
4.3	Demande en eau $F_{2,r}$	108
4.4	Demande en eau $F_{3,r}$	109
4.5	Demande en eau $F_{4,r}$	109
4.6	Évolution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours - Recette A	111
4.7	Évolution de la masse volumique à 7 et 28 jours - Recette A	111
4.8	Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale - Masse volumique . . .	114

Liste des tableaux

1.1	Propriétés des blocs pleins de béton traditionnels (Coeck, 2025)	6
1.2	Propriétés des blocs cellulaires (Courard, 2021)	7
1.3	Propriétés des blocs pleins de béton d'argile expansée (Claesen beton, s.d.)	8
1.4	Propriétés des briques pleines de laitier (Contern, s.d.)	9
1.5	Propriétés des blocs pleins silico-calcaires (Xella, 2021)	10
1.6	Propriétés des briques pleines en terre cuite (Wienerberger, 2019)	12
1.7	Propriétés des blocs de plâtre (Knauf, s.d. ; Binti Katman et al., 2022)	13
1.8	Propriétés des blocs pleins en chaux-chanvre (IsoHemp, 2024)	14
1.9	Propriétés des BTC (Cycle Terre BTC, s.d.)	16
1.10	Propriétés des BTCS (Cycle Terre BTCs, s.d.)	16
1.11	Propriétés des bottes de paille (Isol'en Paille, s.d.)	17
1.12	Tableau de comparaison	18
1.13	Facteur de forme δ (NBN EN 772-1+A1 :2015)	18
1.14	Valeurs limites d'absorption d'eau (NBN B 15-001 :2004)	35
2.1	Paramètres - Recette A	53
2.2	Paramètres - Recette B	53
2.3	Formulation des recettes A et B	54
2.4	Optimisation des recettes	55
2.5	Compositions optimisées et optimale	56
3.1	Teneur en eau des fines du lot 5	68
3.2	Teneur en eau initiale et masse d'eau à ajouter pour humidifier les fines	69
3.3	Rapports E/F théoriques et réels testés pour la demande en eau des fines	69
3.4	Beta P	70
3.5	Masse volumique absolue F0-4 - Variabilité	70
3.6	Pourcentages massiques limites de passant (NBN EN 13242+A1 :2008)	72
3.7	Analyse granulométrique	73
3.8	Pourcentages de fines dans le SMR 0/2	74
3.9	Absorption d'eau et masse volumique réelle	75
3.10	Teneur en eau du SMR 0/2	77
3.11	Force appliquée en fonction de la dimension du capteur	78
3.12	Résistance à la compression à 7 jours - Recette A	80
3.13	Choix de la composition à optimiser - Teneur en ciment/fines	81
3.14	Choix de la composition à optimiser - Force de compaction	82
3.15	Synthèse des compositions optimales - 7 jours	83
3.16	Synthèse des compositions optimales - 28 jours	84
3.17	Teneurs en eau optimales et théoriques à 7 et 28 jours	85
3.18	Résistances estimées et réelles	86
3.19	Résistance à la compression moyenne (R_c) et normalisée (f_b)	88
3.20	Masse volumique moyenne	89
3.21	Teneur en eau	90

3.22	Coefficient d'absorption d'eau	91
3.23	Influence du mode de cure sur A8 - Optimale	93
3.24	Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale	95
3.25	Influence de la vitesse de chargement sur A8 - Optimale	96
3.26	Influence de la variabilité de A8 - Optimale	97
4.1	Quantités des recettes A et B	107
4.2	Brûlage	110
4.3	Résistance et masse volumique à 7 et 28 jours	112
4.4	Brûlage	112
4.5	Brûlage	113
4.6	Résistance à la compression normalisée (fb) - 7 jours	113
4.7	Résistance à la compression normalisée (fb) - 28 jours	113
4.8	Résistance à la compression normalisée (fb) - 28 jours - Force de compaction .	114

Liste des abréviations

BTC : Brique de terre comprimée

BTCS : Brique de terre comprimée stabilisée

SMR : Sable mixte recyclé non lavé

F0-4 : Fines de lavage du lot 0 à 4 (variabilité)

F5 : Fines de lavage du lot 5 (caractérisation)

Introduction

Un des enjeux principaux concernant la durabilité et la préservation de l'environnement est la réduction de l'impact environnemental du secteur de la construction. Les problèmes environnementaux actuels proviennent, le plus souvent, des activités de l'homme (Navarro et al., 2018).

En effet, selon Zhao et al. (2022), la consommation de ressources naturelles et la production de déchets de construction et de démolition (Construction and Demolition Waste, C&DW) ne cessent d'augmenter. En 2014, cette production s'élevait à 868 millions de tonnes dans l'Union européenne (Zhao et al., 2022) contre 461 millions de tonnes en 2005 (Ledesma et al., 2015). La production de C&DW a presque doublé en neuf ans.

En Wallonie, 13,2 millions de tonnes de déchets industriels ont été recensés en 2013. Selon le graphique présenté sur la Figure 0.1, les déchets de construction (45,8 %) ont l'impact le plus important (Gouvernement wallon, 2018).

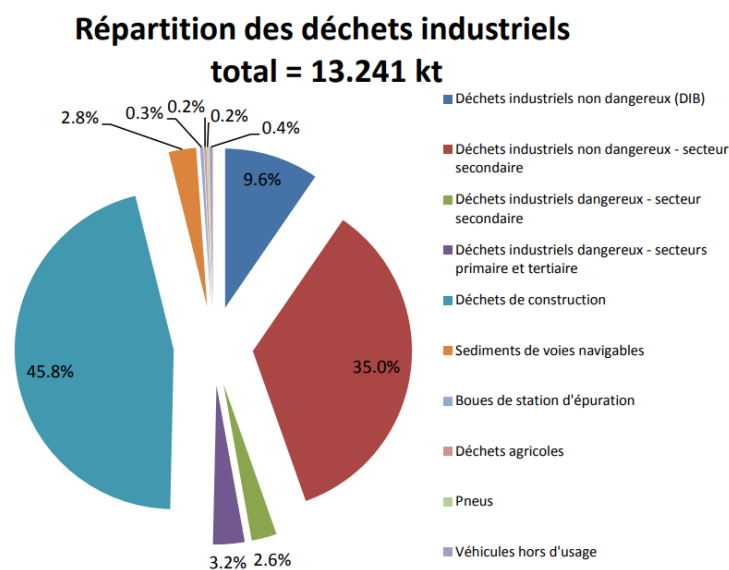


FIGURE 0.1 – Composition du gisement de déchets industriels en Wallonie (Gouvernement wallon, 2018)

Zhao et al. (2022) affirment que les types de déchets les plus produits dans le secteur de la construction sont :

- Le béton ;
- Les résidus de maçonnerie.

Il est donc nécessaire d'intervenir de manière efficace sur ces matériaux.

Toutefois, la réduction de l'impact environnemental de l'industrie de la construction ne se limite pas à la gestion des déchets en fin de vie des matériaux, cela concerne également la diminution de l'empreinte carbone du béton, et plus globalement des matériaux cimentaires, dont la production constitue l'un des principaux facteurs du changement climatique. Dans le béton, la production de dioxyde de carbone (CO_2) provient principalement du procédé de fabrication des éléments qui le composent, en particulier le ciment (Stocek, 2024).

En effet, le ciment représente environ 20 % de la composition du béton (avec l'eau) (Stocek, 2024). L'empreinte carbone des ciments dépend directement de leur teneur en clinker. Pour obtenir ce clinker, il faut chauffer du calcaire et de l'argile à très haute température. Ce phénomène entraîne la libération de CO_2 en très grande quantité (Courard, 2023).

Face à ces enjeux, une des stratégies développées pour réduire l'impact environnemental du béton est le recyclage, avec comme première approche l'utilisation de granulats recyclés pour la production de nouveau béton (Zhao et al., 2022).

En effet, au cours de ces dernières années, l'utilisation de béton et de mortier avec des granulats recyclés est de plus en plus sollicitée par les chercheurs (Candamano et al., 2022). Par ailleurs, les normes NBN EN 206 :2013+A2 :2021 et NBN B 15-001 :2024, concernant les spécifications, les performances, la production et la conformité des bétons, introduisent des taux maximum de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés en fonction des environnements dans lesquels les bétons sont exposés.

Concernant les sables, Candamano et al. (2022) montrent que l'extraction excessive de sable naturel a de nombreux impacts sur la planète. Il s'agit de l'une des raisons principales de la baisse des niveaux d'eau, des dégâts causés à la faune et la flore ou encore de la perte d'approvisionnement en sédiments. L'option d'utiliser des sables recyclés pour la production de nouveaux matériaux semble donc être une bonne alternative, cependant cette considération n'a pas encore été pleinement étudiée.

Le projet SARE4BE, lancé le 1er décembre 2022, est l'un des premiers projets abordant le thème du sable recyclé. En effet, ce dernier a pour but d'identifier la meilleure application de béton possible en fonction du type de sable recyclé (provenant de stations de lavage, de bétons de retour ou de la fraction fine produite pendant la fabrication de granulats) et de déterminer le taux optimal de substitution pour chacune des applications identifiées. Ce projet, en collaboration avec le Centre de Recherches Routières et l'Université de Liège, a pris fin le 30 novembre 2024 (Buildwise, s.d.).

Objectif de recherche

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans la continuité du travail de recherche mené par Doitrand (2025) dont l'objectif principal était d'élaborer une formulation de briques comprimées présentant des propriétés mécaniques proches de celles des briques traditionnelles.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'optimiser les formulations les plus prometteuses de sa recherche en valorisant les sables recyclés et les fines de lavage, tout en maximisant la résistance à la compression du matériau.

L'analyse permet également de caractériser la brique optimisée sous différents aspects : absorption d'eau, mode de cure, résistance à l'état humide et sec, force de compaction, vitesse de chargement et variabilité des résultats. L'objectif final étant de trouver un matériau de construction pouvant être comparé, en termes de résistance, à la brique optimisée.

Questions de recherche

La valorisation et l'influence des sables et des fines recyclées pour la production de briques comprimées constituent le sujet principal de cette recherche. Plusieurs questions seront mises en avant dans ce travail :

- Comment optimiser la formulation des recettes les plus performantes afin de maximiser la résistance à la compression du matériau ?
- Quel est l'impact des différents modes de cure sur la résistance à la compression de la brique optimisée ?
- Comment évolue la résistance à la compression de la brique optimisée sous certaines influences (force de compaction, vitesse de compaction, variabilité, durabilité, etc.) ?
- À quel matériau de construction peut-on comparer les briques comprimées optimisées, produites à partir de sable mixte recyclé et de fines de lavage, en termes de résistance ?

Structure

Ce travail de fin d'études est divisé en trois chapitres distincts (Figure 0.2).

La première partie (chapitre 1) consiste en un résumé de la littérature centré sur les objectifs principaux du travail : la comparaison avec des briques et des blocs de construction existants, l'utilisation de fractions fines recyclées et la durabilité. Ce chapitre constitue la base de la partie expérimentale du rapport.

La deuxième partie (chapitre 2) est consacrée à l'expérimentation du travail. Elle commence par une description des matériaux utilisés dans le cadre de cette recherche, ainsi que leur caractérisation à l'aide de différents essais. Une section de ce chapitre est également dédiée à la fabrication des briques comprimées et leur caractérisation.

La troisième partie (chapitre 3) s'intéresse aux résultats des différents essais obtenus à partir du chapitre 2. Une analyse transversale de ces éléments est effectuée, suivie d'une interprétation pour chacun d'eux, directement intégrée dans ce même chapitre.

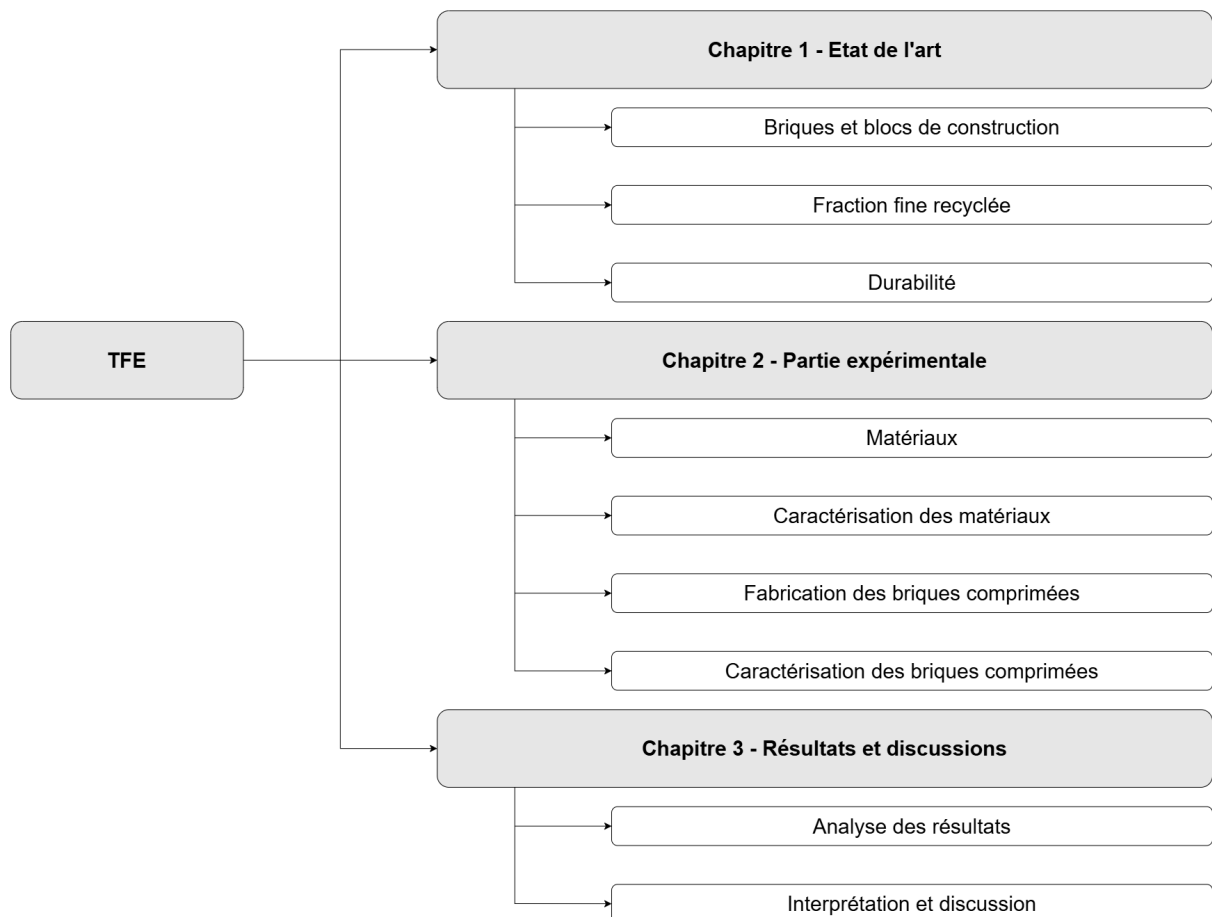


FIGURE 0.2 – Structure du travail

1.1 Briques et blocs de construction

Sur le marché de la construction, il existe différents types de blocs : les blocs de béton pour la maçonnerie, les blocs minéraux et les blocs écologiques et biosourcés.

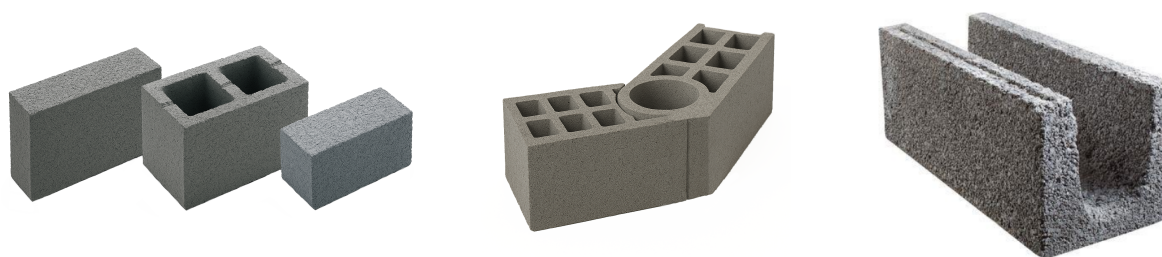
Cette section porte sur la composition, le processus de fabrication, les caractéristiques dimensionnelles, le domaine d'application et les propriétés des blocs présentés ci-dessous. L'objectif est de fournir une base solide permettant de comparer le nouveau matériau avec un ou plusieurs des blocs présentés.

1.1.1 Maçonnerie en blocs de béton

1.1.1.1 Blocs de béton traditionnels

Les blocs de béton traditionnels sont des éléments de maçonnerie préfabriqués constitués d'un mélange d'éléments fins (agréats fins), de liant (ciment) et d'eau. Les blocs de béton sont obtenus par compaction de ces éléments avant de procéder à leur cure, qui permet de développer les performances mécaniques du produit final (Courard, 2021). Plusieurs types de blocs peuvent être identifiés :

- Blocs pleins (Figure 1.1a) ;
- Blocs creux (Figure 1.1a) ;
- Blocs d'angle (Figure 1.1b) ;
- Blocs en "U" (Figure 1.1c) ;
- Blocs à joints minces (Courard, 2021).



(a) Blocs pleins et creux

(b) Blocs d'angle

(c) Blocs en "U"

FIGURE 1.1 – Types de blocs en béton (Courard, 2021)

Pour la partie pratique de ce travail, des briques comprimées **pleines** seront réalisées. C'est pourquoi, les blocs/briques plein(e)s (Figure 1.1a) présentent un intérêt particulier dans cette section.

Les blocs de béton se classent en plusieurs catégories en fonction de leur masse volumique :

- Bloc de béton lourd : $> 2400 \text{ kg/m}^3$;
- Bloc de béton semi-lourd : $2000 - 2400 \text{ kg/m}^3$;
- Bloc de béton léger (argile expansée) : $1200 - 2000 \text{ kg/m}^3$ (SPW, 2021).

Les dimensions habituelles des blocs pleins sont (L x l x H) : 29-39 x 9-14-19 x 19 cm ou 29 x 9 x 14 cm, selon l'entreprise Coeck (2025). Ces blocs sont applicables pour des maçonneries standards intérieures, extérieures et enterrées, tant porteuses que non porteuses.

Les propriétés de ces blocs pleins de béton se définissent comme suit (Table 1.1) :

TABLE 1.1 – Propriétés des blocs pleins de béton traditionnels (Coeck, 2025)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	2110
Résistance à la compression moyenne normalisée $fb [N/mm^2]$	15
Résistance à la compression moyenne $fmean [N/mm^2]$	12, 70
Absorption d'eau par capillarité $[g/m^2 s]$	≤ 8

1.1.1.2 Blocs de béton cellulaire

En 1924, J.A. Eriksson, architecte suédois, élabore un matériau qui possède les mêmes propriétés que le bois, en termes d'isolation, de résistance et de facilité de mise en œuvre, sans ses inconvénients (combustibilité et durabilité). Il s'agit du béton cellulaire (Figure 1.2). Ce matériau, appelé aussi bloc Ytong, est défini comme un béton très léger ou extra-léger selon la norme NBN B 21-002 :1989 (Courard, 2021).

Le béton cellulaire est principalement composé de :

- 65 % de sable de quartz siliceux ;
- 20 % de ciment (CEM I 32,5) ;
- 15 % de chaux ;
- 0,05 % de pâte ou de poudre d'aluminium ;
- 1 % de gypse ;
- eau (Courard, 2021).

Contrairement au béton traditionnel, ce mélange forme, lors de la réaction chimique de la poudre d'aluminium avec le mélange, un dégagement d'hydrogène qui crée des macrocellules de béton fermé (Figure 1.3). Ces cellules sont séparées par de minces parois qui les protègent de l'humidité et sont remplies d'air. Le béton cellulaire est donc constitué principalement d'air (80 %), ce qui lui confère une grande capacité isolante (Cox et al., 2009).

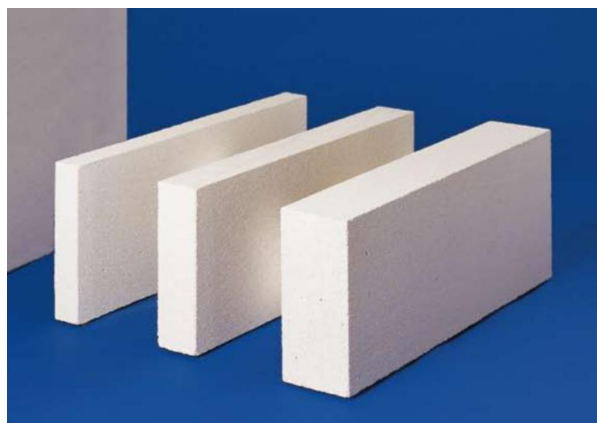


FIGURE 1.2 – Bloc de béton cellulaire (Cox et al., 2009)



FIGURE 1.3 – Macrocellules (Cox et al., 2009)

Selon Cox et al. (2009), il existe différents produits cellulaires : blocs, linteaux, dalles de bardage, dalles de toiture, dalles de plancher et dalles de cloison intérieure. Les dimensions standards des blocs cellulaires ($L \times H \times l$) sont de 600 x 250 x 50-70-100-150-175-200-240-300-365 mm. Ces blocs sont utilisés aussi bien en intérieur qu'en extérieur, pour des maçonneries porteuses et non porteuses (Cox et al., 2009).

Les propriétés du béton cellulaire se définissent à l'aide de la Table 1.2.

TABLE 1.2 – Propriétés des blocs cellulaires (Courard, 2021)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	300 – 700
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda [W/(m \cdot K)]$	0,10 – 0,18
Coefficient de dilatation thermique $\alpha [m/(m \cdot K)]$	$8 \cdot 10^{-6}$
Résistance en compression $\sigma_C [N/mm^2]$	2 – 5
Module de rigidité $E [N/mm^2]$	1250 – 2650
Résistance en traction $\sigma_T [N/mm^2]$	0,55 – 1,3

1.1.1.3 Blocs de béton d'argile expansée

Les blocs d'argile expansée sont composés d'Argex, de ciment ainsi que de granulats naturels (Claesen beton, s.d.). Ils sont également connus sous le nom de blocs d'Argex. L'Argex désigne des granulats d'argile expansée utilisés en construction pour alléger le béton (Figure 1.4) (Courard, 2021). Pour produire ces granulats, l'argile est d'abord extraite et préparée, puis elle subit une cuisson à environ 1100 °C dans un four avant de provoquer son expansion. Ensuite, les granulats sont criblés et stockés pour la fabrication des blocs (Figure 1.5)(Courard, 2021).



FIGURE 1.4 – Granulats d'argile expansée (Courard, 2021)



FIGURE 1.5 – Bloc d'Argex (Courard, 2021)

Les blocs de béton d'argile expansée sont légers. En effet, contrairement aux blocs de béton de gravier, ils présentent une différence massique d'environ 20 % (Courard, 2021). De plus, leurs bonnes performances en isolation thermique et acoustique sont des propriétés intéressantes pour la construction (Claesen beton, s.d.).

Selon Claesen beton (s.d.), différents types de blocs aux dimensions standards sont disponibles sur le marché. On distingue les blocs creux et les blocs pleins. Comme mentionné précédemment, cette étude se concentre sur les blocs pleins. Concernant leurs dimensions, ils mesurent (L x H x l) : 29-39 x 9-14 x 19 cm ou 39 x 19 x 19 cm. Les propriétés des blocs pleins de béton d'argile expansée de dimension 29 x 9 x 19 se définissent via la Table 1.3.

TABLE 1.3 – Propriétés des blocs pleins de béton d'argile expansée (Claesen beton, s.d.)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	1180
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda_{ui} [W/(m \cdot K)]$	0,5
Résistance à la compression moyenne normalisée $f_b [N/mm^2]$	6
Résistance à la compression moyenne $f_{mean} [N/mm^2]$	4,5

Ces blocs de construction sont principalement utilisés pour les murs intérieurs, les murs acoustiques ainsi que les murs coupe-feu. Dans certains cas, ils peuvent être utilisés pour la réalisation de murs porteurs, dans des bâtiments de 2 à 3 étages (Claesen beton, s.d.).

1.1.1.4 Briques de laitier

Les briques de laitier (Figure 1.6) sont un matériau de construction traditionnel originaire du Luxembourg (Contern, s.d.). Elles sont composées de laitier granulé (laitier cristallisé se comportant comme un sable) et de 150 kg de liant par mètre cube. Le liant peut être de la chaux, un mélange de chaux et de laitier vitrifié ou encore un ciment de laitier (CEM III) (Courard, 2021). La production de ces briques repose sur un procédé de compression à l'aide d'une presse mécanique qui exerce une pression de 300 bars dans des moules. Dans le but de réduire la durée de réaction du liant, un durcissement à la vapeur en autoclave (température et pression contrôlées) est effectué (Courard, 2021).



FIGURE 1.6 – Brique de laitier perforée (Courard, 2021)

Les briques de laitier pleines ont les mêmes dimensions que les briques traditionnelles (Courard, 2021). Elles peuvent être utilisées pour la construction de murs extérieurs, de parois de séparation portantes et non portantes, ainsi que pour les murs de clôture, les cheminées et divers travaux du génie civil (Contern, s.d.), comme les ouvrages destinés aux eaux pluviales ou usées (Courard, 2021). Les principales caractéristiques de ces briques sont disponibles dans la Table 1.4.

TABLE 1.4 – Propriétés des briques pleines de laitier (Contern, s.d.)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	2050
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda [W/(m \cdot K)]$	1, 5
Résistance à la compression moyenne $f_{mean} [N/mm^2]$	25

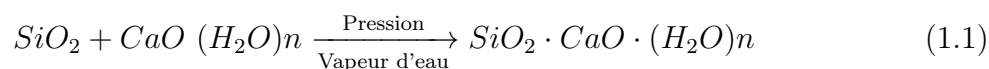
Selon Courard (2021), les briques de laitier présentent de nombreux avantages :

- Bonne résistance à la compression ;
- Dureté très élevée ;
- Bonne résistance à l'usure ;
- Bonne résistance au gel ;
- Bonne résistance vis-à-vis des eaux usées et séléniteuses.

1.1.2 Blocs minéraux

1.1.2.1 Blocs silico-calcaires

C'est en 1880 que Wilhelm Michaelis, chimiste des matériaux à Berlin, est le premier à effectuer un mélange de 5 à 15 % de chaux hydratée ($CaO \cdot (H_2O)_n$) avec de la silice en poudre (SiO_2). Il compacta ensuite ce mélange à la presse avant de procéder à son durcissement à la vapeur en autoclave sous haute pression (8 à 10 bars). Ce processus a permis la formation de silicate de chaux ($SiO_2 \cdot CaO \cdot (H_2O)_n$), qui est à la base de la fabrication des blocs silico-calcaires selon la réaction suivante (1.1) (Courard, 2021) :



La pierre silico-calcaire est composée de (Figure 1.7) :

- 93 % de sable ;
- 7 % de chaux ;
- eau (Xella, 2021).



FIGURE 1.7 – Blocs silico-calcaires (Xella, 2021)

Les blocs silico-calcaires présentent une porosité importante, due à la fois à leur procédé de fabrication par comptage à froid et à la granulométrie très étroite des sables utilisés, tels que le sable éolien 16/250 μ m, qui réduit la compacité du bloc. Cette porosité s'élève donc à environ 30 %, ce qui augmente la sensibilité au gel du matériau (Courard, 2021).

Selon Courard (2021) et l'entreprise Xella (2021), il existe plusieurs types de blocs silico-calcaires : les blocs denses et les blocs légers (lorsqu'une poudre d'aluminium est ajoutée). Leurs dimensions varient en fonction de leur application (blocs d'assise, linteaux, blocs à coller pleins, etc.). Concernant les blocs pleins, les formats standards sont (L x H x l) : 298 x 198 x 100 - 120 - 150 - 200 mm ou 298 x 148 x 150 mm (Xella, 2021).

Les propriétés de ce matériau (Xella, 2021) sont disponibles dans la Table 1.5.

TABLE 1.5 – Propriétés des blocs pleins silico-calcaires (Xella, 2021)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	1610 – 1800
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda_{ui} [W/(m \cdot K)]$	0,91
Résistance à la compression moyenne normalisée $fb [N/mm^2]$	≥ 20
Résistance à la compression caractéristique $fk [N/mm^2]$	10,2

1.1.2.2 Blocs de terre cuite

La terre cuite est un matériau utilisé depuis des siècles dans le secteur de la construction et toujours d'application aujourd'hui (Alviset, 1994 ; Courard, 2021). Ce matériau prend différentes formes, allant des tuiles aux éléments de plancher, en passant par les briques et les blocs pour murs intérieurs (Alviset, 1994).

La terre cuite, fabriquée à partir d'argile, d'éléments dégraissants (comme le sable, qui permet de réduire la plasticité excessive de l'argile naturelle) et d'eau (Alviset, 1994), suit un processus de production en cinq étapes (Alviset, 1994 ; FBB, s.d.) (Figure 1.8) :

1. **Extraction des matières premières (argile et limon)** : L'argile (comprenant les terres limoneuses et schisteuses) est extraite dans des argilières (FBB, s.d.) à l'aide de pelles mécaniques, d'excavateurs, de défonceuses, de décapeuses, de buteurs, de pelles et de chargeuses (Alviset, 1994). Les propriétés de l'argile dépendent de son origine d'extraction en sous-sol (FBB, s.d.).
2. **Préparation de l'argile** : Cette étape comprend, d'une part, le broyage et le malaxage des matières premières et, d'autre part, leur dosage et leur mélange (FBB, s.d.).
3. **Façonnage** : Plusieurs techniques pour le façonnage du matériau sont possibles : le moulage à la main, l'utilisation d'une presse à plateau (exerçant une pression de 5 à 10 MPa (Alviset, 1994)), ou par étirement (Alviset, 1994 ; FBB, s.d.).
4. **Séchage** : Lors de l'étape précédente, la teneur en eau du matériau s'élevait à 15 - 30 % (Alviset, 1994). Avant de passer à l'étape de la cuisson, un passage au séchoir est nécessaire pour obtenir une teneur en eau de 1 à 2 % (Alviset, 1994 ; FBB, s.d.).
5. **Cuisson** : Afin de permettre à la terre cuite d'acquérir sa résistance mécanique, sa stabilité, etc., le matériau est cuit à une température d'environ 1050 °C (Alviset, 1994).

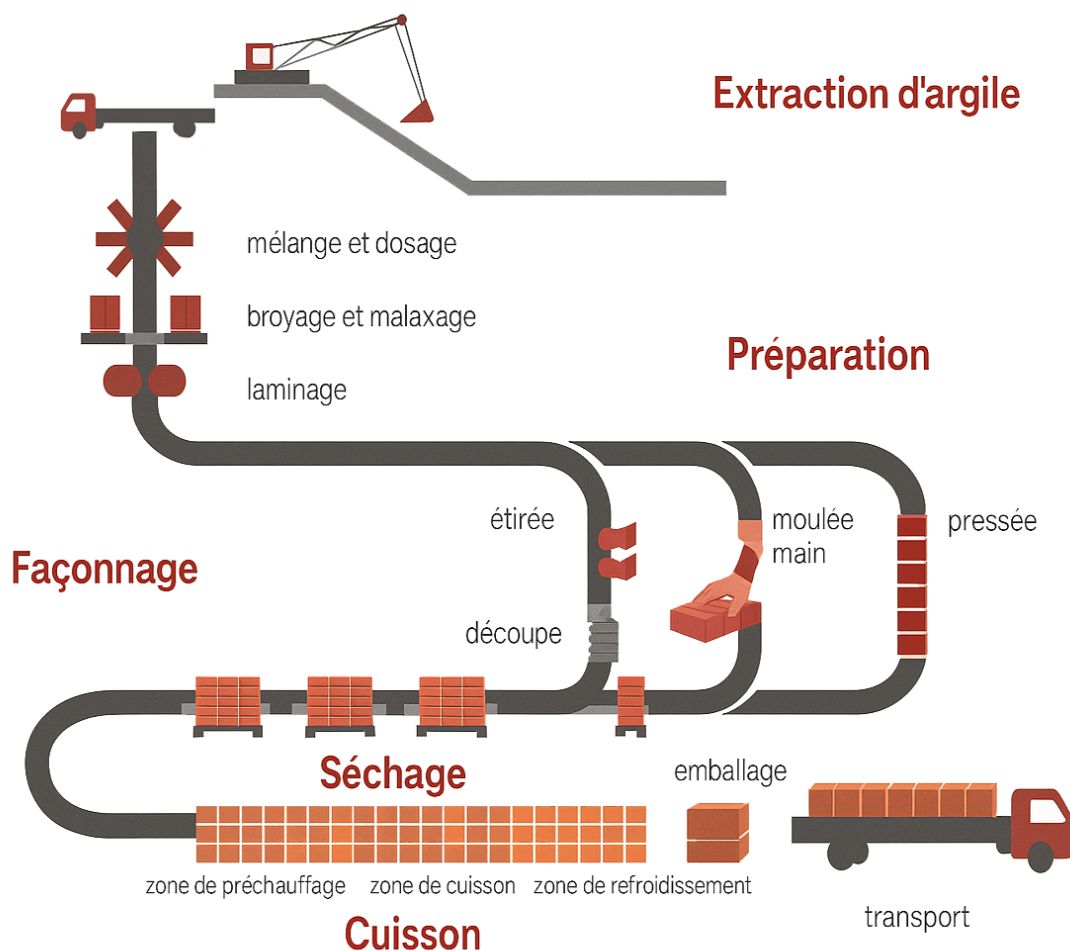


FIGURE 1.8 – Fabrication des blocs de terre cuite (FBB, s.d.)

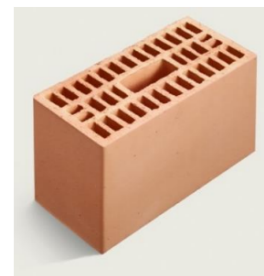
Comme mentionné dans l'étape de façonnage, plusieurs types de briques sont fabriqués à la suite de ce processus : briques « moulées main » (Figure 1.9a), briques pressées (Figure 1.9b), briques/blocs étiré(e)s (les plus courants) (Figure 1.9c) (Courard, 2021). En ce qui concerne leurs dimensions, les mesures standards sont (L x H x l) : 288 x 138 - 88 - 188 x 138 - 188 mm ou 288 x 138 x 88 mm (Wienerberger, 2019).



(a) Briques « moulées main »



(b) Briques pressées



(c) Briques/blocs étiré(e)s

FIGURE 1.9 – Types de briques de terre cuite (Courard, 2021)

Les caractéristiques d'une brique de terre cuite pleine sont reprises dans la Table 1.6.

TABLE 1.6 – Propriétés des briques pleines en terre cuite (Wienerberger, 2019)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique [kg/m^3]	850
Coefficient de conductibilité thermique λ_{ui} [$W/(m \cdot K)$]	0,26
Résistance à la compression moyenne f_{mean} [N/mm^2]	> 10
Comportement de l'humidité [mm/m]	$\leq 0,1$

1.1.2.3 Blocs de plâtre

Obtenus à partir d'un mélange d'eau et de plâtre de gypse (ABLG, 2025 ; Binti Katman et al., 2022), les blocs de plâtre ($CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$) (Figure 1.10) produisent moins d'énergie grise par rapport aux briques en terre cuite mentionnées dans la section précédente (Binti Katman et al., 2022).

En effet, le mélange est coulé dans un moule et séché à l'air libre naturellement (ABLG, 2025 ; Binti Katman et al., 2022). Le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) quant à lui résulte de l'évaporation des eaux sursaturées des lagunes marines (ABLG, 2025 ; Courard, 2021).

Ces blocs sont utilisés dans des cloisons de séparation non portantes (Figure 1.11), pour des applications intérieures dans tous les types de bâtiments (maisons, hôpitaux, immeubles, etc.) (ABLG, 2025 ; Knauf, s.d.). Pour des applications particulières, il existe des blocs hydrofuges (pour les salles de bains, etc.) ainsi que des blocs lourds (pour l'isolation acoustique) (ABLG, 2025).



FIGURE 1.10 – Blocs de plâtre (ABLG, 2025)



FIGURE 1.11 – Cloison en blocs de plâtre (ABLG, 2025)

La plupart des blocs de plâtre disposent d'un système à rainure permettant un emboîtement facile de ces derniers (ABLG, 2025). Les dimensions standards de ces blocs sont (L x H x l) : 550 x 600 x 100 mm (Binti Katman et al., 2022) ou 501 × 666 x 100 mm (Knauf, s.d.).

En ce qui concerne leurs caractéristiques principales, celles-ci sont reprises dans la Table 1.7.

TABLE 1.7 – Propriétés des blocs de plâtre (Knauf, s.d. ; Binti Katman et al., 2022)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique [kg/m^3] (Knauf, s.d.)	800 – 1000
Coefficient de conductibilité thermique λ_{ui} [$W/(m \cdot K)$] (Knauf, s.d.)	0,32
Résistance à la compression [N/mm^2] (Binti Katman et al., 2022)	5,6

1.1.3 Blocs écologiques et biosourcés

1.1.3.1 Blocs en chaux-chanvre

Le béton de chanvre est constitué d'un mélange à base de chaux, de chènevotte (particule de chanvre) et d'eau (Lecompte, 2020), dans des proportions prédéfinies : 80 % de chanvre (granulométrie de 2 à 20 mm), 11 % de chaux hydraulique et 9 % de chaux aérienne (IsoHemp, 2024).

La chaux vive (CaO) est produite lors de la cuisson du calcaire à 900 °C (1.2). Cette chaux est éteinte par ajout d'eau, permettant de produire la chaux aérienne ($Ca(OH)_2$). Tandis que la chènevotte est récoltée lors du broyage de la tige de chanvre, dépourvue de ses fibres (Lecompte, 2020).



Le mélange chaux-chanvre est utilisé en réhabilitation de bâtiments grâce à ses propriétés hygrothermiques. En effet, la chaux et la chènevotte sont poreuses, permettant ainsi une bonne évacuation de l'eau (sous forme de vapeur). Une autre application de ce mélange concerne l'isolation de toiture. Cependant la mise en œuvre la plus répandue concerne la préfabrication de blocs (Figure 1.12) (Lecompte, 2020). Pour leur fabrication, le mélange est moulé, pressé, puis séché à l'air libre (IsoHemp, 2024).



FIGURE 1.12 – Blocs de chaux-chanvre (IsoHemp, 2024)

Les blocs de chaux-chanvre sont utilisés entre une ossature pour des cloisons ou comme enveloppe du bâtiment sans capacité portante (IsoHemp, 2024). En effet, selon Lecompte (2020), le mélange chaux-chanvre utilisé de nos jours a une faible rigidité et une faible résistance, ce qui exclut son utilisation en tant qu'élément structural. Les dimensions standards des blocs utilisés sont (L x H x l) : 60 x 30 x 7,5 à 36 cm (IsoHemp, 2024). Les principales caractéristiques de ces blocs sont présentées dans la Table ci-dessous (Table 1.8).

TABLE 1.8 – Propriétés des blocs pleins en chaux-chanvre (IsoHemp, 2024)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique [kg/m^3]	320
Coefficient de conductibilité thermique λ_{ui} [$W/(m \cdot K)$]	0,071
Résistance à la compression [N/mm^2]	0,2
Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	2,8

1.1.3.2 Briques de terre comprimée

Fabriqués par compression statique ou dynamique, d'un mélange composé de terre argileuse et d'eau (Mahdad et al., 2014), les briques de terre comprimée (BTC) (Figure 1.13) sont considérées comme des matériaux écologiques et durables, offrant des propriétés thermiques et hygrothermiques qui favorisent le confort dans les bâtiments (Qualitropic, 2024). Contrairement aux blocs de béton traditionnels qui nécessitent du ciment pour leur production (la cuisson des argiles et du calcaire à 1200 °C étant l'étape la plus polluante), l'utilisation de la terre permet à la fois l'exploitation d'une ressource locale et abondante et une utilisation limitée de sable et de ciment pour la fabrication des briques stabilisées (Qualitropic, 2024).



FIGURE 1.13 – Briques de terre comprimée (Qualitropic, 2024)

La fabrication des BTC suit six étapes :

1. Extraction de la terre ;
2. Préparation de la terre ;
3. Mélange avec l'eau et éventuellement le liant ;
4. Façonnage des blocs (presse hydraulique (Figure 1.14) ou manuelle ; l'énergie optimale de compactage est de 7 MPa) ;
5. Cure lorsque la BTC contient un liant hydraulique ;
6. Stockage (Mahdad et al., 2014 ; Qualitropic, 2024).



FIGURE 1.14 – Presse de compactage (Mahdad et al., 2014)

Il existe deux types de BTC :

- Briques de terre comprimée (BTC) : constituées uniquement de terre crue, de sable et d'eau ;
- Briques de terre comprimée stabilisée (BTCS) : constituées de terre crue, de sable, d'eau ainsi que d'un liant hydraulique comme la chaux ou le ciment pour leur stabilisation (Mahdad et al., 2014 ; Qualitropic, 2024).

Les propriétés de ces briques (Tables 1.9 et 1.10) varient en fonction de la teneur en stabilisant (0 % et 5 %).

TABLE 1.9 – Propriétés des BTC (Cycle Terre BTC, s.d.)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	1900
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda_{ui} [W/(m \cdot K)]$	0,8
Résistance à la compression moyenne normalisée $fb [N/mm^2]$	4

TABLE 1.10 – Propriétés des BTCS (Cycle Terre BTCS, s.d.)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	1900
Coefficient de conductibilité thermique $\lambda_{ui} [W/(m \cdot K)]$	0,8
Résistance à la compression moyenne normalisée $fb [N/mm^2]$	6

Il est également important de préciser que, pour les BTCS, une stabilisation avec 5 % en masse de liant permet d'atteindre les résistances mécaniques souhaitées pour ce type de briques (Mahdad et al., 2014 ; Qualitropic, 2024), bien qu'en augmentant ce pourcentage (en particulier pour les ciments) les performances soient encore améliorées (Mahdad et al., 2014).

Les briques de terre, généralement aux dimensions standards de (L x l x H) 29,5 x 14 x 9,5 ou 22 x 22 x 9,5 cm, peuvent être utilisés dans différents contextes selon leur type de stabilisation.

Pour les BTC traditionnelles :

- Murs non porteurs en remplissage d'ossature ;
- Parements et doublages intérieurs ;
- Murs porteurs (R+1 max.) ;
- Cloisons lourdes ;
- Usage en extérieur (enduit) ;
- Utilisable en rénovation (Cycle Terre BTC, s.d.).

Pour les BTCS, elles peuvent également être utilisées :

- Parements extérieurs (protégés ou enduits) ;
- Murs porteurs (R+2 max.) (Cycle Terre BTCS, s.d.).

En effet, les BTCS, présentant une résistance à la compression plus élevée, permettent la construction de bâtiments de plus grande hauteur.

1.1.3.3 Bottes de paille

La construction en paille débute en 1886 dans le Nebraska, lors du développement de la botteleuse (RFCP, 2016 ; Rougelot, 2018) en raison d'un manque de matières premières (Forêt et al., 2013). Par conséquent, ce type de construction n'émerge pas pour des considérations environnementales (Forêt et al., 2013). Avec l'arrivée des constructions traditionnelles, l'utilisation de cette technique décline avant de gagner l'intérêt d'architectes écologistes en 1979, à la suite des deux chocs pétroliers (Rougelot, 2018).

Selon le RFCP (2016), plusieurs techniques de construction en paille existent :

- Le remplissage : Technique qui consiste à remplir une ossature en bois avec des bottes de paille (Figure 1.15a) ;
- La préfabrication : Fabrication en atelier des éléments de bottes de paille entre l'ossature en bois (Figure 1.15b) ;
- L'isolation thermique par l'extérieur : Fixation des bottes de paille soit dans une ossature secondaire, soit au mur existant comme isolant (Figure 1.15c) ;
- La paille structurelle : En plus de servir d'isolant, la paille fonctionne également comme des blocs de béton traditionnels en supportant la charpente (Figure 1.15d).



(a) Le remplissage (b) La préfabrication (c) Isolation (d) La paille structurelle

FIGURE 1.15 – Techniques de construction en paille (RFCP, 2016)

Ce sont les propriétés de cette dernière technique qu'il est probablement intéressant de comparer dans cette étude. En effet, il s'agit de paille structurelle ou de paille utilisée pour des cloisons, n'ayant pas un simple rôle d'isolant et de remplissage. Les bottes de paille, dont les dimensions varient fortement (22 x 36 x 55 cm (Forêt et al., 2013) ou 50 x 40 x 150 cm (Isol'en Paille, s.d.)), sont appareillées en panneresses et sanglées sur leur hauteur, permettant de pré-compresser les bottes (Forêt et al., 2013).

Les principales caractéristiques de ces bottes de paille sont d'une part, leur capacité isolante et, d'autre part leur capacité d'être un très bon support d'enduit (Rougelot, 2018). De plus, malgré les a priori existants concernant ce matériau, la paille dépourvue de grains de céréales n'attire pas les rongeurs et la paille compressée en bottes denses n'est pas plus inflammable qu'un autre isolant (RFCP, 2016).

Les caractéristiques essentielles de ces bottes sont reprises dans la Table 1.11.

TABLE 1.11 – Propriétés des bottes de paille (Isol'en Paille, s.d.)

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $[kg/m^3]$	100
Coefficient de conductibilité thermique $[W/(m \cdot K)]$	0,052
Perméabilité μ	1,14
Empreinte carbone $[kgCO_2/m^2]$	-9

1.1.4 Synthèse des matériaux

Les différents blocs de construction ainsi que leurs principales caractéristiques sont synthétisés dans la Table 1.12. Celle-ci servira de base de référence pour comparer les briques développées avec un ou plusieurs des matériaux présentés, en tenant compte de leur masse volumique, de leur résistance, de leurs applications et de leurs dimensions.

TABLE 1.12 – Tableau de comparaison

	Masse volumique [kg/m^3]	Résistance à la compression [MPa]
Blocs de béton traditionnels	2110	15 (f_b)
Blocs de béton cellulaire	300-700	2-5
Blocs de béton d'argile expansée	1180	6 (f_b)
Briques de laitier	2050	25 (f_{mean})
Blocs silico-calcaires	1610-1800	>20 (f_b)
Blocs de terre cuite	850	>10 (f_{mean})
Blocs de plâtre	800-1000	5,6
Blocs en chaux-chanvre	320	0,2
BTC	1900	4 (f_b)
BTCS	1900	6 (f_b)
Bottes de paille	100	-

Concernant la résistance, la comparaison s'appuie sur le facteur f_b lorsque cela est possible. La norme EN 772-1+A1 :2015 ainsi que l'Eurocode 6 définissent ce facteur comme étant la résistance moyenne d'un élément conventionnel de 100 mm de hauteur et de 100 mm de largeur. Il permet ainsi de comparer la résistance de briques de dimensions différentes en les ramenant à un format standardisé.

La résistance à la compression normalisée est calculée sur base de la formule suivante :

$$f_b = f_{mean} \cdot \delta \cdot \delta_c \quad (1.3)$$

Avec :

f_{mean} = résistance moyenne mesurée sur un échantillon de briques ;

δ = facteur de forme (Table 1.13) ;

δ_c = facteur de conditionnement :

- Terre cuite, béton, béton cellulaire : $\delta_c = 1$
- Silico-calcaire : $\delta_c = 0,8$

TABLE 1.13 – Facteur de forme δ (NBN EN 772-1+A1 :2015)

Hauteur [mm]	Plus petite dimension horizontale [mm]				
	50	100	150	200	≥ 250
40	0,80	0,70	–	–	–
50	0,85	0,75	0,70	–	–
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Pour des dimensions intermédiaires du facteur de forme, il faut faire une interpolation linéaire.

1.2 Fraction fine recyclée

1.2.1 Recyclage des déchets de construction

Au 20^e siècle, de nombreuses constructions en béton arrivent en fin de vie et nécessitent des interventions de maintenance, de réparation ou de démolition, ce qui génère une quantité importante de déchets (Courard, 2024). En Wallonie, la production totale de déchets est estimée à 15,2 millions de tonnes par an (Gouvernement wallon, 2018). Parmi ceux-ci, près de 40 % sont issus du secteur de la construction. Ces déchets produisent environ 6 millions de tonnes de granulats recyclés chaque année et proviennent principalement des travaux de voirie, de démolition, de construction et de rénovation (FEREDECO et al., 2023).

Le Plan wallon des déchets-ressources vise à substituer 30 % des granulats naturels par des granulats recyclés dans les travaux publics réalisés en Wallonie (Gouvernement wallon, 2018). En effet, ces derniers présentent un double avantage : à la fois économique et écologique (FEREDECO et al., 2023).

Les déchets inertes, qui représentent la fraction minérale des déchets de construction et de déconstruction, ne peuvent, en raison de leurs caractéristiques physico-chimiques, affecter la qualité du sol, de l'air ou des eaux, ni nuire à la santé humaine ou à l'environnement (FEREDECO et al., 2023).

Ces déchets inertes offrent un grand potentiel de valorisation en granulats recyclés et sont répartis en trois familles :

1. **Les déchets de béton** : Le béton ou le béton armé (Figure 1.16a) ;
2. **Les déchets mixtes** (fraction la plus importante) : Mélange de déchets de construction comme les briques, les blocs de bétons, les tuiles, etc. (Figure 1.16b) ;
3. **Les déchets hydrocarbonés** : Revêtement des parkings et des voiries en asphalte (Figure 1.16c) (FEREDECO et al., 2023).



(a) Déchets de béton



(b) Déchets mixtes



(c) Déchets hydrocarbonés

FIGURE 1.16 – Déchets inertes (FEREDECO et al., 2023)

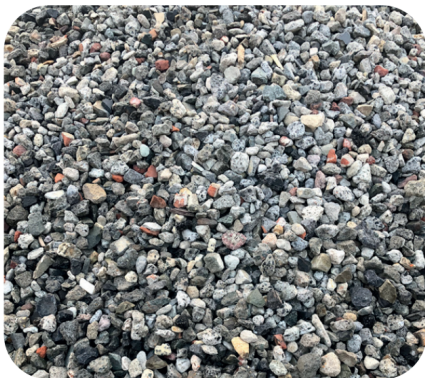
Le recyclage des déchets de construction en granulats est un exemple concret d'économie circulaire (FEREDECO et al., 2023). En effet, il permet de valoriser des matériaux, initialement enfouis en centre d'enfouissement technique, pour la création de matériaux favorisant une gestion plus durable des ressources et une réduction des déchets (FEREDECO et al., 2023). De plus, le recyclage des déchets inertes de construction et de démolition est actuellement une obligation en Wallonie (FEREDECO et al., 2023).

Afin de recycler ces déchets, les indésirables (bois, papier, déchets verts, métaux, etc.) sont tout d'abord retirés par des méthodes de tri manuel, de souffleries, d'électro-aimants ou encore de flottaison. Les déchets inertes triés sont ensuite stockés, concassés et criblés dans des centres de recyclage permettant la production de granulats recyclés. La qualité de ces granulats est contrôlée afin d'attester leur conformité aux normes européennes en vigueur (FEREDECO et al., 2023).

Après leur production, les granulats recyclés sont stockés selon leur type et leur taille de grains (FEREDECO et al., 2023).

Ainsi, trois catégories de granulats recyclés peuvent être obtenues selon leur type :

1. Granulats de béton (Figure 1.17a) ;
2. Granulats mixtes et de maçonnerie (Figure 1.17b) ;
3. Granulats d'hydrocarboné (Figure 1.17c) (FEREDECO et al., 2023).



(a) Granulats de béton



(b) Granulats mixtes



(c) Granulats hydrocarbonés

FIGURE 1.17 – Granulats recyclés (FEREDECO et al., 2023)

Quatre catégories de granulats recyclés peuvent être obtenues selon leur granulométrie :

1. Fines recyclées : La majorité des grains passent au tamis de 0,063 mm ;
2. Sables recyclés : $D \leq 4 \text{ (6,3) mm}$;
3. Gros granulats recyclés : $d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \geq 4 \text{ mm}$;
4. Graves recyclées : $D \geq 6,3 \text{ mm}$ (Courard, 2023).

Avec :

D = diamètre maximal des particules ;

d = diamètre minimal des particules.

Dans cette étude, une attention particulière sera portée sur les sables mixtes recyclés ainsi que sur les fines de lavage.

1.2.2 Sables recyclés

Selon le SPW (2025), les sables recyclés sont définis comme des matériaux issus du recyclage de composants inorganiques précédemment utilisés dans la construction. En fonction de leur mode de production, on en distingue deux sortes : les sables de criblage de granulats recyclés et les sables de concassage de granulats recyclés. Selon la norme européenne de référence choisie, le diamètre maximal des grains de sable varie :

- NBN EN 13242+A1 :2008 : $D \leq 6,3 \text{ mm}$;
- NBN EN 12620+A1 :2008 : $D \leq 4 \text{ mm}$;
- NBN EN 13043 :2002 : $D \leq 2 \text{ mm}$ (FEREDECO et al., 2023).

1.2.2.1 Morphologie et composition

Les propriétés et la durabilité du béton peuvent être affectées par la forme, la texture de surface et la composition minéralogique des sables. Alors que le sable naturel est caractérisé par des grains lisses et arrondis (Courard, 2023 ; FERDECO et al., 2023), le sable recyclé, quant à lui, présente une forme irrégulière et anguleuse avec des bords coupés nets et certains grains présentent même des fissures dans leur microstructure (Candamano et al., 2022).

Le sable recyclé est hétérogène dans sa composition par rapport au sable naturel (Candamano et al., 2022). Cette hétérogénéité, combinée au pourcentage important de mortier que contient le sable recyclé, rend ses propriétés plus variables (Berredjem et al., 2016).

1.2.2.2 Masse volumique

En ce qui concerne la masse volumique des sables recyclés, celle-ci se distingue par une valeur plus faible comparée à celle du sable naturel (Ledesma et al., 2015 ; Zhao et al., 2022). En effet, Ledesma et al. (2015) montrent une masse volumique de 2630 kg/m^3 pour les sables naturels contre 2140 kg/m^3 pour les sables recyclés. Il est important de noter que la masse volumique dépend de la composition et de la nature des sables.

1.2.2.3 Demande en eau

La fraction fine est composée principalement de mortier durci. Elle nécessite une quantité importante d'eau pour être utilisée, mais cette demande en eau varie souvent, ce qui complique son recyclage dans le béton et les mortiers par rapport au sable naturel et aux

granulats (Berredjem et al., 2016).

En effet, les sables recyclés sont composés de pâte cimentaire durcie, dont la porosité est plus élevée que les sables naturels. Cette porosité accrue entraîne une augmentation de l'absorption d'eau de ces sables. En effet, pour les sables recyclés, le besoin en eau varie de 8,8 % à 17 % contre 0,3 % à 3 % pour les sables naturels (Zhao et al., 2022).

Cette porosité élevée a également une influence sur les propriétés des bétons et des mortiers, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Ainsi, la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés augmente la quantité d'eau de gâchage nécessaire, ce qui complique le contrôle de la rhéologie à l'état frais et engendre une diminution de la résistance à la compression, à la flexion et du module d'élasticité (Berredjem et al., 2016).

1.2.3 Fines recyclées

Les fines recyclées sont obtenues à partir du recyclage des granulats. Elles correspondent à la portion fine de ces particules ayant un diamètre inférieur ou égal à 0,063 mm. Comme pour les sables recyclés, on distingue les fines recyclées de concassage et de broyage (FEREDECO et al., 2023).

La teneur en fines et la nature/qualité de ces dernières sont deux paramètres importants dans leur étude :

- La teneur en fines (f [%]) : le pourcentage de grains passant au tamis de 0,063 mm ;
- La nature/qualité des fines : des particules inertes ou argileuses (FEREDECO et al., 2023).

1.2.3.1 Teneur en fines

L'excès de fines peut avoir un rôle néfaste sur les propriétés et le comportement des granulats. En revanche, cet excès peut être limité par un processus de lavage du granulat (FEREDECO et al., 2023). FEREDCO et al. (2023) montrent l'influence des fines sur les propriétés du matériau :

- Compacité : Lorsqu'une quantité limitée de fines est introduite dans le matériau, la masse volumique est améliorée. Les particules se placent dans les espaces intergranulaires, permettant d'améliorer la compacité, la portance et la résistance. En revanche, si un excès de fines (par rapport à la porosité initiale du matériau) est inséré, la compacité diminue. En effet, les fines ne sont plus uniquement dans les espaces intergranulaires, elles écartent également les gros grains. Pour les fondations, les cahiers des charges autorisent une teneur en fines maximale de 20 %.

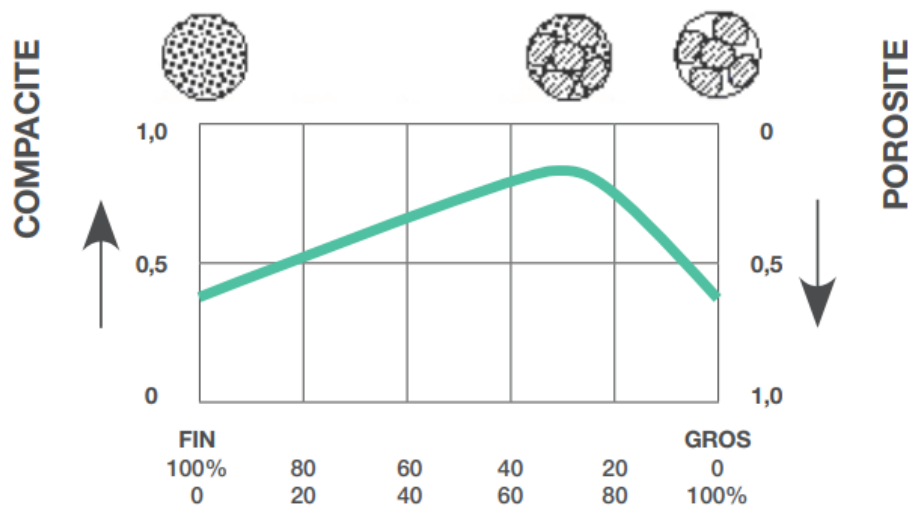


FIGURE 1.18 – Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange (SPW, 2025)

- **Compactage** : Lorsque la quantité de fines augmente, la masse volumique varie avec la teneur en eau et le matériau devient sensible à cette teneur en eau (courbes Proctor redressées).
- **Perméabilité** : La perméabilité diminue lorsqu'une quantité limitée de fines est ajoutée au matériau. Cependant, si un volume trop important de fines est incorporé, l'eau stagne dans le matériau au lieu de s'écouler, ce qui peut causer plusieurs problèmes. L'un d'entre eux concerne la sensibilité au gel du béton. En effet, si l'eau stagne dans le matériau, la probabilité qu'elle gèle est plus importante, ce qui peut entraîner un gonflement et une fissuration du matériau. Pour une application en sous-fondation ou en fondation drainante, un maximum de 10 % de fines est autorisé selon les cahiers des charges.
- **Caractéristiques du matériau lié** : L'ajout de fines dans un béton permet de garantir l'ouvrabilité de ce dernier ainsi que de garantir une résistance élevée. Cependant, si une quantité négligeable de fines est incorporée, de l'eau sera ajoutée au béton pour garantir l'ouvrabilité, mais une perte de résistance sera observée. Dans le cas contraire, si une quantité trop importante de fines est insérée, l'ouvrabilité du béton ainsi que l'adhésion avec le liant seront réduites. De plus, les fines absorberont une partie de l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Par conséquent, une perte de performance totale sera observée.

1.2.3.2 Nature des fines

Lorsqu'une quantité importante de fines est ajoutée au mélange, il est important de déterminer la nature de ces éléments. En effet, ces derniers peuvent être inertes ou argileux en fonction de la nature de sa provenance. Si les particules se révèlent être argileuses, des problèmes de sensibilité à l'eau, des risques de gonflement (en présence d'argile gonflante)

ou encore une perte d'adhésion du liant sur les particules grossières du granulat peuvent apparaître (FEREDECO et al., 2023).

1.2.3.3 Fines de lavage

Les fines de carrière se divisent en deux groupes :

- Les fines de roche concassée : les fillers ;
- Les sous-produits : issus du lavage de sable et de gravier (Cresswell, 2007).

Le processus de production des sables et granulats nécessite un tamisage et un lavage préalables. Cette étape permet la séparation de la fraction la plus fine, présente à la surface des matériaux. C'est donc en cherchant à éliminer les impuretés des granulats que les fines de lavage sont créées (Cresswell, 2007).

Les boues issues du lavage sont ensuite pressées et stockées sous forme de blocs agglomérés, permettant ainsi d'obtenir des fines recyclées, bien que ces dernières soient encore peu utilisées (Es-Saady et al., 2018).

L'un des enjeux majeurs liés à ces fines reste leur grande capacité à absorber l'eau. En effet, leur très faible dimension ($< 0,063$ mm) (FEREDECO et al., 2023) leur offre une surface spécifique importante, bien supérieure à celle des granulats, ce qui leur permet d'absorber une grande quantité d'eau (Courard, 2023). Cela impacte directement la quantité d'eau à introduire dans le mélange.

C'est dans cette optique que la valorisation des fines de lavage constitue une piste intéressante pour la fabrication de briques (Cresswell, 2007). Il faudra tout de même tenir compte de leur demande en eau importante et de leur impact sur les performances du matériau.

1.2.4 Mortier et béton à base de fraction fine recyclée

Plusieurs expériences ont été réalisées afin de mettre en avant les propriétés du béton ordinaire dans lequel le sable naturel est remplacé par du sable recyclé à différents taux de substitution. L'analyse consiste à mettre en évidence et à rapporter les propriétés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci du béton.

Ledesma et al. (2015) mettent en évidence une expérience qui consiste à produire un nouveau mortier en remplaçant une partie du sable naturel par du sable recyclé provenant de déchets céramiques avec différents taux de substitution (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %). Ce mortier est constitué d'un ciment CEM II/B 32,5 N avec une répartition 1 : 5 (ciment : granulat). La consistance de ce mortier est de 175 ± 10 mm, avec l'ajout d'un adjuvant constant pour améliorer la maniabilité du mélange.

1.2.4.1 Impact sur les propriétés à l'état frais du béton

Ledesma et al. (2015) affirment que la masse volumique apparente du mortier frais diminue de manière linéaire lorsque le taux de remplacement du sable naturel par des sables recyclés augmente, étant donné que la masse volumique sèche des sables recyclés considérés est inférieure à celle des sables naturels. La masse volumique fraîche du mortier passe de 2050 kg/m^3 (0 % de substitution) à 1750 kg/m^3 lorsque 100 % du sable naturel est remplacé par du sable recyclé (Figure 1.19). Zhao et al. (2022) et Berredjem et al. (2016) arrivent au même constat. Cependant, ces derniers précisent que cette diminution serait corrélée à l'augmentation de la teneur en eau avec l'augmentation de la teneur en sable recyclé. De plus, cette propriété n'est pas un facteur limitant étant donné que les normes ne fixent pas de valeurs limites pour la densité fraîche (Ledesma et al., 2015).

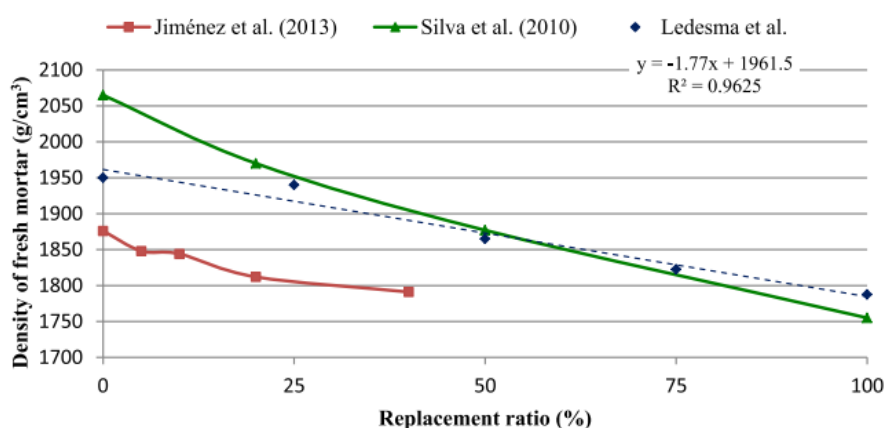


FIGURE 1.19 – Densité apparente du mortier frais par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)

Ensuite, Ledesma et al. (2015) montrent que l'utilisation de sable recyclé dans les mortiers frais entraîne une diminution linéaire de leur ouvrabilité. Ceci est dû à l'absorption d'eau plus élevée des sables recyclés (Kechkar et al., 2022 ; Zhao et al., 2022), à leur teneur en fines supérieure (taux de fines = 5 %) par rapport au sable ordinaire ainsi qu'à la finesse et à la forme anguleuse des grains recyclés qui induisent des frottements élevés (Kechkar et al., 2022). Une solution serait d'envisager de pré-saturer les fractions fines 24 h avant la fabrication du mortier, ce qui limiterait l'absorption d'eau utile au mélange par ces sables. Zhao et al. (2022) affirment qu'il serait possible d'atteindre les propriétés d'étalement du mortier ne contenant pas de sables recyclés (affaissement de 155 mm) pour les mortiers avec 50 % de sables recyclés.

Les résultats de l'expérience de Zhao et al. (2022) montrent également que les mortiers avec un taux de substitution de 5 % et de 10 % présentent une limite élastique et une viscosité plastique inférieures à celles d'un mortier de référence (contenant uniquement du sable naturel). Cependant, lorsque le taux de substitution passe à 50 % une limite élastique et une viscosité plastique plus élevées sont d'application et donc une fluidité plus faible. Cela est dû aux frottements internes entre les sables recyclés et les sables naturels. En effet, ces derniers sont plus élevés lorsque le taux de substitution augmente (Zhao et al., 2022).

1.2.4.2 Impact sur les propriétés à l'état durci du béton

Les résultats des études révèlent que la masse volumique apparente du mortier durci diminue proportionnellement au taux de remplacement par des sables recyclés. En effet, comme pour le mortier frais, cela est dû à la masse volumique plus faible de la fraction fine recyclée considérée (Ledesma et al., 2015).

La masse volumique du mortier durci passe de 1825 kg/m^3 (0 % de substitution) à 1590 kg/m^3 lorsque 100 % du sable naturel est remplacé par du sable recyclé (Figure 1.20).

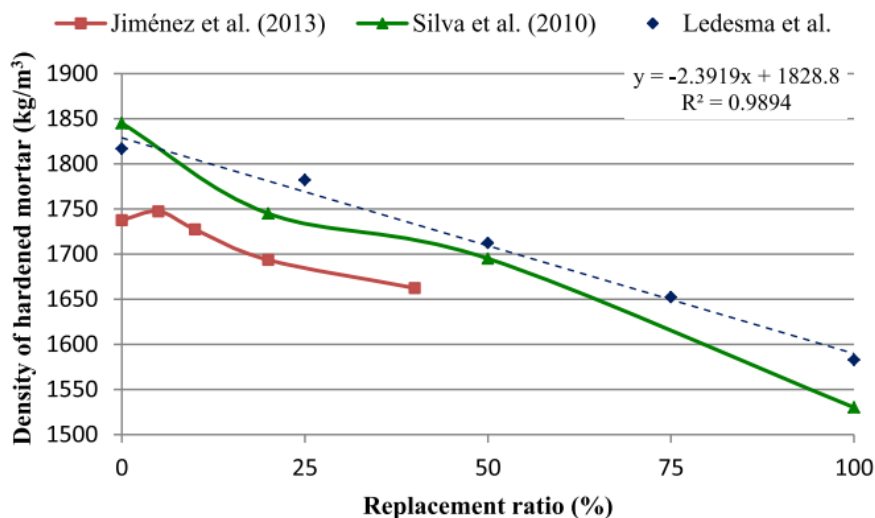


FIGURE 1.20 – Densité apparente du mortier durci par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)

De même, les résistances mécaniques moyennes à la compression et à la flexion décroissent avec ce taux (Ledesma et al., 2015), bien que tous les mortiers considérés montrent une augmentation de leur résistance au cours du temps (Kechkar et al., 2022 ; Ledesma et al., 2015). La résistance à la compression passe de 11,8 MPa pour un taux de substitution de 0 % à 8 MPa (100 % de remplacement) (Figure 1.21), tandis que pour la résistance à la flexion, une diminution de 46 % est observée (Figure 1.22) (Ledesma et al., 2015).

Une solution pour contrer cette diminution de résistance serait, selon Kechkar et al. (2022), l'ajout de fines. En effet, ces dernières ont l'aptitude à remplir les espaces intergranulaires de la composition, rendant ainsi le mélange plus compact.

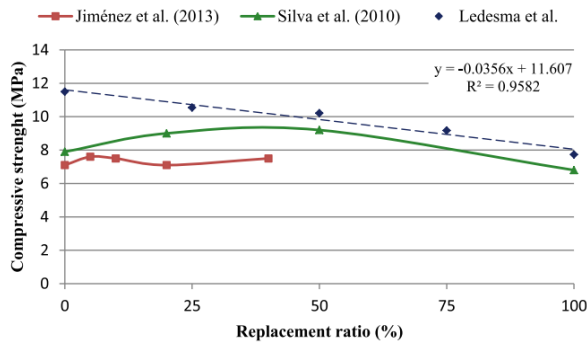


FIGURE 1.21 – Résistance à la compression du mortier durci à 28 jours en fonction du taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)

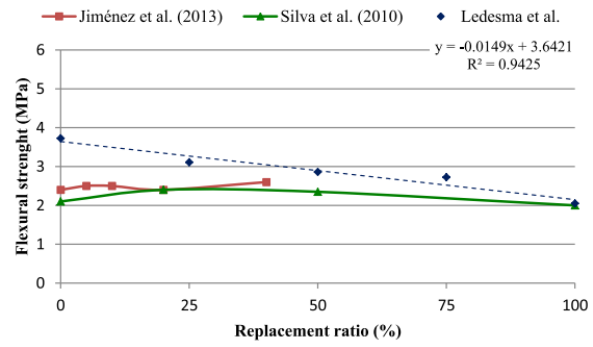


FIGURE 1.22 – Résistance à la flexion du mortier durci à 28 jours en fonction du taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)

En effet, au vu de la structure plus poreuse du nouveau mortier et de la grande teneur en air qu'il contient, la résistance de la pâte et donc du mortier diminue (Zhao et al., 2022). Selon Candamano et al. (2022), cette diminution de la résistance proviendrait des propriétés mécaniques moins performantes du sable recyclé par rapport au sable naturel utilisé, de la grande porosité du sable recyclé, de la présence de pâte de ciment adhérent sur les agrégats, des conditions d'humidité de ces derniers, ainsi qu'à une zone de transition interfaciale plus faible due à des microfissures causées par le concassage.

La Figure 1.23 met en évidence l'absorption d'eau capillaire du mortier durci. Ledesma et al. (2015) observent que cette absorption augmente linéairement lorsque le taux de remplacement augmente (de 0,58 à 1,05 $kg/(m^2 \cdot min^{0.5})$). En effet, cela est corrélé à la teneur en fines des sables. Zhao et al. (2022) obtiennent des résultats similaires dans leur étude.

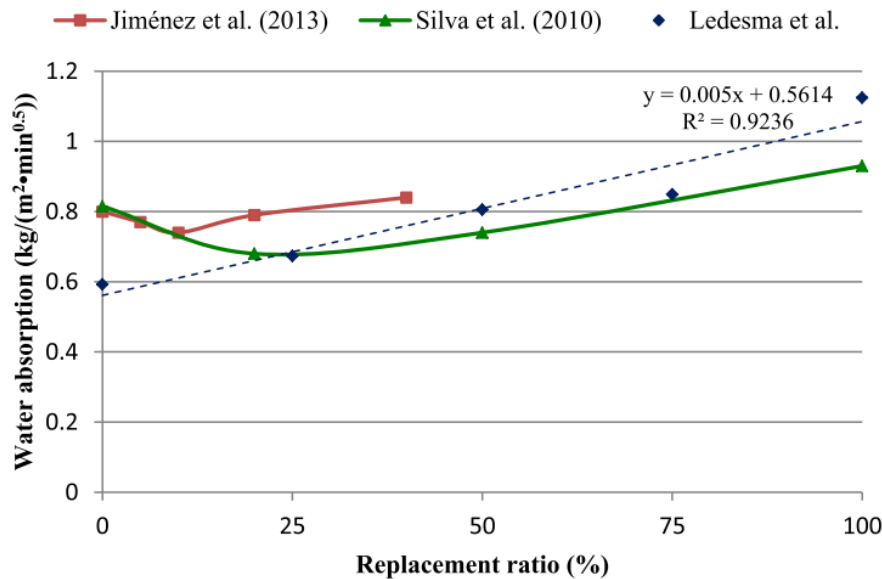


FIGURE 1.23 – Absorption d'eau due à l'action capillaire du mortier durci par rapport au taux de remplacement (Ledesma et al., 2015)

1.2.5 Briques comprimées à base de fraction fine recyclée

Plusieurs expériences ont été réalisées afin de mettre en évidence les propriétés des briques/blocs de terre comprimée incorporant des granulats fins recyclés dans leur composition. Cette analyse vise à rapporter les propriétés d'un matériau pouvant se rapprocher en termes de résistance et de méthode de fabrication du mélange optimisé dans cette recherche.

Rayeesulhaq et al. (2024) présentent une expérience consistant à produire des blocs de terre comprimée emboîtables en remplaçant une partie du sol par des granulats fins de béton recyclé, avec différents taux de substitution (entre 10 et 20 % de la teneur totale du sol). Les blocs formés sont réalisés à l'aide d'une presse hydraulique avec une pression de compaction comprise entre 13,78 MPa et 17,23 MPa, appliquée pendant 3 secondes.

Malkanthi et al. (2021) étudient quant à eux la conception de blocs de terre comprimée stabilisée substituant une partie du sol avec des fines recyclées de déchets de construction à des taux de 5, 10, 15 et 20 %. Plusieurs teneurs en ciment sont testées dans cette étude (6, 8 et 10 %) avec une teneur en eau constante de 10 %.

Les résultats de l'étude de Rayeesulhaq et al. (2024) montrent que la quantité de ciment affecte significativement la résistance à la compression des blocs. De manière générale, plus la quantité de ciment augmente dans le mélange, plus la résistance à la compression est grande (Figure 1.24).

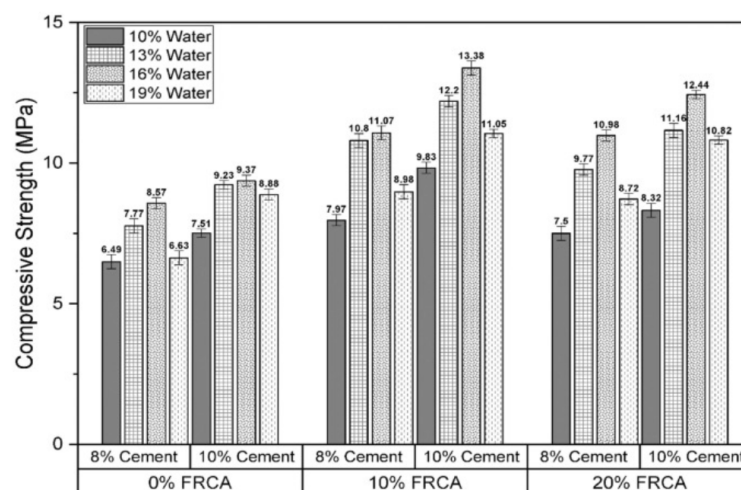


FIGURE 1.24 – Relation entre la résistance à la compression et les variations des pourcentages d'eau, de ciment et de granulats fins recyclés (Rayeesulhaq et al., 2024)

Ces observations sont également confirmées par l'étude de Malkanthi et al. (2021). Rayeesulhaq et al. (2024) recommandent un pourcentage massique en ciment de 10 %, tandis que Malkanthi et al. (2021) préconisent une teneur de 8 %, considérée comme la teneur la plus utilisée dans l'industrie pour la fabrication de blocs stabilisés.

Sur base de la Figure 1.24, la teneur en eau est également une propriété qui affecte la résistance du bloc. Une teneur en eau optimale de 16 % permet d'atteindre les meilleures performances en fonction de plusieurs teneurs testées (Rayeesulhaq et al., 2024). Concernant l'incorporation de fraction fine recyclée, les différents taux de substitution du sol (0 %, 10 % et 20 %) indiquent qu'un remplacement de 10 % permet d'obtenir les meilleures résistances, selon Malkanthi et al. (2021) et Rayeesulhaq et al. (2024).

À propos de l'évolution de la résistance au cours du temps, cette dernière atteint 7,49 MPa à 7 jours contre 13,38 MPa à 28 jours pour l'expérience de Rayeesulhaq et al. (2024) (Figure 1.25). Le projet de recherche de Malkanthi et al. (2021) obtient une résistance sèche à 28 jours de 8,7 MPa.

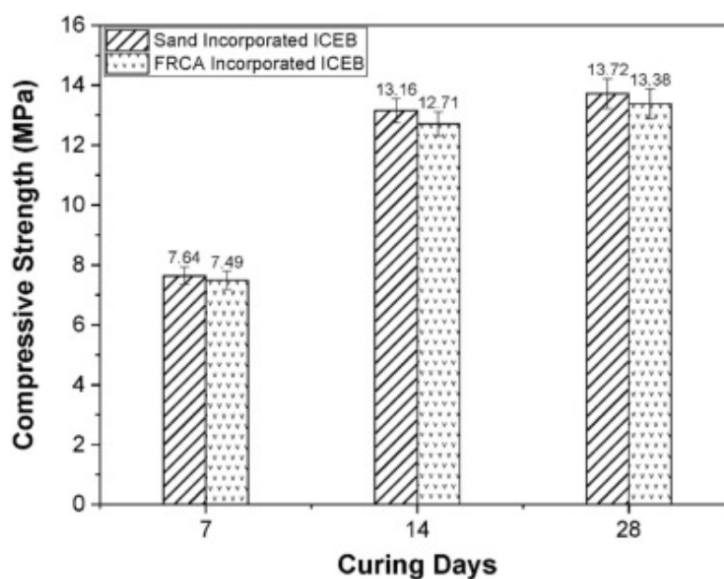


FIGURE 1.25 – Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours (Rayeesulhaq et al., 2024)

La résistance à la compression humide du mélange optimisée par Rayeesulhaq et al. (2024) s'élève à 8,05 MPa. En moyenne, cette valeur est environ 35 % inférieure à la résistance à la compression sèche du matériau. Malkanthi et al. (2021) obtiennent une résistance humide à 28 jours de 4,8 MPa, soit une diminution légèrement supérieure à 35 %.

Cette différence de résistance entre les deux études s'explique notamment par la nature différente des terres utilisées, mais également par la variation des paramètres de formulation des études : l'une utilise un pourcentage massique de ciment de 8 % contre 10 % dans l'autre et la teneur en eau du mélange diffère également. On peut considérer que l'étude de Rayeesulhaq et al. (2024), qui optimise la résistance à la compression de ses briques en valorisant des granulats fins recyclés, présente des conditions proches de celles de notre recherche.

1.2.6 Applications

Les propriétés mécaniques des granulats de béton dépendent de nombreux facteurs : la granulométrie, la qualité, le malaxage, etc. Ces granulats recyclés ainsi que les sables de concassage peuvent être intégrés dans diverses applications : en sous-fondation, en fondation, en revêtement ou encore en remblai. Dans ce dernier cas, les sables de criblage de débris de granulats recyclés sont également utilisés. Les granulats recyclés sont également appliqués dans le béton structurel dans des proportions contrôlées ou encore comme matériaux autocompactants réexcavables (FEREDECO et al., 2023).

Toutefois, l'application des sables recyclés reste une voie encore peu explorée (Berredjem et al., 2016), soulevant la question de leur potentiel dans le domaine des bétons compactés. Des recherches sont actuellement en cours sur la production de blocs de construction ainsi que dans l'impression 3D béton avec des granulats et sables recyclés (Courard, 2023).

1.3 Durabilité

1.3.1 Généralités

La durabilité des ouvrages en béton correspond à leur aptitude à conserver leurs performances mécaniques à travers le temps, malgré les agressions par des agents internes ou externes. Selon Baroghel-Bouny (2008), la durabilité se définit par la capacité à conserver de bonnes performances tout en gardant un niveau adéquat de qualité, en considérant autant la conception de l'ouvrage que les matériaux et leur mise en œuvre.

Les conditions environnementales sont prises en compte dans les normes, en se basant sur la spécification du béton, pour l'évaluation de sa durabilité. Des facteurs tels que l'humidité relative, la température, l'exposition et l'agressivité chimique du milieu sont intégrés (Baroghel-Bouny, 2008), notamment via les classes d'environnement définies par la norme NBN B 15-001 :2024 (par exemple : EE pour les environnements extérieurs, ES pour les environnements marins et EA pour les environnements agressifs) (Courard, 2023).

Ces classes d'environnement définissent des exigences spécifiques pour les bétons non armés, ainsi que pour les bétons armés ou précontraints, en imposant des critères sur la formulation du béton : comme le rapport E/C maximal, la quantité minimale de ciment (en kg/m^3) et la classe minimale de résistance (Courard, 2023). Les paramètres de formulation comme le rapport E/C , le ciment (quantité, composition), les additions minérales (cendres volantes, laitiers, ...), les adjuvants organiques et les granulats influencent également la durabilité du béton (Baroghel-Bouny, 2008).

La durabilité repose sur deux concepts majeurs : la durée de vie d'un ouvrage et les indicateurs de durabilité. La durée de vie d'un ouvrage est le temps pendant lequel la structure est susceptible de servir normalement, sous un niveau de charge et de service déterminés, sans nécessiter de maintenance considérable. Les indicateurs de durabilité sont des paramètres, en fonction de la formulation du béton (sain) et des conditions environnementales, qui peuvent servir de précurseurs pour l'estimation et la prédiction de ses résistances à des phénomènes de dégradation tels que la porosité, la perméabilité et la structure chimique de la matière (Baroghel-Bouny, 2008).

Deux types d'indicateurs de durabilité existent, liés à la microstructure et aux propriétés de transport :

- Indicateur chimique (échelle microscopique) :
 - Teneur en portlandite $Ca(OH)_2$ initiale.
- Indicateurs physiques globaux (échelle macroscopique) :
 - Porosité accessible à l'eau ;
 - Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions Cl^- ;
 - Perméabilité aux gaz ;
 - Perméabilité à l'eau liquide (Baroghel-Bouny, 2008).

1.3.1.1 Caractérisation de la microstructure

Les caractéristiques du réseau poreux du béton jouent un rôle déterminant dans la microstructure de ce dernier. La porosité du béton s'identifie comme étant un paramètre étroitement corrélé à la résistance du matériau, influençant ainsi sa durabilité. Quand la porosité du matériau diminue, par une réduction du rapport E/C ou encore par l'ajout d'ultrafines, la résistance augmente. D'autres paramètres liés à la porosité entrent également en jeu, comme la dimension des pores. En effet, un réseau poreux fin rend difficile la pénétration des agents agressifs, améliorant ainsi la durabilité du béton (Baroghel-Bouny, 2008).

De plus, la teneur initiale en portlandite $Ca(OH)_2$ dans le béton est un paramètre indispensable en tant qu'indicateur de durabilité. En effet, il s'agit d'un paramètre clé tout au long de la vie du béton, de sa phase de conception jusqu'à son vieillissement (Baroghel-Bouny, 2008).

1.3.1.2 Propriétés de transport

Le transfert de fluide dans les bétons peut se produire selon deux phénomènes de transport : la perméation et la diffusion (Baroghel-Bouny, 2008 ; Courard, 2023). La perméabilité (apparente ou intrinsèque) et le coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des chlorures peuvent donc être qualifiés d'indicateurs généraux de durabilité (Baroghel-Bouny, 2008).

Transport par diffusion

Le transport par diffusion peut prendre deux formes distinctes. La première correspond au transport en phase liquide d'un constituant (Cl^- , sulfates, CO_2 , O_2), tandis que la seconde correspond au transport en phase gazeuse d'un constituant (oxygène, vapeur d'eau, CO_2) sous l'effet de son agitation moléculaire aléatoire. Lorsqu'il y a une différence de concentration au sein même du milieu, un transport s'effectue de l'endroit le plus concentré vers la zone la moins concentrée du milieu (Courard, 2023).

Transport par perméation

Baroghel-Bouny (2008) définit la perméabilité comme : « l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale ». En effet, Courard (2023) affirme que la perméabilité dépend non seulement de la différence de pression, mais également de la forme, des dimensions des pores, etc.

Un béton durable est un béton capable de conserver sa résistance dans le temps. La Figure 1.26 montre qu'un béton ayant une faible résistance à la compression présente une perméabilité plus élevée, et par conséquent, une forte porosité, ce qui réduit sa durabilité. Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux et ainsi améliorer sa durabilité, il est nécessaire de diminuer la porosité totale du matériau (en réduisant le rapport E/C), la connectivité, la taille des pores et augmenter la tortuosité du passage des fluides (Courard, 2023).

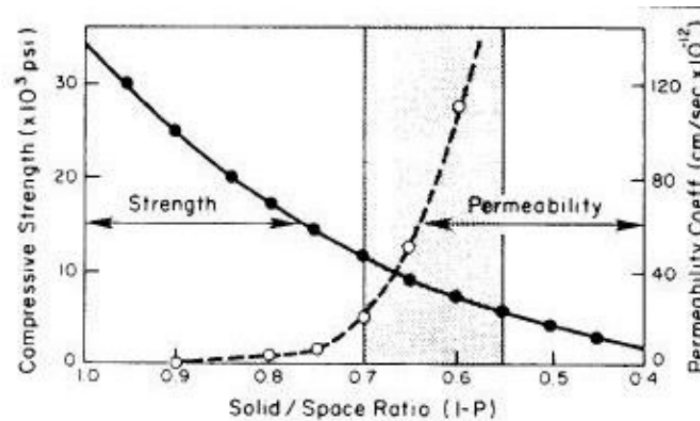


FIGURE 1.26 – Perméabilité, résistance à la compression et porosité (Courard, 2023)

1.3.2 Durabilité des blocs comprimés

Cette sous-section s'intéresse à la durabilité des blocs, en particulier ceux ayant subi un processus de compaction, comme ceux étudiés dans le cadre de cette recherche. Kariyawasam et Jyasinghe (2016) mettent en évidence plusieurs expériences portant sur la durabilité de blocs de pisé compacté et stabilisé au ciment, en lien avec des problématiques de retrait, de chaleur et d'érosion. De son côté, Heathcote (1995) décrit les méthodes d'essai utilisées pour évaluer la durabilité de blocs. Pour finir, Wiomont (2022) aborde dans son travail de fin d'études le comportement de briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés non lavés, ainsi que leur durabilité.

1.3.2.1 Résistance à la compression humide

Dans des climats où il y a des risques de fortes précipitations et où le matériau est potentiellement exposé aux intempéries, il est important de quantifier sa résistance à l'état humide ainsi qu'à l'état sec. Le test de compression humide consiste à plonger trois échantillons dans l'eau pendant 24 heures, puis à mesurer leur résistance à la compression (Heathcote, 1995; Kariyawasam & Jyasinghe, 2016). Selon Kariyawasam et Jyasinghe (2016), la teneur en ciment du mélange influence le rapport entre la résistance à l'état humide et à l'état sec. Ce rapport augmente avec la teneur en ciment et est de l'ordre de 0,61 pour un dosage de 8 % de ciment (Figure 1.27).

CSEB type	Wet strength (MPa)	Dry strength (MPa)	Ratio of wet/dry strength
CSRE specimen (5% cement)	2.33	4.84	0.48
CSRE specimen (6% cement)	1.22	2.34	0.52
CSRE specimen (8% cement)	3.19	5.23	0.61

FIGURE 1.27 – Résistance à la compression humide et sèche pour différents taux de ciment (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016)

De plus, selon Heathcote (1995), la spécification CRATerre pour les briques de terre stabilisées exige que :

- la résistance à la compression minimale à l'état sec soit de 2,4 MPa ;
- la résistance à la compression minimale à l'état saturé soit de 1,2 MPa ;
- le rapport résistance humide/sèche ne doit pas être inférieur à 0,5.

1.3.2.2 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est un indicateur important de la durabilité des blocs comprimés, elle est généralement quantifiée à l'aide d'un essai d'immersion. Selon Kariyawasam et Jyasinghe (2016), ce test consiste à pulvériser de l'eau pendant 1 h sur trois échantillons, puis à les sécher au four pendant 24 heures. L'absorption d'eau est ensuite calculée via la formule suivante (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016 ; Wiomont, 2022) :

$$Absorption [\%] = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \cdot 100 \quad (1.4)$$

Selon la Figure 1.28, l'absorption d'eau des échantillons des blocs diminue à mesure que la teneur en ciment augmente (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016).

Cement percentage (%)	Water absorption (%) of CSRE specimens
2	21.2
4	17.4
5	12.5
6	8.6
8	6.4
10	5.3

FIGURE 1.28 – Absorption d'eau pour différents taux de ciment (Kariyawasam & Jyasinghe, 2016)

De manière similaire, les briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés montrent une absorption d'eau comprise entre 15,6 % et 21,5 % pour une teneur en ciment allant de 13,6 % à 5 % (Wiomont, 2022). L'absorption d'eau des échantillons diminue donc à mesure que la teneur en ciment augmente. On observe également que la présence de matériaux recyclés entraîne une augmentation de l'absorption d'eau, en raison d'une porosité généralement plus élevée et d'une capacité plus importante à retenir l'humidité du matériau (Wiomont, 2022).

D'un point de vue normatif, la norme NBN B 15-001 :2004 (annexe O) déclare des valeurs limites d'absorption d'eau pour les bétons, selon différents types définis par leur composition :

TABLE 1.14 – Valeurs limites d'absorption d'eau (NBN B 15-001 :2004)

Type	T(0,50)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Valeur moyenne (sur 3 éprouvettes)	$\leq 6 \%$	$\leq 6,3 \%$	$\leq 5,5 \%$	$\leq 5,8 \%$
Valeur individuelle	$\leq 6,5 \%$	$\leq 6,8 \%$	$\leq 6,0 \%$	$\leq 6,3 \%$

Cube (150 · 150 · 150)mm : Réduction de 0,3 % des valeurs.

4mm ≤ D_{max} < 8mm : Réduction de 2 % des valeurs.

Ces références permettent de positionner les performances des briques fabriquées par rapport aux blocs traditionnels ainsi qu'aux différents types de blocs comprimés.

1.3.2.3 Résistance à l'érosion

L'érosion constitue un autre problème important en matière de durabilité. Ce phénomène peut se produire sous l'effet de fortes pluies tropicales à la surface du matériau (Heathcote, 1995 ; Kariyawasam & Jyasinghe, 2016), ce qui n'est pas fréquent en Belgique.

Des essais d'érosion sont réalisés en exposant un échantillon à un jet d'eau constant pendant 1 h (Heathcote, 1995 ; Kariyawasam & Jyasinghe, 2016). Le jet d'eau est caractérisé par une pression de 50 kPa à l'aide d'une buse standard placée à 470 mm de l'échantillon. La zone exposée de l'échantillon est un cercle de 150 mm de diamètre (Heathcote, 1995).

La performance, en termes de vitesse d'érosion (mm/h), est déterminée en fonction de la profondeur des piqûres ou du temps nécessaire pour qu'elles traversent entièrement l'échantillon. Selon Kariyawasam et Jyasinghe (2016), la rupture est considérée atteinte lorsque la profondeur maximale d'érosion dépasse 60 mm ou que l'eau pénètre jusqu'à l'arrière du bloc.

1.3.2.4 Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est un facteur important de durabilité, notamment dans des contextes d'exposition prolongée à l'eau. Pour la quantifier, un test à l'aide d'une brosse métallique peut être réalisé (Heathcote, 1995).

Cet essai consiste à compacter un échantillon de sol dans un moule de 100 mm de diamètre sur une épaisseur de 125 mm. Après une cure de 7 jours, l'échantillon est séché au four, pesé puis immergé dans l'eau pendant 5 h avant d'être séché une nouvelle fois au four et brossé avec une brosse métallique durant douze cycles (Figure 1.29) (Heathcote, 1995).

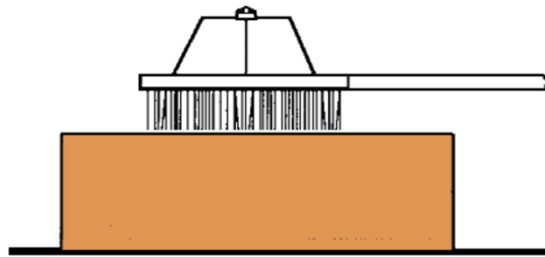


FIGURE 1.29 – Test d’abrasion (Wiomont, 2022)

Les recommandations préconisent un taux de perte de masse ne devant pas dépasser :

- 5 % dans les régions où les précipitations annuelles sont supérieures à 500 mm ;
- 10 % dans les régions où les précipitations annuelles sont inférieures à 500 mm (Heathcote, 1995).

Pour le même test, Wiomont (2022) obtient en moyenne un taux de perte de masse de 0,39 % pour les briques comprimées avec des granulats fins recyclés.

2.1 Méthodologie

Il est rappelé que l'objectif principal de cette étude est d'optimiser les formulations les plus prometteuses de la recherche de Doitrand (2025) en valorisant le sable mixte recyclé et les fines de lavage, tout en maximisant la résistance à la compression du matériau. Le second objectif est de caractériser la brique comprimée optimisée à l'aide de différents essais : absorption d'eau, mode de cure, résistance à l'état humide et sec, force de compaction, vitesse de chargement et variabilité des résultats. À la suite, il est également intéressant d'identifier les matériaux de construction qui pourront être comparés à la brique optimisée en termes de résistance.

Ce chapitre aborde, dans un premier temps, la description de chacun des matériaux utilisés dans la formulation des briques comprimées ainsi que les tests réalisés pour la caractérisation de ces composants. Ensuite, un protocole est établi pour la fabrication de ces briques. Leur caractérisation repose ensuite sur différents essais de résistance et de durabilité, décrits dans ce chapitre. Tous les tests sont effectués sur base d'une référence normative ou d'une méthode d'évaluation précise, avec un protocole spécifique. Ce chapitre est divisé en quatre sections (Figure 2.1) :

- La section 2.2 "Matériaux" décrit les différents matériaux utilisés pour la formulation des briques comprimées ;
- La section 2.3 "Caractérisation des matériaux" décrit les essais de caractérisation réalisés sur les fines recyclées et sur le sable recyclé ;
- La section 2.4 "Fabrication des briques comprimées" présente le protocole établi pour la formulation et la fabrication des briques ;
- La section 2.5 "Caractérisation des briques comprimées" établit les différents essais de caractérisation des briques comprimées après leur formulation.

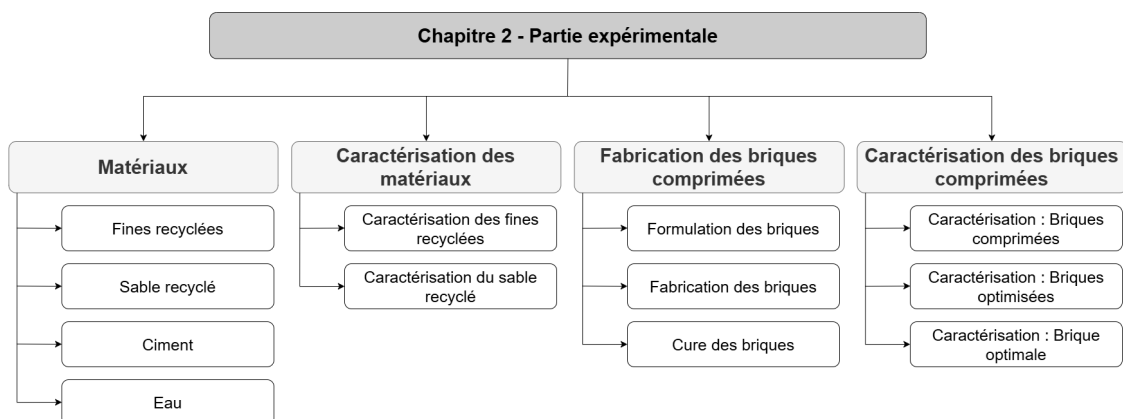


FIGURE 2.1 – Méthodologie

2.2 Matériaux

2.2.1 Fines recyclées : F0-5

Les fines de cette étude proviennent du processus de lavage des déchets inertes de déconstruction (mélange de terre et de pierres) de la société WANTY Satea, dans un but de revalorisation. Ces fines prennent la forme de blocs compressés (Figure 2.2) car elles sont issues du processus de fabrication des fines de lavage.



FIGURE 2.2 – Blocs de fines initiaux

En ce qui concerne les essais réalisés sur les fines, des tests ont été réalisés sur cinq lots différents (de F0 à F4) pour étudier la variabilité des échantillons. Ces lots ont été prélevés à différents endroits d'un stock important présent sur le site de la société Wanty. Sur base de cette variabilité, le lot F5, prenant la forme d'un big bag du même stock, a été sélectionné pour la caractérisation finale des fines (Figure 2.3). Les F5 ont été placées dans trois bidons hermétiques afin de conserver leur teneur en eau initiale (Figure 2.4).



FIGURE 2.3 – Big bag



FIGURE 2.4 – Bidon hermétique

Plusieurs tests ont été réalisés sur les fines dans l'objectif de les caractériser : un test de teneur en eau et de demande en eau, l'étude de la masse volumique des particules par pycnomètre à gaz et une analyse laser de la granulométrie de cette fraction fine.

2.2.2 Sable recyclé : SMR 0/2

Le sable utilisé pour l'étude est un sable mixte recyclé non lavé provenant de la même société que les fines recyclées. Selon l'entreprise WANTY Satea, il s'agit d'un sable dont la taille maximale des grains est de 2 mm. Ce sable a été fourni dans un big bag (Figure 2.5), similaire aux fines. Pour conserver sa teneur en eau, le sable a été placé dans cinq bidons hermétiques (Figure 2.6).



FIGURE 2.5 – Big bag



FIGURE 2.6 – Bidon hermétique

Pour la caractérisation du sable recyclé, les tests ont été directement réalisés à partir du big bag reçu : une étude de la granulométrie par tamisage et un test d'absorption d'eau par immersion ont été réalisés.

2.2.3 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de haut-fourneau de type CEM III/B 32,5 N - LH/SR LA (Figure 2.7). Il a été fourni par la société Heidelberg Materials et présente les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique : 3000 kg/m^3 ;
- Résistance à la compression à 28 jours : $32,5 \text{ N/mm}^2$;
- Constituants : Clinker (20 – 34 %), laitier de haut fourneau (66 – 80 %) et des sous-composants (0 – 5 %).

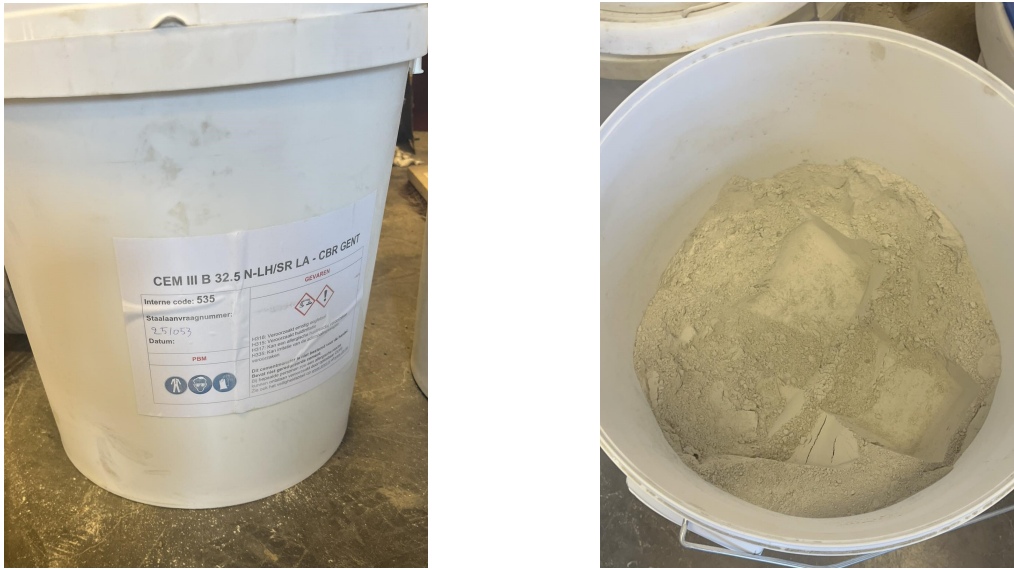


FIGURE 2.7 – Ciment de haut-fourneau

Ce ciment a été choisi parmi la gamme de ciments disponibles en Belgique en raison de son impact environnemental faible. L'objectif était de sélectionner un ciment contenant un minimum de clinker, ce qui le rend préférable à un ciment Portland. En effet, le CEM I est le type de ciment le plus polluant, à cause de sa teneur en clinker importante.

2.2.4 Eau

Conformément à la norme NBN EN 1008 :2002 concernant l'eau de gâchage pour les bétons, de l'eau du robinet a été utilisée pour la réalisation des briques comprimées.

2.3 Caractérisation des matériaux

2.3.1 Caractérisation des fines recyclées

2.3.1.1 Teneur en eau par séchage en étuve ventilée

Cet essai, qui suit la norme NBN EN 1097-5 :2008, a pour but de déterminer la teneur en eau des fines par séchage en étuve ventilée. La quantité d'eau libre, se trouvant soit à la surface des particules, soit à l'intérieur de celles-ci ou dans leurs pores, sera déterminée à la suite de l'essai.

La première étape de la prise de mesure consiste à peser une boîte métallique vide et à enregistrer la valeur en M_2 [g]. Ensuite, la détermination de la masse de la prise d'essai humide M_1 [g] se réfère à la norme. En effet, celle-ci considère que si la plus grande dimension (D) de tamis est inférieure à 1 mm (ce qui est le cas pour des fines), la masse minimale M_1 doit être de 200 g.

Une fois cette masse enregistrée, la boîte métallique contenant la prise d'essai humide (Figure 2.8) est placée dans une étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse constante (M_3) soit atteinte (Figure 2.9) après une série de pesées successives. Pour déterminer si M_3 est bien atteinte, il faut vérifier qu'après avoir refroidi la boîte en fer à température ambiante, la masse de la dernière pesée ne diffère pas de plus de 0,1 % de la pesée précédente.



FIGURE 2.8 – Échantillons pesés



FIGURE 2.9 – Échantillons dans l'étuve

La valeur de la teneur en eau (w), exprimée en pourcentage, se calcule sur base de l'équation 2.1.

$$w [\%] = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Avec :

M_1 [g] = la masse de la prise d'essai humide ;

M_3 [g] = la masse constante de la prise d'essai séchée.

Ce test a été réalisé à plusieurs moments de l'étude :

- Lors de la réception des fines, afin de déterminer la teneur en eau initiale réelle des six lots de fines ($w_{init,r,F0-5}$) ;
- Après humidification des fines (en 2.3.1.2), afin de déterminer la teneur en eau réelle avant de commencer l'essai de demande en eau des six lots de fines ($w_{ap.hum,r,F0-5}$) ;
- Après les tests (en 2.3.1.2), afin de déterminer la teneur en eau réelle des six lots de fines après chaque essai de demande en eau ($w_{ap.test,r,F0-5}$).

2.3.1.2 Demande en eau

La réalisation du test de demande en eau commence par l'humidification des fines.

Les fines des lots F0 à F4 ne sont pas utilisables dans leur état initial. En effet, ces fines prennent la forme de blocs compressés et agglomérés (Figure 2.10). Il est donc nécessaire de passer par une étape d'humidification pour pouvoir les utiliser correctement et permettre leur désagglomération. De plus, cette humidification permet d'éviter une absorption excessive de l'eau efficace par les fines. Un rapport $E/F = 0,2$ permet d'atteindre un équilibre en termes de consistance, favorisant la désagglomération des fines sans excès d'eau (Doitrand, 2025).



FIGURE 2.10 – Fines compressées

La méthode d'humidification se base sur la teneur en eau initiale réelle des cinq lots de fines ($w_{init,r,F0-4}$). Une fois $w_{init,r,F0-4}$ déterminée (en 2.3.1.1), et en tenant compte de la valeur théorique $E/F_{th} = 0,2$, environ 5000 g de fines sont prélevées avant humidification ($M_{F0-4,h}$) pour chaque lot, afin de réaliser les essais de demande en eau. Les fines sont placées dans un grand plateau et la masse d'eau à ajouter pour les humidifier est déterminée à l'aide des formules suivantes (2.2 à 2.4).

La masse de fines sèches ($M_{F0-4,s}$) [g] est calculée en fonction de la $M_{F0-4,h}$ et de la teneur en eau initiale :

$$M_{F0-4,s} = \frac{M_{F0-4,h}}{1 + w_{init,r,F0-4}} \quad (2.2)$$

De même, la masse d'eau initiale ($M_{eau,init}$) [g] contenue dans les fines avant leur humidification est obtenue par :

$$M_{eau,init} = M_{F0-4,h} - M_{F0-4,s} \quad (2.3)$$

Enfin, la masse d'eau à ajouter pour humidifier les fines [g] est calculée en soustrayant de la masse d'eau totale nécessaire pour atteindre le rapport $E/F = 0,2$ la masse d'eau initiale contenue dans les fines :

$$M_{eau,pour\ hum} = M_{F0-4,s} \cdot E/F_{th} - M_{eau,init} \quad (2.4)$$

Une fois $M_{eau,pour\ hum}$ déterminée, l'eau sera ajoutée aux fines (Figure 2.11). Après 24 h, celles-ci seront utilisables et auront absorbé toute l'eau présente.



(a) F1 humidifiées



(b) F2 humidifiées

FIGURE 2.11 – Fines humidifiées

Une fois les fines humidifiées, l'essai β_p peut débuter.

Cette méthode (BRL 1804, annexe C) permet de déterminer la demande en eau β_p des matériaux fins. Après humidification, les fines sont concassées à l'aide d'un marteau (Figure 2.12a), puis broyées avec un malaxeur (Figure 2.12b) afin de les rendre utilisables pour l'essai.



(a) F4 concassées



(b) F4 broyées

FIGURE 2.12 – Fines broyées pour l'essai de besoin en eau

Le test consiste à mesurer l'étalement d'une pâte avec quatre rapports E/F différents. L'objectif est d'extrapoler les quatre valeurs obtenues par régression linéaire jusqu'à leur intersection avec l'axe des ordonnées afin d'obtenir la valeur du β_p .

La première étape consiste à fabriquer la pâte. Après avoir pesé les fines et l'eau nécessaires à la réalisation de l'essai, il faut :

- Mélanger pendant 60 secondes (vitesse 1) : F0-4 + W1 ;
- Arrêter de mélanger et racler avec la spatule ;
- Mélanger pendant 60 secondes (vitesse 1) ;
- Arrêter de mélanger et ajouter W2 ;
- Mélanger pendant 60 secondes (vitesse 1) : F0-4 + W1 + W2 ;
- Arrêter de mélanger et racler avec la spatule ;
- Mélanger pendant 60 secondes (vitesse 1).

Avec :

$W1 = 70 \%$ de la quantité totale d'eau ;

$W2 = 30 \%$ de la quantité totale d'eau.

Lorsque la pâte est prête pour le test (Figure 2.13a), celle-ci est coulée dans un cône en acier inoxydable centré sur une plaque lisse humidifiée (Figure 2.13b). Ensuite, le cône est retiré, en le soulevant par un mouvement fluide, de la plaque avant de mesurer l'étalement (Figure 2.13c). Ce dernier est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse en prenant le plus grand diamètre ($d1$) et le diamètre perpendiculaire à celui-ci ($d2$). L'opération de mesure est répétée avec la même pâte, ce qui permet d'obtenir les valeurs $d3$ et $d4$.



(a) Pâte prête pour l'essai

(b) Cône et plaque humidifiés

(c) Étalement de la pâte

FIGURE 2.13 – Essai β_p

Une moyenne arithmétique (F_p) des quatre diamètres est ensuite effectuée, ce qui permet de déterminer la valeur du débit Γ_p :

$$\Gamma_p = \left(\frac{F_p}{F_0}\right)^2 - 1 \quad (2.5)$$

Avec :

$F_0 = 100 \text{ mm}$;

F_p = la mesure du diamètre moyen en mm .

Il faut ensuite réitérer l'expérience avec les trois autres rapports E/F , ce qui permet d'obtenir au total quatre couples de points $E/F - \Gamma_p$. Graphiquement, ces points servent à la création d'une ligne de tendance. L'intersection de cette ligne avec l'axe Y (quand $\Gamma_p = 0$) correspond au besoin en eau des fines β_p .

2.3.1.3 Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz

Sur base de la norme NBN EN ISO 8130-2 :2021, la masse volumique absolue des fines est mesurée à l'aide d'un pycnomètre à gaz.

Ce test a été décidé, car il est applicable à tous types de poudres de revêtement. Pour procéder à la mesure de la masse volumique absolue des six lots de fines par le test du pycnomètre à gaz, il faut d'abord préparer le matériau. Pour ce faire, une poudre homogène des fines doit être obtenue par broyage. Le principe consiste à utiliser un broyeur à disque (Figure 2.14).



FIGURE 2.14 – Broyeur à disque

La première étape consiste à fragmenter un échantillon de fines sèches à l'aide d'un marteau (Figure 2.15a). Une fois l'échantillon fragmenté, $\pm 50\text{ g}$ seront placés dans le bol du broyeur à disques avant de démarrer la machine pendant 30 secondes (Figure 2.15b). Lorsque le broyage est terminé, la poudre est récoltée (Figure 2.15c) et l'essai par pycnomètre à gaz peut être réalisé.



(a) Fines concassées

(b) Avant broyage

(c) Après broyage

FIGURE 2.15 – Broyage des fines

Le principe de l'essai consiste à déterminer le volume solide d'un échantillon (V_e) d'une certaine masse, puis d'en déduire sa masse volumique (M_v) par le déplacement d'un gaz entre une enceinte de référence et une enceinte de mesure.

Pour ce faire, de l'hélium à une pression donnée (P_1) est injecté dans l'enceinte de référence, vide et de volume connu (V_1). Ensuite, le gaz se détend vers l'enceinte de mesure, qui contient l'échantillon de fines sèches broyées, de volume total connu (V_0). Une fois que l'équilibre est atteint, la nouvelle pression (P_2) dans l'enceinte de mesure est mesurée. Sur base de la loi de Boyle-Mariotte (2.6), le volume solide de l'échantillon (V_e) peut être déterminé :

$$V_e [cm^3] = V_0 - V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} - 1\right) \quad (2.6)$$

Avec :

V_e = le volume solide de l'échantillon ;

V_0 = le volume de l'enceinte de mesure ;

V_1 = le volume de l'enceinte de référence ;

P_1 = la pression du gaz dans l'enceinte de référence ;

P_2 = la pression du gaz dans l'enceinte de mesure.

En se basant sur la masse de la prise d'essai initiale (m), la masse volumique absolue (2.7) des fines des six lots est calculée :

$$M_v [g/cm^3] = \frac{m}{V_e} \quad (2.7)$$

2.3.1.4 Granulométrie laser

La granulométrie laser est une technique permettant de déterminer la distribution granulométrique des particules fines. Le protocole de la norme NBN ISO 13320 :2020 a été suivi pour réaliser l'essai.

Pour ce faire, un échantillon de fines (F5), est d'abord mélangé à une solution d'eau déminéralisée pour s'assurer de la désagglomération des particules (Figure 2.16). Celles-ci sont ensuite introduites dans l'unité de dispersion de la machine Hydro 2000S (Figure 2.17). Pour assurer une dispersion homogène des fines, les paramètres suivants sont encodés dans la machine :

- Ultrason : 50 %
- Vitesse agitateur/pompe : 2870 tours/minute

Un faisceau laser est ensuite envoyé à travers les particules et la diffraction provoquée par les particules est analysée par le logiciel afin de déterminer la distribution granulométrique du lot.



FIGURE 2.16 – Mélange eau/fines



FIGURE 2.17 – Hydro 2000S

2.3.2 Caractérisation du sable recyclé

2.3.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sable est réalisée à l'aide d'une série de tamis. La norme NBN EN 933-1 :2012 décrit le protocole à adopter pour la réalisation de cet essai. Le principe de ce test consiste à effectuer un tamisage par voie sèche pour déterminer la granularité et tracer la courbe granulométrique correspondant à ce sable.

Selon la norme NBN EN 933-1 :2012, le test consiste à séparer un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes en fonction des ouvertures des tamis suivantes :

8 mm - 4 mm - 3,15 mm - 2 mm - 1 mm - 0,5 mm - 0,25 mm - 0,125 mm - 0,063 mm.
Au vu de la dimension du sable (0/2), on commence par le tamis de 4 mm.

Pour procéder au tamisage, trois échantillons, d'une masse supérieure à 300 g chacun (M_{humide}), ont été prélevés afin d'éviter une surcharge des tamis lors du test. Le matériau a ensuite été séché dans une étuve à $110 \pm 5^\circ C$ jusqu'à masse constante ($M_{sèche}$). Avant de verser le matériau dans la colonne de tamis, disposés de haut en bas dans un ordre de dimensions de mailles décroissantes, la norme recommande un lavage préalable. Ce lavage permet d'éliminer une grande quantité de fines présentes dans le sable ($M_{sèche,L}$). Une fois l'échantillon séché en étuve, la masse sèche lavée de l'échantillon sera versée dans le tamis en trois fois pour éviter une surcharge des tamis et la colonne sera mise en vibration à l'aide d'une table vibrante (Figure 2.18).



FIGURE 2.18 – Colonne de tamis

Après la vibration, la masse de refus de chaque tamis est mesurée et cumulée à la masse précédente.

Le pourcentage cumulé de passants est calculé à l'aide de la formule 2.8 :

$$Passant [\%] = 100 - \sum (100 \cdot \frac{R_i}{M_1}) \quad (2.8)$$

Le test est effectué sur les trois échantillons prélevés.

2.3.2.2 Coefficient d'absorption d'eau et masse volumique réelle

Le test d'absorption à l'aide d'un pycnomètre permet de déterminer le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la masse volumique absolue, réelle séchée à l'étuve et réelle saturée à surface sèche du sable, sur base de la norme NBN EN 1097-6 :2022.

Le principe de ce test consiste à saturer le sable par immersion pendant 24 h dans l'eau à $22 \pm 3^\circ C$ dans un pycnomètre. Pour commencer l'essai, trois échantillons de sable de masse supérieure à 1100 g chacun sont prélevés, lavés et placés dans un pycnomètre avec de l'eau (Figure 2.19). Avant de mettre le pycnomètre dans un bain chaud à une température de $22 \pm 3^\circ C$ pendant $24 \pm 0,5 h$, l'air occlus dans le mélange est éliminé en tournant doucement le pycnomètre. Une fois l'échantillon saturé d'eau, la masse du pycnomètre rempli de sable saturé et d'eau est mesurée (M_2).



FIGURE 2.19 – Pycnomètre rempli de sable et d'eau

L'échantillon est ensuite réparti uniformément sur un plateau de masse connue (M_{pot}) et exposé à un courant d'air chaud, à environ 30 centimètres pour évaporer l'humidité de surface des sables (Figure 2.20). Pour s'assurer de l'état de surface sec du sable, un cône est rempli de la prise d'essai et tassé 25 fois, à l'aide d'un pilon. Une fois le cône soulevé délicatement, si l'essai s'effondre en forme de pyramide, alors l'état de surface sèche du sable saturé est considéré comme atteint. L'échantillon est alors pesé (M_1). Enfin, le sable est séché en étuve à $110 \pm 5^\circ C$ jusqu'à masse constante, puis pesé (M_4).



FIGURE 2.20 – Détermination de la masse réelle saturée à surface sèche

À partir des mesures réalisées, les différentes masses volumiques ainsi que le coefficient d'absorption d'eau du sable après 24 h d'immersion peuvent être déterminés sur base des équations suivantes (2.9 à 2.12) :

Masse volumique absolue $[g/cm^3]$:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (2.9)$$

Masse volumique réelle séchée à l'étuve
 $[g/cm^3]$:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (2.10)$$

Masse volumique réelle saturée surface
 sèche $[g/cm^3]$:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (2.11)$$

Coefficient d'absorption d'eau [%] :

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Avec :

$\rho_w [Mg/m^3]$ = la masse volumique de l'eau ;

$M_1 [g]$ = la masse du sable saturé à surface sèche ;

$M_2 [g]$ = la masse du pycnomètre rempli du sable saturé et de l'eau ;

$M_3 [g]$ = la masse du pycnomètre rempli d'eau ;

$M_4 [g]$ = la masse du sable séché en étuve.

2.3.2.3 Teneur en eau

Les tests de teneur en eau effectués sur le sable suivent le même protocole que ceux des fines, décrits dans la partie 2.3.1.1.

2.4 Fabrication des briques comprimées

Cette section concernant la fabrication des briques comprimées fait suite aux essais réalisés pour la caractérisation des matériaux. L'objectif est, dans un premier temps, de présenter les recettes utilisées pour la formulation des briques et l'optimisation du meilleur mélange. Dans un second temps, de décrire les protocoles de fabrication de ces dernières, et ensuite, la méthode de cure associée.

2.4.1 Formulation des briques

Cette sous-section est divisée en trois parties, en fonction de la méthodologie suivie pour la formulation des briques.

- La première partie 2.4.1.1 "**Recettes**" consiste à concevoir deux recettes de seize compositions chacune à l'aide d'une presse manuelle. Cela permet, sur base d'hypothèses, d'identifier la brique présentant les meilleures performances à 7 jours, qui servira ensuite de référence pour l'optimisation de la composition idéale.
- La deuxième partie 2.4.1.2 "**Optimisation des recettes**" consiste, sur base de la brique sélectionnée, à étudier l'influence de la teneur en eau sur la composition et la résistance. Ensuite, la même méthodologie est appliquée à deux compositions modifiées : l'une avec une teneur en fines inférieure, et l'autre avec une teneur en fines supérieure à celle de la brique de référence. Les briques sont confectionnées à l'aide d'une presse hydraulique dans cette partie.
- La troisième partie 2.4.1.3 "**Recettes optimisées**" consiste à déterminer la teneur en eau permettant d'obtenir les meilleures propriétés mécaniques pour chacune des trois teneurs en fines. La composition optimale est ainsi définie.

L'objectif de cette section est d'identifier, à la suite de ces étapes, trois briques (une pour chacune des trois teneurs en fines) de composition optimisée et la brique de composition optimale sur laquelle les essais de caractérisation sont appliqués en 2.5.

2.4.1.1 Recettes

Dans le but d'identifier l'impact que peut avoir chacun des constituants sur le mélange, deux recettes ont été établies. La recette A maximise la résistance en compression du mélange, tandis que la recette B maximise la valorisation des fines.

Pour étudier chacune des recettes, il a fallu fixer des paramètres qui vont rester constants tout au long de l'étude.

- **Le volume du mélange $[L]$** : Il correspond à la quantité de matière nécessaire pour remplir les moules destinés à la confection des briques. Ce volume, adapté lors de la fabrication des briques, est de 4 L pour la recette A et de 4,5 L pour la recette B.
- **Le rapport E/C $[-]$** : Il correspond au rapport eau/ciment. Pour garantir une bonne durabilité et une bonne résistance mécanique, un rapport de 0,25 est considéré sur base du travail de Doitrand (2025).

- **Le rapport E/F [-]** : Il correspond au rapport eau/fines. Ce rapport est utilisé pour humidifier les fines, comme décrit en 2.3.1.2. La valeur de 0,2 a été retenue, selon le travail de Doitrand (2025).

Tandis que trois facteurs variables sont étudiés (Tables 2.1 et 2.2) :

- La quantité de ciment $[kg/m^3]$** : Elle influence directement la résistance du matériau et donne une indication sur l'impact écologique de ce dernier.
- La teneur en fines [%]** : Elle donne une indication sur la compacité du mélange, qui est corrélée à sa porosité. Il sera important de prendre en compte la teneur en fines déjà présente dans le SMR (B totale). La teneur en fines permet également de se rendre compte de leur potentiel de valorisation dans les briques.
- La quantité d'eau libre $[kg/m^3]$** : Elle influence la teneur en eau du mélange, le développement de sa résistance et la durabilité de la brique.

Pour la recette A, chaque facteur varie selon quatre valeurs disponibles à la Table 2.1.

TABLE 2.1 – Paramètres - Recette A

			Recette A			
			Valeurs			
			1	2	3	4
Facteurs	Quantité de ciment $[kg/m^3]$	A	160	180	200	220
	Teneur en fines [%]	B	0	10	15	20
	Teneur en fines totale [%]	B totale	22	30	34	38
	Quantité d'eau libre $[kg/m^3]$	C	120	144	167	190

Pour la recette B, chaque facteur varie selon quatre valeurs disponibles à la Table 2.2.

TABLE 2.2 – Paramètres - Recette B

			Recette B			
			Valeurs			
			1	2	3	4
Facteurs	Quantité de ciment $[kg/m^3]$	A	80	100	120	140
	Teneur en fines [%]	B	50	55	60	65
	Teneur en fines totale [%]	B totale	61	65	69	73
	Quantité d'eau libre $[kg/m^3]$	C	100	127	154	180

Les valeurs attribuées au facteur "Quantité de ciment" (80 à 220 kg/m^3) sont choisies pour couvrir différentes proportions de ciment tout en garantissant l'objectif de limitation de la pollution liée à la production de ciment et de valorisation des déchets. Pour ce faire, l'analyse est effectuée avec un pas de 20 kg/m^3 . Pour la recette maximisant la résistance en compression, les quantités plus importantes de ciment lui ont été attribuées (160 à 220 kg/m^3). En effet, la résistance à la compression du matériau augmente de manière significative avec l'augmentation du taux de ciment (Kechkar et al., 2022). De plus,

les quantités choisies permettent de garantir un pourcentage massique de ciment compris entre 4 % et 11 %, assurant le compromis souhaité entre empreinte écologique et résistance.

Pour les fines, les valeurs de 0 à 65 % ont été considérées, correspondant en réalité à un pourcentage de fines allant de 22,2 % à 72,8 % en tenant compte des fines présentes dans le sable recyclé. La teneur en fines du SMR a été déterminée sur base de l'analyse granulométrique. Ces valeurs ont été choisies afin de se rapprocher des pourcentages de fines du travail de Doitrand (2025) donnant les meilleurs résultats, soit 33 % et 66,7 %, déterminés à l'aide de la granulométrie du sable et de celle des fines. En toute logique, les valeurs élevées de la teneur en fines (50 à 65 %) ont été attribuées à la recette B.

En ce qui concerne la quantité d'eau libre présente dans le mélange (100 à 190 kg/m^3), elle se rapporte également aux limitations du travail de Doitrand (2025). En effet, les résultats de son étude montrent qu'une quantité d'eau libre plus importante que celle présentée serait une piste d'amélioration de la résistance des briques. La quantité d'eau totale dans le mélange dépend de l'eau initialement comprise dans les fines et le sable (déterminée à l'aide de la partie 2.3.1.1 et 2.3.2.3), de l'eau absorbée par les fines et le sable (déterminée à l'aide de la partie 2.3.1.2 et 2.3.2.2), de l'eau efficace pour hydrater le ciment (afin de garantir le rapport $E/C = 0,25$ défini ultérieurement), ainsi que de l'eau libre.

Ainsi, une grande matrice 16 x 3 est établie, représentant les seize compositions définies pour les deux recettes (Table 2.3).

TABLE 2.3 – Formulation des recettes A et B

	Recette A				Recette B		
	Quantité de ciment [kg/m ³]	Teneur en fines [%]	Quantité d'eau "libre" [kg/m ³]		Quantité de ciment [kg/m ³]	Teneur en fines [%]	Quantité d'eau "libre" [kg/m ³]
A1	160	0%	120	B1	80	50%	100
A2	160	10%	144	B2	80	55%	127
A3	160	15%	167	B3	80	60%	154
A4	160	20%	190	B4	80	65%	180
A5	180	0%	144	B5	100	50%	127
A6	180	10%	120	B6	100	55%	100
A7	180	15%	190	B7	100	60%	180
A8	180	20%	167	B8	100	65%	154
A9	200	0%	167	B9	120	50%	154
A10	200	10%	190	B10	120	55%	180
A11	200	15%	120	B11	120	60%	100
A12	200	20%	144	B12	120	65%	127
A13	220	0%	190	B13	140	50%	180
A14	220	10%	167	B14	140	55%	154
A15	220	15%	144	B15	140	60%	127
A16	220	20%	120	B16	140	65%	100

L'Annexe 1 présente les quantités [kg] ainsi que les pourcentages massiques utilisés pour la formulation de ces briques.

Les briques seront dès lors identifiées sur base de la Table 2.3. Par exemple, la brique B4 correspond à l'une des compositions de la recette B avec 80 kg/m^3 de ciment, 65 % de fines ajoutées ainsi que 180 kg/m^3 d'eau libre.

La presse manuelle, décrite dans la partie 2.4.2.2 "Presse manuelle", a servi pour la fabrication de ces briques.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, seule la recette A a été optimisée. En effet, celle-ci répond à l'objectif principal de l'étude : maximiser la résistance à la compression du mélange tout en limitant la quantité de ciment. La recette B sera analysée, après la recherche, par les chercheurs du laboratoire.

2.4.1.2 Optimisation des recettes

Sur base de la composition sélectionnée (A8) en 3.2.3, la première étape consiste à déterminer la teneur en eau idéale pour laquelle la brique possède les meilleures propriétés mécaniques.

La recette A8 de référence, identifiée sur base de la Table 2.3, contient 180 kg/m^3 de ciment, 20 % de fines ajoutées ainsi que 167 kg/m^3 d'eau libre, correspondant à une teneur en eau théorique de 22,46 %.

Trois autres teneurs en eau ont été considérées, avec la même teneur en fines, la même quantité de ciment et la même force de compaction (38 kN) que la composition A8. Ceci a pour but d'identifier la teneur en eau optimale pour la composition A8 - F-20 %. Les teneurs en eau théoriques considérées sont de 20,73 %, 19,02 % et 17,67 % (Table 2.4).

Le travail a ensuite été réitéré avec une teneur en fines ajoutée inférieure (10 %) et supérieure (30 %) à celle de référence (20 %), toujours avec la même quantité de ciment et la même force de compaction que la brique de référence A8. Les différentes compositions sont détaillées dans la Table 2.4.

TABLE 2.4 – Optimisation des recettes

	Quantité de ciment	Teneur en fines	Teneur en eau th.
	[kg/m ³]	[%]	[%]
A8 - F-20%	180	20	22,46%
	180	20	20,73%
	180	20	19,02%
	180	20	17,67%
A8 - F-10%	180	10	22,54%
	180	10	20,62%
	180	10	19,16%
	180	10	17,77%
A8 - F-30%	180	30	22,46%
	180	30	20,63%
	180	30	18,89%
	180	30	17,58%

La presse hydraulique, décrite dans la partie 2.4.2.3 "Presse hydraulique", a servi pour la fabrication de ces briques.

2.4.1.3 Recettes optimisées

Une fois la teneur en eau idéale de chaque composition déterminée sur base des résultats de la résistance à compression à 7 jours des échantillons (partie 3.3), les compositions optimisées ont été formulées et sont appelées :

A8 - F-20% Opt. ; A8 - F-10% Opt. ; A8 - F-30% Opt.

Pour finir, le mélange présentant la meilleure résistance à la compression à 7 jours parmi les trois recettes est déterminé. Cette brique, appelée A8 - Optimale, est celle sur laquelle seront appliqués les essais de caractérisation.

La formulation des trois compositions optimisées et celle de la brique optimale sont présentées dans la Table 2.5.

TABLE 2.5 – Compositions optimisées et optimale

	Quantité de ciment	Teneur en fines	Teneur en eau th.
	[kg/m ³]	[%]	[%]
A8 - F-20% Opt.	180	20	21,46%
A8 - F-10% Opt.	180	10	21,74%
A8 - F-30% Opt.	180	30	21,25%
A8 - Optimale	180	10	21,74%

Il est important de remarquer que la composition optimale (A8 - Optimale) correspond à la composition optimisée A8 - F-10% Opt.

La presse hydraulique, décrite dans la partie 2.4.2.3 "Presse hydraulique", a servi pour la fabrication de ces briques.

2.4.2 Fabrication des briques

Cette section porte sur la fabrication des briques comprimées. Pour ce faire, un protocole bien défini a été suivi pour réaliser le mélange de l'ensemble des briques. Les briques issues des formulations des recettes A et B ont été compactées à l'aide d'une presse manuelle, en continuité avec l'étude de Doitrand (2025) où la même machine a été utilisée. Afin de contrôler la force de compaction du mélange (en 3.2.1), les briques produites pour l'optimisation de la composition ont été fabriquées à l'aide d'une presse hydraulique.

2.4.2.1 Protocole de fabrication

Pour fabriquer l'ensemble des briques comprimées, une procédure de malaxage bien précise permet de confectionner la pâte. Pour ce faire, il faut :

1. Humidifier le bol ;
2. Ajouter le sable et ensuite les fines dans le bol (Figure 2.21a) ;

3. Malaxer 30 secondes ;
4. Ajouter la moitié de l'eau ;
5. Malaxer 120 secondes ;
6. 120 secondes de repos ;
7. Ajouter le ciment dans le bol (Figure 2.21b) ;
8. Malaxer 30 secondes ;
9. Ajouter l'autre moitié de l'eau ;
10. Malaxer 90 secondes (Figure 2.21c).

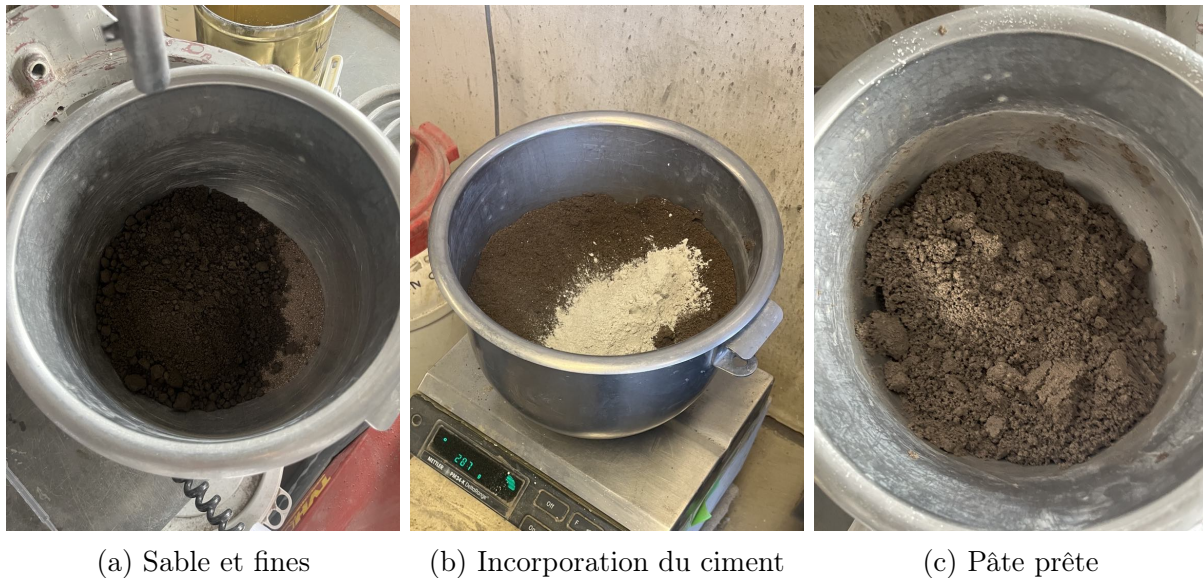


FIGURE 2.21 – Protocole de fabrication des briques

Il est important de préciser que, dans l'ensemble des compositions, les étapes 4, 5 et 6 (consistant à ajouter la première moitié de l'eau et à la malaxer) ne sont pas réalisées. En effet, le mélange contient déjà cette quantité d'eau en raison de la teneur en eau initiale des composants (sable et fines).

Une fois le protocole de fabrication établi, il convient de procéder à la confection des briques.

2.4.2.2 Presse manuelle

Une presse manuelle Terstaram (Figure 2.22) est utilisée pour la fabrication des briques des recettes A et B. Cette presse permet de confectionner différents types de briques grâce à ses moules interchangeables. Dans le cadre de cette étude, un double moule carré est utilisé (Figure 2.23), permettant de produire deux briques de 14 cm de côté pour une hauteur avoisinant les 9,5 cm.



FIGURE 2.22 – Presse Terstaram

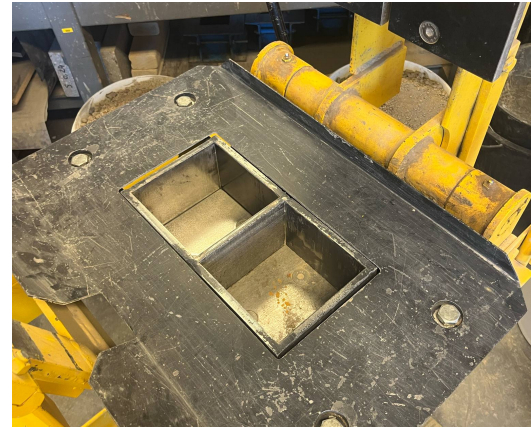


FIGURE 2.23 – Double moule carré

La première étape de fabrication consiste à déterminer le volume de mélange à insérer dans les deux moules. Pour cela, la formule suivante est utilisée :

$$V = l \cdot L \cdot H \cdot 2 = 3,7 [L] \quad (2.13)$$

Environ 4 L de matériau sont donc nécessaires pour remplir les deux moules.

Une fois le volume de mélange calculé, celui-ci est introduit dans les moules, tassé manuellement à 9 reprises et puis piqué 20 fois à l'aide d'un outil adapté (Figure 2.24).

Ensuite, les briques sont comprimées en utilisant la presse dans le bon sens (Figure 2.25), contrairement à l'approche adoptée dans l'étude de Doitrand (2025). Bien que la poussée maximale théorique de la presse soit de 15 tonnes, des capteurs installés pendant la fabrication ont permis de mesurer la force réelle de compaction appliquée (résultats en 3.2.1).

Ces mesures ont révélé que la force de compaction appliquée n'était pas contrôlée de manière précise, qu'elle variait d'une brique à l'autre et qu'elle n'atteignait jamais la force maximale de 150 kN.



FIGURE 2.24 – Mélange piqué 20 fois



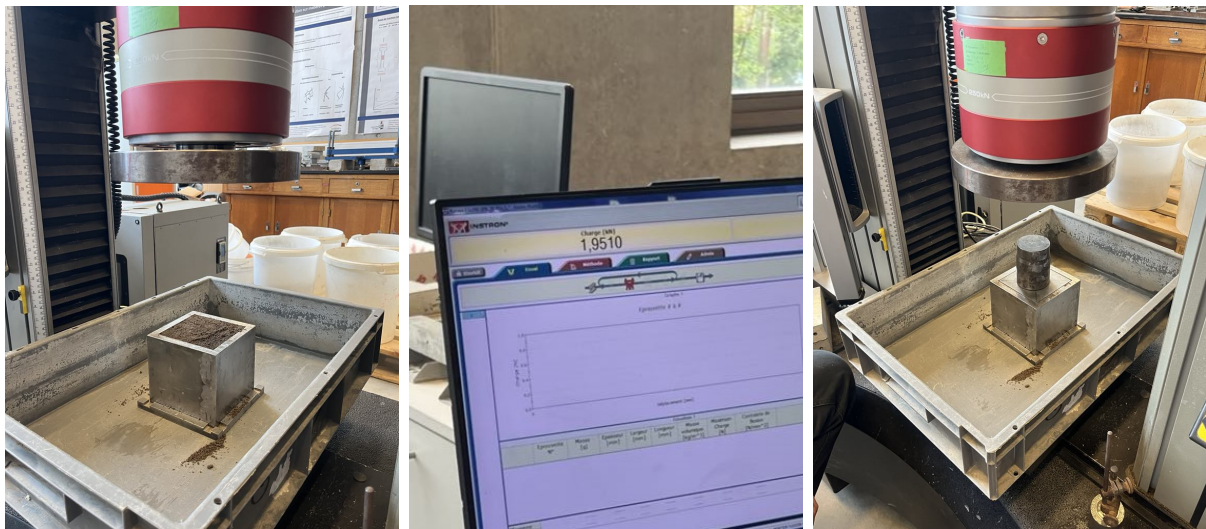
FIGURE 2.25 – Sens d'utilisation

Cette observation est menée une fois que les 32 compositions, correspondantes aux recettes A et B, sont effectuées. Dans le but de poursuivre les recherches, les briques produites sont conservées afin d'estimer celle offrant la plus grande résistance à la compression à 7 jours. L'étape suivante, consacrée à l'optimisation du mélange, a alors été réalisée à l'aide d'une presse hydraulique, permettant cette fois un contrôle précis de la force de compaction appliquée.

2.4.2.3 Presse hydraulique

Dans l'objectif d'avoir un contrôle précis de la force de compaction du mélange, une presse hydraulique de la marque Instron 5585 est utilisée pour former les briques nécessaires à l'optimisation des recettes, ainsi que celles issues de la composition optimale. Le même protocole est appliqué pour confectionner l'ensemble des briques.

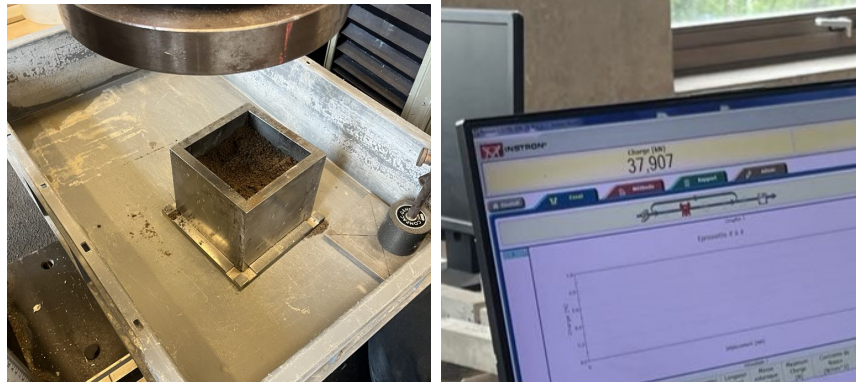
La première étape consiste à remplir un moule métallique carré de 100 mm de côté jusqu'au bord, sans tasser le matériau (Figure 2.26a). Ensuite, une première compaction est réalisée à l'aide de la presse hydraulique en appliquant une force verticale d'environ 2 kN (Figure 2.26b) répartie uniformément sur la surface, avec un piston et une plaque métallique (Figure 2.26c).



(a) Remplissage du moule (b) Force de compaction (2 kN) (c) Piston et plaque métallique

FIGURE 2.26 – Première compaction

Avant la deuxième compaction, des stries sont créées à la surface de la première couche pour assurer une bonne liaison entre les deux compactions (Figure 2.27a). Le moule est à nouveau rempli jusqu'à son bord, puis compacté en appliquant une force verticale répartie uniformément sur la surface d'environ 38 kN (Figure 2.27b).



(a) Stries à la surface

(b) Force de compaction (38 kN)

FIGURE 2.27 – Deuxième compaction

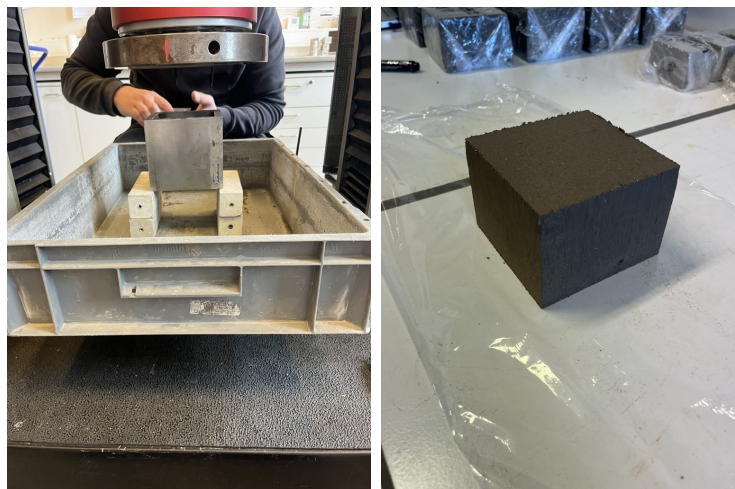
Une charge de 38 kN est appliquée pour reproduire la pression maximale qu'on obtiendrait en utilisant la presse manuelle. En effet, celle-ci applique une force de 150 kN sur un moule de 14 cm x 28 cm, soit une pression de :

$$\frac{150\,000\,[N]}{140\,[mm] \cdot 280\,[mm]} = 3,8\,MPa \quad (2.14)$$

Pour obtenir la même pression avec un moule de 10 cm x 10 cm (pour la presse hydraulique), la force appliquée doit être de :

$$\frac{x\,[N]}{100\,[mm] \cdot 100\,[mm]} = 3,8\,MPa \rightarrow x = 38\,000\,N = 3,8\,t \quad (2.15)$$

La dernière étape consiste au démoulage de la brique. Ce dernier est réalisé avec la même presse. Le moule métallique est surélevé, permettant ainsi d'appliquer une force verticale suffisante à l'aide du piston et de plaques métalliques pour éjecter la brique en dehors de son moule (Figure 2.28a). La brique est désormais prête à être mise en cure (Figure 2.28b).



(a) Moule surélevé

(b) Brique prête pour la cure

FIGURE 2.28 – Démoulage de la brique

2.4.3 Cure des briques

Une fois les briques confectionnées, celles-ci sont étiquetées et emballées dans un film plastique (Figure 2.29) pour l'ensemble des compositions.



FIGURE 2.29 – Cure des briques

Les briques sont ensuite conservées à température et humidité ambiantes pendant 7 et 28 jours, en vue des essais de compression (voir partie 2.5.1.3).

2.5 Caractérisation des briques comprimées

L'objectif de cette section est, dans un premier temps, de présenter les essais de caractérisation réalisés sur l'ensemble des briques produites au cours de la recherche (sous-section 2.5.1). Dans un second temps, la sous-section 2.5.2 vise à décrire les tests supplémentaires effectués sur les mélanges optimisés (A8 - F-20% Opt. ; A8 - F-10% Opt. ; A8 - F-30% Opt.) et par conséquent, sur le mélange optimal. Enfin, la dernière partie porte sur la caractérisation finale de la brique optimale (sous-section 2.5.3).

2.5.1 Caractérisation : Briques comprimées

2.5.1.1 Brûlage

Dans l'objectif de déterminer la teneur en eau réelle des mélanges frais, un test de brûlage est réalisé. La teneur en eau théorique des différentes formulations, établie en 2.4, permet de quantifier la quantité d'eau présente dans le mélange. Pour mesurer la teneur en eau réelle du mélange frais, avant que le ciment ait le temps de réagir avec l'eau pour son hydratation (ce qui peut se produire lors d'un test en étuve ventilée, dont le séchage dure plus de 24 heures), un test de brûlage par un four à micro-ondes est utilisé, ne durant qu'une heure.

Le test de brûlage est similaire à celui de la détermination de la teneur en eau par séchage (décrit en 2.3.1.1), à la différence qu'au lieu d'utiliser une étuve, un four à micro-ondes est d'application. Il convient de peser un récipient vide et d'enregistrer la valeur en M_2 [g]. La masse de l'échantillon humide à tester, notée M_1 , doit être d'au moins 1000 g. Le récipient contenant la prise d'essai humide est placé dans un four à micro-ondes jusqu'à ce que la masse constante (M_3) soit atteinte, soit après une heure de séchage. La valeur de la teneur en eau (w) se calcule sur base de l'équation 2.1.

2.5.1.2 Masse volumique des briques

Avant de procéder à l'essai de compression des échantillons de briques, ces dernières sont sciées en quatre échantillons pour les tests, puis pesées et mesurées à 7 et à 28 jours afin de déterminer leur masse volumique à l'aide de l'équation suivante :

$$Mv [kg/m^3] = \frac{m}{L \cdot l \cdot H} \cdot 10^6 \quad (2.16)$$

Avec :

m [g] = la masse de l'échantillon ;

$L \cdot l \cdot H$ [mm³] = le volume de l'échantillon.

Il est important de préciser que les échantillons de briques présentent plusieurs défauts de surface, dus au moulage et au démoulage de celles-ci. Le volume de l'échantillon est tout de même considéré comme étant celui d'un parallélépipède rectangle.

2.5.1.3 Résistance à la compression

Les tests de compression sont réalisés après 7 et 28 jours de cure pour l'ensemble des compositions. Ces essais de compression sont effectués sur base de la norme NBN EN 196-1 :2016 relative aux mortiers. Normalement destinée à des échantillons de 40 x 40 x 160 mm, cette norme est ici adaptée aux briques réalisées dans ce travail, en l'absence de norme spécifique applicable au matériau créé.

Les essais sont réalisés à l'aide de la même presse hydraulique présentée en 2.4.2.3 pour confectionner les briques (Figure 2.30a). Une vitesse de chargement de 2400 ± 200 N/s est appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon (Figure 2.30b et 2.30c).

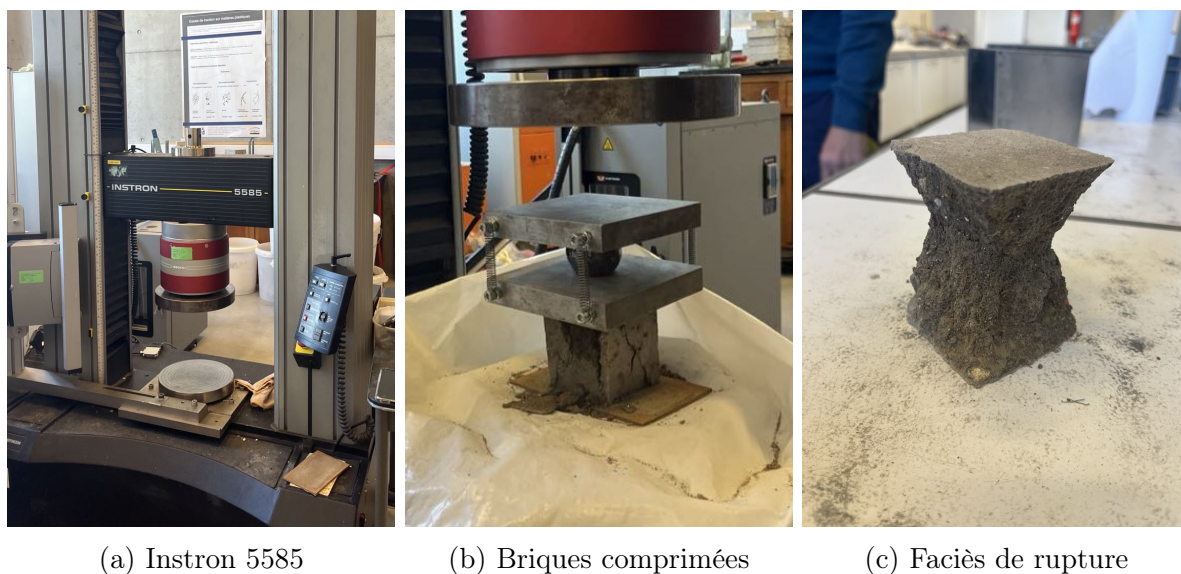


FIGURE 2.30 – Résistance à la compression des briques

2.5.2 Caractérisation : Briques optimisées

2.5.2.1 Teneur en eau des briques

Les tests de teneur en eau effectués sur les échantillons de briques à 7 et 28 jours suivent le même protocole que ceux décrits en 2.3.1.1 (Figure 2.31). Ces tests ont été réalisés sur les échantillons d'optimisation, les échantillons optimisés et sur l'échantillon optimal et permettent d'estimer, par différence avec la teneur en eau initiale, la quantité d'eau consommée par l'hydratation et celle utile à la compaction du mélange (Figure 2.32).



FIGURE 2.31 – Teneur en eau

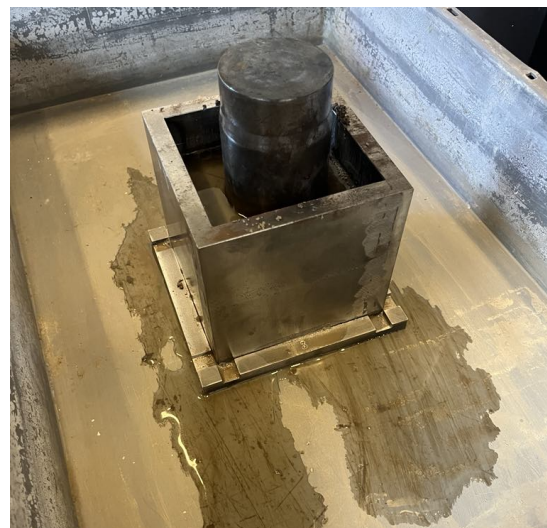


FIGURE 2.32 – Compaction

2.5.2.2 Absorption

L'absorption d'eau des briques, réalisée sur les échantillons issus des compositions optimisées (A8 - F-20% Opt. ; A8 - F-10% Opt. ; A8 - F-30% Opt.) et par conséquent sur la composition optimale (A8 - Optimale = A8 - F-10% Opt.), se base sur la norme NBN EN 772-21 :2011 relative à la détermination de l'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite et en silico-calcaire par absorption d'eau. En effet, aucune norme spécifique aux types de briques créées dans ce travail n'existe à ce jour.

Pour réaliser le test, quatre échantillons de brique pour chaque composition sont considérés. Dans un premier temps, les briques sont mises en cure sous film plastique pendant 21 jours (Figure 2.33a). Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à ce que la masse constante (M_d) soit atteinte après une série de pesées successives à 24 heures d'intervalle (Figure 2.33b). Pour déterminer si M_d est bien atteinte, il faut vérifier que la masse de la dernière pesée ne diffère pas de plus de 0,2 % de la pesée précédente.

Une fois secs, les échantillons sont immergés pendant $24 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ dans une cuve d'eau à 20 °C (Figure 2.33c). À la fin de l'immersion, la masse saturée de l'échantillon (M_s) est enregistrée après avoir retiré les échantillons de l'eau et éliminé l'eau de surface à l'aide d'un chiffon humide.

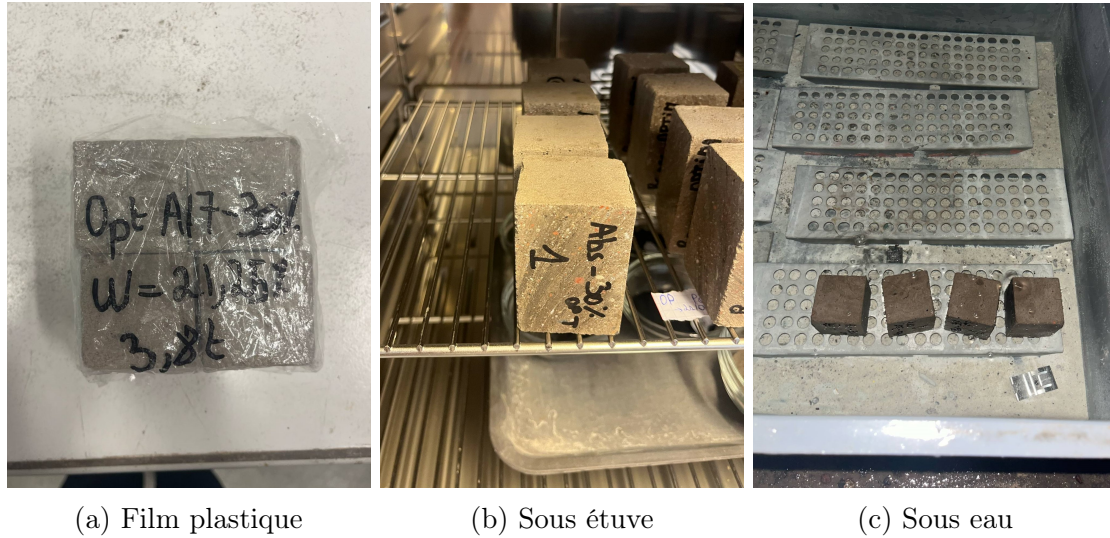


FIGURE 2.33 – Absorption d'eau

L'absorption d'eau W_s de chaque échantillon est calculée sur base de la formule suivante :

$$W_s [\%] = \frac{M_s - M_d}{M_d} \cdot 100 \quad (2.17)$$

2.5.3 Caractérisation : Brique optimale

2.5.3.1 Modes de cure

Pour la composition optimale A8 - Optimale, quatre types de cure sont étudiés, afin d'évaluer l'influence du mode de cure sur la résistance à la compression du matériau :

- Sous film plastique : 28 jours emballés dans un film plastique à température et humidité ambiantes (Figure 2.34a) ;
- A l'air libre : 28 jours à l'air libre à 60 % d'humidité relative (Figure 2.34b) ;
- Sous eau : 21 jours sous film plastique à température et humidité ambiantes, suivis de 6 jours en étuve ventilée à 105 ± 5 °C puis de 24 h $\pm$ 0,5 h dans une cuve d'eau (Figure 2.34c) ;
- Sec : 21 jours sous film plastique à température et humidité ambiantes, suivis de 7 jours en étuve ventilée à 105 ± 5 °C (Figure 2.34d).

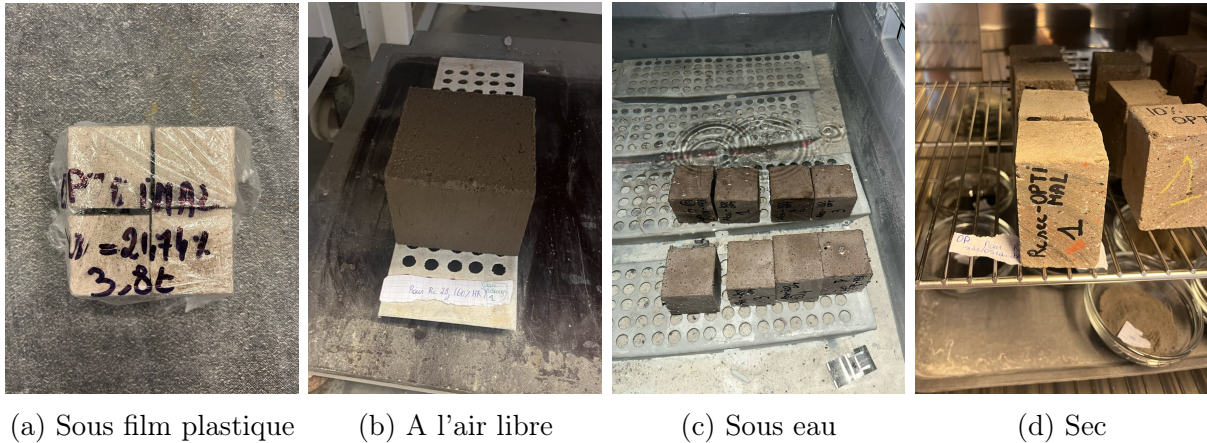


FIGURE 2.34 – Modes de cure

Le rapport entre la résistance en cure humide et la résistance à l'état sec, établi en 1.3.2.1, est analysé dans cette partie sur base des résultats obtenus pour la résistance à la compression des échantillons soumis aux cures sous eau et en étuve.

2.5.3.2 Force de compaction

Dans l'objectif de caractériser la composition A8 - Optimale, trois briques sont réalisées avec des forces de compaction différentes. Le protocole de fabrication à l'aide de la presse hydraulique, décrit dans la partie 2.4.2.3, reste inchangé.

Les trois pressions considérées sont les suivantes :

- 3,8 MPa : comme décrit en 2.4.2.3, afin de se rapprocher de la pression maximale qu'on obtiendrait en utilisant la presse manuelle (Figure 2.35a) ;
- 7 MPa : comme mentionné dans la partie 1.1.3.2, cette pression correspondrait à l'énergie optimale de compactage pour les BTC/S selon Mahdad et al. (2014) (Figure 2.35b) ;
- 15 MPa : une pression plus élevée, bien que la presse utilisée permette de monter jusqu'à 25 MPa. Cette valeur permet d'obtenir une idée de la compaction optimale, en se basant sur trois points de comparaison (Figure 2.35c). Cette valeur est également basée sur l'article de Rayeesulhaq et al. (2024) qui applique une pression entre 13,78 MPa et 17,23 MPa pour confectionner leurs blocs de terre comprimée.

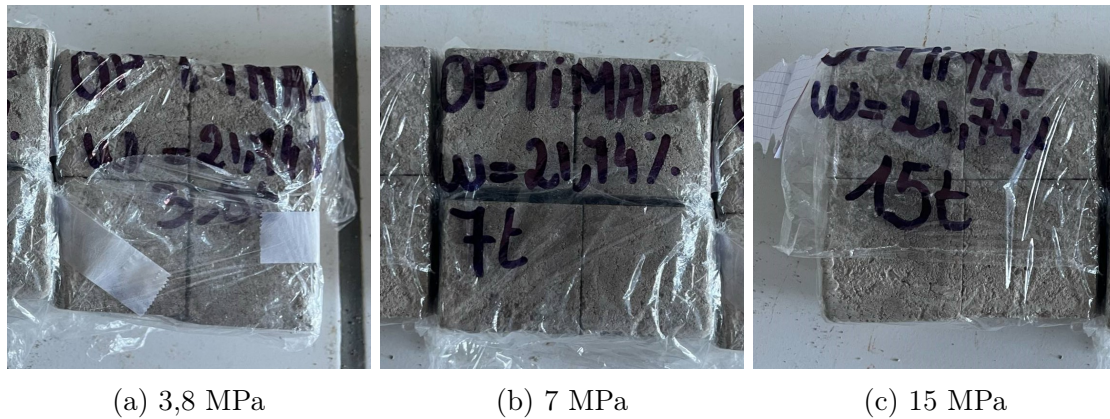


FIGURE 2.35 – Force de compaction

L'influence de la force de compaction sur le mélange sera donc analysée sur base des résultats de résistance à la compression mesurés après 28 jours de cure sous film plastique.

2.5.3.3 Vitesse de chargement

Comme décrit en 2.5.1.3, la norme NBN EN 196-1 :2016 relative aux mortiers est utilisée pour déterminer la résistance à la compression des échantillons. Selon cette norme, une vitesse de chargement de 2400 ± 200 N/s est appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon. L'objectif ici est d'évaluer l'influence de la vitesse de chargement sur la résistance à la compression de la brique optimale (A8 - Optimale). Pour cela, la norme NBN EN 772-1+A1 :2015 relative à la détermination de la résistance à la compression des éléments de maçonnerie est appliquée à une deuxième brique.

Selon le tableau 2 de la norme, la vitesse de chargement dépend à la fois de la résistance à la compression prévue et de la surface de l'échantillon (A [mm^2]). Pour une résistance à 28 jours prévue comprise entre 11 et 20 MPa (estimée à la Table 3.16), une vitesse d'application de la charge de $0,15$ (N/mm^2)/s est recommandée. La vitesse de chargement est donc calculée comme suit :

$$Vitesse\ chargement = 0,15 \cdot A = 0,15 \cdot (50 \cdot 50) = 375\ N/s \quad (2.18)$$

2.5.3.4 Variabilité

Afin d'analyser la reproductibilité du mélange et du procédé de fabrication, trois briques ont été confectionnées pour la composition optimale provenant de trois mélanges différents. L'objectif est d'étudier la variabilité des résultats de résistance à la compression à 28 jours de ces trois briques.

Résultats et discussions

3.1 Caractérisation des matériaux

3.1.1 Caractérisation des fines recyclées

3.1.1.1 Teneur en eau par séchage en étuve ventilée

Le test de teneur en eau est réalisé à partir de trois pots de fines du lot 5 prélevés à différents endroits du big bag. Les résultats de ces essais sont disponibles dans la Table 3.1.

TABLE 3.1 – Teneur en eau des fines du lot 5

	F 5 - 1	F 5 - 2	F 5 - 3
Date	28/03/2025	28/03/2025	27/03/2025
Mpot [g]	260,9	264,5	264,6
Mhumide [g]	502,5	500,8	363,2
Mpot + Mhumide [g]	657,35	662,7	552,4
Date	31/03/2025	31/03/2025	28/03/2025
Mpot + Msèche [g]	657,35	662,7	552,4
Msèche [g]	396,45	398,2	287,8
Teneur en eau	26,75%	25,77%	26,20%

La teneur en eau des trois pots varie de 25,77 % à 26,75 % avec une moyenne de 26,24 % $\pm$ 0,49 %. Cette très faible variabilité, $CV = 1,88$ % (équation 3.1), montre une homogénéité du matériau dans le big bag. Selon Denoël (2022), la variabilité des lots est considérée comme très faible si le CV ne dépasse pas 5 %.

$$CV [\%] = \frac{\text{écart} - \text{type}}{\text{moyenne}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Afin de préserver la teneur initiale de chacun des pots, ces derniers sont placés dans des bidons hermétiques, permettant ainsi de conserver leur teneur en eau initiale tout le long de l'étude. Cela permet de prendre en compte cette quantité d'eau réelle que les fines possèdent lors de la formulation des mélanges de briques comprimées.

Pour s'assurer de la validité des résultats, la teneur en eau a été réévaluée à plusieurs reprises lors de la fabrication des briques comprimées.

3.1.1.2 Demande en eau

Les résultats relatifs à la demande en eau des fines sont basés sur la partie 2.3.1.2. L'objectif est d'étudier la variabilité de cette demande pour les lots F0 à F4.

Afin de déterminer la quantité d'eau nécessaire à l'humidification des fines, une mesure de la teneur en eau réelle initiale est effectuée. Les résultats sont présentés dans la Table 3.2. Les fines F0 à F4 présentent une faible teneur en eau. En effet, elles se présentent sous forme de blocs agglomérés, rendant nécessaire une humidification préalable pour atteindre le rapport $E/F_{th} = 0,20$ souhaité. Les résultats de la masse d'eau à ajouter pour les humidifier sont détaillés dans la Table 3.2.

TABLE 3.2 – Teneur en eau initiale et masse d'eau à ajouter pour humidifier les fines

	F0	F1	F2	F3	F4
Date	25-02-25	03-03-25	03-03-25	06-03-25	06-03-25
$M_{F0-4,h}$ [g]	6574	5208	5588	4947	4949
$W_{init,r}$	7,00%	5,86%	5,58%	7,85%	9,92%
E/F_{th}	19,41%	20%	20%	20%	20%
$M_{eau,init}$ [g]	430,07	288,38	295,40	359,91	446,44
$M_{F0-4,s}$ [g]	6143,93	4919,62	5292,60	4587,09	4502,56
$M_{eau,pour\ hum}$ [g]	762,58	695,54	763,13	557,50	454,07

Une erreur de calcul a été commise pour F0. Un rapport $E/F_{th} = 19,41\%$ a été considéré à cette étape au lieu des 20 % prévus.

Ensuite, quatre essais sont réalisés pour chaque lot avec quatre teneurs en eau théoriques différentes. Après chaque essai, la teneur en eau réelle du mélange est évaluée permettant d'analyser l'écart par rapport à la valeur cible. La comparaison entre les teneurs en eau théoriques et réelles des essais est présentée dans la Table 3.3.

TABLE 3.3 – Rapports E/F théoriques et réels testés pour la demande en eau des fines

	F0		F1		F2		F3		F4	
	E/F_{th}	E/F_r	E/F_{th}	E/F_r	E/F_{th}	E/F_r	E/F_{th}	E/F_r	E/F_{th}	E/F_r
1	0,660	0,570	0,630	0,632	0,650	0,630	0,650	0,595	0,700	0,591
2	0,680	0,599	0,650	0,651	0,660	0,640	0,660	0,609	0,720	0,601
3	0,700	0,600	0,670	0,661	0,670	0,653	0,680	0,633	0,740	0,606
4	0,720	0,637	0,690	0,694	0,690	0,673	0,700	0,648	0,760	0,643

Il est observé que, pour les lots F1 et F2, les écarts entre les valeurs théoriques et réelles sont faibles. Tandis que pour les lots F0 et F4, les écarts sont plus importants. Cette observation traduit la difficulté de reproductibilité du test qui sera expliquée plus en détail par la suite.

Les résultats du paramètre β_P sont disponibles à l'Annexe 2. La valeur moyenne obtenue (Table 3.4) est de 0,58, avec un écart-type de 0,026 correspondant à un coefficient de variation (CV) de 4,49 % (équation 3.1).

TABLE 3.4 – Beta P

	F0	F1	F2	F3	F4
Beta P	0,54	0,61	0,61	0,58	0,56

Moyenne	0,58	Ecart-type	0,026	CV	4,49%
----------------	------	-------------------	-------	-----------	-------

Sur base de la Figure 3.1, la variabilité entre les lots F0 à F4 est relativement faible. Cela suggère que le lot F5 suivrait la même tendance que ces derniers. Toutefois, le coefficient de variation reste proche de la valeur limite de 5 % définie par Denoël (2022). Par conséquent, cette variabilité, bien que modérée, peut être attribuée à des facteurs humains. Plusieurs pistes peuvent alors entrer en jeu :

- Un niveau d’humidification différent de la plaque et du cylindre entre les essais ;
- Une vitesse de retrait du cylindre différente entre les essais ;
- Une durée d’essai trop longue (le test doit être terminé en cinq minutes) ;
- Etc.

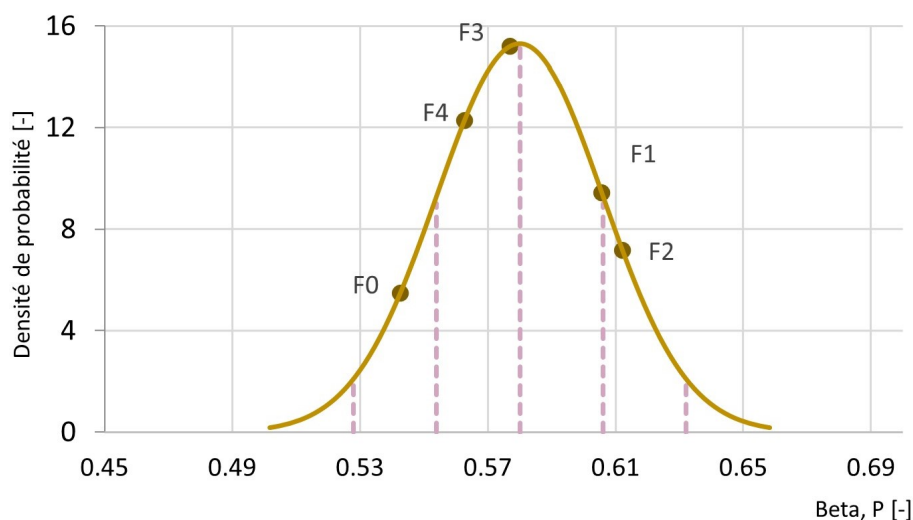


FIGURE 3.1 – Courbe de Gauss - Demande en eau F0-4

3.1.1.3 Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz

L’essai au pycnomètre à gaz, utilisé pour déterminer la masse volumique absolue des fines (décrit en 2.3.1.3), a été réalisé sur les cinq échantillons issus des lots de variabilité (F0-F4). Les résultats obtenus sont présentés dans la Table 3.5.

TABLE 3.5 – Masse volumique absolue F0-4 - Variabilité

Masse volumique absolue [g/cm ³]							
F0	F1	F2	F3	F4	Moyenne	Ecart-type	CV
2,426	2,403	2,488	2,423	2,450	2,438	0,033	1,34%

Comme le montre la Table 3.5, les cinq échantillons de fines présentent une masse volumique absolue moyenne de 2,438 g/cm³ avec un écart-type de 0,033. Selon l’équation

3.1, un coefficient de variation (CV) de 1,34 % en résulte. D'après Denoël (2022), la variabilité des lots est considérée très faible si le CV ne dépasse pas 5 % (Figure 3.2). Par conséquent, la masse volumique absolue du lot peut être représentée par l'échantillon du lot F5, pour la caractérisation finale. La valeur de la masse volumique absolue s'élève à **2,400 g/cm³** pour ce dernier.

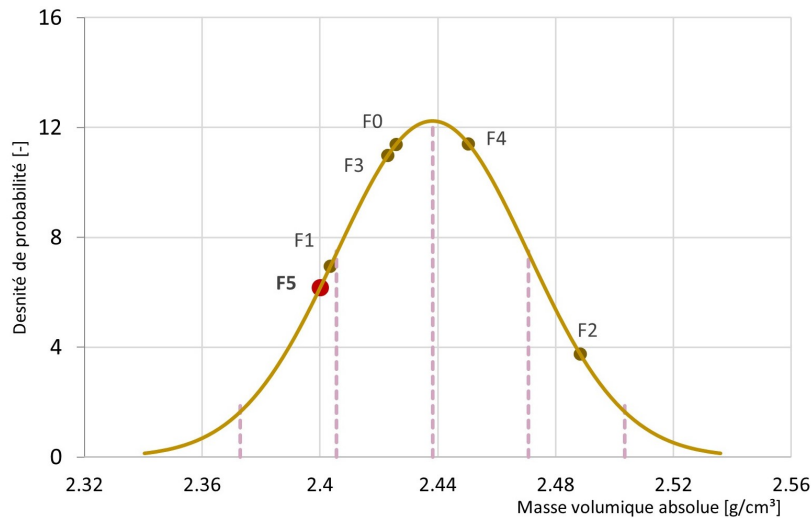


FIGURE 3.2 – Courbe de Gauss - Masse volumique absolue F0-5

3.1.1.4 Granulométrie laser

L'analyse granulométrique laser présentée en 2.3.1.4 est réalisée sur deux échantillons de fines du lot 5 (F5), sur base du modèle mathématique de Fraunhofer. La distribution granulométrique moyenne est représentée à la Figure 3.3.

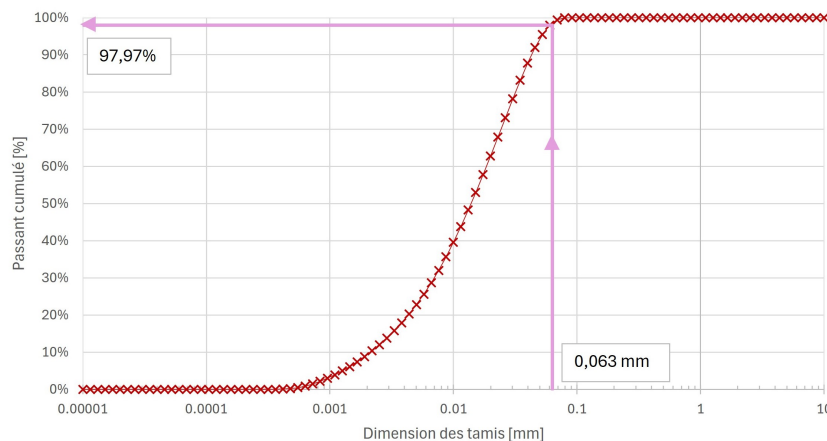


FIGURE 3.3 – Courbe granulométrique - F5

La distribution granulaire obtenue est cohérente avec la norme NBN EN 13242+A1 :2008. En effet, cette dernière définit les fines comme la fraction d'un granulat passant au tamis de 0,063 mm. En considérant $D = 0,063$ mm, les limites de pourcentage en masse de passant sont les suivantes (Table 3.6) et sont respectées :

TABLE 3.6 – Pourcentages massiques limites de passant (NBN EN 13242+A1 :2008)

	Limites [%]	Valeurs obtenues [%]
2D	= 100	100
1,4D	$98 < x < 100$	99,87
D	$80 < x < 99$	97,97

Le matériau est donc bien classé comme étant une fraction fine selon la norme.

De plus, la norme NBN ISO 13320 :2020 propose des valeurs percentiles pour caractériser la distribution granulométrique des fines :

- D10 : 10 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur ;
- D50 : 50 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur ;
- D90 : 90 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur.

Ces valeurs, reportées sur la Figure 3.4, offrent respectivement les résultats de 2,2 μm , 14 μm et 43 μm . En comparaison avec la texture du sol sur la Figure 3.5, le matériau est un sol limoneux très fin avec une très faible quantité d'argile (inférieure à 10 %). Il s'agit donc d'un matériau avec une grande surface spécifique qui possède une grande sensibilité à l'eau.

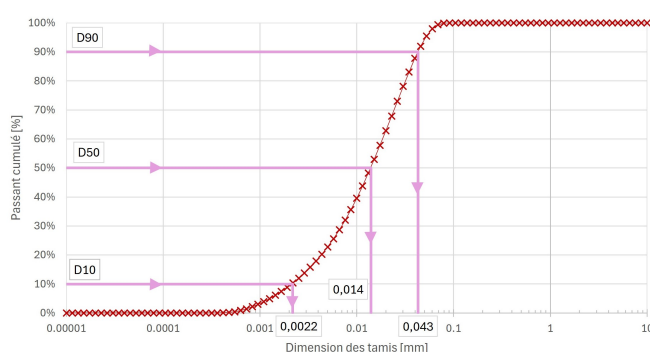


FIGURE 3.4 – Valeurs percentiles

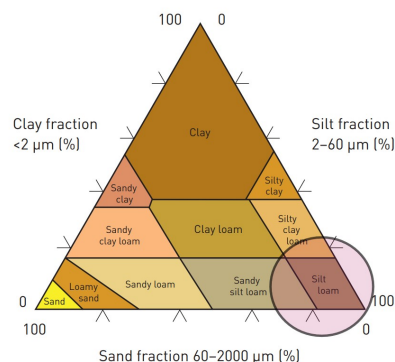


FIGURE 3.5 – Triangle textural (Foot & Sinnett, 2006)

3.1.2 Caractérisation du sable recyclé

3.1.2.1 Analyse granulométrique

La méthode de tamisage utilisée pour l'analyse granulométrique du sable mixte recyclé (décrite en 2.3.2.1), réalisée sur trois échantillons différents, présente les résultats suivants :

TABLE 3.7 – Analyse granulométrique

Ouverture des tamis [mm]	Echantillon 1 Passant cumulé [%]	Echantillon 2 Passant cumulé [%]	Echantillon 3 Passant cumulé [%]	Passant cumulé moyen [%]	Ecart-type	CV
8	100%	100%	100%	100%	0	0%
4	99,23%	99,37%	98,52%	99,04%	0,00345	0,35%
3,15	98,80%	99,18%	98,13%	98,71%	0,00383	0,39%
2	97,55%	98,63%	97,11%	97,76%	0,00580	0,59%
1	90,78%	93,01%	89,88%	91,22%	0,01193	1,31%
0,5	73,35%	75,68%	72,68%	73,91%	0,01185	1,6%
0,25	45,77%	46,61%	45,54%	45,97%	0,00424	0,92%
0,125	29,82%	28,87%	29,06%	29,25%	0,00380	1,3%
0,063	22,55%	21,21%	21,93%	21,90%	0,00461	2,1%
0	21,05%	19,94%	20,84%	20,61%	0,00447	2,17%

Masse sèche M1 [g]					
Echantillon 1	306,18	Echantillon 2	304,21	Echantillon 3	304,75
Masse sèche lavé L [g]					
Echantillon 1	243,49	Echantillon 2	243,16	Echantillon 3	240,88

Les résultats des trois échantillons ainsi que leur moyenne sont présentés sur la Figure 3.6. Les pourcentages cumulés moyens de matière passant à travers chaque tamis permettent d’obtenir la courbe granulométrique du sable mixte recyclé 0/2.

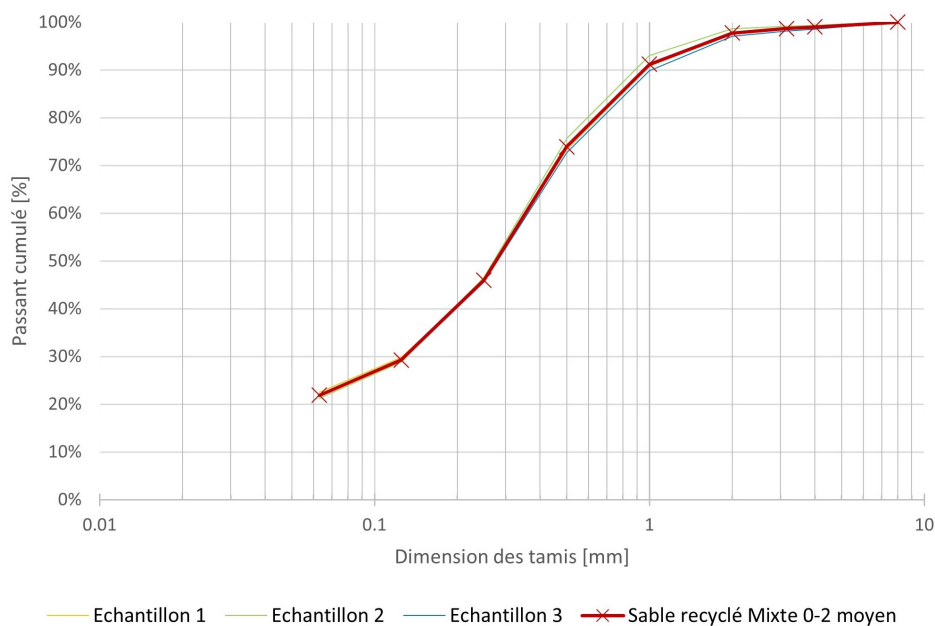


FIGURE 3.6 – Courbe granulométrique - SMR 0/2

En effet, la Table 3.7 montre un coefficient de variabilité maximal (CV) (équation 3.1) ne dépassant pas 2,17 %. Selon Denoël (2022), la variabilité des lots est considérée comme très faible si le CV ne dépasse pas 5 %. Dès lors, la moyenne des passants cumulés peut être considérée comme représentative du lot entier.

La Figure 3.7 permet la comparaison de la courbe granulométrique du SMR 0/2 définie avec celles d’un sable naturel et d’un sable recyclé mixte de brique (RMA) issues de l’étude de Ledesma et al. (2015).

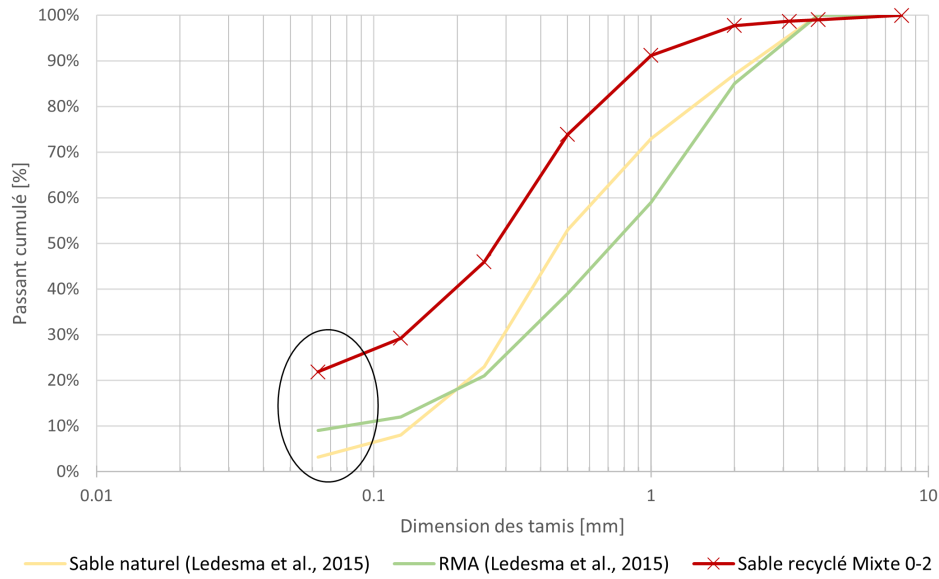


FIGURE 3.7 – Courbe granulométrique - SMR 0/2 et sable naturel

Contrairement à un sable naturel, le sable recyclé (SMR 0/2 et RMA) présente une teneur en fines bien plus importante. La teneur en fines correspond au pourcentage de matière passant au travers du tamis de 0,063 mm (entouré en noir sur la Figure 3.7). Cette valeur est calculée à l'aide de la formule suivante (3.2) :

$$f \text{ [%]} = \left(\frac{M0 - M2}{M0} + \frac{M1 - L}{M1} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Avec :

$M0$ [g] = la masse séchée de refus cumulée au tamis de 0 mm ;

$M1$ [g] = la masse séchée de la prise d'essai ;

$M2$ [g] = la masse séchée de refus cumulée au tamis de 0,063 mm ;

L [g] = la masse séchée lavée de la prise d'essai.

Les résultats sont fournis dans la Table 3.8.

TABLE 3.8 – Pourcentages de fines dans le SMR 0/2

Teneur en fines [%]					
Échantillon 1	22,38 %	Échantillon 2	21,65 %	Échantillon 3	22,33 %
Moyenne	22,12 %				

En moyenne, la teneur en fines dans le SMR 0/2 s'élève à 22,12 % contre 3 % pour le sable naturel (Ledesma et al., 2015). Cette différence s'explique notamment par le processus de concassage et de broyage utilisé pour produire les sables recyclés. De plus, ce dernier n'étant pas lavé, il conserve l'ensemble de ses fines.

Ainsi, il sera important de prendre en compte la quantité importante de fines initialement présentes dans le sable.

3.1.2.2 Coefficient d'absorption d'eau et masse volumique réelle

Le test d'absorption à l'aide d'un pycnomètre permet de déterminer le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la masse volumique réelle du sable mixte recyclé (voir 2.3.2.2). Ce test a été réalisé sur trois échantillons différents. Les résultats obtenus sont présentés dans la Table 3.9.

TABLE 3.9 – Absorption d'eau et masse volumique réelle

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3			
M_1 [g]	823,19	821,27	819,93			
M_2 [g]	2192,70	2175,68	2196,97			
M_3 [g]	1696,05	1677,85	1699,12			
M_4 [g]	787,63	793,37	798,50	Moyenne	Ecart-type	CV
ρ_a [kg/m^3]	2706,82	2684,45	2655,94	2682,40	25,50	0,95%
ρ_{rd} [kg/m^3]	2412,05	2452,89	2479,22	2448,05	33,85	1,38%
ρ_{ssd} [kg/m^3]	2520,95	2539,15	2545,76	2535,28	12,85	0,51%
WA_{24} [%]	4,51%	3,52%	2,68%	3,57%	0,92%	25,67%

Sur base de la Table 3.9, les échantillons de SMR 0/2 présentent une masse volumique réelle moyenne (ρ_{rd}) de 2448,05 kg/m^3 avec un écart-type de 33,85, ce qui donne un coefficient de variation de 1,38 %, selon l'équation 3.1. Selon Denoël (2022), la variabilité des lots est considérée comme très faible si le CV ne dépasse pas 5 %. Dès lors, la moyenne des masses volumiques réelles peut être considérée comme représentative de l'ensemble du lot.

Les résultats obtenus concernant la masse volumique sont également confirmés par les données de la littérature. En effet, Ledesma et al. (2015) montrent une masse volumique des sables recyclés de 2140 kg/m^3 , contrairement à un sable naturel dont la masse volumique peut atteindre 2630 kg/m^3 . Cela confirme les observations courantes dans la littérature, selon lesquelles la masse volumique des sables recyclés est généralement plus faible que celle des sables naturels.

Concernant l'absorption du SMR 0/2, celle-ci influence directement la quantité d'eau à introduire dans le mélange pour la formulation des briques. En effet, une partie de l'eau est absorbée par le sable et ne réagira donc pas avec le ciment. Il faut donc quantifier cette eau absorbée.

Sur base de la Table 3.9, les échantillons de SMR 0/2 présentent un coefficient d'absorption d'eau moyen (WA_{24}) de 3,57 % avec un écart-type de 0,92 %. Une courbe de Gauss (Figure 3.8) a été réalisée en fonction des résultats, permettant de mettre en évidence la variabilité importante du lot, correspondant à un coefficient de variation de 25,67 %.

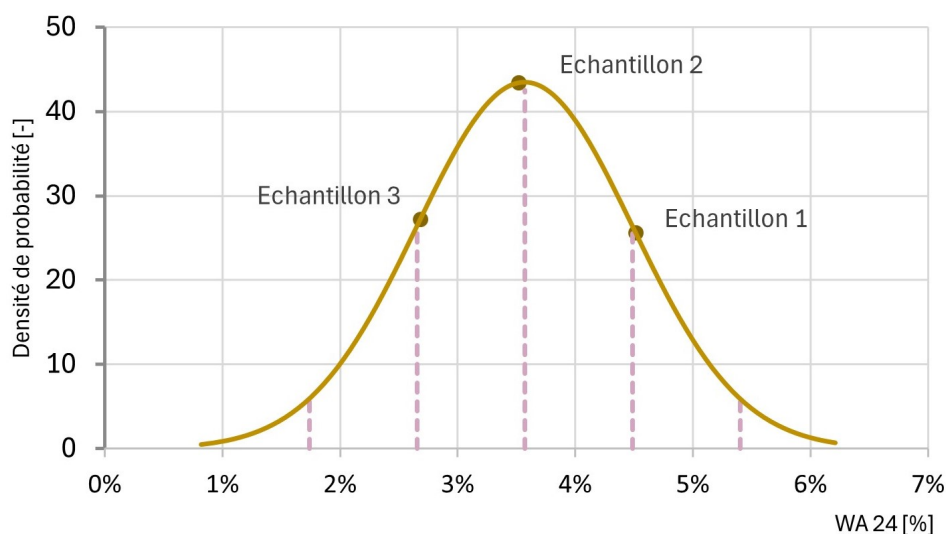


FIGURE 3.8 – Courbe de Gauss - Absorption d'eau SMR 0/2

Malgré la variabilité importante du lot, la valeur moyenne a tout de même été considérée pour la suite des tests. Cette décision s'appuie sur la nature hétérogène du matériau recyclé en termes de porosité et de composition par rapport au sable naturel (Candamano et al., 2022). Une certaine dispersion est donc attendue au sein du lot, représentant le comportement réel du matériau. En effet, lors de l'essai permettant de déterminer le coefficient d'absorption, il est difficile d'évaluer et de quantifier précisément l'état saturé à surface sèche du sable lors de l'essai.

En comparant la valeur moyenne du coefficient d'absorption du SMR 0/2 issue du test (3,57 %) à la plage définie par l'étude de Zhao et al. (2022) pour des sables recyclés (8,8 % à 17 %) en 1.2.2.3, la valeur obtenue peut sembler faible, se rapprochant de celle indiquée pour un sable naturel (0,3 % à 3 %). Cependant, le sable recyclé utilisé pour le test a été lavé, le coefficient d'absorption du lot est donc sous-estimé car il ne tient pas compte de l'ensemble des fines présentes dans le sable, celles-ci ayant une capacité d'absorption plus élevée que le sable lui-même.

Le coefficient d'absorption a donc été réévalué. Pour ce faire, le coefficient moyen intrinsèque du SMR 0/2 (3,57 %) a été additionné à la teneur en fines (déterminée en 3.1.2.1) que contient le sable multipliée par la demande en eau de ces fines (20 %). La valeur obtenue de 8 % se rapproche ainsi davantage de la plage définie par Zhao et al. (2022) (de 8,8 % à 17 %).

Une masse volumique réelle moyenne de 2450 kg/m^3 et un coefficient d'absorption d'eau de 8 % sont considérés pour caractériser le lot de SMR 0/2.

3.1.2.3 Teneur en eau

Le test de teneur en eau est réalisé à partir de cinq pots de sable mixte recyclé 0/2 prélevés à différents endroits du big bag. Les résultats sont disponibles dans la Table 3.10.

TABLE 3.10 – Teneur en eau du SMR 0/2

	SMR 0/2 - 1	SMR 0/2 - 2	SMR 0/2 - 3	SMR 0/2 - 4	SMR 0/2 - 5
Date	28/03/2025	28/03/2025	28/03/2025	28/03/2025	27/03/2025
Mpot [g]	260,8	268,4	261,6	261	261,2
Mhumide [g]	511,1	502,3	510,5	503,3	370,7
Mpot + Mhumide [g]	771,9	770,7	772,1	764,3	631,9
Date	31/03/2025	31/03/2025	31/03/2025	31/03/2025	28/03/2025
Mpot + Msèche [g]	710,84	712,96	711,55	704,93	587,8
Msèche [g]	450,04	444,56	449,95	443,93	326,6
Teneur en eau	13,57%	12,99%	13,46%	13,37%	13,50%

La teneur en eau des cinq pots varie de 12,99 % à 13,57 % avec une moyenne de 13,38 % $\pm$ 0,23 %. Cette très faible variabilité, $CV = 1,71$ % (équation 3.1), montre une homogénéité du matériau dans le big bag. Afin de préserver la teneur initiale de chacun des pots, ces derniers sont placés dans des bidons hermétiques, permettant ainsi de conserver leur teneur en eau initiale tout le long de l'étude. Cela permet de prendre en compte cette quantité d'eau réelle que les sables possèdent lors de la formulation des mélanges de briques comprimées.

Pour s'assurer de la validité des résultats, la teneur en eau a été réévaluée à plusieurs reprises lors de la fabrication des briques comprimées.

Selon la partie 3.1.2.2, le coefficient d'absorption d'eau du sable recyclé est de 8 %, ce qui signifie qu'au-delà de cette valeur, le sable est considéré comme saturé. Cependant, la teneur en eau moyenne réelle s'élève à 13,38 %, ce qui suggère soit que le sable est réellement en état de saturation avec un excès d'eau libre dans les interstices des grains, soit que le coefficient d'absorption d'eau a été sous-évalué en raison de la variabilité importante du lot analysé. Si la deuxième hypothèse se confirme, la valeur obtenue du coefficient d'absorption d'eau de 8 %, inférieure à la plage définie par Zhao et al. (2022) comprise entre 8,8 % et 17 %, serait sous-estimée. Une valeur située dans cette plage correspondrait alors mieux à la teneur moyenne observée dans cette étude.

3.2 Recettes

3.2.1 Presse manuelle

Ce test a permis de quantifier la force réelle de compaction appliquée lors de la confection des 32 compositions des recettes A et B. Sur base des recommandations issues du travail de recherche de Doitrand (2025), la méthode "classique" préconisée par le fournisseur de la presse a été adoptée pour confectionner les briques. Cette méthode consiste à compresser la brique en tournant le levier dans le sens horaire (Figure 3.9).

Ce test est réalisé à l'aide d'un capteur placé dans la presse, avec des plaques positionnées en dessous de ce dernier permettant de simuler différentes hauteurs de brique, en ajoutant ou en retirant des plaques (Figure 3.9).

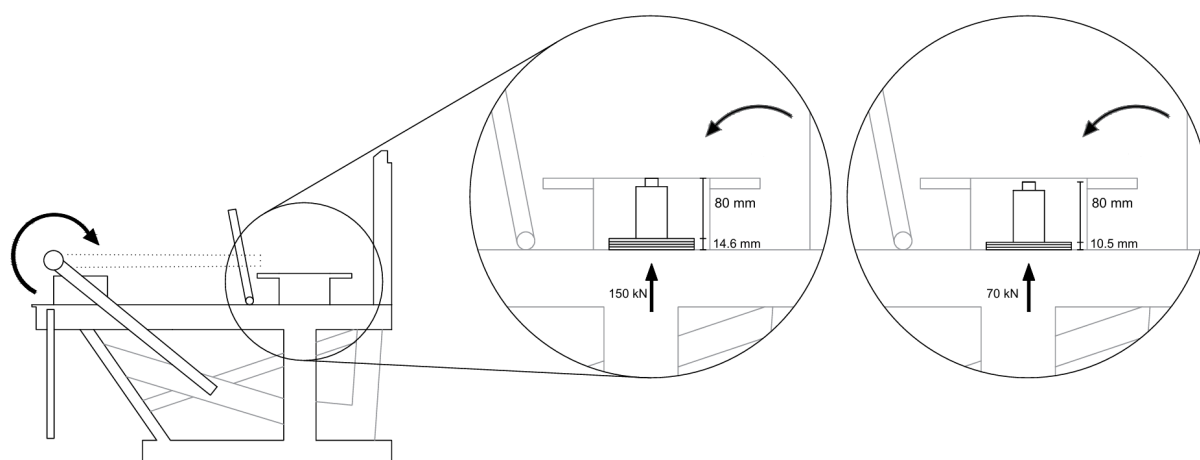


FIGURE 3.9 – Méthode "classique" et capteur dans la presse

Les résultats du capteur corrélés à la hauteur totale du système sont disponibles dans la Table 3.11.

TABLE 3.11 – Force appliquée en fonction de la dimension du capteur

Dimension du capteur [mm]	81,5	83,0	84,5	86,0	87,5	89,0	90,0	90,5	91,5	93,0	94,5
Force appliquée [t]	0,80	1,00	1,60	2,20	3,40	5,10	5,60	7,30	9,00	12,00	15,00

Sur base de ces résultats, le graphique représentant l'évolution de la force appliquée en fonction de la dimension du capteur est présenté à la Figure 3.10. La courbe de tendance passant par les points, avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,9957$, montre une forte corrélation entre les deux variables. Ainsi, l'équation de la courbe de tendance permet de montrer qu'une hauteur de brique d'exactement **94,6 mm** serait nécessaire pour atteindre la force optimale de **15 t** décrite par le fournisseur de la presse.

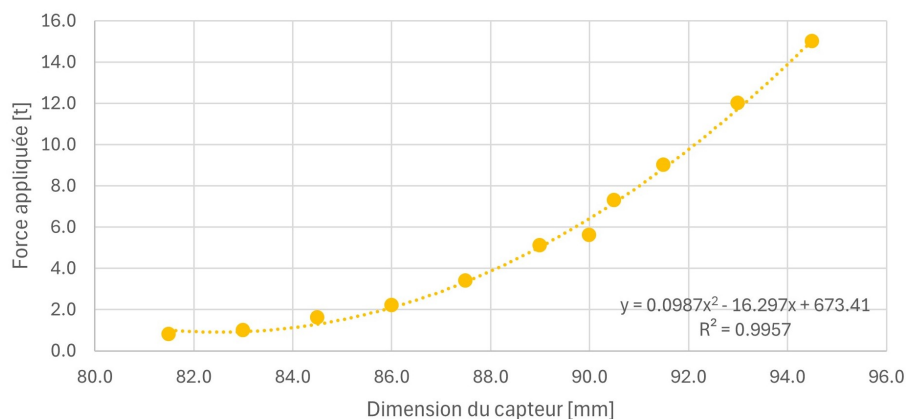


FIGURE 3.10 – Évolution de la force appliquée en fonction de la dimension du capteur

Cet essai permet de constater qu’une méthode de compression efficace modifie considérablement les résultats. Il montre également que la force de compaction appliquée lors de la fabrication des briques n’était pas contrôlée et qu’elle variait d’une brique à l’autre en fonction de leur hauteur.

La force appliquée lors de la réalisation des 32 compositions a donc pu être estimée sur base de la hauteur mesurée des briques comprimées, ainsi que de l’équation de la courbe de tendance présentée en Figure 3.10. Les résultats de cette estimation sont disponibles à la Table 3.12.

3.2.2 Brûlage

Sur base du travail de recherche de Doitrand (2025), la méthode de brûlage pendant une heure au four à micro-ondes est privilégiée pour l’essai (au détriment du test en étuve ventilée), afin d’analyser la teneur en eau du mélange frais des 32 compositions des recettes A et B (détaillées en 2.5.1.1). Les résultats du brûlage sont présentés sur la Figure 3.11 ainsi que dans la Table 4.2 disponible en Annexe 3.

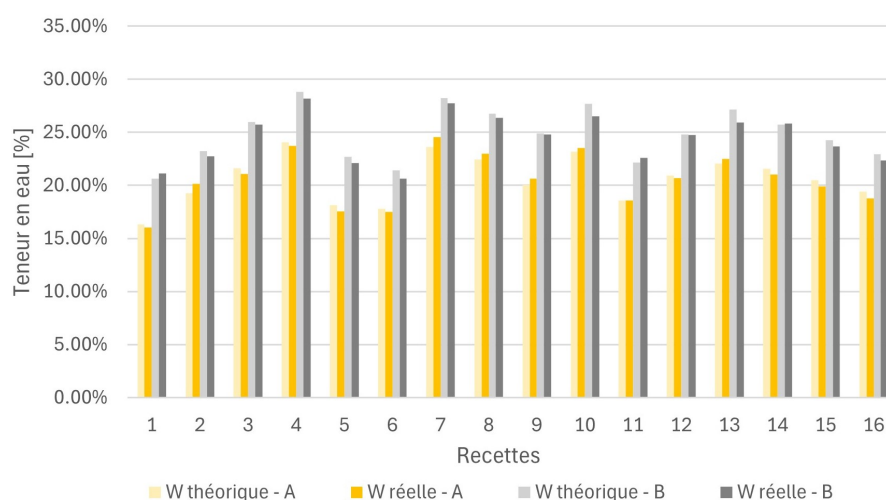


FIGURE 3.11 – Evolution de la teneur en eau par brûlage des recettes A et B

La Figure 3.11 montre que les teneurs en eau théoriques et réelles des mélanges sont semblables. En effet, pour la recette A, l'écart-type s'élève à 0,35 % avec des écarts allant de 0 % à 0,66 % (Table 4.2). Pour la recette B, l'écart-type est similaire, atteignant 0,37 % avec une plage de variation de 0,04 % à 0,86 % (Table 4.2). En comparaison, l'étude de Doitrand (2025) montre un écart-type de 0,7 %. Les résultats obtenus ici sont donc encore meilleurs, ce qui valide l'approche utilisée pour estimer les pertes de masse d'eau par micro-ondes et la méthodologie suivie pour formuler les recettes.

Pour les compositions suivantes, les résultats des brûlages sont similaires. Les tables de résultats sont placées en annexe de chaque partie.

3.2.3 Choix de la composition à optimiser

Les résultats des essais de résistance à la compression à 7 jours (décrits en 2.5.1.3), réalisés après une cure sous film plastique (détaillée en 2.4.3), sont disponibles à la Table 3.12. Les tests sont réalisés sur un seul échantillon de brique pour chaque composition de la recette A. Les valeurs de masse volumique associées (en 2.5.1.2) sont également présentées dans cette même table.

TABLE 3.12 – Résistance à la compression à 7 jours - Recette A

Recette A								
	Quantité de ciment [kg/m ³]	% massique ciment	Teneur en fines [%]	h [mm]	Teneur en eau réelle [%]	σ_{max} 7j [MPa]	Force réellement appliquée [t]	Masse volumique [kg/m ³]
A1	160	7,8%	0%	93,93	16,04%	4,43	13,45	1755
A2		8,0%	10%	90,43	20,16%	3,47	6,80	1754
A3		8,1%	15%	90,15	21,05%	4,68	6,37	1869
A4		8,3%	20%	89,73	23,71%	4,74	5,76	1884
A5	180	8,9%	0%	90,13	17,54%	3,84	6,34	1675
A6		8,8%	10%	89,78	17,51%	4,36	5,83	1791
A7		9,3%	15%	89,67	24,54%	4,82	5,68	1899
A8		9,2%	20%	87,59	22,96%	4,93	3,18	1828
A9	200	10,0%	0%	90,95	20,65%	6,97	7,63	1885
A10		10,2%	10%	90,74	23,53%	5,99	7,29	1921
A11		9,9%	15%	88,66	18,60%	4,65	4,36	1810
A12		10,1%	20%	84,25	20,68%	5,60	0,97	1846
A13	220	11,1%	0%	89,98	22,51%	8,17	6,12	1922
A14		11,1%	10%	88,09	21,04%	6,46	3,70	1876
A15		11,0%	15%	89,19	19,88%	4,45	5,02	1834
A16		10,9%	20%	89,38	18,78%	4,18	5,28	1807

Les résultats présentés à la Table 3.12 sont difficiles à interpréter et à comparer les uns avec les autres au premier abord. En effet, les seize compositions testées présentent des variations simultanées de plusieurs paramètres : la quantité de ciment, la teneur en fines, la teneur en eau ainsi que la force de compaction appliquée aux briques comprimées. Chacune de ces variables influence directement la résistance à la compression des compositions.

Ainsi, sur base des résultats de la partie 3.2.1 concernant la force réellement appliquée par la presse manuelle, il est possible d'estimer la force effective exercée lors du compactage. L'équation présentée dans la Figure 3.10 permet cette estimation en fonction de la hauteur des briques. Cette méthode est utilisée pour toutes les compositions de la recette A (voir Table 3.12).

Une fois la force de compaction effective déterminée pour chaque composition, des critères de sélection sont définis afin de déterminer, sur base de la Table 3.12, de la littérature et d'hypothèses posées, la composition la plus prometteuse à optimiser.

Il est important de noter ici que les résultats présentés reposent sur un seul échantillon par composition et sur la résistance à 7 jours, limitant ainsi la fiabilité des essais.

Concernant le choix de la composition à optimiser (Table 3.13), celui-ci repose sur trois critères principaux : la teneur en ciment, la teneur en fines ainsi que le meilleur compromis entre la résistance mécanique et la force de compaction appliquée par la presse.

- Premièrement, la sélection repose sur la teneur en ciment. L'un des objectifs de cette étude est de concevoir une brique comprimée à faible impact environnemental. Pour ce faire, un pourcentage massique en ciment inférieur à 10 % est visé, comme recommandé dans l'étude de Rayeesulhaq et al. (2024), afin de réduire les émissions de CO_2 liées à la fabrication du ciment. Les teneurs en ciment supérieures à 10 % ont néanmoins été testées afin de fournir une référence de performance maximale. En effet, le comportement du CEM III/B en présence d'eau, de fines de lavage et de sable mixte recyclé est encore inconnu.
- La deuxième étape de sélection repose sur les compositions respectant la limite des 10 % de teneur en ciment (voir Table 3.13). Le choix final s'oriente vers une teneur en fines maximale. L'un des objectifs de cette recherche est de valoriser les fines de lavage. Une teneur en fines de 20 % est donc privilégiée à cette étape.

TABLE 3.13 – Choix de la composition à optimiser - Teneur en ciment/fines

Recette A								
	Quantité de ciment [kg/m ³]	% massique ciment	Teneur en fines [%]	h [mm]	Teneur en eau réelle [%]	σ_{max} 7j [MPa]	Force réellement appliquée [t]	Masse volumique [kg/m ³]
A1	160	7,8%	0%	93,93	16,04%	4,43	13,45	1755
A2		8,0%	10%	90,43	20,16%	3,47	6,80	1754
A3		8,1%	15%	90,15	21,05%	4,68	6,37	1869
A4		8,3%	20%	89,73	23,71%	4,74	5,76	1884
A5	180	8,9%	0%	90,13	17,54%	3,84	6,34	1675
A6		8,8%	10%	89,78	17,51%	4,36	5,83	1791
A7		9,3%	15%	89,67	24,54%	4,82	5,68	1899
A8		9,2%	20%	87,59	22,96%	4,93	3,18	1828
A11	200	9,9%	15%	88,66	18,60%	4,65	4,36	1810

- Troisièmement, la sélection finale s'appuie sur les deux compositions répondant aux critères précédents : les compositions A4 et A8. Le choix entre les deux formulations repose sur le meilleur compromis entre une résistance à la compression élevée et une faible force de compaction appliquée. Cette comparaison est pertinente car les deux compositions présentent la même teneur en fines (20 %) et une teneur en eau similaire (± 23 %). Ainsi, bien qu'une teneur plus élevée en ciment conduise généralement à une résistance plus importante, la composition A8 affiche la meilleure performance avec une force de compaction plus faible (Table 3.14).

TABLE 3.14 – Choix de la composition à optimiser - Force de compaction

	Recette A							
	Quantité de ciment [kg/m ³]	% massique ciment	Teneur en fines [%]	h [mm]	Teneur en eau réelle [%]	σ_{max} 7j [MPa]	Force réellement appliquée [t]	Masse volumique [kg/m ³]
A4	160	8,3%	20%	89,73	23,71%	4,74	5,76	1884
A8	180	9,2%	20%	87,59	22,96%	4,93	3,18	1828

C'est dans cette optique que la composition A8, présentant une teneur en ciment inférieure à 10 %, une teneur en fines de 20 % et affichant la meilleure résistance à la compression corrélée à la plus faible force de compaction appliquée par la presse parmi les compositions restantes, est choisie comme la brique de référence pour l'optimisation de la formulation.

L'évolution des résultats à 7 et 28 jours des résistances à la compression ainsi que des masses volumiques des seize compositions est disponible dans les Figures 4.6 et 4.7 de l'Annexe 4.

3.3 Optimisation des recettes

Sur base de la composition la plus prometteuse en termes de résistance, déterminée dans la partie 3.2.3 et comme détaillée dans la section expérimentation en 2.4.1.2 relative à l'optimisation des recettes, l'objectif est ici de déterminer les teneurs en eau optimales des compositions A8 - F-10%, A8 - F-20% et A8 - F-30%.

Pour ce faire, trois échantillons de chaque formulation présentée dans la Table 2.4 sont utilisés. Les résistances à la compression à 7 jours ont permis d'identifier la teneur en eau idéale à partir de l'équation de la courbe de tendance de chaque teneur en fines (Figure 3.12). L'optimum de teneur en eau permet également d'estimer la résistance à la compression des trois formulations optimisées (Table 3.15).

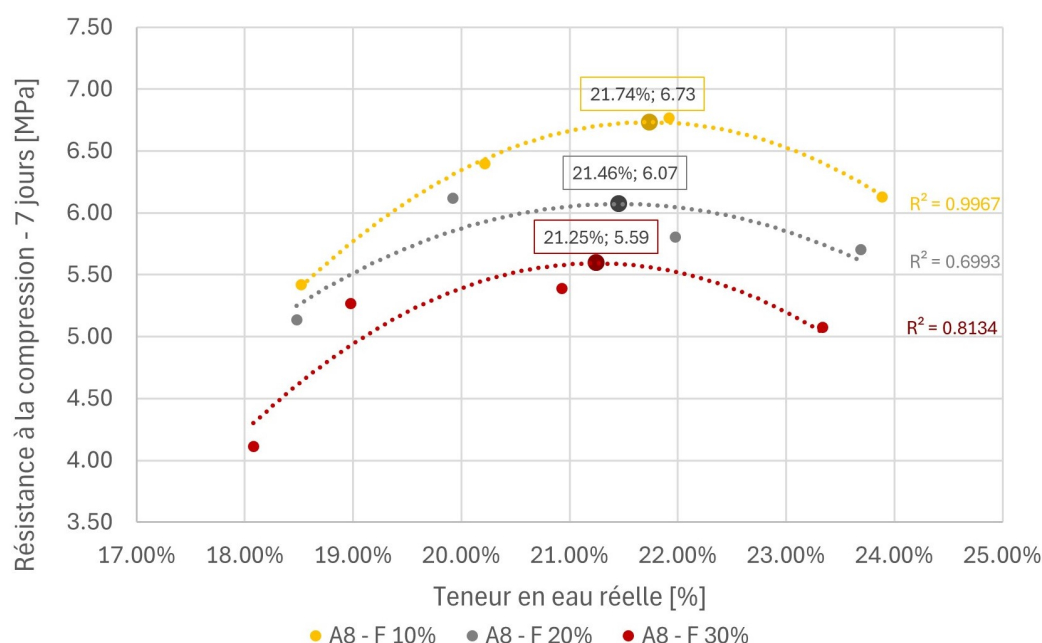


FIGURE 3.12 – Résistance à la compression à 7 jours - Optimisation des recettes

TABLE 3.15 – Synthèse des compositions optimales - 7 jours

	A8 - F-10% Opt.	A8 - F-20% Opt.	A8 - F-30% Opt.
Teneur en fines [%]	10%	20%	30%
Teneur en eau Opt. th. [%]	21,74%	21,46%	21,25%
σ_{max} th. [MPa]	6,73	6,07	5,59

Une fois les teneurs en eau optimales de chaque composition obtenues, la formulation offrant les meilleures performances parmi les trois courbes de tendance peut être identifiée. Il s'agit de celle correspondant à une teneur en fines de 10 % qui sera considérée, sur base des estimations, comme la composition optimale. À première vue, cette teneur en fines optimale peut se rapprocher des analyses réalisées par Malkanthi et al. (2021) (détaillées en 1.2.5), selon lesquelles la teneur en fines optimale d'un mélange serait de 10 %. Cependant, il est important de souligner que les 10 % mentionnés dans cette étude

représentent uniquement les fines ajoutées, sans prendre en compte celles déjà présentes dans le sable. Ainsi, le pourcentage réel optimal de fines présent dans le mélange atteint environ 30 %.

Contrairement à l'étude de Malkanthi et al. (2021), qui utilise un sable manufacturé à base de granite et de calcaire avec de la terre, des fines de lavages sont utilisées ici. De plus, la teneur en fines présente dans le sable n'a pas été précisée dans l'étude de Malkanthi et al. (2021). La nature du matériau peut donc influencer la teneur en fines optimale du mélange. Concernant la teneur en eau, il est logique d'obtenir une valeur optimale plus élevée que celle présentée dans l'étude, car les fines présentes en plus grande quantité dans ce travail possèdent une demande en eau plus importante que le sable.

La Figure 1.18 semble mieux refléter les résultats obtenus. En effet, dans le but de garantir un compromis entre la compacité et la porosité, et d'optimiser les performances mécaniques, une teneur en fines d'environ 30 % est préconisée (SPW, 2025). Cette teneur idéale permet de diminuer l'indice de vide du matériau en remplissant les espaces intergranulaires, sans pour autant remplacer les grosses particules.

Le même exercice a été réalisé à 28 jours sur un seul échantillon. Les résultats sont disponibles à la Figure 3.13 et à la Table 3.16.

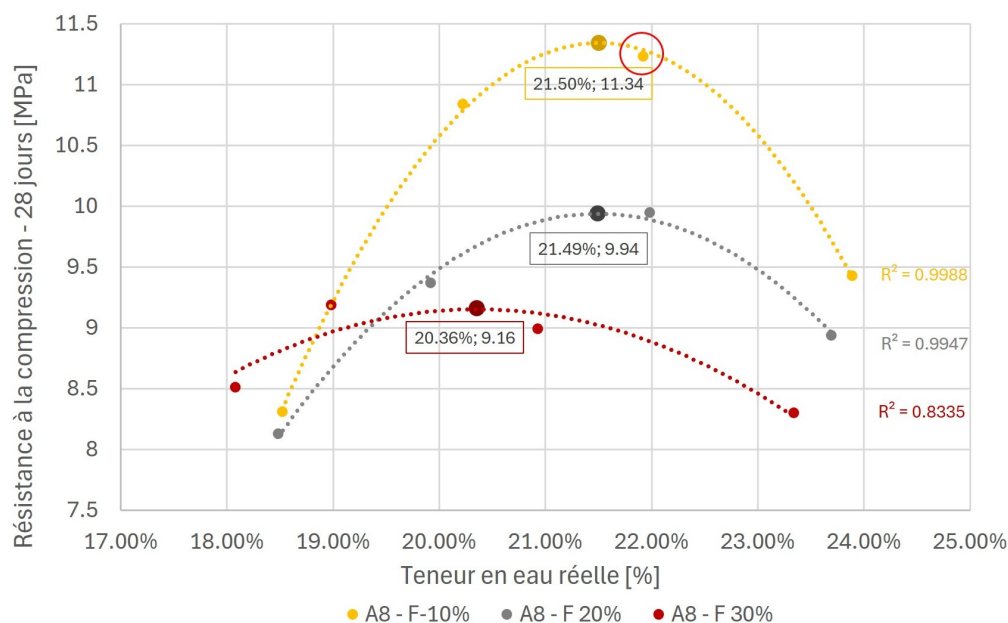


FIGURE 3.13 – Résistance à la compression à 28 jours - Optimisation des recettes

TABLE 3.16 – Synthèse des compositions optimales - 28 jours

	A8 - F-10%	A8 - F-20%	A8 - F-30%
Teneur en fines [%]	10%	20%	30%
Teneur en eau Opt. th. [%]	21,50%	21,49%	20,36%
σ_{max} th. [MPa]	11,34	9,94	9,16

Les courbes présentées à la Figure 3.13 suivent la même tendance que celles à 7 jours. En effet, la courbe A8 - F 10 % identifiée comme optimale atteint la résistance à la compression la plus importante à 28 jours. Cette observation confirme l'hypothèse formulée à partir de la Figure 3.12, selon laquelle A8 - F 10 % constitue la composition optimale.

Il est important de préciser que, sur la Figure 3.13 (point entouré en rouge), la valeur correspondant à la recette A8 - F-10% a été estimée. En effet, lors de l'essai de compression, la résistance mesurée était anormalement faible, probablement en raison d'arêtes cassées sur l'échantillon. Comme un seul échantillon est testé à 28 jours, cette valeur faussait la courbe de tendance. Pour corriger cela, le point est repositionné sur base de la résistance mesurée à 7 jours, en appliquant un taux d'augmentation plus cohérent. Initialement, l'évolution de la résistance entre 7 jours et 28 jours pour ce point n'était que de 30 %, contre une moyenne de 66 % pour les autres points de l'analyse. La valeur a donc été ajustée, ce qui semble plus représentatif du comportement réel du matériau.

Concernant les teneurs en eau optimales obtenues à 7 jours et à 28 jours (Table 3.17), celles-ci sont semblables avec un écart-type maximal entre les résultats de 0,63 %. Les différences peuvent venir du fait qu'un seul échantillon est utilisé pour les analyses, ce qui peut affecter la fiabilité des résultats.

TABLE 3.17 – Teneurs en eau optimales et théoriques à 7 et 28 jours

	<i>W_{th} 7j Opt.</i>	<i>W_{th} 28j Opt.</i>	Ecart-type
A8 - F-10%	21,74%	21,50%	0,17%
A8 - F-20%	21,46%	21,49%	0,03%
A8 - F-30%	21,25%	20,36%	0,63%

Les résultats de résistance à la compression à 7 et 28 jours, des masses volumiques et du brûlage obtenus pour chaque teneur en eau sont présentés à l'Annexe 5.

Les différentes teneurs en eau optimales obtenues à 7 jours pour chaque teneur en fines ont servi de base pour la suite des expérimentations. Parmi ces compositions, la formulation A8 - F-10% Opt. est retenue comme composition optimale dans le cadre de l'étude. Elle est composée de :

- Teneur en fines : 10 %
- Teneur en ciment : 180 kg/m^3
- Teneur en eau théorique : 21,74 %

La caractérisation de cette formulation optimale a donc été réalisée sur base des estimations établies à 7 jours.

3.4 Recettes optimisées

3.4.1 Comparaison des résultats estimés et réels

Une fois les résistances à la compression à 7 jours et 28 jours estimées pour chaque composition optimisée (Tables 3.15 et 3.16), des essais réels sont réalisés afin de vérifier l'hypothèse formulée précédemment selon laquelle A8 - F-10% Opt. correspond à la composition optimale (A8 - Optimale). Des tests de compression sont effectués sur les compositions A8 - F-10% Opt., A8 - F-20% Opt. et A8 - F-30% Opt à 7 jours et à 28 jours. Pour cela, trois échantillons sont analysés pour chaque formulation.

La Table 3.18 donne une vue d'ensemble des résistances estimées et de celles réellement obtenues :

TABLE 3.18 – Résistances estimées et réelles

	$\sigma_{\max}$ [MPa]					
	7j th.	7j réelle	Ecart-type	28j th.	28j. réelle	Ecart-type
A8 - F-10% Opt.	6,73	6,75	0,01	11,34	10,82	0,37
A8 - F-20% Opt.	6,07	6,67	0,42	9,94	11,37	1,01
A8 - F-30% Opt.	5,59	6,91	0,93	9,16	11,61	1,73

Concernant les résistances à la compression à 7 jours, la formulation A8 - F-10% Opt. montre une résistance à la compression réelle très proche de la valeur théorique (6,75 MPa contre 6,73 MPa), avec un écart négligeable. La composition A8 - F-20% Opt. affiche également une résistance à la compression réelle proche de la valeur estimée, bien qu'un léger écart (0,42 MPa) soit observé, suggérant un comportement légèrement meilleur.

Cependant, la composition A8 - F-30% Opt. montre une résistance à la compression réelle plus élevée que celle théorique, ce qui est surprenant. En effet, une diminution progressive de la résistance à mesure que la teneur en fines augmente était attendue (de 10 à 30 %), car un excès de fines ayant tendance à empêcher l'emboîtement optimal des grains plus gros (ici les grains de sable). De plus, un excès de fines amène une demande en eau considérable, réduisant le potentiel d'hydratation du ciment présent. Ce résultat illustre finalement la complexité du comportement des matériaux intégrant uniquement des matières recyclées.

Concernant les résistances à la compression à 28 jours, l'estimation des valeurs ne reflète pas les mesures réelles. En effet, alors qu'une augmentation de la résistance était attendue à mesure que la quantité de fines diminuait (comme pour les résultats à 7 jours), l'effet inverse est observé. Les résultats montrent que la formulation A8 - F-30% Opt. présente les meilleures performances (11,61 MPa). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces différences :

- **Les fines se comportent comme des granulats** : Après une observation visuelle d'un bloc après sa compression, la présence de particules grossières résistantes est constatée (Figure 3.14). Celles-ci proviennent des fines, qui sont en réalité présentes sous forme d'agglomérats (Figure 3.15). À 28 jours, le ciment enrobe complètement

ces particules grossières, qui jouent le rôle de squelette interne et donc de granulats dans le bloc. En effet, ces particules s'avèrent être plus résistantes que la pâte (ciment + eau + SMR 0/2). Ce comportement pourrait expliquer l'augmentation de la résistance à la compression à mesure que la teneur en fines du mélange augmente.

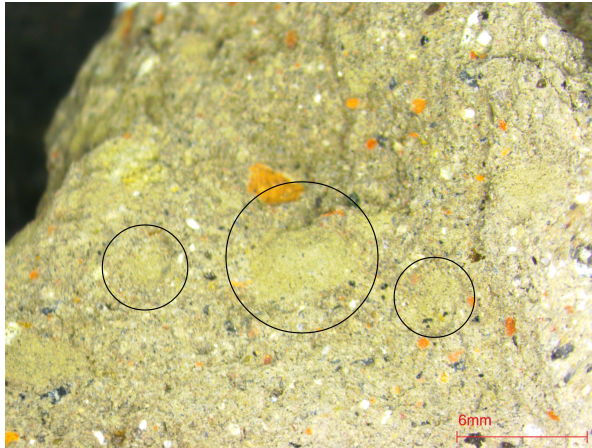


FIGURE 3.14 – Fines agglomérées



FIGURE 3.15 – Agglomérats

- **Teneur optimale en fines** : À 30 % de fines, celles-ci joueraient encore un rôle positif en remplissant les espaces intergranulaires du matériau, ce qui améliorerait la résistance. Il est possible que la teneur en fines optimale n'ait pas encore été atteinte, ce qui expliquerait pourquoi la résistance continue d'augmenter. Une diminution de la résistance serait alors observée lorsque les fines commenceraient à remplacer une partie du sable constituant le squelette granulaire du matériau.
- **Variation entre les teneurs en eau réelles et théoriques** : L'Annexe 6 présente les teneurs en eau estimées et réelles obtenues pour chaque composition optimisée. Il en découle que, pour la formulation A8 - F-20% Opt., un excès d'eau de 0,42 % est observé. Cette teneur en eau, légèrement plus élevée que la valeur attendue, pourrait avoir ralenti la réaction d'hydratation à 7 jours, ce qui expliquerait la résistance à la compression la plus faible à 7 jours parmi les trois formulations. Cependant, cette eau supplémentaire aurait pu favoriser une hydratation plus complète du ciment sur le long terme, contribuant à une résistance plus élevée à 28 jours que celle observée pour la formulation A8 - F-10% Opt.
- **Mise en œuvre de la cure sous film plastique** : Bien que les échantillons aient été emballés dans un film plastique alimentaire pour leur cure, il est possible que l'étanchéité de la protection ait été imparfaite (trou dans le film, mauvais emballage, etc.), entraînant l'évaporation d'une partie de l'eau de surface. Cela conduirait à une mauvaise hydratation du ciment et donc à des résistances plus faibles pour certains échantillons.

Malgré ces observations, et pour des raisons de contraintes temporelles, c'est tout de même la composition A8 - F-10%, initialement choisie pour ses performances estimées à

7 jours, qui a été retenue pour la suite des essais de caractérisation. Cela, bien que les résultats suggèrent que la composition A8 - F-30% Opt. pourrait finalement présenter de meilleures performances.

3.4.2 Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression à 7 et 28 jours des recettes optimisées sont présentés dans la Table ci-dessous. Les essais sont réalisés sur trois échantillons pour chaque formulation. La Table 3.19 montre à la fois la résistance moyenne obtenue (R_c) et la résistance à la compression normalisée (f_b) (détaillée en 1.1.4). Les calculs du changement de variable entre R_c et f_b sont disponibles à l'Annexe 6.

TABLE 3.19 – Résistance à la compression moyenne (R_c) et normalisée (f_b)

	$\sigma_{\max}$ [MPa]			
	R_c 7j moyen	f_b 7j moyen	R_c 28j moyen	f_b 28j moyen
A8 - F-10% Opt.	6,75	6,74	10,82	10,93
A8 - F-20% Opt.	6,67	6,61	11,37	11,36
A8 - F-30% Opt.	6,91	6,70	11,61	11,38

La Figure 3.16 illustre la comparaison entre les résistances normalisées (f_b) des briques comprimées et celles issues des briques et des blocs de construction, synthétisés à la Table 1.12.

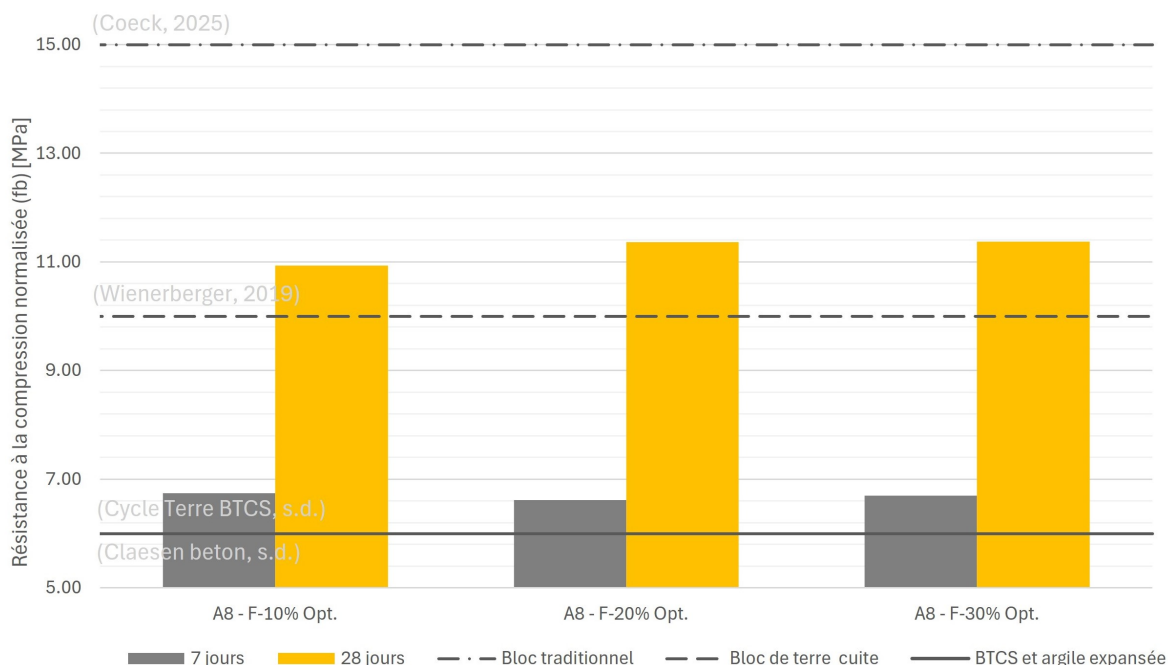


FIGURE 3.16 – Résistance à la compression normalisée (f_b) - Comparaison

Concernant les résistances à 7 jours, toutes les briques optimisées atteignent déjà une résistance normalisée supérieure à 6 MPa, soit la résistance optimale préconisée dans la

recherche de Doitrand (2025). Cela correspond aux valeurs généralement observées pour les briques de terre comprimées stabilisées et les blocs de béton d’argile expansée. Ces performances permettent d’envisager l’usage des briques comprimées pour la réalisation de bâtiments atteignant le R+2 (Claesen beton, s.d. ; Cycle Terre BTCs, s.d.).

Leur résistance normalisée à 28 jours s’étend de 10,93 MPa à 11,38 MPa. Ces valeurs se situent dans une plage de résistance intermédiaire entre celle des blocs de terre cuite et celle des blocs de béton. Ces deux types de blocs peuvent être utilisés aussi bien pour de la maçonnerie non porteuse que pour de la maçonnerie porteuse (Coeck, 2025 ; Wienerberger, 2019).

3.4.3 Masse volumique

Concernant la masse volumique, les résultats obtenus à 7 et à 28 jours pour les compositions optimisées sont présentés dans la Table 3.20. Les masses volumiques sont déterminées sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour les essais de résistance à la compression.

TABLE 3.20 – Masse volumique moyenne

	Masse volumique [kg/m³]	
	7j moyen	28j moyen
A8 - F-10% Opt.	1919	1832
A8 - F-20% Opt.	1907	1878
A8 - F-30% Opt.	1921	1871

La Figure 3.17 affiche une comparaison entre les masses volumiques obtenues et celles des briques et blocs de construction présentés dans la partie 1.1.4.

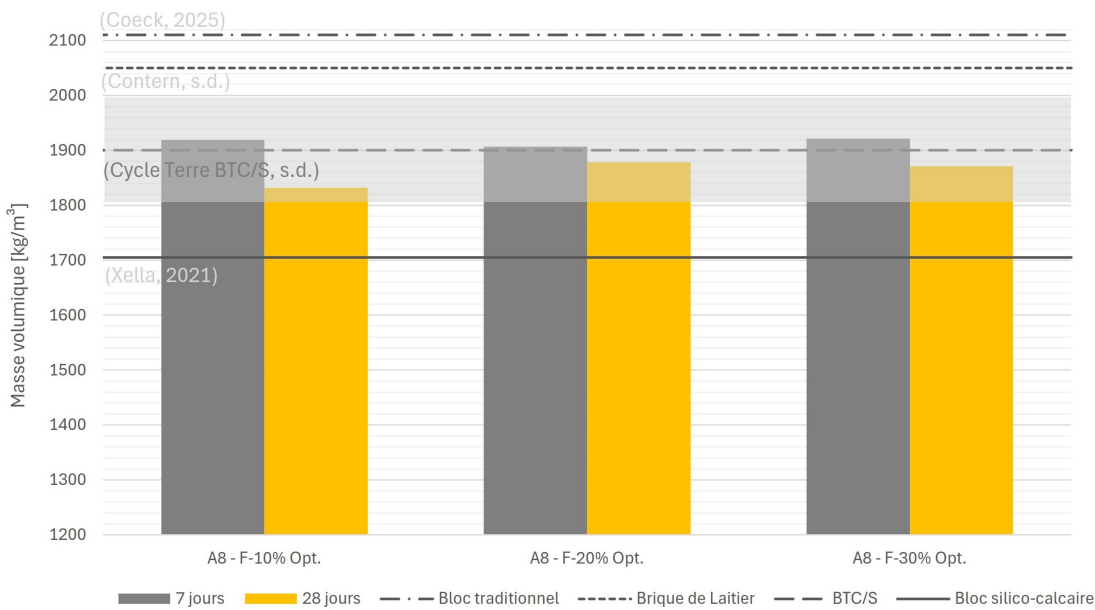


FIGURE 3.17 – Masse volumique moyenne - Comparaison

Les résultats montrent une masse volumique à 7 jours comprise entre 1907 et 1921 kg/m^3 et entre 1832 et 1878 kg/m^3 pour la masse volumique à 28 jours. Ces valeurs se situent dans une plage de $\pm 5\%$ par rapport aux résultats des briques de terre comprimée/stabilisée (BTC/S), représentée par la zone grisée sur la Figure 3.17.

De plus, la corrélation entre la masse volumique et la résistance permet d'affirmer que lorsque la masse volumique augmente, la résistance à la compression augmente linéairement de la même façon (Figure 3.18). Un coefficient de détermination de 0,71 est observé pour la résistance à 7 jours et de 0,82 pour celle à 28 jours. L'étude de Doitrand (2025) observe la même tendance pour des briques comprimées. Cela suggère que la masse volumique des briques, et par conséquent, leur compaction est un paramètre influençant la résistance à la compression du matériau.

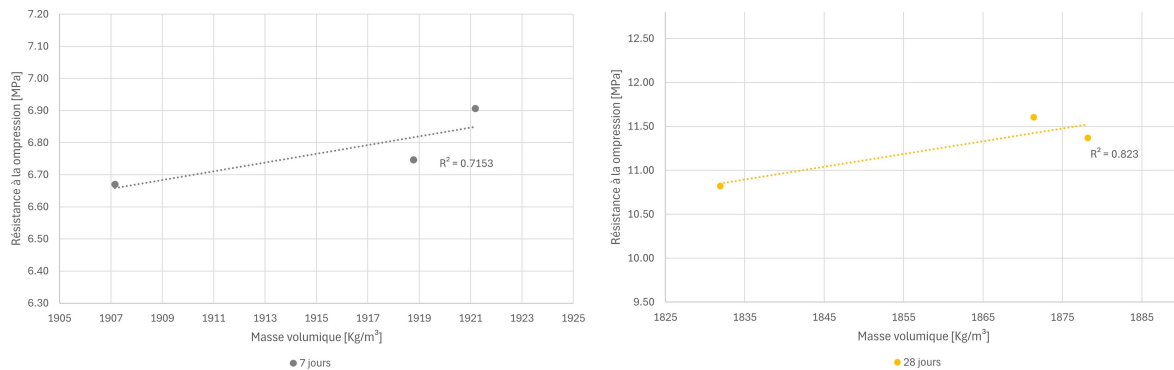


FIGURE 3.18 – Résistance à la compression en fonction de la masse volumique

3.4.4 Teneur en eau

La Table 3.21 présente les résultats du test de teneur en eau détaillé en 2.5.2.1. Ce test est réalisé à trois moments différents pour les trois compositions optimisées : sur le mélange frais, après 7 jours de cure et après 28 jours de cure sous film plastique. Les résultats de résistance à la compression obtenus dans la Table 3.19 sont également repris dans le tableau ci-dessous.

TABLE 3.21 – Teneur en eau

	W_r 0j	W_r 7j	W_r 28j	$\Delta 0j - 7j$	$\Delta 7j - 28j$	$\Delta 0j - 28j$
A8 - F-10% Opt.	21,70%	18,46%	17,73%	-3,24%	-0,73%	-3,96%
A8 - F-20% Opt.	21,88%	19,46%	16,75%	-2,41%	-2,71%	-5,12%
A8 - F-30% Opt.	21,34%	17,41%	15,66%	-3,93%	-1,75%	-5,68%
			Moyenne	3,19%	1,73%	4,92%

	$\sigma_{\max}$ 7j [MPa]	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]	Gain [%]
A8 - F-10% Opt.	6,75	10,82	60,42%
A8 - F-20% Opt.	6,67	11,37	70,46%
A8 - F-30% Opt.	6,91	11,61	68,03%

Concernant l'évolution de la teneur en eau, les résultats montrent que la perte entre 0 et 7 jours varie entre 2,41 % et 3,93 %, avec une moyenne de 3,19 %. Cette donnée traduit une consommation d'eau importante durant la première semaine. Cette eau est utilisée à

la fois pour le compactage initial du mélange et pour l'hydratation primaire du ciment. Entre 7 et 28 jours, les pertes en eau sont plus faibles, comprises entre 0,73 % et 2,71 %, avec une moyenne de 1,73 %. À cette étape, l'effet du compactage n'entre plus en jeu. Les pertes sont donc directement attribuées à l'hydratation du ciment, il s'agit de la phase de maturation.

La perte en eau globale entre 0 et 28 jours est corrélée avec la teneur en fines et la résistance à la compression à 28 jours du matériau. En effet, plus la teneur en fines augmente, plus la résistance finale augmente et plus la perte d'eau totale est importante. Cette indication montre que l'eau du mélange a été plus consommée dans les formulations les plus fines, traduisant une hydratation plus avancée. Par exemple, la composition A8 - F-30% Opt. présente la plus grande perte d'eau entre 0 et 28 jours (5,68 %). Par conséquent, cette eau a réagi avec le ciment, menant à une résistance à 28 jours du même mélange plus importante. Enfin, en ce qui concerne la perte d'eau entre 0 et 7 jours, la résistance mécanique suit également la même tendance.

3.4.5 Absorption d'eau

La Table 3.22 présente les résultats du test d'absorption d'eau détaillé en 2.5.2.2. Le test est réalisé sur quatre échantillons pour les trois compositions optimisées.

TABLE 3.22 – Coefficient d'absorption d'eau

	W_s [%]				
	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Échantillon 4	Moyenne
A8 - F-10% Opt.	19,36%	19,29%	19,26%	19,47%	19,34%
A8 - F-20% Opt.	18,67%	18,70%	18,85%	19,00%	18,81%
A8 - F-30% Opt.	19,21%	19,43%	19,29%	19,86%	19,45%

Il est important de rappeler que la résistance à la compression sous film plastique à 28 jours de la composition A8 - F-30% est plus élevée que celle des compositions à 20% et 10% de fines (résultats à la Table 3.18). Cependant, au niveau de la durabilité, il ne s'agit plus du squelette granulaire qui influence l'absorption d'eau, mais des espaces intergranulaires.

Pour la composition A8 - F-10%, les fines remplissent partiellement les vides intergranulaires, ce qui réduit la porosité du mélange, conduisant à une absorption d'eau moyenne (19,34 %). Toutefois, la présence en faible quantité de fines et donc potentiellement de granulats se traduit par la résistance à la compression la plus faible parmi les compositions optimisées (10,93 MPa). Lorsque 20 % de fines sont introduites, les vides se remplissent davantage sans pour autant séparer les grains de sable, ce qui entraîne une diminution de l'absorption d'eau (18,81 %) et une augmentation de la résistance (11,37 MPa).

Pour 30 % de fines, celles-ci sont présentes en quantité suffisante pour remplir presque entièrement les vides. On pourrait s'attendre à une absorption d'eau minimale, cependant une remontée est observée (19,45 %). Une première hypothèse est que la présence de fines se comportant comme des granulats explique, d'une part, la hausse de la résistance (11,61 MPa) et, d'autre part, la formation de micro-espaces vides autour de ces agglomérats,

augmentant ainsi l'absorption d'eau. Une seconde hypothèse est que l'excès de fines augmente la capacité du matériau à absorber l'eau, en raison de leur forte demande en eau, ce qui entraîne une augmentation du coefficient d'absorption d'eau.

La Figure 3.19 est un graphique représentant les données analysées de la Table 3.22, comparant l'absorption d'eau des compositions optimisées aux données de la littérature.

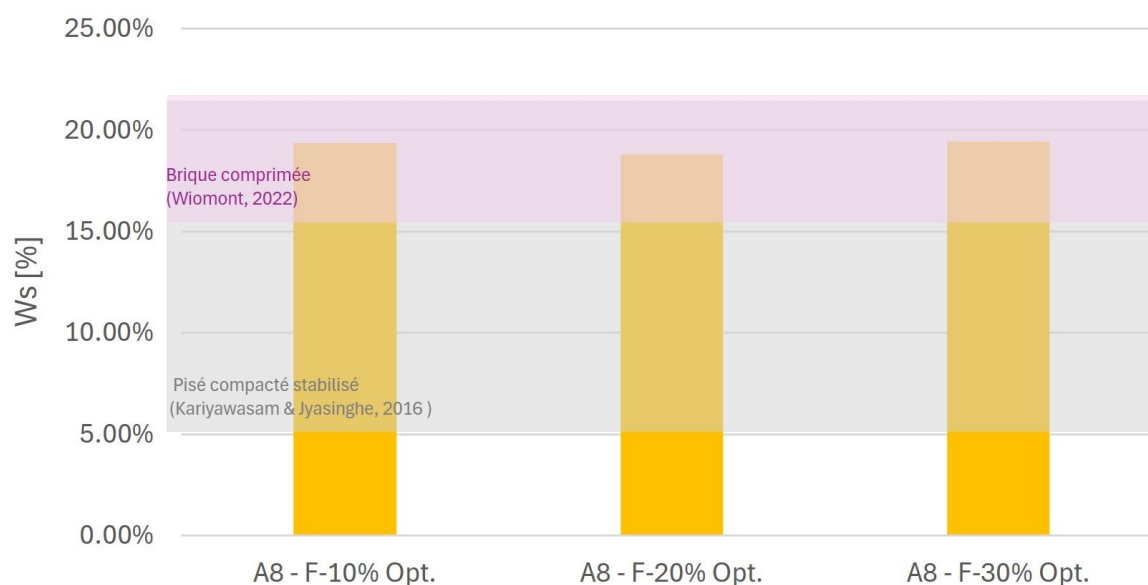


FIGURE 3.19 – Coefficient d'absorption d'eau

La moyenne des résultats obtenus pour chaque composition s'élève à 19,34 %, 18,81 % et 19,45 %. Ces trois valeurs se situent dans la plage de données définie par Kariyawasam et Jyasinghe (2016), dont le travail porte sur les blocs de pisé compacté stabilisé, et plus particulièrement dans la plage définie par Wiomont (2022). Ce dernier étudie les briques comprimées à base de granulats fins recyclés (détaillées en 1.3.2.2).

Le pourcentage d'absorption d'eau défini par Wiomont (2022) dépend du taux de ciment présent dans le mélange. Selon lui, un pourcentage massique de 9,4 % en ciment correspond à un pourcentage d'absorption d'eau de 19,1 %. Dans le cadre de cette étude, la quantité de ciment, similaire pour chaque composition optimisée, s'élève à 9,1 % pour une absorption d'eau moyenne atteignant 19,2 %. La valeur moyenne relevée est donc similaire à celle observée dans l'étude de Wiomont (2022).

3.5 Recette optimale

Une fois la recette présentant les meilleures performances mécaniques déterminée sur base des estimations à 7 jours (A8 - Optimale), la caractérisation de cette composition peut être réalisée à travers différents tests. Les résultats de l'influence du mode de cure, de la force de compaction, de la vitesse de chargement et de la variabilité des mélanges sont analysés dans cette section.

3.5.1 Modes de cure

Le résultat des résistances à la compression à 28 jours des différents modes de cure (détaillés en 2.5.3.1) est présenté à la Table 3.23. Les tests sont réalisés sur trois échantillons pour chaque type de cure.

TABLE 3.23 – Influence du mode de cure sur A8 - Optimale

	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]			
	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Moyenne
Sous film-plastique	10,79	10,27	11,41	10,82
A l'air libre	5,53	4,96	5,44	5,31
Sous eau	6,50	5,90	5,73	6,04
Sec	10,99	8,43	10,73	10,05
	Ratio RH/RS			0,60

Le Figure 3.20 met en évidence les résultats analysés de la Table 3.23, permettant de quantifier l'influence du mode de cure sur la composition optimale.

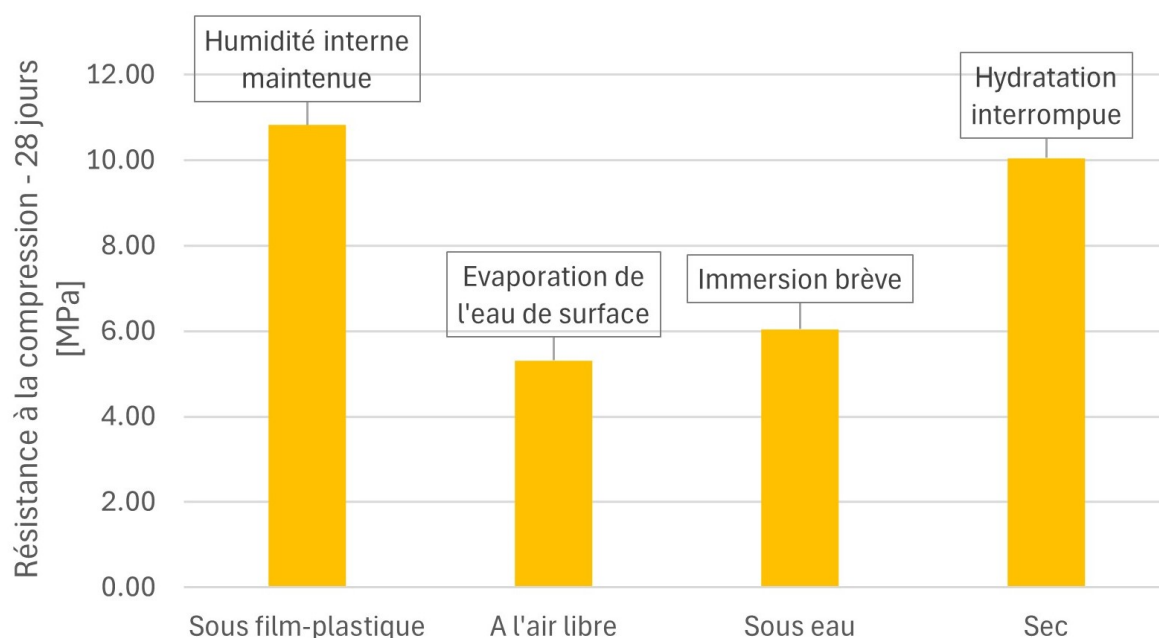


FIGURE 3.20 – Influence du mode de cure sur A8 - Optimale

La cure sous film-plastique utilisée pour l'ensemble des compositions de cette recherche affiche une résistance à la compression à 28 jours de 10,82 MPa. Ce mode de durcissement

est celui offrant les meilleures performances mécaniques. En effet, il conserve l'humidité interne de la brique, ce qui permet une hydratation progressive et presque complète du ciment.

La cure sèche, qui suit de près la cure sous film-plastique, présente une résistance à la compression légèrement inférieure, de l'ordre de 10,05 MPa. Cela s'explique par l'arrêt brutal de l'hydratation après 21 jours de cure sous film-plastique. En effet, en plaçant l'échantillon pendant 7 jours en étuve à 105°C, l'eau restante s'évapore du matériau rendant ce dernier plus rigide et limitant la poursuite de l'hydratation du ciment. Cependant, à long terme, ce type de cure pourrait avoir un effet défavorable. En effet, lors de l'évaporation, la structure interne est fragilisée, entraînant des fissurations.

Contrairement aux résultats de la littérature, la cure sous eau présente une résistance de 6,04 MPa inférieure à celle obtenue avec la cure sous film-plastique et la cure sèche. En effet, Goel et al. (2013) analysent trois types de cure pour un béton : sous film-plastique, à l'air libre et sous eau. Selon leurs recherches, l'immersion des échantillons dans l'eau permet d'atteindre la résistance maximale. En effet, l'échantillon étant complètement saturé, l'humidité interne est maintenue sans évaporation, favorisant donc une hydratation complète du ciment (Goel et al., 2013). Cependant, dans cette étude, l'immersion n'a duré que 24 heures, ce qui a permis à l'eau d'entrer dans les pores sans laisser le temps à une reprise de l'hydratation du ciment.

La cure à l'air libre présente la résistance à la compression la plus faible, de 5,31 MPa. Cela s'explique par l'évaporation rapide de l'humidité de surface de la brique, limitant une hydratation complète du ciment. L'absence d'un environnement humide provoque une perte rapide de l'eau nécessaire à la réaction d'hydratation, ce qui limite la résistance finale.

Concernant les résistances à la compression à l'état humide et à l'état sec, les valeurs moyennes obtenues de 6,04 MPa et 10,05 MPa respectent la spécification CRATerre pour les briques de terre stabilisée (Heathcote, 1995). Selon ces recommandations, la résistance minimale à l'état saturé doit être de 1,2 MPa et à l'état sec de 2,4 MPa. Le rapport entre la résistance humide et la résistance sèche s'élève à 0,60, ce qui est plus grand que la valeur minimale de 0,5 définie par CRATerre. Cette spécification est également respectée dans l'étude de Kariyawasam et Jyasinghe (2016).

L'écart significatif entre la cure sous film-plastique (10,82 MPa) et la cure à l'air libre (5,31 MPa) montre l'importance du mode de durcissement sur les propriétés mécaniques finales du matériau.

3.5.2 Force de compaction

La force de compaction est un paramètre influençant la résistance à la compression du matériau. Les essais sont réalisés sur trois échantillons par niveau de compaction. La Table 3.24 présente les résistances moyennes obtenues (R_c) et la résistance à la compression

normalisée (fb) (détaillée en 1.1.4). Les calculs du changement de variable entre Rc et fb sont disponibles à l’Annexe 7.

TABLE 3.24 – Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale

	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]					Mv moyen [kg/m³]
	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Rc moyen	fb moyen	
3,8 MPa	10,79	10,27	11,41	10,82	10,93	1831,89
7 MPa	12,01	11,86	10,48	11,45	11,95	1948,47
15 MPa	15,07	16,07	15,63	15,59	15,58	1980,37

La Figure 3.21 illustre l’évolution de la résistance à la compression normalisée (fb) à 28 jours en fonction de la pression de compaction appliquée. Elle permet également de comparer ces résultats avec ceux de briques ou blocs de construction synthétisés à la Table 1.12.

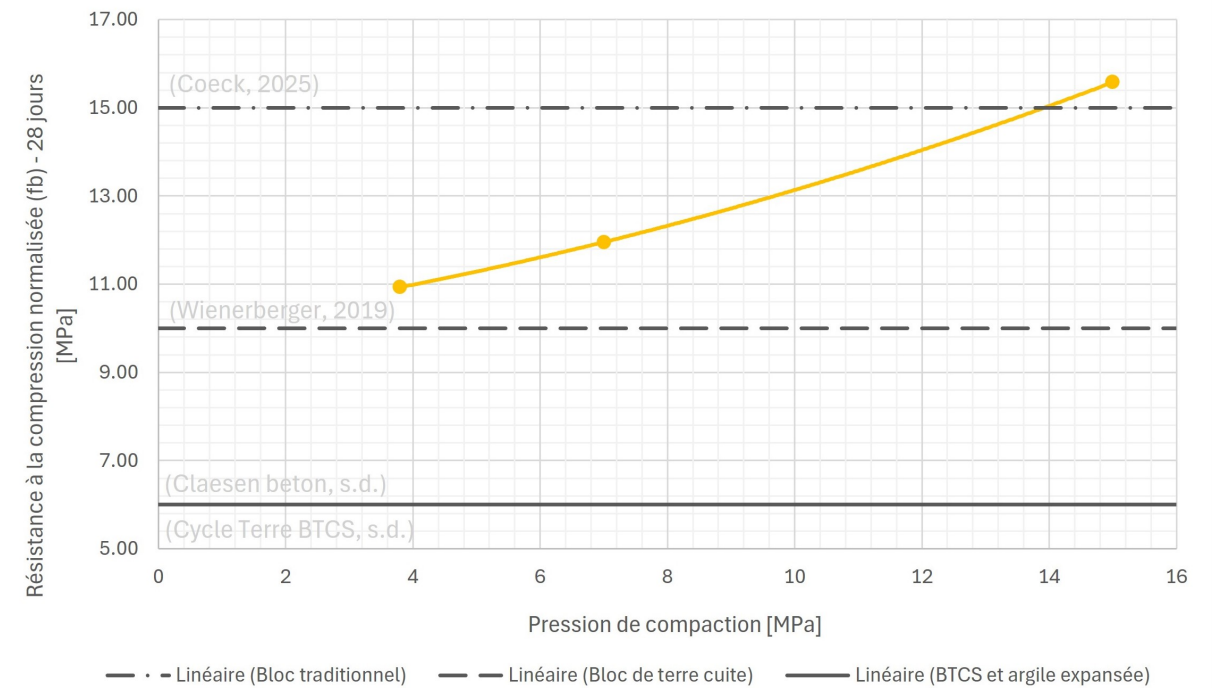


FIGURE 3.21 – Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale

La plus grande force de compaction testée (15 MPa) permet d’atteindre une résistance à la compression à 28 jours de 15,59 MPa, avec une résistance à la compression normalisée de 15,58 MPa. Cette valeur permet de dépasser la résistance d’un bloc de béton traditionnel selon la Figure 3.21. Concernant la masse volumique, celle-ci évolue proportionnellement à la résistance. Elle atteint 1980 kg/m^3 à 15 MPa, ce qui se rapproche des 2100 kg/m^3 recensés pour un bloc traditionnel. Le graphique présentant une comparaison des masses volumiques obtenues en fonction de celles des blocs et briques de construction, synthétisés à la Table 1.12, est présenté à l’Annexe 7.

Selon la littérature, alors que Mahdad et al. (2014) préconisent une force de compaction de 7 MPa et que Rayeesulhaq et al. (2024) suggèrent une plage comprise entre

13,78 MPa et 17,23 MPa pour la fabrication de blocs de terre comprimée, les résultats obtenus indiquent que l'optimal n'est pas encore atteint. Il est important de préciser ici que la teneur en eau utilisée est celle déterminée comme optimale pour une compaction de 3,8 MPa. Il est donc possible d'atteindre des résultats encore meilleurs en adaptant cette teneur à chaque pression de compaction.

Ces résultats restent néanmoins très prometteurs. En effet, des performances comparables à celles de blocs de béton traditionnels sont obtenues.

3.5.3 Vitesse de chargement

La Table 3.25 présente les résultats de l'influence de la vitesse de chargement détaillée en 2.5.3.3. Le test est réalisé sur trois échantillons par vitesse.

TABLE 3.25 – Influence de la vitesse de chargement sur A8 - Optimale

	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]			
	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Moyenne
2400 N/s - Norme mortier	10,79	10,27	11,41	10,82
375 N/s - Norme maçonnerie	9,98	8,21	7,87	8,69

La Figure 3.22 est un graphique représentant les données analysées de la Table 3.25 caractérisant l'influence du type de norme utilisée sur les résultats de résistance à la compression.

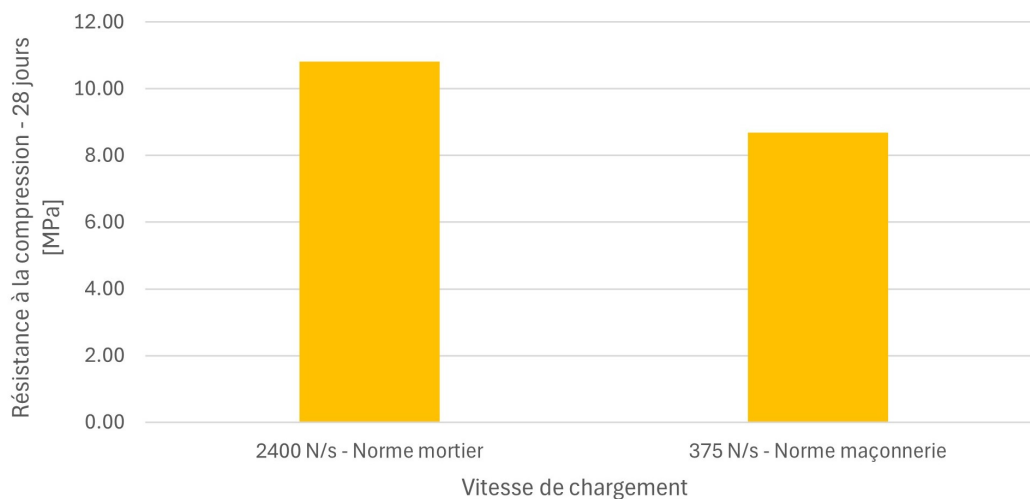


FIGURE 3.22 – Influence de la vitesse de chargement sur A8 - Optimale

La norme NBN EN 196-1 :2016 relative aux mortiers affiche une résistance moyenne à la compression de 10,82 MPa, tandis que la norme NBN EN 772-1+A1 :2015 relative aux éléments de maçonnerie montre une résistance moyenne plus faible, de l'ordre de 8,69 MPa.

Cette faible différence s'explique, car la vitesse de chargement de 2400 N/s provoque une rupture plus rapide et plus brutale de l'échantillon, cette rupture est plus fragile. Ce

dernier n'a pas le temps de se déformer, ce qui provoque une résistance à la compression plus élevée. En effet, une vitesse de chargement plus faible (375 N/s) offre une meilleure distribution des contraintes dans l'échantillon, et donc une déformation élastique de ce dernier. Cette vitesse plus lente permet une rupture plus lente et provoque ainsi une résistance plus faible de l'échantillon.

3.5.4 Variabilité

La Table 3.26 présente les résultats de compression de l'influence de la variabilité du mélange détaillée en 2.5.3.4. Le test est réalisé sur trois échantillons par mélange.

TABLE 3.26 – Influence de la variabilité de A8 - Optimale

	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]			
	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Moyenne
V1 mélange 0	10,79	10,27	11,41	10,82
V2 mélange 1	11,06	11,12	9,66	10,61
V3 mélange 2	9,69	10,09	10,08	9,95

Moyenne	10,46
Ecart-type	0,45
CV	4,34%

L'équation 3.1 permet d'obtenir le coefficient de variation (CV) des trois valeurs de résistances à la compression obtenues pour les trois mélanges. Ce coefficient de 4,34 % s'avère être inférieur à 5 %, ce qui correspond selon Denoël (2022), à une variabilité pouvant être considérée comme faible. Cependant, il est important de nuancer cette interprétation dans ce cas précis. En effet :

- Le mélange est réalisé avec des particules 100 % recyclées, composées d'un sable mixte recyclé non lavé (SMR 0/2) et de fines de lavage dont la composition et la granulométrie varient d'un lot à l'autre et d'une source à l'autre.
- De plus, les fines insérées dans le mélange n'ont pas réellement une taille inférieure à 63 μm : elles sont introduites à l'état initial sous forme de gros blocs agglomérés, qu'il est nécessaire de broyer manuellement avant leur utilisation. L'effet des fines dépend donc fortement d'une personne à l'autre, d'un bloc à l'autre et d'un temps de broyage à l'autre. Leur incorporation et leur rôle dans le mélange peuvent ainsi fortement varier.

Par conséquent, même si les résultats semblent relativement peu variables, la variabilité reste présente en raison de l'origine, de la mise en œuvre et de la forme hétérogène que peut prendre le matériau dans le mélange.

4.1 Contributions

Durant ce travail de fin d'études, des briques comprimées incorporant du sable mixte recyclé et des fines de lavage ont été étudiées. La caractérisation des matériaux, les propriétés mécaniques et la durabilité sont analysées dans l'objectif de comparer la brique optimale déterminée avec un bloc ou une brique de construction et, par conséquent, d'identifier les domaines d'utilisation possibles du matériau.

La caractérisation des matériaux recyclés a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du sable et des fines. Les fines recyclées affichent une masse volumique absolue de 2400 kg/m^3 . Il s'agit d'un matériau limoneux très fin, capable d'améliorer la compacité du mélange en s'insérant dans les espaces intergranulaires. Le sable, quant à lui, présente une forte proportion de fines dans son squelette (22,12 %), avec un coefficient d'absorption d'eau recalculé à 8 % et une masse volumique de 2450 kg/m^3 .

Concernant le travail réalisé sur la formulation, différents mélanges sont formulés en faisant varier à la fois la teneur en eau, la teneur en ciment et la quantité de matières recyclées. Contrairement aux attentes, la meilleure formulation s'est avérée être celle contenant 30 % de fines de lavage ajoutées (A8 - F-30% Opt.). Ce résultat montre une avancée dans la recherche, qui révèle un comportement inattendu des fines, comparable à un "granulat". La résistance à la compression du matériau formulé atteint 11,61 MPa. D'un point de vue mécanique, cette résistance est comparable à celle des blocs de terre cuite et, au niveau de la masse volumique à des blocs de terre comprimée.

Contrairement à la résistance, c'est la composition A8 - F-20% Opt. qui s'est révélée la plus durable au niveau de l'absorption d'eau, avec un coefficient de 18,81 %. La cure sous film-plastique, utilisée pour l'ensemble des compositions, est celle présentant les meilleures performances. En ce qui concerne la force de compaction, une pression de 15 MPa appliquée sur la composition A8 - F-10% Opt. permet d'atteindre une résistance supérieure à celle d'un bloc de béton avec une résistance de 15,59 MPa. Enfin, la vitesse de chargement relative à la norme mortier permet d'acquérir les meilleures résistances. Il est également important de souligner que la variabilité doit être prise en compte dans ce type de mélange.

4.2 Limites

Concernant les limitations de ce travail, la première relève de l'utilisation de la presse manuelle. En effet, cette dernière génère une force de compaction difficilement reproductible d'une brique à l'autre. Cette contrainte engendre une variabilité importante des

résultats de résistance, rendant leur interprétation difficilement quantifiable.

La deuxième limite réside dans la variabilité des matériaux recyclés. Les briques sont fabriquées à partir d'une matière qui est 100 % recyclée. Certes, entre les différents lots utilisés au laboratoire, les variations peuvent sembler faibles. Cependant en réalité, leur composition n'est pas parfaitement constante. Cela rend difficile la production du matériau stable final pour l'industrie.

4.3 Perspectives

Les perspectives de ce travail sont variées. Il ouvre la voie à de nouvelles recherches expérimentales sur la caractérisation du nouveau rôle que pourraient jouer les fines en tant que granulats secondaires. Pour ce faire, une étude microscopique du matériau ainsi qu'un test granulométrique dans son état d'utilisation seraient des pistes intéressantes à développer afin de mieux comprendre la structure interne des mélanges.

Il serait également pertinent de tester le remplacement partiel ou total du ciment par de la chaux, dans l'objectif de formuler un matériau à impact environnemental encore plus réduit. La cure par carbonatation de ce matériau constitue également une piste prometteuse pour améliorer sa durabilité ainsi que la résistance en réduisant la porosité interne des briques.

Enfin, une autre piste à explorer serait la réalisation d'une analyse budgétaire et d'une analyse de cycle de vie du matériau, permettant ainsi d'évaluer la pertinence de ce produit à la fois sur les plans économique et écologique.

Bibliographie

- Alviset, L. (1994). *Matériaux de terre cuite* [Cours]. https://mcours.net/cours/pdf/geniecivil/Materiaux_deterre_cuite_hjuyg.pdf
- Association Belgo-Luxembourgeoise de Gypse. (2025). *Les blocs de plâtre*. ABLG. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://blgv.be/fr/les-blocs-de-platre>
- Baroghel-Bouny, V. (2008, décembre). *Développement d'une approche globale, performante et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur base d'indicateurs de durabilité : Bilan et perspectives*. LCPC. <https://collections.univ-gustave-eiffel.fr/ouvrages/lcpc/ERLPC/ERLPC-OA-LCPC-OA63.pdf>
- Berredjem, L., Molez, L., Nguyen, V. M., Meftah, H., & Arabi, N. (2016, mai). Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé. *34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC 2016)*. <https://hal.science/hal-01366545v1>
- Binti Katman, H. Y., Khai, W. J., Benjeddou, O., & Mashaan, N. (2022). Experimental Investigation of a New Design of Insulation Gypsum Plaster Blocks. *Buildings*, 12(9), 1297. <https://doi.org/10.3390/buildings12091297>
- Buildwise. (s.d.). *Sable recyclé pour la fabrication de béton – applications et impact environnemental - SARE4BE*. Buildwise. Consulté le 19 février 2025 sur <https://www.buildwise.be/fr/recherche-innovation/showroom-des-projets/sable-recycle-pour-la-fabrication-de-beton-applications-et-impact-environnemental-sare4be/#>
- Candamano, S., Tassone, F., Iacobini, I., Crea, F., and De Fazio, P. (2022). The Properties and Durability of Self-Leveling and Thixotropic Mortars with Recycled Sand. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/app12052732>
- Claesen beton. (s.d.). *TOPARGEX* [Fiche technique]. Consulté le 3 mars 2025 sur <http://www.claesenbetonbedrijf.be/topargex>
- Coeck SA. (2025). *Bloc en béton standard plein (Bloc en Béton)* [Fiche technique]. Coeck SA. <https://dam.coeck.be/m/14f639621d1eaffb/original/B10005.pdf>
- Contern. (s.d.). *Briques de laitier / Hüttensteine* [Fiche technique]. Contern. https://www.contern.com/wp-content/uploads/2023/08/Briques-de-laitier_Huttenstein.pdf
- Courard, L. (2021). *GCIV0184-5 : Matériaux de construction* [Cours, Université de Liège]. Centrale des cours de la FSA ASBL.
- Courard, L. (2023). *GCIV0201-2 : Technologie des bétons et matériaux nouveaux* [Cours, Université de Liège]. Centrale des cours de la FSA ASBL.

- Courard, L. (2024). *GCIV0133-9 : Maintenance, repair and reinforcement of constructions* [Cours, Université de Liège]. Centrale des cours de la FSA ASBL.
- Cox, J., Sizaire, J., Meulders, P., Van Overmeire, E., & Ingelaere, A. (2009). *Le Béton Cellulaire : Matériau d'Avenir, FeBeCel*. Editeur responsable : Jacques Sizaire. <https://www.calameo.com/read/001016193065d23f7b549>
- Cresswell, D. (2007, octobre). Quarry Fines & Paper Sludge in Manufactured Aggregate. *Case Study WRT, 177*. https://www.academia.edu/48640800/Quarry_Fines_and_Paper_Sludge_in_Manufactured_Aggregate
- Cycle Terre BTC. (s.d.). *Bloc comprimé BTC 60* [Fiche technique]. Cycle Terre. <https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2020/02/Fiche-technique-Bloc-BTC-Cycle-Terre-191210.pdf>
- Cycle Terre BTCs. (s.d.). *Bloc stabilisé BTCs 40* [Fiche technique]. Cycle Terre. <https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2020/02/Fiche-technique-Bloc-stabilise%CC%81-BTCs-Cycle-Terre-191210.pdf>
- Denoël, V. (2022). *MATH0067-A-a : Introduction aux statistiques et probabilités* [Cours, Université de Liège].
- Doitrand, E. (2025). *Développement de briques comprimées à base de sable recyclé et de fines de lavage* [Projet d'Initiation à la Recherche et au Développement, Université de Liège et Institut National des Sciences Appliquées Lyon].
- Es-Saady, I., Rangeard, D., Mboumba-Mamboundou, L. B., Montrelay, N., Houessou, K. J., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2018). Matériaux biosourcés à base de déchets de carrières de roches concassées. *Matériaux 2018* (11). <https://enpc.hal.science/hal-02005373v1>
- Fédération Belge de la Brique. (s.d.). Fabrication de la brique. <https://www.brique.be/media/1263/fabrication-brique.pdf>
- Foot, K., & Sinnett, D. (2006). Imported soil or soil-forming materials placement. *Best Practice Guidance for Land Regeneration*. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/lru_bpg05-6.pdf
- Forêt, G., Hamelin, C., & Olivier, M. (2013, mars). LA BOTTE DE PAILLE, MATERIAU PORTEUR. *ECOBAT Sciences & Techniques 2012*. <https://enpc.hal.science/hal-00940081v1>
- Goel, A., Narwal, J., Verma, V., Sharma, D., & Singh, B. (2013, août). A Comparative Study on the Effect of Curing on the Strength of Concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(6), 401-406. <https://citeseerx.ist.psu.e>

- du/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8caf961e0ea8907eccf52bbfd5b30a0a8503f35e
- Gouvernement wallon. (2018, 22 mars). *Plan wallon des Déchets-Ressources*. L'Environnement en Wallonie. Consulté le 16 février sur <https://environnement.wallonie.be/home/gestion-environnementale/dechets.html>
- Heathcote, K. A. (1995, juin). Durability of earthwall buildings. *Construction and building materials*, 9(3), 185-189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
- IsoHemp. (2024, octobre). *Bloc de chanvre* [Fiche technique]. IsoHemp. Consulté le 19 mars sur <https://www.iso hemp.com>
- Isol'en Paille. (s.d.). *LA BOTTE DE 22* [Fiche technique]. Isol'en Paille. https://www.isolant-paille.com/images/Fiche_Technique_-_Botte_de_22cm.pdf
- Kariyawasam, K. K. G. K. D., & Jayasinghe, C. (2016, 15 février). Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 105, 519-527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189>
- Kechkar, C., Kherraf, L., Abdelouahid, A., & Hebhouh, H. (2022). THE COMPARATIVE STUDY OF THE PERFORMANCE OF CONCRETE MADE FROM RECYCLED SAND. *Stavební obzor - Civil engineering journal*, 31(3), 415-426. <https://doi.org/10.14311/cej.2022.03.0031>
- Knauf. (s.d.). *Isolava Isomur 10 cm* [Fiche technique]. Knauf. https://gobert.groupegobert.com/ressources/images/articles/Fiches_techniques/ISOLAVA%20FT%20ISOMUR10.pdf
- La Fédération des Recycleurs de Déchets de construction, Buildwise & Le Centre de Recherches Routières. (2023, 20 septembre). *Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie - Version 2.0*. <https://www.granulatsrecycles.be/fr/guide-technique-pour-lutilisation-des-granulats-recycles-en-wallonie>
- Lecompte, T. (2020). Le chanvre dans les bâtiments de demain : atouts, freins et enjeux. *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest*, 127(3), 193-207. <https://doi.org/10.4000/abpo.6361>
- Ledesma, E., Jiménez, J., Ayuso, J., Fernández, J., & De Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production - Part-I : Ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 692-706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.084>
- Mahdad, M., Brara, A., & Ait Said, S. (2014, 19 novembre). *ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES BLOCS ET MURETS DE TERRE STABILISEE PAR AJOUT DE CIMENT ET CHAUX*. [Conférence]. Colloque sur la Ca-

- ractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures, Université Mouloud Mammeri. https://www.researchgate.net/publication/332523474_Caracterisation_hydro_mecanique_des_blocs_de_terre_stabilisee_au_ciment_et_a_la_chaux#fullTextFileContent
- Malkanathi, S. N., Wickramasinghe, W. G. S., & Perera, A. A. D. A. J. (2021, décembre). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00717. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717>
- Navarro, R., Alcocel, E., Sánchez, I., Garcés, P., & Zornoza, E. (2018). Mechanical properties of alkali activated ground SiMn slag mortars with different types of aggregates. *Construction and Building Materials*, 186, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.093>
- Qualitropic. (2024, mars). *Brique de terre compressée* [Fiche matériau]. Qualitropic. https://cdn.s-pass.org/SPASSDATA/attachments/2024_04/17/175455-fiche-10-brique-de-terre-compresse-e.pdf
- Rayeesulhaq, M. R., Ahamed, M. L., Khushnood, R. A., & Khan, H. A. (2024, 16 février). Optimization in recipe design of interlocking compressed earth blocks by incorporating fine recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 416, 135167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135167>
- Réseau Français de la Construction Paille. (2016). *LA CONSTRUCTION EN PAILLE*. https://www.rfcp.fr/wp-content/uploads/dlm_uploads/2016/01/Livret-vert-BD.pdf
- Rougelot, B. (2018). La paille, un matériau de construction résilient. *POUR*, 236(4), 129–133. <https://doi.org/10.3917/pour.236.0127>
- Service Public de Wallonie mobilité infrastructures. (2025, 1 janvier). *CAHIER DES CHARGES TYPE QUALIROUTES - Chapitre C : Matériaux et produits de construction*. CCT Qualiroutes - Qualité & Construction. <http://qc.spw.wallonie.be>
- Service Public de Wallonie. (2021). *Guide PEB*. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/?ID=63062>
- Skocek, J., Ouzia, A., Vargas Serrano, E., & Pato, N. (2024, 17 janvier). Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete : Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption. *Sustainability*, 16(2), 814. <https://doi.org/10.3390/su16020814>
- Wienerberger. (2019, 9 avril). *Thermobrick 10N Nova* [Fiche technique]. Wienerberger. Consulté le 23 mars sur <https://www.wienerberger.be/Binnenmuur/productzoeker/thermobrick-10n.html>

- Wiomont, F. (2022). *Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés* [Mémoire, Université de Liège]. MatheO. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/14340>
- Xella. (2021). *DONNÉES TECHNIQUES SILKA* [Fiche technique]. Xella. https://storefrontapi.commerce.xella.com/medias/sys_master/images/h31/he9/9228449087518/DT-Silka-LB/DT-Silka-LB.pdf
- Zhao, Z., Xiao, J., Duan, Z., Hubert, J., Grigoletto, S., & Courard, L. (2022). Performance and durability of self-compacting mortar with recycled sand from crushed brick. *Journal of Building Engineering*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104867>

Normes NBN

NBN B 15-001 :2004 : Supplément à la NBN EN 206-1 - Béton - Spécification, performances, production et conformité

NBN B 15-001 :2024 : Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021

NBN B 21-002 :1989 : Matériaux de maçonnerie - Prescriptions relatives aux matériaux de maçonnerie en béton cellulaire autoclavé

NBN EN 1008 :2002 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton

NBN EN 1097-5 :2008 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée

NBN EN 1097-6 :2022 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau

NBN EN 12620+A1 :2008 : Granulats pour béton

NBN EN 13043 :2002 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aéroports et d'autres zones de circulation

NBN EN 13242+A1 :2008 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées

NBN EN 196-1 :2016 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances

NBN EN 206 :2013+A2 :2021 : Béton - Spécification, performances, production et conformité

NBN EN 772-1+A1 :2015 : Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression

NBN EN 772-21 :2011 : Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 21 : Détermination de l'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite et en silico-calcaire par absorption d'eau froide

NBN EN 933-1 :2012 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage

Normes ISO

NBN EN ISO 8130-2 :2021 : Poudres pour revêtement - Partie 2 : Détermination de la masse volumique à l'aide d'un pycnomètre à gaz (méthode de référence) (ISO 8130-2 :2021)

NBN ISO 13320 :2020 : Particle size analysis — Laser diffraction methods

Eurocode

Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie

BRL

BRL 1804 : Vulstof voor toepassing in beton en mortel

Annexe 1 Quantités des recettes A et B

TABLE 4.1 – Quantités des recettes A et B

	Ciment		Fines		Sable		Eau totale	
	Quantité [kg]	% massique	Quantité [kg]	% massique	Quantité [kg]	% massique	Quantité [kg]	% massique
Recette A								
A1	160	7,8%	0	0,0%	1611	78,2%	289	14,0%
A2	160	8,0%	149	7,4%	1373	68,4%	324	16,1%
A3	160	8,1%	215	10,9%	1244	63,2%	349	17,8%
A4	160	8,3%	275	14,2%	1121	58,1%	375	19,4%
A5	180	8,9%	0	0,0%	1538	75,8%	312	15,4%
A6	180	8,8%	152	7,5%	1396	68,6%	307	15,1%
A7	180	9,3%	205	10,6%	1185	61,1%	371	19,1%
A8	180	9,2%	279	14,3%	1139	58,2%	359	18,3%
A9	200	10,0%	0	0,0%	1467	73,3%	334	16,7%
A10	200	10,2%	136	7,0%	1249	64,0%	367	18,8%
A11	200	9,9%	222	11,0%	1283	63,5%	317	15,7%
A12	200	10,1%	283	14,3%	1157	58,3%	343	17,3%
A13	220	11,1%	0	0,0%	1396	70,8%	357	18,1%
A14	220	11,1%	138	7,0%	1269	64,1%	351	17,8%
A15	220	11,0%	211	10,6%	1233	61,4%	339	17,0%
A16	220	10,9%	288	14,3%	1176	58,5%	327	16,2%
Recette B								
B1	80	4,1%	765	39,0%	781	39,8%	336	17,1%
B2	80	4,2%	807	42,0%	674	35,0%	362	18,8%
B3	80	4,2%	842	44,7%	573	30,4%	388	20,6%
B4	80	4,3%	874	47,3%	480	26,0%	413	22,4%
B5	100	5,2%	731	37,8%	746	38,6%	358	18,5%
B6	100	5,1%	822	42,1%	686	35,2%	344	17,6%
B7	100	5,4%	803	43,2%	546	29,4%	409	22,0%
B8	100	5,3%	890	47,5%	489	26,1%	396	21,1%
B9	120	6,3%	696	36,5%	710	37,3%	380	19,9%
B10	120	6,4%	732	39,2%	612	32,7%	405	21,7%
B11	120	6,2%	875	45,0%	595	30,6%	353	18,1%
B12	120	6,3%	907	47,6%	499	26,2%	378	19,9%
B13	140	7,4%	662	35,2%	676	36,0%	402	21,4%
B14	140	7,4%	746	39,3%	623	32,8%	388	20,5%
B15	140	7,3%	834	43,5%	568	29,6%	374	19,5%
B16	140	7,2%	925	47,8%	508	26,3%	361	18,6%

Annexe 2 Résultats - Demande en eau des fines

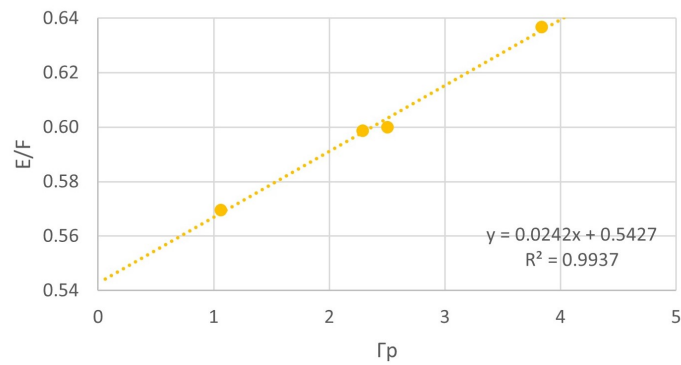


FIGURE 4.1 – Demande en eau $F_{0,r}$

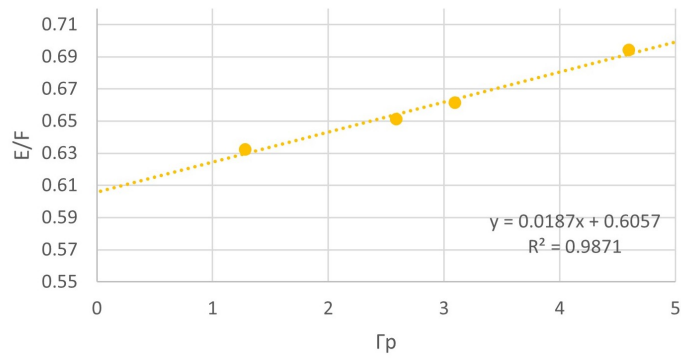


FIGURE 4.2 – Demande en eau $F_{1,r}$

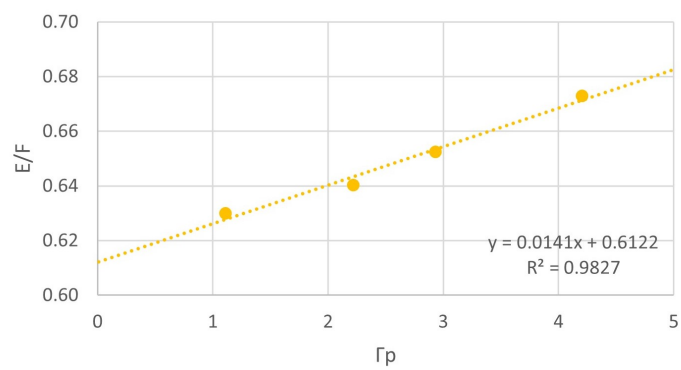
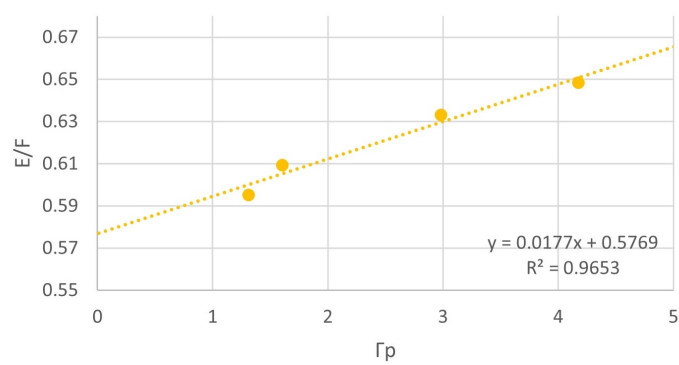
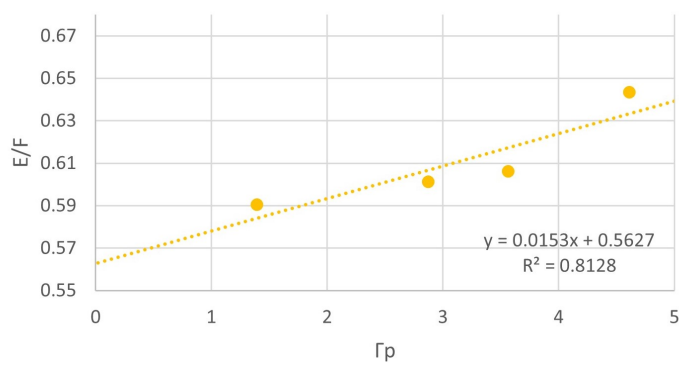


FIGURE 4.3 – Demande en eau $F_{2,r}$

FIGURE 4.4 – Demande en eau $F_{3,r}$ FIGURE 4.5 – Demande en eau $F_{4,r}$

Annexe 3 Résultats - Brûlage des recettes A et B

TABLE 4.2 – Brûlage

	W_{th}	W_r	Ecart-type		W_{th}	W_r	Ecart-type
A1	16,31%	16,04%	0,19%	B1	20,63%	21,13%	0,35%
A2	19,24%	20,16%	0,65%	B2	23,21%	22,74%	0,34%
A3	21,59%	21,05%	0,38%	B3	25,96%	25,72%	0,18%
A4	24,08%	23,71%	0,26%	B4	28,81%	28,17%	0,45%
A5	18,16%	17,54%	0,44%	B5	22,70%	22,10%	0,42%
A6	17,77%	17,51%	0,19%	B6	21,41%	20,63%	0,55%
A7	23,61%	24,54%	0,66%	B7	28,24%	27,73%	0,36%
A8	22,46%	22,96%	0,35%	B8	26,78%	26,37%	0,29%
A9	20,05%	20,65%	0,42%	B9	24,90%	24,80%	0,07%
A10	23,17%	23,53%	0,26%	B10	27,69%	26,52%	0,83%
A11	18,59%	18,60%	0,00%	B11	22,17%	22,60%	0,30%
A12	20,93%	20,68%	0,18%	B12	24,79%	24,74%	0,04%
A13	22,07%	22,51%	0,31%	B13	27,16%	25,94%	0,86%
A14	21,58%	21,04%	0,38%	B14	25,71%	25,81%	0,07%
A15	20,49%	19,88%	0,43%	B15	24,27%	23,65%	0,44%
A16	19,40%	18,78%	0,44%	B16	22,92%	22,33%	0,42%
		Moyenne :	0,35%			Moyenne :	0,37%

Annexe 4 Résultats - Résistance et masse volumique de la recette A

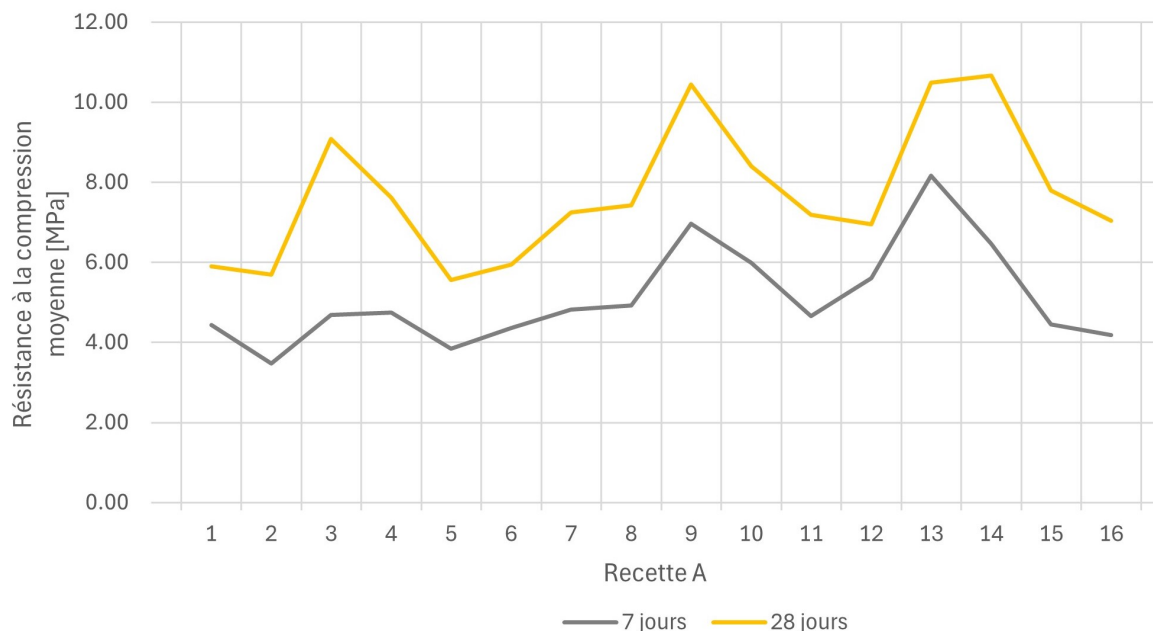


FIGURE 4.6 – Évolution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours - Recette A

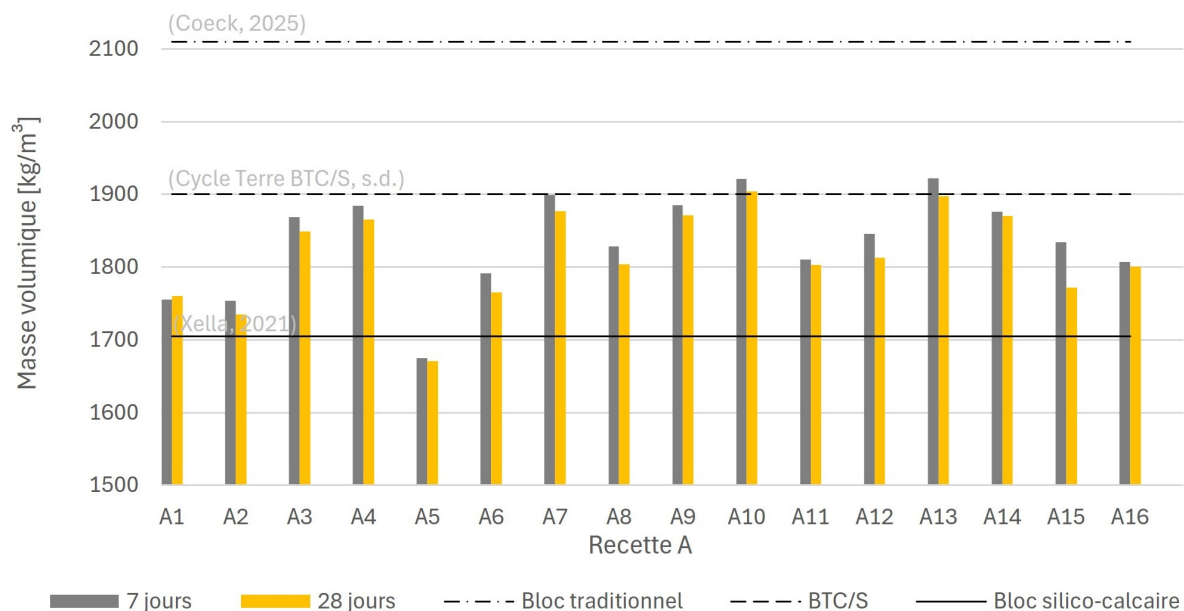


FIGURE 4.7 – Évolution de la masse volumique à 7 et 28 jours - Recette A

Annexe 5 Résultats - Optimisation des recettes

TABLE 4.3 – Résistance et masse volumique à 7 et 28 jours

Teneur en fines [%]	Teneur en eau r. [%]	N°	$\sigma_{\max}$ 7j [MPa]	$\sigma_{\max}$ 7j moy. [MPa]	Mv 7j [kg/m³]	Mv 7j moy. [kg/m³]	$\sigma_{\max}$ 28j [MPa]	Mv 28j [kg/m³]
A8 - F-20%	23,69%	1	5,71	5,70	1902	1897	8,94	1851
		2	5,57		1892			
		3	5,82		1898			
	21,98%	1	6,49	5,80	1898	1889	9,95	1811
		2	5,63		1888			
		3	5,29		1881			
	19,92%	1	6,28	6,12	1891	1878	9,37	1810
		2	6,03		1868			
		3	6,05		1876			
	18,48%	1	5,52	5,14	1871	1855	8,13	1771
		2	5,02		1842			
		3	4,87		1852			
A8 - F-10%	23,89%	1	5,70	6,13	1912	1912	9,43	1848
		2	6,54		1925			
		3	6,14		1898			
	21,92%	1	6,85	6,77	1904	1898	11,23	1886
		2	6,68		1913			
		3	5,9		1877			
	20,22%	1	6,42	6,40	1864	1861	10,84	1836
		2	6,84		1871			
		3	5,93		1849			
	18,52%	1	5,24	5,42	1828	1824	8,31	1789
		2	5,69		1839			
		3	5,32		1806			
A8 - F-30%	23,34%	1	5,32	5,08	1921	1904	8,3	1923
		2	5,25		1903			
		3	4,66		1888			
	20,93%	1	5,14	5,39	1911	1915	8,99	1917
		2	5,66		1915			
		3	5,36		1919			
	18,98%	1	5,33	5,27	1893	1860	9,19	1900
		2	5,12		1881			
		3	5,35		1806			
	18,08%	1	4,09	4,11	1862	1859	8,51	1846
		2	4,31		1850			
		3	3,93		1864			

TABLE 4.4 – Brûlage

	W_{th}	W_r	Ecart-type
A8 - F-20%	22,46%	23,69%	0,87%
	20,73%	21,98%	0,88%
	19,02%	19,92%	0,63%
	17,67%	18,48%	0,57%
A8 - F-10%	22,54%	23,89%	0,96%
	20,62%	21,92%	0,92%
	19,16%	20,22%	0,75%
	17,77%	18,52%	0,53%
A8 - F-30%	22,46%	23,34%	0,62%
	20,63%	20,93%	0,21%
	18,89%	18,98%	0,06%
	17,58%	18,08%	0,36%
		Moyenne :	0,61%

Annexe 6 Résultats - Recettes optimisées

TABLE 4.5 – Brûlage

	W_{th}	W_r	Ecart-type
A8 - F-10% Opt.	21,74%	21,70%	0,03%
A8 - F-20% Opt.	21,46%	21,88%	0,29%
A8 - F-30% Opt.	21,25%	21,34%	0,06%
	Moyenne :		0,13%

TABLE 4.6 – Résistance à la compression normalisée (fb) - 7 jours

7 jours	Cote 1 [mm]	Cote 2 [mm]	Hauteur [mm]	δ_c	δ	fb [MPa]
A8 - F-10% Opt.	48,93	49,94	73,55	1	1,00	6,74
A8 - F-20% Opt.	49,29	48,78	72,27	1	0,99	6,61
A8 - F-30% Opt.	48,58	48,78	68,50	1	0,97	6,70

TABLE 4.7 – Résistance à la compression normalisée (fb) - 28 jours

28 jours	Cote 1 [mm]	Cote 2 [mm]	Hauteur [mm]	δ_c	δ	fb [MPa]
A8 - F-10% Opt.	50,09	49,03	75,50	1	1,01	10,93
A8 - F-20% Opt.	49,31	49,77	73,60	1	1,00	11,36
A8 - F-30% Opt.	48,53	49,02	70,29	1	0,98	11,38

Annexe 7 Résultats - Recette optimale

TABLE 4.8 – Résistance à la compression normalisée (f_b) - 28 jours - Force de compaction

28 jours	Cote 1 [mm]	Cote 2 [mm]	Hauteur [mm]	δ_c	δ	f_b [MPa]
3,8 MPa	50,09	49,03	75,50	1	1,01	10,93
7 MPa	49,44	48,41	81,46	1	1,04	11,95
15 MPa	48,68	48,52	73,62	1	1,00	15,58

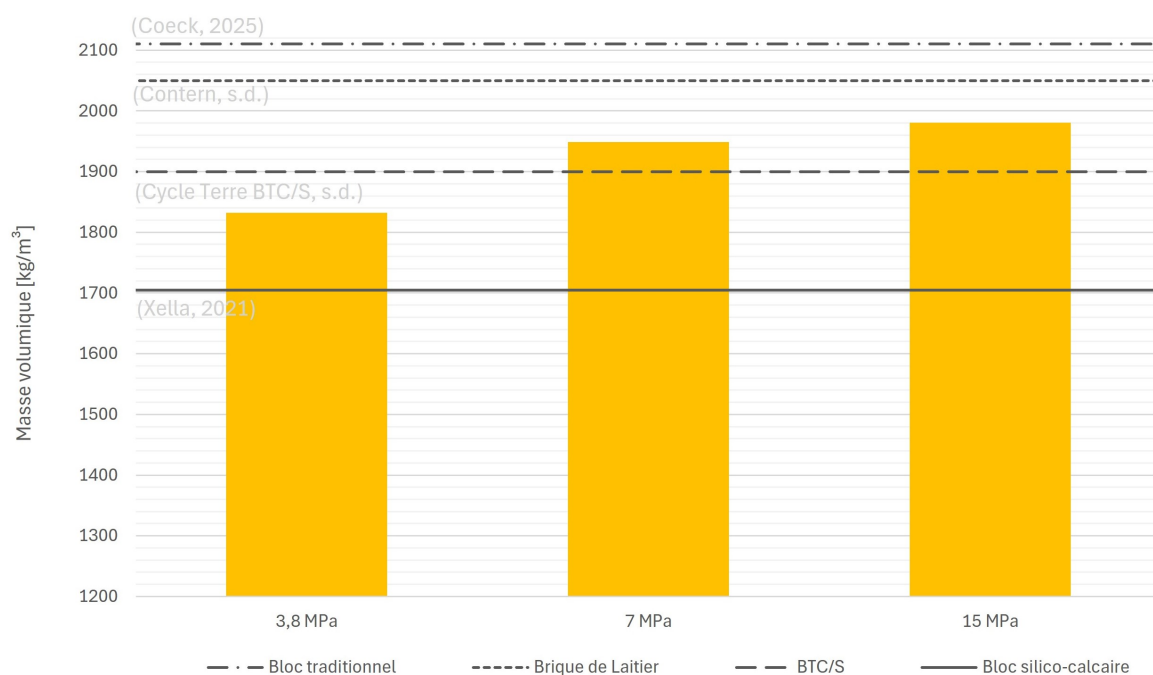


FIGURE 4.8 – Influence de la force de compaction sur A8 - Optimale - Masse volumique