LIÈGE université Library

https://lib.uliege.be

https://matheo.uliege.be

Développement de briques comprimées et de mortiers de maçonnerie à faible impact environnemental : étude du comportement en assemblage (en ce compris une introduction à la méthodologie de la recherche)

Auteur : Pires, Romain
Promoteur(s) : Courard, Luc
Faculté : Faculté des Sciences appliquées
Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"
Année académique : 2025-2026
URI/URL : http://hdl.handle.net/2268.2/26037

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.

Développement de briques comprimées et de mortiers de maçonnerie à faible impact environnemental : Étude du comportement en assemblage

Travail de fin d'études réalisé par

Romain Pires

en vue de l'obtention du grade de master

"Ingénieur civil en construction"

Promoteur : **Courard L.**

Guidance : **Libert R., Troquay J.**

Membres du jury : **Courard L., Grigoletto S., Messan A., Mihaylov B., Libert R.**

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des Sciences Appliquées

Année académique 2025–2026

Résumé

Le secteur de la construction est confronté à une double problématique : réduire son impact environnemental et limiter l'utilisation de ressources naturelles. Dans ce contexte, ce travail étudie le comportement en assemblage de briques comprimées et de mortiers de maçonnerie formulés à partir de matériaux recyclés. Les briques utilisées sont constituées de sable mixte recyclé, de fines de lavage, de ciment CEM III/B et d'eau. Elles sont associées à des mortiers bas-carbone également formulés avec du sable mixte recyclé et des fines de lavage.

L'objectif principal est d'évaluer la compatibilité entre ces briques comprimées et deux mortiers présentant des teneurs en ciment différentes. La démarche expérimentale comprend d'abord la caractérisation des matériaux, puis la fabrication des briques à l'aide d'une presse manuelle. Les briques obtenues présentent une résistance moyenne en compression de $11{,}74\,MPa$ à 28 jours. Deux mortiers sont ensuite retenus pour la réalisation des assemblages : le mortier SMR 0.8+F, plus faiblement dosé en ciment, et le mortier SMR 1.8+F, plus performant mécaniquement. Leurs résistances en compression à 28 jours sont respectivement de $3{,}77\,MPa$ et $11{,}72\,MPa$.

Les assemblages brique–mortier sont caractérisés par des essais de traction directe, de cisaillement et de compression. Les résultats montrent que l'influence du mortier est particulièrement marquée lorsque l'interface est directement sollicitée. En traction directe, la résistance moyenne passe de $0{,}072\,MPa$ avec le mortier SMR 0.8+F à $0{,}230\,MPa$ avec le mortier SMR 1.8+F. En cisaillement, elle passe de $0{,}146\,MPa$ à $0{,}541\,MPa$. En compression, l'écart est plus limité, avec des résistances moyennes de $7{,}38\,MPa$ et $8{,}25\,MPa$. Ces résultats confirment que la résistance de l'assemblage ne dépend pas uniquement de la résistance propre du mortier, mais aussi du comportement composite brique–mortier et de la qualité de l'interface.

Un essai complémentaire de transfert d'eau met en évidence des échanges rapides entre le mortier frais et les briques comprimées durant la première heure de contact. Le mortier SMR 1.8+F limite davantage ce transfert d'eau, ce qui peut favoriser le développement de l'adhérence à l'interface. De manière générale, ce travail montre que l'association de briques comprimées et de mortiers incorporant des matériaux recyclés constitue une piste prometteuse pour le développement de maçonneries à plus faible impact environnemental. Les résultats soulignent toutefois la nécessité d'améliorer l'adhérence brique–mortier et de poursuivre les essais sur des assemblages de plus grande échelle.

Mots-clés : maçonnerie, briques comprimées, mortier bas-carbone, matériaux recyclés, sable mixte recyclé, fines de lavage, assemblage brique–mortier, adhérence, cisaillement, traction directe, compression.

Abstract

The construction sector faces the challenge of reducing its environmental impact while limiting the use of natural resources. In this context, this work investigates the behaviour of masonry assemblies made with compressed bricks and masonry mortars incorporating recycled materials. The bricks studied are composed of mixed recycled sand, washing fines, CEM III/B cement and water. They are combined with low-carbon mortars also formulated with mixed recycled sand and washing fines.

The main objective is to assess the compatibility between these compressed bricks and two mortars with different cement contents. The experimental approach first includes the characterization of the raw materials, followed by the production of the bricks using a manual press. The bricks obtained reach an average compressive strength of $11.74\,MPa$ at 28 days. Two mortars are then selected for the production of the assemblies : SMR 0.8+F, with a lower cement content, and SMR 1.8+F, with higher mechanical performance. Their 28-day compressive strengths are respectively $3.77\,MPa$ and $11.72\,MPa$.

The brick–mortar assemblies are characterized through direct tensile, shear and compression tests. The results show that the influence of the mortar is particularly significant when the brick–mortar interface is directly loaded. In direct tension, the average strength increases from $0.072\,MPa$ with mortar SMR 0.8+F to $0.230\,MPa$ with mortar SMR 1.8+F. In shear, it increases from $0.146\,MPa$ to $0.541\,MPa$. Under compression, the difference is more limited, with average strengths of $7.38\,MPa$ and $8.25\,MPa$, respectively. These results confirm that the strength of the assembly does not depend only on the strength of the mortar itself, but also on the composite behaviour of the brick–mortar system and on the quality of the interface.

A complementary water transfer test highlights rapid exchanges between the fresh mortar and the compressed bricks during the first hour of contact. Mortar SMR 1.8+F limits this water transfer more effectively, which may promote the development of adhesion at the interface. Overall, this work shows that combining compressed bricks and mortars incorporating recycled materials is a promising approach for developing masonry systems with a lower environmental impact. However, the results also underline the need to improve brick–mortar adhesion and to continue testing on larger-scale masonry assemblies.

Keywords : masonry, compressed bricks, low-carbon mortar, recycled materials, mixed recycled sand, washing fines, brick–mortar assembly, adhesion, shear, direct tension, compression.

Remerciements

Ce travail de fin d'études constitue l'aboutissement de cinq années riches en apprentissages, en projets, en essais expérimentaux et en réflexions autour du développement de matériaux de maçonnerie à plus faible impact environnemental. Il n'aurait pas pu être mené de la même manière sans l'aide, les conseils et le soutien des nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le Professeur Luc Courard, pour son aide, sa disponibilité et pour m'avoir permis de travailler sur un sujet aussi intéressant que passionnant. Je le remercie également pour la confiance accordée tout au long de ce travail.

Je remercie sincèrement Romain et Julien pour leur accompagnement tout au long de ce travail. Leur aide, leurs conseils, les nombreux moments passés ensemble au laboratoire ainsi que les discussions et réflexions menées autour de ce sujet de recherche ont été particulièrement précieux.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe de recherche et à l'équipe du laboratoire pour leurs suggestions lors des présentations orales réalisées durant l'année, ainsi que pour leur aide dans la réalisation des différents essais expérimentaux. Je remercie plus particulièrement Frédéric, Amaury et Yoan pour leur disponibilité, leur gentillesse et leurs précieux conseils.

Je souhaite aussi remercier Simon-Pierre pour avoir suivi le déroulement des essais et pour les nombreux échanges autour de ce sujet, qui le passionne également dans le cadre de sa thèse. Ses recommandations, les sources qu'il m'a transmises ainsi que le travail qu'il avait déjà réalisé ont constitué une aide importante dans l'avancement de ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements au Professeur Hervé Degée pour le temps qu'il m'a accordé et pour ses précieux conseils dans l'analyse et l'interprétation des résultats.

Je remercie également Sophie Grigoletto, Boyan Mihaylov et Adamah Messan d'avoir accepté de faire partie de mon jury et pour l'intérêt porté à ce travail.

Il est aussi important pour moi de remercier mes amis de Master, sans qui ces études d'ingénieur civil des constructions n'auraient pas été aussi passionnantes et amusantes. Merci pour les projets réalisés ensemble, les discussions, l'entraide et les nombreux rires partagés au cours de ces années.

Enfin, je remercie sincèrement toute ma famille pour son soutien durant ce travail, mais également tout au long de ces cinq années d'études. Leur présence, leurs encouragements et leur confiance ont été essentiels tout au long de ce parcours.

Merci à tous.

Table des matières

Liste des figures viii

Liste des tableaux xi

1 Introduction 1
- 1.1 Contexte et problématique . . . 1
- 1.2 Structure du travail . . . 2

2 État de l'art 4
- 2.1 Maçonnerie et enjeux actuels . . . 4
  - 2.1.1 Rôle de matériau composite . . . 4
    - 2.1.1.1 Briques/blocs de construction traditionnels . . . 4
    - 2.1.1.2 Mortiers de maçonnerie . . . 5
    - 2.1.1.3 Types d'appareillage . . . 5
  - 2.1.2 Rôle structurel . . . 6
  - 2.1.3 Rôle d'enveloppe . . . 7
  - 2.1.4 Enjeux actuels . . . 8
- 2.2 Recyclage des matériaux . . . 10
  - 2.2.1 Valorisation des déchets de construction et de démolition . . . 10
  - 2.2.2 Production et classification des granulats recyclés . . . 10
    - 2.2.2.1 Propriétés des sables recyclés . . . 11
    - 2.2.2.2 Propriétés des fines recyclées . . . 12
  - 2.2.3 Mortiers à base de fraction fine recyclée . . . 13
    - 2.2.3.1 Propriétés à l'état frais . . . 13
    - 2.2.3.2 Propriétés à l'état durci . . . 14
  - 2.2.4 Briques/blocs de construction à base de fraction fine recyclée . . . 16
    - 2.2.4.1 Briques de terre comprimées (BTC) . . . 16
    - 2.2.4.2 Briques stabilisées . . . 17
    - 2.2.4.3 Briques de béton recyclé comprimées . . . 19
- 2.3 Comportement des assemblages brique–mortier . . . 20
  - 2.3.1 La maçonnerie comme matériau composite . . . 20
  - 2.3.2 Formation de l'adhérence brique–mortier . . . 20
  - 2.3.3 Paramètres influençant l'adhérence . . . 21
    - 2.3.3.1 Propriétés de la brique . . . 21

2.3.3.2 Propriétés du mortier . . . 21
2.3.3.3 Paramètres de mise en oeuvre et géométrie . . . 22
2.3.3.4 Paramètres externes et cure . . . 22
2.3.4 Comportement en compression . . . 22
2.3.5 Comportement en traction . . . 25
2.3.6 Comportement en cisaillement . . . 27

3 Objectifs de recherche et méthodologie 28
3.1 Objectifs et portée de la recherche . . . 28
3.2 Méthodologie . . . 28

4 Programme expérimental 30
4.1 Matériaux . . . 30
4.1.1 Ciment CEM III/B 32,5 N . . . 30
4.1.2 Sable naturel BUIR 0/2 . . . 31
4.1.3 Sable mixte recyclé : SMR 0/2 . . . 31
4.1.4 Sable de béton recyclé : SBR 0/4 . . . 32
4.1.5 Fines de lavage . . . 32
4.1.6 Adjuvants . . . 33
4.1.7 Eau . . . 34
4.2 Caractérisation des matériaux . . . 35
4.2.1 Caractérisation des sables . . . 35
4.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage . . . 35
4.2.1.2 Masse volumique réelle et absorption d'eau . . . 36
4.2.1.3 Teneur en eau par séchage en étuve . . . 37
4.2.2 Caractérisation des fines de lavage . . . 38
4.2.2.1 Humidification et teneur en eau . . . 38
4.2.2.2 Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz . . . 39
4.3 Réalisation des briques comprimées . . . 39
4.3.1 Composition retenue pour les assemblages . . . 39
4.3.2 Protocole de fabrication . . . 39
4.3.3 Caractérisation des briques comprimées . . . 42
4.3.3.1 Brûlage . . . 42
4.3.3.2 Masse volumique . . . 43
4.3.3.3 Résistance à la compression . . . 43
4.4 Développement d'un mortier bas-carbone . . . 45
4.4.1 Compositions finales retenues pour les assemblages . . . 45
4.4.2 Protocole de fabrication . . . 46
4.4.3 Caractérisation des mortiers . . . 47
4.4.3.1 Masse volumique . . . 47
4.4.3.2 Consistance du mortier frais à la table à secousses . . . 48
4.4.3.3 Résistance à la flexion . . . 49
4.4.3.4 Résistance à la compression . . . 50
4.4.3.5 Essai de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées . . . 50

4.5 Assemblages brique–mortier . . . 52
4.5.1 Protocole de fabrication . . . 52
4.5.1.1 Assemblages brique–mortier pour les essais de cisaillement . . . 52
4.5.1.2 Assemblages brique–mortier pour les essais de traction directe . . . 54
4.5.1.3 Assemblages brique–mortier pour les essais de compression . . . 55
4.5.2 Cure des assemblages . . . 57
4.5.3 Caractérisation des assemblages . . . 58
4.5.3.1 Essai de cisaillement . . . 58
4.5.3.2 Essai de traction directe . . . 59
4.5.3.3 Essai de compression . . . 61

5 Analyse des résultats et discussion 62
5.1 Caractérisation des matériaux . . . 63
5.1.1 Caractérisation des sables . . . 63
5.1.1.1 Analyse granulométrique . . . 63
5.1.1.2 Coefficient d'absorption d'eau et masse volumique réelle . . . 64
5.1.1.3 Teneur en eau par séchage en étuve . . . 65
5.1.2 Caractérisation des fines recyclées . . . 65
5.1.2.1 Humidification et teneur en eau . . . 65
5.2 Réalisation des briques comprimées . . . 66
5.2.1 Composition retenue pour les assemblages . . . 66
5.2.2 Caractérisation des briques comprimées . . . 66
5.2.2.1 Détermination de la teneur en eau par brûlage . . . 66
5.2.2.2 Variabilité de la presse manuelle sur la résistance à la compression 67
5.2.2.3 Influence de la teneur en eau des briques sur la résistance en compression . . . 70
5.3 Développement d'un mortier bas-carbone . . . 73
5.3.1 Première campagne d'essais – Comparaison des trois sables . . . 74
5.3.1.1 Compositions . . . 74
5.3.1.2 Résistance en compression . . . 76
5.3.1.3 Influence du superplastifiant . . . 77
5.3.2 Deuxième campagne d'essais – Ajout de fines de lavage . . . 78
5.3.2.1 Compositions . . . 78
5.3.2.2 Résistance en flexion/compression . . . 81
5.3.2.3 Influence du rapport E/C . . . 82
5.3.2.4 Influence de l'accélérateur de prise . . . 83
5.3.2.5 Détermination des deux compositions optimales . . . 84
5.3.3 Caractérisation des deux compositions optimales . . . 85
5.3.3.1 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression . . . 85
5.3.3.2 Essai de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées . . . 86
5.4 Assemblages brique–mortier . . . 89
5.4.1 Essai de cisaillement . . . 90
5.4.1.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues . . . 90
5.4.1.2 Observation des modes de rupture . . . 92

5.4.1.3 Interprétation de la résistance initiale au cisaillement 94
5.4.2 Essai de traction directe 95
5.4.2.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues 95
5.4.2.2 Observation des modes de rupture 97
5.4.2.3 Interprétation de l'adhérence en traction 98
5.4.3 Essai de compression 99
5.4.3.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues 99
5.4.3.2 Observation des modes de rupture 101
5.4.3.3 Interprétation des résistances en compression 103
5.4.4 Synthèse comparative et limites expérimentales 104

6 Conclusion **107**
6.1 Conclusion générale 107
6.2 Suggestions pour un travail futur 108

Annexes **110**
Annexe A – Valeurs du facteur de forme δ pour la résistance normalisée 110
Annexe B – Valeurs de f_{vk0} 111
Annexe C – Valeurs de f_{xk1} 111
Annexe D – Valeurs de K 112
Annexe E – Déclaration relative à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle 113

Bibliographie **114**

Liste des figures

2.1 Principaux types de blocs utilisés en maçonnerie [13] . . . 5
2.2 Différents types d'appareillage en maçonnerie [14] . . . 6
2.3 Détail constructif de l'enveloppe du bâtiment [16] . . . 8
2.4 Émissions mondiales liées à la production de ciment [20] . . . 9
2.5 Exemples de granulats recyclés [22] . . . 11
2.6 Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange [22] . . . 13
2.7 Variation du rapport E/C par rapport au taux de remplacement du sable recyclé [26] . 14
2.8 Masse volumique sèche des mortiers en fonction du rapport E/C [28] . . . 15
2.9 Relation linéaire entre la résistance en compression des mortiers et le taux de remplacement [26] . . . 16
2.10 Résistance à la compression à 28 jours dans des conditions sèches, saturées et en laboratoire [4] . . . 18
2.11 Nature des contraintes développées dans la brique et le mortier lorsque la maçonnerie est sollicitée en compression axiale [42] . . . 23
2.12 Différents modes de rupture en compression [3] . . . 24
2.13 Principaux essais utilisés pour caractériser l'adhérence brique–mortier . . . 26
2.14 Modes de rupture en traction : (a) rupture cohésive, (b) rupture adhésive, (c) rupture mixte . . . 26
2.15 Essai de cisaillement sur assemblage en triplet pour caractériser l'adhérence brique–mortier . . . 27

4.1 Ciment CEM III/B utilisé dans les formulations . . . 30
4.2 Sable naturel utilisé pour les formulations . . . 31
4.3 Sable mixte recyclé non lavé utilisé pour les formulations . . . 31
4.4 Sable de béton recyclé utilisé pour les formulations . . . 32
4.5 Fines de lavage utilisées pour la fabrication des briques et des mortiers . . . 32
4.6 Adjuvants utilisés lors du développement des mortiers . . . 34
4.7 Colonne de tamis utilisée pour l'analyse granulométrique des sables . . . 35
4.8 Détermination de l'état saturé surface sèche des sables . . . 36
4.9 Malaxeur utilisé pour la préparation du mélange des briques comprimées . . . 40
4.10 Protocole de fabrication des briques comprimées . . . 41
4.11 Briques comprimées obtenues avec la presse manuelle . . . 42
4.12 Presse *Instron 5585* de 25 t utilisée pour les essais de compression sur briques . . . 43
4.13 Essais de compression réalisés sur les briques comprimées . . . 44

4.14 Malaxeur et préparation préalable des fines de lavage pour la fabrication des mortiers 46
4.15 Fabrication et démoulage des barrettes de mortier SMR 1,8 + F (6) 47
4.16 Essai de consistance du mortier frais à la table à secousses 48
4.17 Essai de flexion en trois points sur une barrette de mortier 49
4.18 Essai de compression sur une barrette de mortier 50
4.19 Essai de transfert d'eau entre les mortiers frais et les briques comprimées 51
4.20 Préparation des carottes cylindriques destinées aux essais de cisaillement 53
4.21 Préparation des assemblages brique–mortier destinés au cisaillement 54
4.22 Préparation des assemblages brique–mortier destinés aux essais de traction directe . . 55
4.23 Préparation des assemblages brique–mortier destinés aux essais de compression . . . 57
4.24 Cure des assemblages brique–mortier dans des bacs en plastique humidifiés 58
4.25 Essai de cisaillement des assemblages brique–mortier à la boîte de Casagrande . . . 59
4.26 Essai de traction directe des assemblages brique–mortier 60
4.27 Essai de compression des assemblages brique–mortier 61

5.1 Analyse granulométrique des trois sables 63
5.2 Résistance à la compression et hauteur finale des briques en fonction des échantillons 1 à 8 67
5.3 Résistance à la compression des briques en fonction de leur masse volumique à 28 jours 68
5.4 Influence de la teneur en eau sur la masse volumique 71
5.5 Influence de la teneur en eau sur la résistance en compression 72
5.6 Résistances moyennes à 7 et 28 jours et étalement des mortiers de la première campagne 76
5.7 Résistance moyenne à 28 jours et quantité de superplastifiant utilisée pour les mortiers de la première campagne 77
5.8 Évolution des résistances en compression des mortiers entre 7 et 28 jours et comparaison avec la résistance moyenne des briques 81
5.9 Influence du rapport E/C sur la résistance en compression à 28 jours et sur la masse volumique des mortiers 82
5.10 Influence de la quantité d'accélérateur de prise sur le rapport entre la résistance en compression à 7 jours et à 28 jours 83
5.11 Influence de la teneur en eau sur la résistance en compression des barrettes de mortier à 28 jours 85
5.12 Évolution du gain moyen de masse des briques durant les 60 premières minutes de contact avec les mortiers frais 87
5.13 Évolution du gain moyen de masse des briques et des différences de masse associées au transfert d'eau entre les mortiers frais et les briques comprimées 88
5.14 Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les assemblages testés 90
5.15 Comparaison des résistances moyennes en cisaillement des assemblages brique–mortier 91
5.16 Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les briques seules 92
5.17 Assemblages brique–mortier après l'essai de cisaillement 93
5.18 Éprouvettes de brique après l'essai de cisaillement 93
5.19 Faces de rupture des assemblages brique–mortier 93
5.20 Faces de rupture des éprouvettes de brique 93

5.21 Évolution de la contrainte de traction en fonction du temps pour les assemblages brique–mortier . . . 95
5.22 Comparaison des résistances moyennes en traction directe des assemblages . . . 96
5.23 Assemblages brique–mortier après l'essai de traction directe . . . 97
5.24 Éprouvettes de brique après l'essai de traction directe . . . 97
5.25 Faces de rupture des assemblages brique–mortier . . . 97
5.26 Faces de rupture des éprouvettes de briques . . . 97
5.27 Évolution de la contrainte de compression en fonction du déplacement vertical pour les assemblages brique–mortier . . . 99
5.28 Comparaison des résistances moyennes en compression des assemblages brique–mortier 100
5.29 Modes de rupture observés après les essais de compression sur assemblages brique–mortier . . . 101
5.30 Brique avant l'essai de compression . . . 102
5.31 Fissuration observée après l'essai de compression – face avant . . . 102
5.32 Fissuration observée après l'essai de compression – face latérale . . . 102

A.1 Facteur de forme δ [45] . . . 110
B.1 Valeurs de résistance initiale au cisaillement de la maçonnerie f_{vk0} [45] . . . 111
C.1 Valeurs de f_{xk1} pour plan de rupture parallèle aux lits de pose [45] . . . 111
D.1 Valeurs de K à utiliser avec des mortiers d'usage courant, des mortiers de joints minces et allégés [45] . . . 112

Liste des tableaux

4.1 Composition des briques de béton comprimées 39
4.2 Compositions des mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage. 45
4.3 Fractions volumiques des mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage. 45

5.1 Masse volumique réelle et absorption d'eau des sables étudiés 64
5.2 Teneur en eau des sables stockés en *big bag* 65
5.3 Paramètres d'humidification des fines utilisées pour la réalisation d'un mélange de $30\,L$ destiné à la fabrication de 14 briques comprimées 66
5.4 Teneur en eau réelle des mélanges de briques à l'état frais déterminée par brûlage . . 67
5.5 Influence de la teneur en eau des briques sur leur résistance à la compression 71
5.6 Compositions des mortiers de la première campagne d'essais 75
5.7 Propriétés des sables utilisées pour la formulation des mortiers 75
5.8 Fractions volumiques des compositions de mortier de la première campagne d'essais 76
5.9 Compositions des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (1)–(2)–(3) 79
5.10 Compositions des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (4)–(5)–(6) 80
5.11 Fractions volumiques des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (4)–(5)–(6) . 80
5.12 Synthèse comparative des résultats mécaniques obtenus sur les assemblages brique–mortier 105
5.13 Synthèse des gains de masse des briques lors de l'essai de transfert d'eau 105

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et problématique

La maçonnerie constitue l'art de bâtir le plus ancien et le plus universel de l'humanité, ses premières traces remontant à 7000 av. J.-C. [1]. Initialement fondée sur l'utilisation de la pierre sèche, elle a évolué vers des systèmes de construction rectangulaires permanents dès 9000 av. J.-C. au Proche-Orient [2]. L'intégrité et la durabilité exceptionnelles de la maçonnerie reposent sur une synergie complexe : les unités de maçonnerie, qu'il s'agisse de briques, de blocs ou de pierres, assurent principalement la résistance aux charges de compression, tandis que le mortier permet la transmission de ces charges, le remplissage des irrégularités, l'étanchéité et l'adhérence de l'ensemble [3]. Cette maîtrise technique a permis l'émergence de structures iconiques, des pyramides aztèques en adobe aux voûtes magistrales de l'architecture islamique, dont certaines atteignent une portée inédite de $25,3\,m$ sans armature [1].

Le milieu du XIXe siècle marque toutefois une évolution importante dans les pratiques constructives. La révolution industrielle favorise l'essor des structures métalliques, puis du béton armé, breveté en 1854, ce qui modifie profondément la place de la maçonnerie traditionnelle dans les pays développés [2]. Les matériaux cimentaires deviennent progressivement dominants dans de nombreuses applications en raison de leurs performances mécaniques, de leur standardisation et de leur mise en œuvre maîtrisée. Cette évolution soulève cependant aujourd'hui une problématique environnementale majeure. La production de ciment est responsable de 5 à 8 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone [4]. À cela s'ajoute l'épuisement des ressources naturelles, l'industrie de la construction consommant annuellement des milliards de tonnes de granulats, dont une partie est extraite par dragage des lits de rivières, avec des conséquences importantes sur les écosystèmes aquatiques [5, 6].

Face à cette problématique, le secteur de la construction s'oriente progressivement vers des approches fondées sur la circularité et sur le concept « Cradle to Cradle », visant à transformer les déchets en ressources secondaires. En Europe, l'objectif de valorisation des déchets de construction et de démolition a été fixé à 70 % dès 2020. Si les fractions grossières sont aujourd'hui couramment valorisées, un enjeu important concerne encore la fraction fine, notamment les matériaux de dimension inférieure à $5\,mm$ et les boues de lavage de granulats. Ces fractions sont souvent plus difficiles à recycler en raison de leur forte porosité, de leur hétérogénéité et de leur demande en eau élevée [7, 8].

Parallèlement, la brique de terre comprimée, version modernisée de l'adobe, suscite un intérêt renouvelé comme solution constructive à plus faible impact environnemental [9]. Le processus de compression mécanique permet d'obtenir des blocs plus réguliers et plus robustes, tout en limitant l'énergie nécessaire à leur fabrication. Certaines études mettent ainsi en évidence une empreinte carbone nettement inférieure à celle de matériaux conventionnels : la fabrication d'une tonne de blocs autobloquants en terre comprimée émettrait environ $22\,kg$ de CO_2, contre $143\,kg$ de CO_2 pour des blocs de béton classiques [10].

Le développement de briques comprimées à base de matériaux recyclés s'inscrit dans cette double logique : conserver le principe de densification par compaction, tout en valorisant des fractions issues du recyclage. Ces éléments permettent notamment d'incorporer des sables recyclés et des fines de lavage, et donc de limiter le recours aux ressources naturelles. Le présent travail s'inscrit dans la continuité du travail de QUARTO [11], consacré au développement de briques de béton comprimées à base de sable recyclé, de fines de lavage, de ciment CEM III/B et d'eau. Les briques développées dans ce travail antérieur sont reprises afin d'étudier leur comportement lorsqu'elles sont associées à un mortier de maçonnerie bas-carbone.

Cette étude de l'association brique–mortier est essentielle, car la maçonnerie ne peut pas être considérée comme une simple juxtaposition de matériaux. Elle constitue un matériau composite dont le comportement dépend de l'interaction entre les unités maçonnées, le mortier et l'interface brique–mortier. La résistance propre des constituants ne suffit donc pas à prédire le comportement global de l'assemblage. En particulier, l'interface joue un rôle déterminant dans la transmission des efforts, notamment lorsque l'assemblage est sollicité en traction ou en cisaillement.

L'objectif principal de ce travail est donc de caractériser le comportement mécanique d'assemblages brique–mortier réalisés à partir de matériaux à impact environnemental réduit. Une attention particulière est portée au développement d'un mortier compatible avec les briques comprimées, à la qualité de l'adhérence développée à l'interface et à l'influence de la composition du mortier sur les performances mécaniques des assemblages.

1.2 Structure du travail

Ce travail est structuré selon une progression allant du contexte théorique vers l'analyse expérimentale des assemblages brique–mortier. Le Chapitre 2 présente l'état de l'art nécessaire à la compréhension du sujet. Il aborde d'abord le rôle de la maçonnerie dans la construction, ses fonctions structurelles et d'enveloppe, ainsi que les enjeux environnementaux associés aux matériaux conventionnels. Il traite ensuite de la valorisation des matériaux recyclés, en particulier des sables recyclés et des fines de lavage. Enfin, il présente les mécanismes gouvernant le comportement des assemblages brique–mortier, notamment en compression, en traction et en cisaillement.

Le Chapitre 3 précise les objectifs de recherche et la méthodologie générale adoptée. Il permet de définir la portée du travail, les choix expérimentaux retenus et la logique suivie pour passer de la caractérisation des matériaux à l'étude mécanique des assemblages.

Le Chapitre 4 décrit le programme expérimental. Les matériaux utilisés y sont présentés, puis caractérisés à travers leurs principales propriétés physiques, telles que la granulométrie, la masse volumique,

l'absorption d'eau et la teneur en eau. Ce chapitre détaille également la fabrication des briques comprimées, le développement des mortiers bas-carbone, les protocoles de réalisation des assemblages et les méthodes d'essai retenues.

Le Chapitre 5 est consacré à l'analyse des résultats. Les propriétés des matériaux de base y sont d'abord discutées, avant d'aborder la caractérisation des briques comprimées et le développement des mortiers. Les deux compositions finales de mortier sont ensuite comparées et utilisées pour analyser le comportement des assemblages brique–mortier. Les essais de traction directe, de cisaillement et de compression permettent d'évaluer l'influence du mortier et de l'interface sur les performances mécaniques globales.

Enfin, le Chapitre 6 synthétise les principales conclusions du travail. Il met en évidence les contributions de l'étude, les limites expérimentales rencontrées et les perspectives pouvant être envisagées pour la poursuite du développement de maçonneries à plus faible impact environnemental.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Maçonnerie et enjeux actuels

2.1.1 Rôle de matériau composite

2.1.1.1 Briques/blocs de construction traditionnels

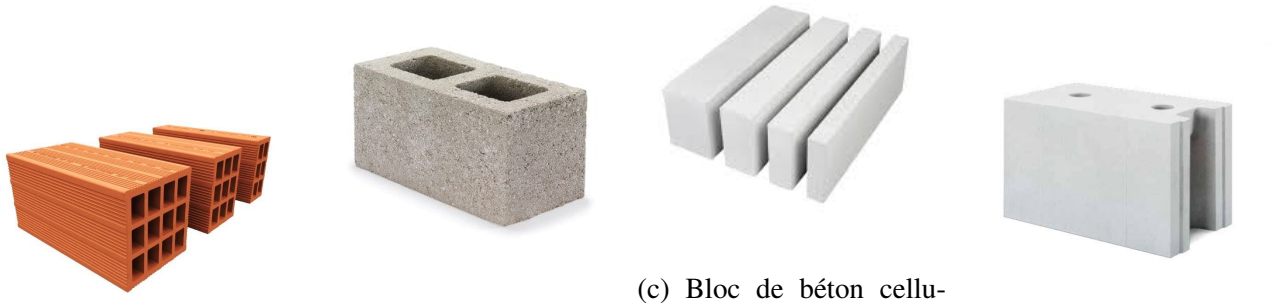
La maçonnerie constitue l'un des modes de construction les plus anciens encore largement utilisés aujourd'hui dans le secteur du bâtiment. Sa pérennité s'explique notamment par la relative simplicité de sa mise en œuvre. Au fil du temps, une grande diversité de matériaux, de liants et de techniques constructives s'est développée, en fonction des ressources locales disponibles ainsi que des exigences architecturales [2].

En Europe, les solutions de construction en maçonnerie non armée représentent une part importante des nouvelles constructions résidentielles, variant d'environ 15 % à plus de 50 % selon les pays, qu'ils se situent dans des zones d'activité sismique faible ou élevée [2]. En Belgique, les parois en maçonnerie sont généralement conçues avec des épaisseurs importantes afin de satisfaire notamment aux exigences liées à l'inertie thermique du bâtiment.

Plus précisément, les murs sont le plus souvent réalisés sous forme de murs creux comportant un parement en briques. La mise en œuvre de la maçonnerie est généralement réalisée sur chantier, ce qui implique le recours à une main-d'œuvre qualifiée.

Pour les murs porteurs intérieurs, les éléments de maçonnerie les plus couramment utilisés en Belgique sont, par ordre décroissant d'utilisation [12] :

1. Bloc d'argile perforé (Figure 2.1a) ;
2. Bloc de béton (mince ou léger) (Figure 2.1b) ;
3. Bloc de béton cellulaire autoclavé (Figure 2.1c) ;
4. Bloc de silicate de calcium (Figure 2.1d)



(a) Bloc d'argile perforé (b) Bloc de béton (c) Bloc de béton cellulaire (d) Bloc en silico-calcaire

FIGURE 2.1 – Principaux types de blocs utilisés en maçonnerie [13]

Outre ces blocs de construction, d'autres éléments de maçonnerie peuvent être utilisés, tels que les briques ou les pierres naturelles. Les briques sont principalement employées pour les murs de parement, tandis que les pierres naturelles sont davantage présentes dans certaines régions, notamment dans le sud de la Belgique.

2.1.1.2 Mortiers de maçonnerie

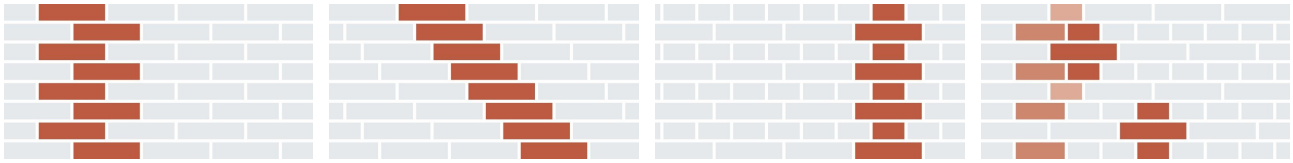
Les éléments de maçonnerie sont assemblés à l'aide de joints de mortier, dont le rôle principal est d'assurer la liaison entre les unités maçonnées, de répartir les contraintes et de compenser les irrégularités géométriques des surfaces de contact. Le mortier contribue ainsi à la continuité mécanique de la maçonnerie, tout en influençant ses performances en compression, en cisaillement et en traction.

Pour les chantiers de petite envergure, les mortiers sont généralement préparés sur site, tandis que des mortiers industriels ou préfabriqués peuvent être utilisés pour des projets de plus grande ampleur. Les mortiers traditionnels sont généralement constitués d'un mélange de liant, de sable et d'eau. Le liant le plus couramment utilisé est le ciment, bien que des formulations à base de chaux, ou plus rarement d'argile, puissent également être rencontrées [12].

À l'état frais, une ouvrabilité suffisante est nécessaire afin de permettre une bonne mise en place du mortier et un contact satisfaisant avec les éléments de maçonnerie. À l'état durci, les résistances mécaniques et l'adhérence avec les unités maçonnées deviennent déterminants pour le comportement global de l'assemblage [12].

2.1.1.3 Types d'appareillage

L'organisation spatiale des éléments de maçonnerie, appelée appareillage, peut varier selon différentes configurations, comme illustré à la Figure 2.2.



(a) Appareillage en demi-brique (b) Appareillage incliné (c) Appareillage debout (d) Appareillage en croix

FIGURE 2.2 – Différents types d'appareillage en maçonnerie [14]

L'appareillage influence directement le comportement mécanique, la stabilité et la mise en œuvre de la maçonnerie [14].

L'appareillage en demi-brique (Figure 2.2a), également appelé appareillage en panneresses, est largement utilisé en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Il permet une bonne répartition des charges grâce au décalage des joints verticaux, tout en limitant les découpes et la consommation de mortier, ce qui le rend particulièrement économique et efficace.

L'appareillage incliné (Figure 2.2b) constitue une variante de l'appareillage en demi-brique dans laquelle les éléments sont disposés de manière oblique. Il est principalement utilisé pour des raisons esthétiques, mais peut également favoriser une redistribution des efforts selon des directions non horizontales. Sa mise en œuvre requiert toutefois une attention particulière afin de garantir la stabilité de l'ensemble.

L'appareillage debout (Figure 2.2c) se caractérise par l'alternance de rangées de briques pleines disposées en panneresse et de 3/4 de briques disposées en boutisse, ce qui modifie localement la répartition des contraintes et la rigidité du mur. Ce type d'appareillage peut engendrer des zones de discontinuité si les liaisons entre éléments ne sont pas correctement assurées.

Enfin, l'appareillage en croix (Figure 2.2d) repose sur une alternance de couches de panneresses et de boutisses, assurant un bon chaînage des éléments de maçonnerie. Cette disposition améliore la cohésion du mur et permet une transmission plus homogène des efforts, ce qui en fait une solution particulièrement robuste, notamment dans les anciennes constructions.

La maçonnerie doit être considérée comme un matériau composite dont le comportement résulte de l'interaction entre ses différents constituants. Cette nature composite introduit une variabilité importante des propriétés, rendant le comportement de la maçonnerie difficile à prédire. Cette complexité justifie l'étude expérimentale des interactions entre les différents constituants.

2.1.2 Rôle structurel

Comme décrit précédemment, la maçonnerie constitue un matériau composite. Elle peut ainsi être assimilée à un matériau hétérogène dont les propriétés mécaniques varient en fonction de la direction de sollicitation, notamment en raison de la présence des joints de mortier qui agissent comme des plans de faiblesse.

Le comportement global de la maçonnerie résulte de la contribution de chacun de ses constituants. Les unités de maçonnerie assurent principalement la résistance mécanique, tandis que le mortier permet

la répartition des contraintes et compense les irrégularités géométriques. L'interface entre ces deux éléments joue un rôle déterminant dans la transmission des efforts [2].

La présence de joints de mortier confère à la maçonnerie un comportement anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques varient en fonction de la direction de sollicitation. Les joints peuvent ainsi constituer des plans de faiblesse influençant la réponse mécanique globale [12].

Par ailleurs, l'interface brique–mortier constitue une zone critique dans laquelle se développent des phénomènes complexes, notamment liés aux transferts d'eau et au développement de l'adhérence. Les propriétés hydriques des matériaux, telles que leur porosité et leur capacité d'absorption, influencent directement ces mécanismes et, par conséquent, les performances globales de la maçonnerie [6].

Du point de vue mécanique, la maçonnerie non armée présente généralement une très faible résistance à la traction et travaille donc principalement en compression. À l'inverse, la maçonnerie armée permet d'améliorer ce comportement en développant une capacité à reprendre des efforts de traction.

Dans le cadre de son rôle structurel, la maçonnerie est principalement mise en œuvre sous forme de murs porteurs. Ceux-ci assurent la reprise des charges appliquées au bâtiment, telles que les charges issues des planchers, de la toiture et des charges d'exploitation, qu'ils transmettent ensuite aux fondations. En outre, les murs de maçonnerie contribuent à la rigidité globale du bâtiment et participent à sa stabilité, notamment par l'intermédiaire de murs de refend qui reprennent les efforts horizontaux, tels que les actions du vent.

À l'inverse, les murs non porteurs ne participent pas à la reprise des charges. Ils sont généralement constitués d'éléments de plus faible épaisseur et remplissent principalement des fonctions de séparation ou d'aménagement des espaces.

2.1.3 Rôle d'enveloppe

L'enveloppe du bâtiment est directement exposée aux sollicitations du climat et de l'environnement extérieur. Elle doit dès lors remplir plusieurs fonctions essentielles, en agissant à la fois comme une barrière et comme un filtre selon les phénomènes considérés [15].

Vis-à-vis de l'eau, son rôle est de garantir une protection efficace en empêchant toute infiltration à l'intérieur du bâtiment. En ce qui concerne l'air, l'enveloppe agit davantage comme un régulateur : une bonne étanchéité à l'air est nécessaire afin de limiter les infiltrations parasites et de réduire les pertes énergétiques. Elle doit également résister aux effets du vent, qui peuvent accentuer ces phénomènes et dégrader les performances globales de l'ouvrage [15].

Sur le plan thermique, l'enveloppe joue un rôle majeur dans le confort intérieur. Elle doit limiter les déperditions de chaleur en hiver tout en protégeant le bâtiment des apports excessifs liés au rayonnement solaire en été. Elle participe ainsi à la régulation des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur [15].

Dans ce contexte, la maçonnerie constitue un élément clé de l'enveloppe. Au-delà de son rôle structurel, elle contribue directement à la protection et au confort du bâtiment. Le parement extérieur en maçonnerie agit comme une première barrière face aux agressions climatiques, notamment la pluie battante et le vent, en limitant les infiltrations d'eau et en contrôlant les écoulements en façade. L'ef-

ficacité de cette fonction dépend fortement de la qualité de la mise en œuvre et de la conception des détails constructifs, tels que les joints, les appuis ou les couronnements [15].

Par ailleurs, les éléments porteurs en maçonnerie, tels que les blocs de béton, participent aux performances thermiques de l'enveloppe. Bien que leur capacité isolante soit limitée, ils apportent une inertie thermique significative. Cette propriété se traduit par un déphasage entre l'accumulation de chaleur et sa restitution vers l'intérieur, ce qui permet d'atténuer les variations de température et d'améliorer le confort thermique. Combinée à une isolation adaptée, cette inertie contribue également à la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. Dans les constructions courantes en Belgique, ces fonctions sont généralement assurées par des murs creux comme représenté à la Figure 2.3 [15] :

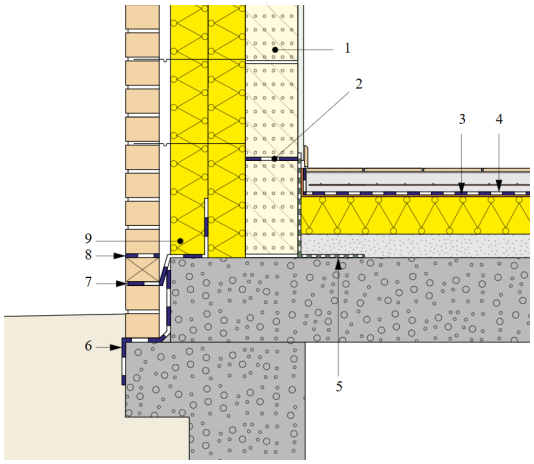


FIGURE 2.3 – Détail constructif de l'enveloppe du bâtiment [16]

1. Maçonnerie portante isolante
2. Barrière anticapillaire
3. Isolant acoustique
4. Membrane en film plastique
5. Cimentage ou membrane d'étanchéité à l'air
6. Membrane à joints soudés ou collés
7. Drainage de la coulisse du mur creux
8. Barrière anticapillaire éventuelle
9. Isolant thermique

2.1.4 Enjeux actuels

La maçonnerie traditionnelle, largement utilisée en Belgique, repose principalement sur l'emploi de blocs de béton et de mortiers à base de ciment. Si ces matériaux présentent des performances mécaniques et une durabilité reconnues, leur impact environnemental est aujourd'hui largement questionné. En effet, la production de ciment constitue une source majeure d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2) à l'échelle mondiale, représentant jusqu'à environ 8 % des émissions globales. Le ciment est en effet la deuxième ressource la plus utilisée dans le monde, après l'eau [17].

La production de béton mobilise des quantités considérables de ressources. Selon COURARD [18], la consommation mondiale annuelle s'élève à environ 4,7 milliards de tonnes de granulats, dont 2,2 milliards de tonnes de sable, ainsi que 1,3 milliard de tonnes de ciment et près de 8000 milliards de litres d'eau.

L'origine de ces émissions est double. D'une part, elles proviennent de la réaction chimique de décarbonatation du calcaire lors de la fabrication du clinker, composant principal du ciment. Cette réaction, indispensable à la formation des propriétés liantes du ciment, libère intrinsèquement du CO_2. D'autre part, la production de clinker nécessite des températures très élevées (supérieures à 1000 °C), impliquant une consommation importante d'énergie et donc des émissions supplémentaires liées à la

combustion de combustibles fossiles. Ainsi, même en l'absence de consommation énergétique, une part significative des émissions resterait incompressible, car directement liée au processus chimique [19]

Au cours des dernières décennies, la production mondiale de ciment a connu une croissance très rapide, conduisant à une augmentation continue des émissions associées. Cette tendance est notamment illustrée par la Figure 2.4, qui met en évidence l'évolution des émissions globales de CO_2 liées à la production de ciment. Cette croissance est en grande partie liée à l'urbanisation et au développement des infrastructures à l'échelle mondiale.

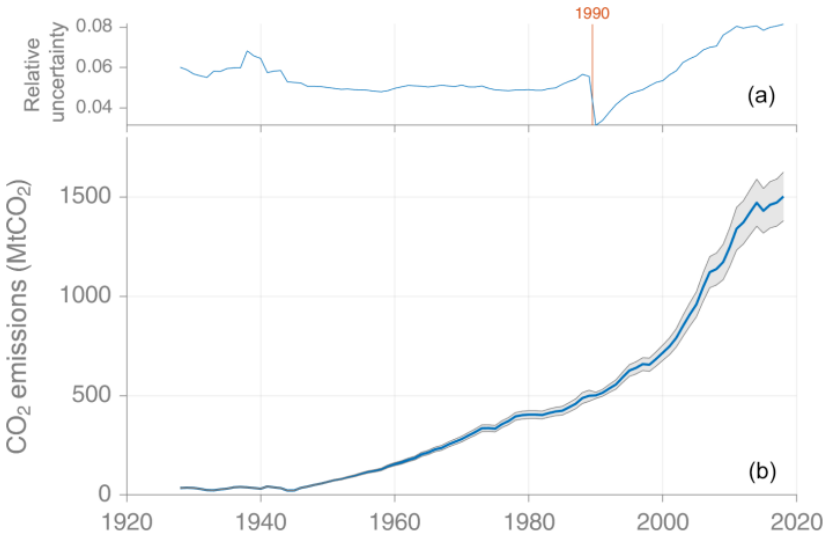


FIGURE 2.4 – Émissions mondiales liées à la production de ciment [20]

Le facteur déterminant de l'empreinte carbone du ciment réside dans sa teneur en clinker. En effet, les émissions de CO_2 sont directement proportionnelles à la fraction de clinker présente dans le ciment. Cette proportion varie selon les régions : elle peut atteindre environ 89 % aux États-Unis, se situer autour de 77 % en Europe, et descendre jusqu'à environ 66 % en Chine. À l'échelle mondiale, le taux moyen de clinker est de l'ordre de 74 %. Malgré cette proportion massique relativement modérée, le clinker est responsable d'environ 90 % de l'empreinte carbone du ciment.

Ce constat est encore plus frappant à l'échelle du béton. En effet, lorsque le ciment est mélangé aux granulats, au sable et à l'eau, le clinker ne représente qu'environ 10 % de la masse totale du matériau. Toutefois, il demeure à l'origine de près de 90 % des émissions de CO_2 associées au béton. Cela met en évidence le rôle prépondérant du clinker dans l'impact environnemental des matériaux cimentaires [19].

Dans ce contexte, la réduction de la teneur en clinker apparaît comme un levier majeur pour diminuer l'empreinte carbone de la construction. Le développement de matériaux alternatifs, intégrant des constituants à plus faible impact environnemental tels que des sables recyclés ou fines de lavage, constitue ainsi une voie prometteuse. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, qui vise à développer et caractériser des briques comprimées à base de matériaux recyclés ainsi que des mortiers à faible impact environnemental, afin de proposer des solutions plus durables pour la maçonnerie.

2.2 Recyclage des matériaux

2.2.1 Valorisation des déchets de construction et de démolition

Le secteur de la construction constitue l'un des principaux consommateurs de matières premières à l'échelle européenne. Il génère également une part significative des déchets, les activités de construction et de démolition représentant environ un tiers des déchets produits annuellement en Europe. En Belgique, cette problématique est particulièrement marquée, avec une production estimée à environ $1,5\,\mathrm{t}$ de déchets de construction et de démolition par habitant chaque année, soit plus de 20 millions de tonnes à l'échelle nationale [21].

Ces volumes importants soulèvent plusieurs enjeux environnementaux, liés à la fois à la consommation de ressources naturelles et à la gestion des déchets produits. La mise en décharge entraîne notamment une occupation d'espace importante et peut présenter des risques de pollution des sols et des eaux souterraines [21]. Dans ce contexte, la valorisation des déchets de construction et de démolition constitue une voie importante pour réduire l'impact environnemental du secteur.

Depuis plusieurs décennies, des solutions techniques et des cadres réglementaires ont été développés afin de permettre le réemploi et le recyclage contrôlé des matériaux issus de la démolition, principalement sous forme de granulats recyclés. Ces matériaux sont largement utilisés dans la construction routière, notamment pour les fondations et sous-fondations. Grâce à ces pratiques, la Belgique présente un taux de valorisation des déchets de construction et de démolition supérieur à $90\,\%$ [21].

La qualité des matériaux recyclés dépend toutefois fortement du mode de démolition et du tri réalisé en amont. La démolition sélective permet de séparer les fractions inertes des fractions non inertes ou dangereuses, tandis que la déconstruction vise à préserver certains éléments en vue de leur réemploi. Les déchets inertes, principalement issus de la déconstruction de bâtiments et de voiries, constituent la fraction la plus adaptée à la production de granulats recyclés [22].

2.2.2 Production et classification des granulats recyclés

Les déchets inertes issus de la construction et de la démolition peuvent être valorisés sous forme de granulats recyclés après différentes étapes de traitement. Le procédé comprend généralement un tri préalable, destiné à éliminer les éléments indésirables, suivi d'opérations de concassage, de criblage et, dans certains cas, de lavage. Ces étapes permettent d'obtenir des matériaux recyclés classés selon leur nature et leur granulométrie [22].

Le recyclage peut être réalisé dans des centres fixes ou à l'aide d'unités mobiles directement installées sur chantier. Les centres fixes permettent de traiter une large gamme de déchets inertes, tandis que les unités mobiles présentent l'avantage de limiter les transports lorsque les matériaux peuvent être réutilisés à proximité du site de production [22].

Selon leur origine, les granulats recyclés peuvent être distingués en plusieurs catégories. Les granulats de béton proviennent principalement de la démolition d'ouvrages en béton. Les granulats mixtes ou de maçonnerie sont issus de matériaux plus hétérogènes, comprenant notamment des fragments de béton, de briques, de tuiles, de blocs ou de mortiers anciens. Les granulats hydrocarbonés, quant à eux, proviennent principalement du fraisage ou de la déconstruction de chaussées bitumineuses. La

Figure 2.5 illustre différents types de granulats recyclés obtenus après traitement des déchets inertes.



(a) Granulats de béton

(b) Granulats mixtes et de maçonnerie

(c) Granulats hydrocarbonés

FIGURE 2.5 – Exemples de granulats recyclés [22]

Les matériaux recyclés peuvent également être classés selon leur granulométrie. Les fines recyclées correspondent aux particules de dimension inférieure ou égale à $0,063\,mm$, tandis que les sables recyclés regroupent généralement les fractions dont la dimension maximale est inférieure ou égale à $4\,mm$, voire $6,3\,mm$ selon les classifications utilisées. Les fractions plus grossières correspondent aux gravillons, aux graves ou aux granulats recyclés de plus grande dimension.

Malgré le développement important de ces filières, l'utilisation des granulats recyclés reste influencée par certaines limitations, notamment leur variabilité, leur hétérogénéité et leur influence sur les propriétés des matériaux dans lesquels ils sont incorporés. Ces aspects sont particulièrement importants pour les fractions fines, dont la granulométrie, la teneur en fines et la capacité d'absorption d'eau peuvent modifier significativement le comportement des mortiers, bétons ou briques comprimées [21].

Dans ce contexte, le présent travail se focalise plus spécifiquement sur les sables recyclés, en particulier les sables de béton et les sables mixtes, ainsi que sur les fines recyclées issues des procédés de lavage.

2.2.2.1 Propriétés des sables recyclés

Un sable recyclé est défini avant tout par sa granulométrie. En fonction de son mode de production, on distingue généralement deux types : les sables de criblage et les sables de concassage. La dimension maximale D_{max} de ces sables varie selon les normes.

- **Composition et hétérogénéité** : Contrairement aux sables naturels qui sont minéralogiquement plus homogènes, les sables recyclés sont définis par leur grande hétérogénéité. En effet, ils proviennent de débris de béton, de briques, de céramiques, de mortiers anciens, etc. Une part importante de leur porosité et de leur faible densité provient de la couche de vieux mortier restée attachée aux grains de roche naturelle d'origine. Cette interface poreuse est un point clé qui influence la zone de transition interfaciale (ITZ) dans le nouveau mélange [23].

- **Coefficient d'absorption d'eau** : C'est une propriété physique cruciale pour les sables recyclés. Contrairement aux sables naturels (souvent < 2%), les granulats recyclés présentent des valeurs d'absorption nettement plus élevées, généralement comprises entre 4 et 25%. Cette forte absorption est due à la présence d'une matrice cimentaire poreuse attachée aux grains d'origine ou aux débris de maçonnerie. Cela influence directement la formulation des mélanges (béton, mortier) en augmentant la demande en eau de gâchage [22].
- **Masse volumique** : Il existe différentes masses volumiques qui peuvent être calculées. On différencie notamment la masse volumique réelle et la masse volumique sèche. D'une part, la première (ρ_{rd}) est la masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte uniquement des pores et fissures présents dans les éléments mais pas des vides interstitiels. Cela se détermine par la mesure du volume du matériau dans un liquide. Cette valeur varie entre 2 500 et 2 650 kg/m³ pour la majorité des granulats. D'autre part, la masse volumique sèche est la masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte de tous les vides (vides interstitiels, pores et fissures) après compactage. Elle varie de 1 700 à 2 200 kg/m³ pour les granulats les plus courants [22].
- **Angularité et texture** : La morphologie des sables recyclés, surtout ceux issus du concassage, est généralement anguleuse. Une forte angularité améliore la portance et la résistance, mais peut réduire l'ouvrabilité du béton frais [22].
- **Coefficient d'uniformité** : Le sable peut être homométrique (grains de même taille) ou bien gradué (mélange de différentes tailles). Un sable bien gradué ($C_u > 6$) présente une meilleure compacité car les grains plus fins remplissent les interstices entre les gros éléments, ce qui augmente la masse volumique et réduit la perméabilité [22].
- **Teneur en fines** : Les sables recyclés présentent généralement une teneur en fines nettement plus élevée que les sables naturels, due au processus de concassage. Cette "poudre" peut avoir un effet bénéfique en densifiant la microstructure du béton/mortier [23].

Dans le cadre du présent travail, les sables utilisés présentent une dimension maximale $D_{\max} = 4\,\text{mm}$. Par ailleurs, aucun lavage préalable n'est effectué. En effet, bien que le lavage permette d'améliorer la qualité des sables recyclés, il implique une consommation supplémentaire d'eau et d'énergie, ce qui en réduit l'intérêt du point de vue environnemental.

2.2.2.2 Propriétés des fines recyclées

Les fines recyclées désignent les particules de très faible granulométrie issues du traitement des matériaux recyclés. Les fines de lavage s'inscrivent donc dans cette famille de matériaux, mais se distinguent par leur mode d'obtention. Elles sont récupérées lors des opérations de lavage des granulats, généralement sous forme de boues ensuite déshydratées. Elles peuvent être produites en quantités importantes, pouvant atteindre jusqu'à 5 % de la production totale de granulats, ce qui pose des problématiques de gestion et de stockage, notamment dans des bassins de décantation. Leur valorisation présente dès lors un intérêt environnemental [24, 25].

L'influence des fines sur les propriétés des matériaux est illustrée à la Figure 2.6.

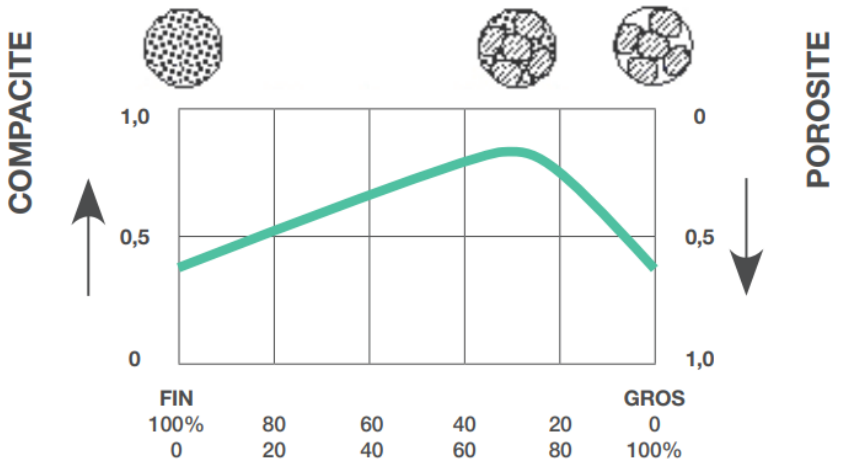


FIGURE 2.6 – Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange [22]

- **Compacité et résistances** : Une teneur modérée en fines améliore la compacité en comblant les vides intergranulaires, ce qui augmente la masse volumique, la portance et les résistances. Au-delà d'un certain seuil, les fines écartent les grains grossiers, entraînant une diminution de la densité.
- **Sensibilité au compactage** : L'augmentation de la teneur en fines rend le matériau plus sensible à la teneur en eau, avec des variations plus marquées de la masse volumique lors du compactage.
- **Perméabilité** : L'ajout de fines réduit la perméabilité en remplissant les interstices. Pour des teneurs modérées (environ 10 à 15 %), l'eau circule encore ; au-delà, elle tend à stagner, ce qui peut engendrer des problèmes, notamment liés au gel.
- **Caractéristiques des matériaux liés** : Une quantité adéquate de fines est nécessaire pour assurer l'ouvrabilité et les performances mécaniques. Un déficit en fines nécessite un apport en eau, réduisant les résistances, tandis qu'un excès diminue l'adhérence du liant, perturbe l'hydratation et altère les performances globales.
- **Nature des fines** : Le comportement dépend également de leur nature. Les fines argileuses, en particulier, augmentent la sensibilité à l'eau, peuvent induire des phénomènes de gonflement et réduire l'adhérence du liant.

2.2.3 Mortiers à base de fraction fine recyclée

2.2.3.1 Propriétés à l'état frais

Plusieurs auteurs utilisent des plages de consistance similaires. Par exemple, MARTÍNEZ-GARCÍA et al. [26] fixent la consistance de leurs mortiers à $134 \pm 4\,mm$. D'autres auteurs, tels que LEDESMA et al. [27] et MORA-ORTIZ et al. [28], la fixent à $175 \pm 10\,mm$.

Les résultats de MARTÍNEZ-GARCÍA et al. [26] confirment que que l'utilisation de granulats recyclés augmente la demande en eau. En comparaison à un mortier témoin, un mortier avec 100 % de granulats recyclés nécessite pas moins de 52% d'eau de gâchage supplémentaire pour atteindre la même consistance.

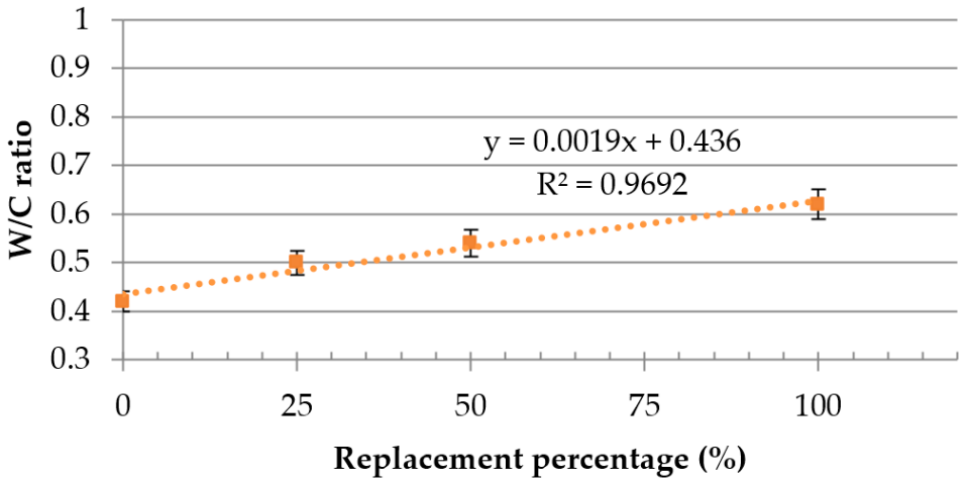


FIGURE 2.7 – Variation du rapport E/C par rapport au taux de remplacement du sable recyclé [26]

Sur la Figure 2.7, MARTÍNEZ-GARCÍA et al. [26] démontrent qu'il existe une relation quasi-linéaire entre le taux de substitution des granulats et le rapport E/C nécessaire pour avoir une consistance constante. ROQUE et al. [29] le démontrent aussi. Cela est dû à la porosité élevée de l'ancien mortier adhérent aux grains recyclés et leur forme plus anguleuse qui augmente les frictions internes et absorbe une partie de l'eau de gâchage.

Selon GHORBEL et al. [8], une perte de maniabilité du mortier est également observée au cours du temps. Celle-ci s'explique par l'absorption différée des sables recyclés, qui continuent à capter une partie de l'eau de gâchage après la fin du malaxage. Afin de limiter ce phénomène, des techniques de pré-humidification des sables recyclés peuvent être mises en œuvre avant leur incorporation dans le mélange.

Dans son étude, GHORBEL et al. [8] analysent deux séries de mortiers : une première à ouvrabilité variable avec un rapport E/C constant et une seconde à ouvrabilité constante obtenue par ajustement de la teneur en eau. Les résultats montrent que, pour la première série, la vitesse de perte de maniabilité se stabilise dès que le taux de substitution en sable recyclé dépasse environ 30 %. Pour la seconde série, cette stabilisation intervient plus tardivement, au-delà de 50 % de substitution.

Ces observations mettent en évidence l'existence d'un seuil à partir duquel l'évolution de la maniabilité dans le temps n'est plus significativement influencée par l'augmentation du taux de sable recyclé. Par ailleurs, l'étude montre que la perte de maniabilité est globalement plus importante dans les formulations à rapport E/C constant, en raison de l'absorption progressive de l'eau disponible par les granulats recyclés.

Enfin, pour les mortiers contenant 100 % de sable recyclé et formulés à ouvrabilité constante, une masse volumique de l'ordre de 1970 kg/m^3 est obtenue pour un étalement de 180 ± 16 mm.

2.2.3.2 Propriétés à l'état durci

Lorsqu'on augmente le rapport E/C pour compenser l'absorption des granulats recyclés et maintenir l'ouvrabilité, la littérature confirme que cette augmentation de l'eau efficace est le facteur principal

de la baisse des performances mécaniques.

La Figure 2.8 provenant du travail de MORA-ORTIZ et al. [28] met en relation la masse volumique apparente à l'état durci et le rapport eau/ciment pour différentes formulations de mortiers incorporant des sables recyclés. Les résultats montrent que la masse volumique diminue globalement lorsque le rapport E/C augmente. Cette tendance est observée pour l'ensemble des familles de mortiers étudiées, qu'il s'agisse de granulats recyclés utilisés à l'état naturel, pré-humidifiés ou associés à un plastifiant.

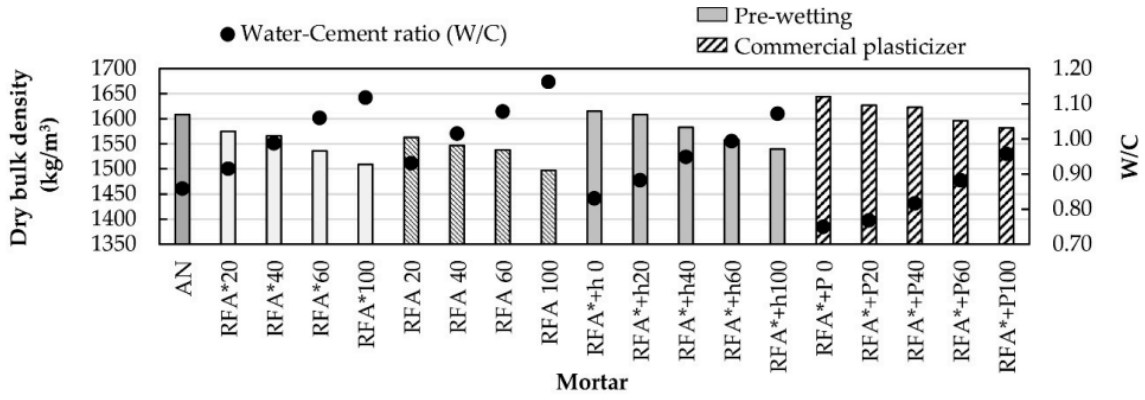


FIGURE 2.8 – Masse volumique sèche des mortiers en fonction du rapport E/C [28]

Cette diminution de la masse volumique est attribuée à l'augmentation de la porosité de la matrice cimentaire, liée à la présence d'un excès d'eau dans le mélange. En effet, l'eau non consommée lors de l'hydratation du ciment laisse, après évaporation, un réseau de pores plus développé, ce qui conduit à une réduction de la densité du matériau durci [28].

La résistance diminue également avec le taux de remplacement du sable naturel par le sable recyclé. Cela est présenté dans le travail de MARTÍNEZ-GARCÍA et al. [26], comme démontré à la Figure 2.9. Ils notent une perte de résistance à 7 et 28 jours de 34% entre le mortier composé de 100 % de sable recyclé par rapport au mortier de référence. Cependant, cette différence de résistance est moins marquante à 90 jours où elle n'est que de 20%.

Afin de compenser les faibles résistances à jeune âge, notamment à 7 jours, des accélérateurs de prise peuvent être utilisés. En effet, bien que les écarts de résistance entre formulations soient importants à court terme (7 et 28 jours), ils tendent à diminuer à plus long terme (90 jours). L'utilisation d'un accélérateur permet ainsi d'obtenir des résistances suffisantes dès les premiers jours, facilitant notamment les opérations de mise en oeuvre, comme le montage de maçonneries dès le lendemain.

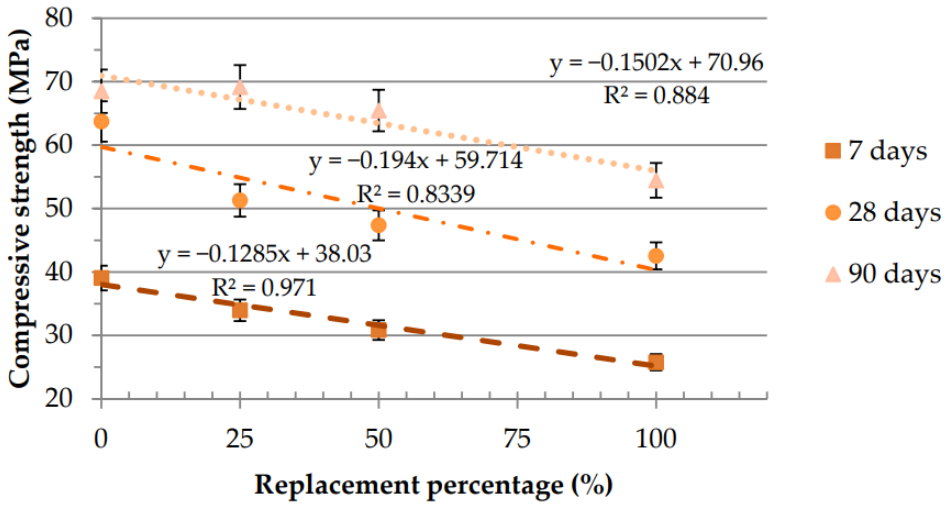


FIGURE 2.9 – Relation linéaire entre la résistance en compression des mortiers et le taux de remplacement [26]

2.2.4 Briques/blocs de construction à base de fraction fine recyclée

2.2.4.1 Briques de terre comprimées (BTC)

Les briques de terre comprimée (BTC) constituent une technique de construction issue des méthodes traditionnelles en terre crue, telles que l'adobe ou le pisé, mais modernisée par l'utilisation de presses mécaniques. Les presses permettent la standardisation des dimensions des briques et une augmentation de la productivité. Le travail de « La brique de terre compressée » [9] suggère un mélange théorique d'environ 1/3 de gravier, 1/3 de sable et 1/3 de fines. Les fines argileuses jouent le rôle de liant naturel [30]. Cette approche s'apparente à un "béton de terre", où le squelette granulaire assure la stabilité et les fines assurent la cohésion. Le procédé de fabrication repose fortement sur des paramètres tels que la teneur en eau et l'énergie de compaction. La terre est utilisée à un état hydrique humide, avec une teneur en eau optimale généralement située entre 5 et 15% [9]. La force de compaction réduit fortement la porosité, densifie la brique et améliore ainsi la résistance en compression. La densité de ces briques se trouve généralement entre 1600 et 2200 kg/m³. Le séchage de ces briques est généralement réalisé à l'air libre.

Les BTC présentent plusieurs avantages, notamment leur faible impact environnemental, leur disponibilité locale et leur bonne inertie thermique. Toutefois, leurs performances mécaniques restent limitées et fortement dépendantes de la nature du sol utilisé. Les résistances en compression rapportées dans la littérature sont généralement comprises entre environ 0,4 et 3 MPa [30], ce qui est nettement inférieur aux matériaux cimentaires classiques. De plus, ces briques présentent une forte sensibilité à l'eau et nécessitent une bonne protection contre l'humidité et l'érosion, sans quoi elles risquent une dégradation progressive et une perte de résistance. Ces limites, combinées à la variabilité intrinsèque des sols, constituent des freins à une utilisation plus large dans des applications structurelles.

2.2.4.2 Briques stabilisées

Afin de pallier ces insuffisances, le développement des BTC stabilisées s'est imposé comme une évolution naturelle. On distingue trois types de stabilisation :

- Stabilisation physique : Elle agit sur la texture du matériau en ajustant la courbe granulométrique pour maximiser la compacité. Pour une terre trop plastique, on ajoute du sable et pour une terre peu plastique on ajoute des fines [30].
- Stabilisation mécanique : Elle agit sur la force de compaction pour modifier la structure interne de la brique. Comme la compression réduit les vides, on augmente la densité du bloc. Il existe en effet une relation quasi-linéaire entre la force de compaction et la résistance en compression. Une forte densification permet également de réduire la porosité et de limiter la vitesse de pénétration de l'eau, améliorant la durabilité [31].
- Stabilisation chimique : Elle consiste à ajouter des liants qui fixent la matrice par des réactions chimiques. Les liants ajoutés peuvent être de la chaux, du ciment ou d'autres alternatives à plus faible impact environnemental. Le ciment est le plus couramment utilisé et est particulièrement efficace pour les terres sableuses ou à faible fraction argileuse. En ajoutant 5 à 10% de ciment, il est possible de doubler voire tripler la résistance de la brique [4]. L'ajout de ciment permet essentiellement d'augmenter la résistance à l'eau. Elle augmente également la résistance à l'abrasion et aux cycles gel/dégel.Elle nécessite toutefois une cure humide de 28 jours pour permettre une hydratation complète. Cette stabilisation transforme progressivement la BTC en un matériau hybride, à mi-chemin entre un sol compacté et un matériau cimentaire. Cette solution présente néanmoins des limites, notamment en termes d'impact environnemental lié à l'utilisation du ciment, ainsi qu'en raison du maintien d'une dépendance aux caractéristiques du sol local.

Les briques étudiées dans le travail de CRUZ et al. [4] sont constituées d'un mélange de terre argilo-sableuse stabilisée à l'aide de différents types de liants. Afin de comparer les performances, plusieurs formulations ont été définies en fonction de la nature et du dosage du liant. Le ciment Portland ordinaire (noté PC) est utilisé comme matériau de référence, tandis qu'un ciment recyclé thermoactivé (noté RC) est également étudié. Ce dernier est obtenu par broyage et traitement thermique d'anciennes pâtes de ciment à une température d'environ 650 °C, ce qui permet de réactiver partiellement ses propriétés liantes. Les notations associées aux différentes formulations correspondent au pourcentage massique de liant par rapport à la masse de terre sèche. Par exemple, une formulation PC10 contient 10 % de ciment Portland, tandis que RC10 contient 10 % de ciment recyclé. Des formulations hybrides ont également été considérées, telles que RC2PC8 ou RC5PC5, combinant respectivement 2 % de ciment recyclé et 8 % de ciment Portland, ou encore un mélange équilibré de 5 % de chaque type de liant. À titre de référence, des briques non stabilisées ont également été étudiées (UCEB), ne contenant aucun liant ajouté.

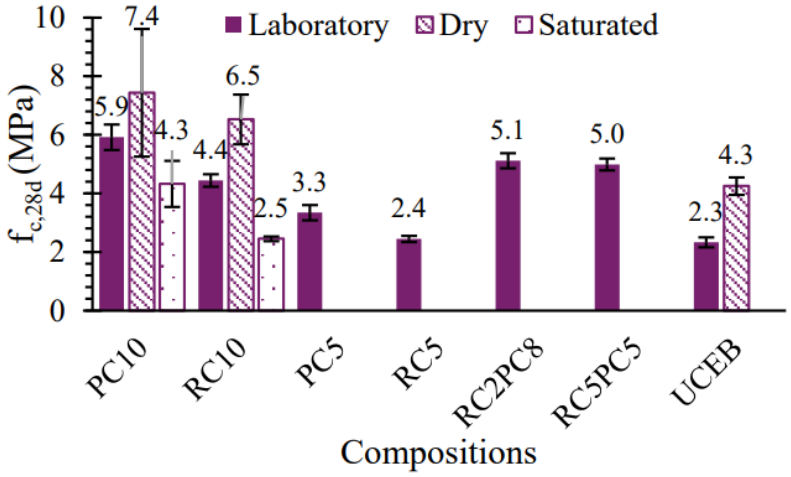


FIGURE 2.10 – Résistance à la compression à 28 jours dans des conditions sèches, saturées et en laboratoire [4]

L'analyse des résultats présentés à la Figure 2.10 met clairement en évidence l'influence du taux et de la nature du stabilisant sur les performances mécaniques des briques. En particulier, la résistance à la compression à 28 jours, notée $f_{c,28d}$, augmente de manière significative avec la teneur en liant. Ainsi, les briques stabilisées avec 10 % de ciment Portland présentent une résistance environ 2,5 fois supérieure à celle des briques non stabilisées, tandis que celles contenant 10 % de ciment recyclé atteignent une résistance environ 1,9 fois plus élevée. Ces résultats confirment que la stabilisation chimique, qu'elle soit réalisée à l'aide de ciment Portland ou de ciment recyclé, permet d'améliorer efficacement la résistance mécanique des briques.

Un autre aspect essentiel mis en évidence par la Figure 2.10 concerne l'influence de l'eau sur le comportement mécanique des briques. Une diminution systématique de la résistance à la compression est observée lorsque les échantillons sont testés à l'état saturé, par rapport à leur état sec. Ce phénomène s'explique par différents mécanismes physiques : la présence d'eau dans les pores engendre des pressions interstitielles qui réduisent les contraintes effectives, tandis que les particules argileuses, initialement responsables d'une partie de la cohésion, peuvent subir une déstructuration, voire une liquéfaction partielle en milieu humide. Cette dégradation est particulièrement marquée pour les briques non stabilisées, qui peuvent aller jusqu'à se désintégrer complètement au contact de l'eau.

À l'inverse, la stabilisation permet de préserver l'intégrité physique des briques même en condition saturée, ce qui constitue un avantage majeur en termes de durabilité. L'évaluation de cette durabilité repose notamment sur le rapport entre la résistance en condition saturée et la résistance à l'état sec, respectivement notées $f_{c,s}$ et $f_{c,d}$. Pour la formulation PC10, ce rapport est de l'ordre de $0,58$, traduisant une bonne résistance à l'eau. Dans le cas du ciment recyclé (RC10), ce ratio est plus faible, autour de $0,38$, ce qui indique une sensibilité plus importante à l'humidité. Néanmoins, cette valeur reste supérieure au seuil minimal de durabilité généralement admis dans la littérature, souvent fixé à $0,33$ selon certaines recommandations techniques, notamment celles de CRATerre.

Dans les travaux de WIOMONT et al. [31] et HEATHCOTE [32], un ratio minimal de $0,33$ est également

retenu pour considérer les briques stabilisées comme durables, en cohérence avec les spécifications issues des recommandations CRATerre. Toutefois, la plage comprise entre $0,33$ et $0,5$ apparaît comme plus adaptée en fonction des conditions d'exposition, notamment en lien avec la sévérité des précipitations locales [32]. Par ailleurs, dans le travail de QUARTO [11], un seuil plus conservatif de $0,5$ est adopté par mesure de sécurité. Ce choix est également retenu dans le cadre du présent travail, étant donné que les briques étudiées sont destinées à un usage structurel, bien qu'elles soient envisagées pour des murs intérieurs non directement exposés aux intempéries.

Enfin, dans une perspective d'optimisation des performances, le travail de MALKANTHI et al. [33] met en œuvre le concept de « particle packing », qui consiste à optimiser la distribution granulométrique afin d'améliorer la compacité du mélange et de réduire les vides. Dans ce cadre, l'étude explore l'incorporation de matériaux recyclés, tels que des granulats issus de déchets de construction ou du béton concassé, en substitution partielle du sol. Ces approches permettent non seulement d'améliorer les performances mécaniques, mais également de valoriser des déchets et de limiter l'exploitation des ressources naturelles. Par exemple, des briques de terre comprimée intégrant des granulats recyclés peuvent atteindre des résistances en compression conformes aux exigences normatives, avec des gains significatifs attribués à l'optimisation granulométrique [33].

2.2.4.3 Briques de béton recyclé comprimées

Plusieurs études récentes s'intéressent au développement de briques comprimées intégrant des matériaux recyclés, notamment en remplacement partiel ou total de la terre. Par exemple, RAYEESULHAQ et al. [10] proposent des briques à base de sol limono-sableux argileux modifié par l'ajout de 10 % de granulats fins de béton recyclé (FRCA) ou de sable de rivière, et stabilisé avec 10 % de ciment Portland. Dans une approche plus poussée, QUARTO [11] développe des briques de béton comprimé composées de 70 % de sables recyclés et 30 % de fines, stabilisées à l'aide d'un ciment de haut fourneau (CEM III/B).

Du point de vue des performances mécaniques, les résultats montrent des résistances en compression élevées et comparables aux matériaux conventionnels. Ainsi, RAYEESULHAQ et al. [10] rapportent des résistances de 13,72 MPa pour les briques contenant du sable naturel, contre 13,38 MPa pour celles intégrant des granulats recyclés, ce qui souligne la pertinence de ces derniers comme alternative viable. De leur côté, QUARTO [11] obtiennent une résistance de 11,6 MPa pour une formulation contenant 30 % de fines. En augmentant la pression de compaction jusqu'à 15 MPa, la résistance dépasse 15,5 MPa, atteignant ainsi des performances supérieures à certains blocs de béton traditionnels.

En termes de durabilité, les résultats sont également encourageants. Les briques étudiées par QUARTO [11] présentent une absorption d'eau d'environ 19 %, valeur cohérente avec celles généralement observées pour les briques comprimées dans la littérature. En revanche, les briques développées par RAYEESULHAQ et al. [10] se distinguent par une absorption nettement plus faible, de l'ordre de 4,4 %, traduisant une compacité plus élevée. Le rapport entre la résistance en condition saturée et à l'état sec constitue également un indicateur clé. RAYEESULHAQ et al. [10] observent une perte de résistance d'environ 35 à 40 % après saturation, tandis que QUARTO [11] obtient une perte de résistance de l'ordre de 40 % après saturation.

Les briques recyclées présentées dans le travail de QUARTO [11] se situent dans une zone de performance intermédiaire entre la terre cuite et le béton, ce qui valide leur potentiel pour des applications

structurelles. Dès 7 jours de cure, elles dépassent le seuil de 6 MPa. À ce stade, leurs performances sont déjà comparables à celles des briques de terre comprimée stabilisées (BTCS). D'un point de vue structurel, de telles résistances permettent d'envisager la construction de bâtiments de type R+2.

Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, en favorisant la valorisation de déchets tels que les sables recyclés ou les fines de lavage, tout en réduisant la pression sur les ressources naturelles, notamment le sable de rivière. Elle constitue ainsi une évolution cohérente des briques de terre comprimée, en conservant les principes de compaction et d'optimisation granulaire, tout en s'appuyant sur des matériaux mieux contrôlés et potentiellement plus performants. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique, en explorant le développement de briques comprimées à base de sables recyclés et de fines de lavage, liées par un liant cimentaire, dans le but d'obtenir un matériau à la fois performant, durable et à faible impact environnemental.

2.3 Comportement des assemblages brique–mortier

2.3.1 La maçonnerie comme matériau composite

Comme décrit précédemment, la maçonnerie constitue un matériau composite. Elle peut ainsi être assimilée à un matériau hétérogène dont les propriétés mécaniques varient en fonction de la direction de sollicitation, notamment en raison de la présence des joints de mortier qui agissent comme des plans de faiblesse. Il n'existe pas de relation simple ou directe entre la résistance des composants isolés (testés séparément en laboratoire) et la résistance finale de la maçonnerie [34] [35]. Le comportement est régi par une interaction complexe qui dépend des propriétés mécaniques et des procédures de production de chaque élément séparément [3].

Le comportement global de la maçonnerie résulte de la contribution de chacun de ses constituants :

- **L'unité (brique)** : Principale responsable de la résistance aux charges de compression [3].
- **Le mortier** : Son rôle est d'assurer la transmission des charges entre les unités, compenser les irrégularités dimensionnelles des briques et garantir l'adhérence [3].
- **L'interface** : Elle est considérée comme le troisième composant. Elle correspond au plan où s'exercent les transferts de contraintes. C'est fréquemment le plan de faiblesse de l'assemblage car elle joue un rôle déterminant pour la transmission des efforts [36].

Une particularité du matériau composite est que sa performance dépend parfois plus de la qualité de l'interaction que de la force du mortier lui-même [37]. Par exemple, un mortier de faible résistance mais ayant développé une excellente adhérence peut produire une maçonnerie plus résistante qu'un mortier mécaniquement plus performant mais présentant une adhérence médiocre. Cela s'explique par le fait que la résistance de la maçonnerie n'est pas linéairement proportionnelle à celle du mortier. Par contre, le travail COSTIGAN et al. [37] conclut que la résistance d'adhérence a un impact plus important sur la résistance à la compression de la maçonnerie que la résistance du mortier.

2.3.2 Formation de l'adhérence brique–mortier

L'adhérence entre la brique et le mortier ne se forme pas instantanément, mais résulte d'un ensemble de phénomènes physiques et chimiques évoluant dans le temps. Elle repose sur des mécanismes de

transport de l'eau et des particules fines du mortier vers la brique, suivis par l'hydratation des liants, qui permettent de créer une liaison durable entre les deux matériaux [38].

Selon SUGO et al. [39], ce processus peut être décrit en plusieurs étapes. Dans un premier temps, le mortier frais entre en contact avec la surface de la brique, ce qui nécessite un bon mouillage pour assurer un contact efficace. Ensuite, la brique, généralement poreuse et non-saturée, exerce une succion capillaire qui entraîne un transfert d'eau du mortier vers la brique. Ce flux s'accompagne du transport de particules fines, ce qui permet de combler les vides à l'interface et d'améliorer la continuité du contact.

Au cours des heures et des jours suivant la mise en œuvre, les réactions d'hydratation du ciment produisent des composés tels que les silicates de calcium hydratés (CSH) et la portlandite ($Ca(OH)_2 = CH$), qui se développent à l'interface et peuvent pénétrer dans la porosité de surface de la brique [39]. Cette interpénétration contribue à renforcer la liaison entre les deux matériaux.

Enfin, à plus long terme, des phénomènes comme la carbonatation contribuent à densifier la zone interfaciale et augmenter la cohésion interne du mortier. La carbonatation est la réaction de la portlandite (CH) avec le CO_2 atmosphérique, formant de la calcite $CaCO_3$ [38].

2.3.3 Paramètres influençant l'adhérence

L'adhérence résulte ainsi de deux mécanismes principaux : un ancrage mécanique et des interactions physico-chimiques. L'ancrage mécanique est lié à la pénétration des produits d'hydratation dans les pores de la brique, créant un effet de verrouillage. De nombreux paramètres relatifs aux propriétés intrinsèques des briques et du mortier, ainsi que les conditions de mise en oeuvre déterminent la qualité de l'adhérence brique–mortier [36].

2.3.3.1 Propriétés de la brique

La nature et l'état de surface de la brique jouent un rôle essentiel dans le développement de l'adhérence avec le mortier. La structure poreuse et en particulier la taille des pores, est déterminante : des pores compris entre 0,1 et 1 μm favorisent la pénétration des produits d'hydratation et améliorent ainsi l'ancrage du mortier [40]. Le taux d'absorption d'eau est également important : une absorption trop élevée peut assécher le mortier trop rapidement et limiter son hydratation, tandis qu'une absorption trop faible limite le transfert d'eau nécessaire à la formation du lien [39]. Enfin, l'état de surface de la brique, notamment sa rugosité, sa mouillabilité ou la présence de traitements, influence directement la qualité du contact avec le mortier et donc l'adhérence [36].

2.3.3.2 Propriétés du mortier

Le mortier doit être capable de céder son eau de manière contrôlée tout en conservant suffisamment de matière pour assurer une liaison efficace avec la brique. La rétention d'eau constitue à ce titre le paramètre le plus influent sur la résistance d'adhérence [38]. Une bonne rétention permet de réguler le transfert d'eau à l'interface et favorise ainsi la formation des produits d'hydratation nécessaires à la cohésion du système [37]. Le volume de pâte et le dosage en liant jouent également un rôle important. Un volume de pâte suffisant est nécessaire pour garantir une continuité de contact à l'échelle macroscopique. L'ajout de chaux hydraulique peut être bénéfique, car il améliore la maniabilité du mortier

et sa capacité de rétention d'eau [39]. Enfin, l'ouvrabilité du mortier, liée notamment à la quantité d'eau de gâchage et au "temps ouvert" (période durant laquelle le mortier reste frais après étalage), est essentielle. Un mortier suffisamment ouvrable permet d'assurer un bon contact avec la brique avant le début de la prise et du séchage, conditions indispensables à la formation d'une interface de qualité [36].

2.3.3.3 Paramètres de mise en oeuvre et géométrie

La manière dont la maçonnerie est mise en œuvre influence directement l'interaction entre la brique et le mortier. Pour les briques présentant un taux de succion initial élevé (IRS supérieur à environ 1,5 kg/m^2/min), une humidification préalable est recommandée afin d'éviter une absorption trop rapide de l'eau du mortier [34]. L'épaisseur du joint, généralement de l'ordre de 10 mm, joue également un rôle important. Elle influence la rigidité et la capacité de déformation de l'assemblage. Dans le cas de briques à haute résistance, une augmentation de cette épaisseur peut entraîner une diminution de la résistance globale du composite [3]. Enfin, la qualité de l'exécution est essentielle. Un remplissage complet des joints et une compression adéquate du mortier lors de la pose permettent d'assurer un contact optimal entre les matériaux, condition nécessaire pour garantir les performances mécaniques de l'assemblage [34].

2.3.3.4 Paramètres externes et cure

Les conditions environnementales lors de la mise en œuvre influencent également le développement de l'adhérence. La température, l'humidité relative et la ventilation affectent la vitesse d'évaporation de l'eau et le déroulement des réactions d'hydratation [36]. Les conditions de cure jouent un rôle déterminant durant les premiers jours. Le maintien d'un environnement humide permet d'éviter un séchage trop rapide du mortier et favorise la formation des produits d'hydratation à l'interface [41].

2.3.4 Comportement en compression

L'interaction entre les constituants du composite engendre un état de contrainte qui n'existe dans aucun des matériaux pris séparément. Lorsqu'un assemblage de maçonnerie est soumis à une compression axiale, la brique et le mortier ne se déforment pas librement de manière indépendante. En raison de l'adhérence à l'interface brique–mortier, la déformation latérale de chaque matériau est partiellement contrainte par l'autre. Cette interaction modifie alors l'état de contrainte interne des constituants et explique pourquoi le comportement en compression d'une maçonnerie ne peut pas être déduit uniquement des propriétés mécaniques de la brique ou du mortier pris séparément.

La nature de ces contraintes dépend notamment du rapport entre le module d'élasticité de la brique, noté E_b, et celui du mortier, noté E_m. Deux situations principales peuvent être distinguées, comme illustré à la Figure 2.11.

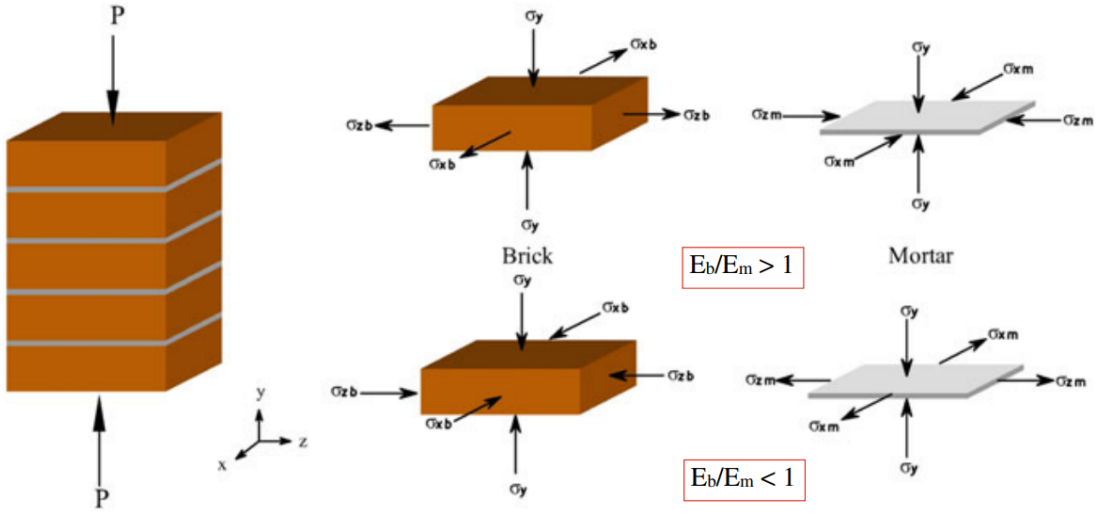


FIGURE 2.11 – Nature des contraintes développées dans la brique et le mortier lorsque la maçonnerie est sollicitée en compression axiale [42]

Lorsque $E_b/E_m > 1$, la brique est plus rigide que le mortier. Sous l'effet de la compression axiale, le mortier tend alors à se dilater latéralement davantage que la brique. Cette dilatation est toutefois limitée par l'adhérence à l'interface brique–mortier, ce qui place le mortier dans un état de compression triaxiale. En réaction, des contraintes de traction latérale apparaissent dans la brique, combinées à la compression axiale appliquée. La brique se retrouve ainsi dans un état de compression–traction biaxiale, qui favorise l'apparition de fissures verticales de fendage.

À l'inverse, lorsque $E_b/E_m < 1$, le mortier est plus rigide que la brique. Dans cette configuration, la brique tend à se déformer latéralement davantage que le joint de mortier. Sa dilatation latérale est alors limitée par le mortier, ce qui modifie la répartition des contraintes au sein de l'assemblage. La brique peut être soumise à un état de compression plus marqué, tandis que le mortier peut développer des contraintes de traction transversale. Le mode de rupture attendu peut donc différer du cas précédent, car l'élément le plus sollicité n'est plus nécessairement le même.

Ce phénomène, propre au comportement composite de la maçonnerie, est à l'origine de l'apparition de fissures de fendage vertical dans les briques, pouvant mener à la rupture de l'assemblage [3, 37].

En compression, plusieurs modes de rupture peuvent être distingués, comme représenté à la Figure 2.12.

- **Écrasement du joint de mortier (Crushing of mortar joint) :** La rupture de la maçonnerie dépend généralement du constituant le plus faible du système brique–mortier. Lorsque le mortier est nettement moins résistant que les briques (par exemple lorsque $f_m < 0{,}4 f_b$), la rupture se produit par écrasement du mortier. Celui-ci se déforme fortement et peut être expulsé du joint avant que les briques ne soient endommagées [3].
- **Fendage transversal des briques (Transverse block's splitting) :** Le mode de rupture le plus fréquent correspond toutefois au fendage transversal des briques. Sous compression, le mortier tend à se dilater latéralement tandis que les briques limitent cette expansion. Cette interaction

génère des contraintes de traction dans les briques, provoquant l'apparition de fissures verticales, même lorsque la charge appliquée reste inférieure à la résistance en compression de la brique seule [3] [37].

- **Écrasement de la brique (Crushing of blocks) :** Enfin, lorsque le mortier présente une rigidité et une résistance très élevées, proches ou supérieures à celles de la brique, l'effet de confinement diminue et la rupture peut se produire directement par écrasement fragile de l'unité de maçonnerie [3].

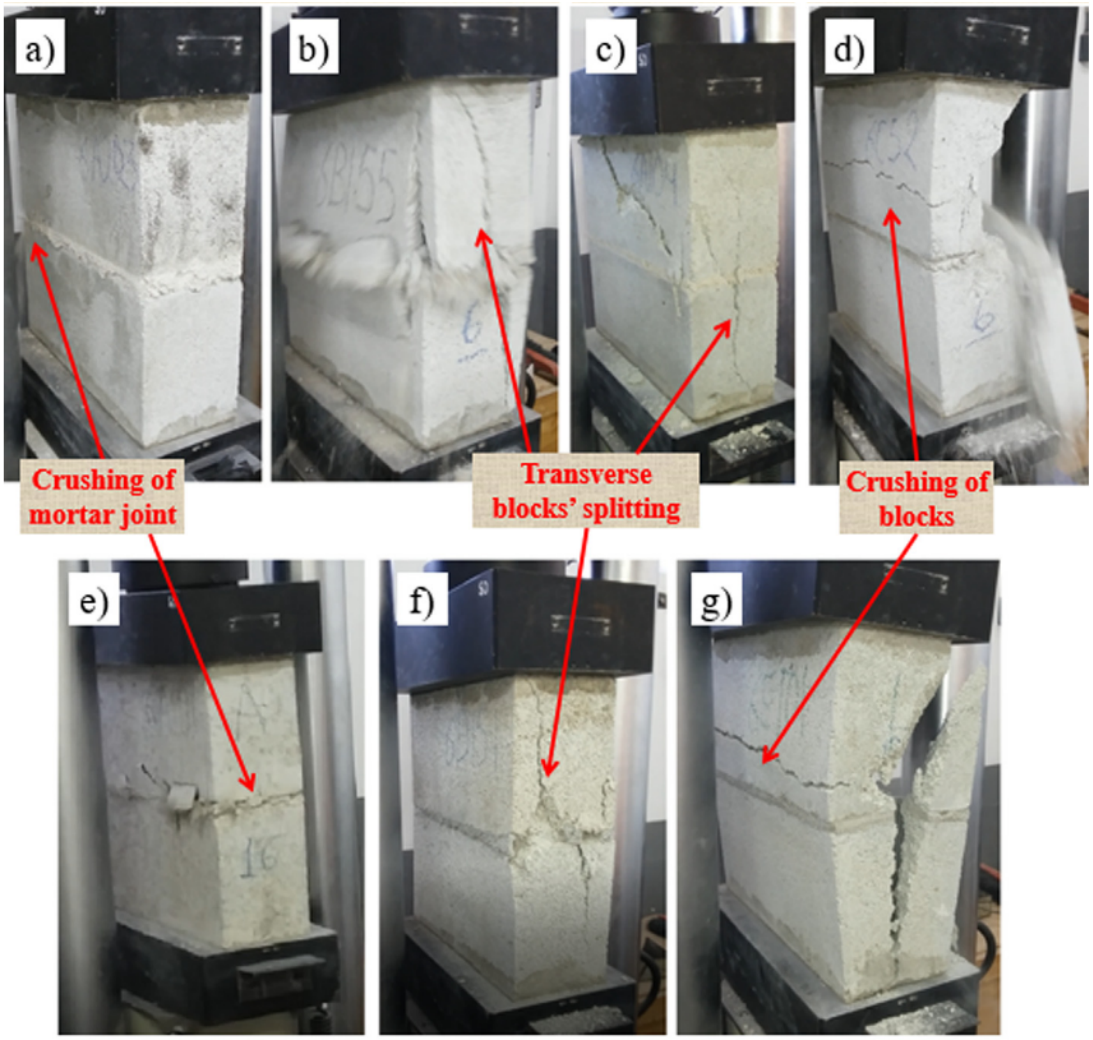


FIGURE 2.12 – Différents modes de rupture en compression [3]

Les différents scénarios présentés à la Figure 2.12 et étudiés par CALDEIRA et al. [3] montrent que le mode de rupture de la maçonnerie dépend principalement du rapport entre la résistance des briques et celle du mortier. Dans les scénarios (a) et (e), où le mortier est nettement plus faible que les briques, la rupture se produit principalement par écrasement du joint de mortier. Dans cette configuration, l'épaisseur du joint joue un rôle important : un joint mince augmente le confinement du mortier et améliore ainsi la résistance globale de l'assemblage. Dans ce cas, une augmentation de l'épaisseur

du joint de 5 à 20 mm peut entraîner une diminution de la résistance globale d'environ 44 %. En effet, plus le joint est mince, plus l'effet de restriction exercé par les surfaces rigides des briques est efficace sur toute l'épaisseur du mortier, augmentant le confinement latéral imposé par les briques, ce qui améliore la rigidité globale de l'assemblage.

Dans les scénarios (c) et (f), correspondant à des résistances plus équilibrées entre les briques et le mortier, la rupture apparaît principalement par fendage vertical des briques sous l'effet des contraintes de traction générées par la déformation latérale du mortier. L'influence de l'épaisseur du joint devient alors plus limitée, car la résistance de l'assemblage est surtout contrôlée par la résistance en traction des briques.

Enfin, dans les scénarios (d) et (g), où le mortier présente une rigidité et une résistance élevées, la rupture se produit directement par écrasement fragile des briques.

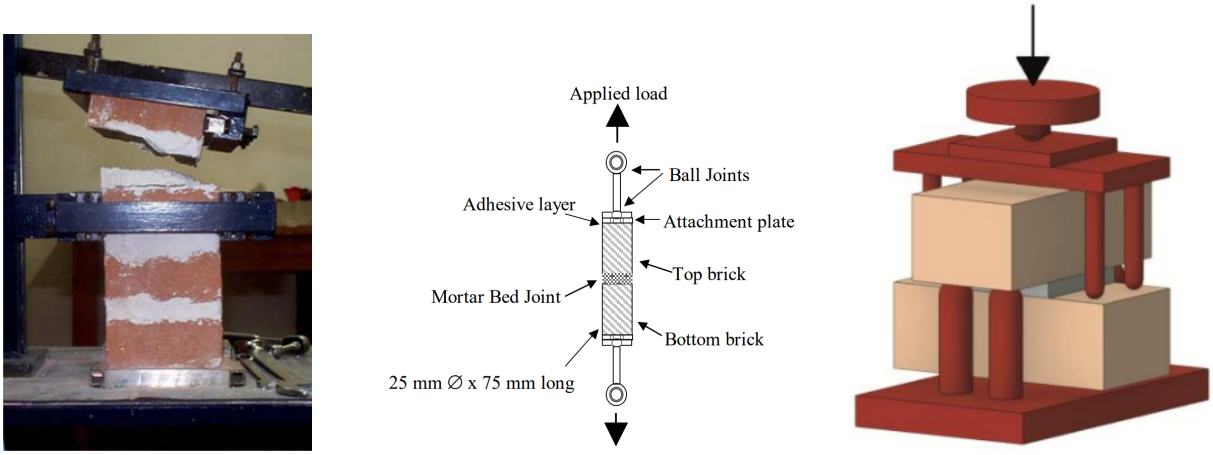
Selon REDDY [42], dans le cas de la maçonnerie en blocs de terre comprimée, la résistance en compression de l'assemblage représente généralement entre 25 et 40 % de la résistance du bloc seul. D'autres études rapportent toutefois des ratios plus élevés, pouvant atteindre 45 à 60 %. Ces valeurs indiquent que la résistance de la maçonnerie reste nettement inférieure à celle des éléments pris isolément, en raison des effets d'interaction entre les blocs, le mortier et les interfaces.

Ce rapport peut néanmoins être plus élevé pour la maçonnerie en terre comprimée que pour la maçonnerie traditionnelle en briques de terre cuite, pour laquelle la résistance de l'assemblage se situe généralement autour de 25 à 35 % de la résistance de la brique seule. Cette différence s'explique notamment par la géométrie des blocs de terre comprimée, souvent plus hauts que les briques traditionnelles. Une hauteur plus importante réduit l'influence relative des joints de mortier et limite donc l'effet de frettage et de perturbation des contraintes à proximité des interfaces. Par conséquent, le comportement de l'assemblage se rapproche davantage de celui du bloc seul, ce qui peut conduire à un ratio de résistance plus élevé.

2.3.5 Comportement en traction

La maçonnerie est un matériau principalement destiné à reprendre des efforts de compression, tandis que sa résistance en traction reste relativement faible [43]. Cette propriété est néanmoins essentielle, car elle contrôle le comportement des ouvrages soumis à des sollicitations hors plan, comme le vent ou les actions sismiques. La résistance en traction dépend fortement de la qualité de l'adhérence entre la brique et le mortier.

L'évaluation expérimentale de cette résistance est toutefois complexe, notamment pour les matériaux poreux ou fragiles. Des essais de traction directe peuvent être réalisés sur des assemblages spécifiques, par exemple à l'aide de carottages traversant l'interface brique–mortier, comme illustré à la Figure 2.13b [39]. Des essais de traction indirecte basés sur la flexion sont également largement utilisés. Le *bond wrench test*, présenté à la Figure 2.13a, permet notamment d'évaluer la résistance d'un joint soumis à un moment de flexion [41]. D'autres méthodes, comme l'essai de traction en croix montré à la Figure 2.13c, permettent de caractériser plus spécifiquement la liaison brique–mortier. Les essais de flexion sur murets sont quant à eux utilisés pour évaluer le comportement global de la maçonnerie hors plan [34]. Les résistances obtenues en flexion sont généralement supérieures à celles mesurées en traction directe, en raison de la répartition non uniforme des contraintes dans l'éprouvette.



(a) Bond wrench test [34] (b) Traction directe [39] (c) Traction en croix [36]

FIGURE 2.13 – Principaux essais utilisés pour caractériser l'adhérence brique–mortier

L'analyse des surfaces de rupture après essai permet également de mieux comprendre l'interaction entre la brique et le mortier. À nouveau, on distingue différents modes de rupture en traction :

- **Rupture cohésive** (Figure 2.14a) : La rupture se produit à l'intérieur du joint de mortier lui-même. Cela indique que l'adhérence à la brique est plus forte que la résistance interne du mortier [39].
- **Rupture adhésive** (Figure 2.14b) : La rupture se produit exactement à l'interface brique-mortier. C'est souvent le cas avec des briques à faible succion ou des mortiers ayant une mauvaise rétention d'eau [39].
- **Rupture dans la brique** : Dans le cas de mortiers très performants (comme les mortiers-colles) associés à des briques de résistance moyenne, la brique peut se casser avant que le joint ou l'interface ne cède [36].

En plus des ruptures adhésive et cohésive, une rupture mixte est également représentée (Figure 2.14c), correspondant à une propagation de fissure alternant entre l'interface et le mortier. La rupture directement dans la brique, pouvant apparaître lorsque l'adhérence est très élevée, n'est toutefois pas représentée sur cette figure. Ces modes de rupture sont représentés par analogie avec les assemblages collés [44].

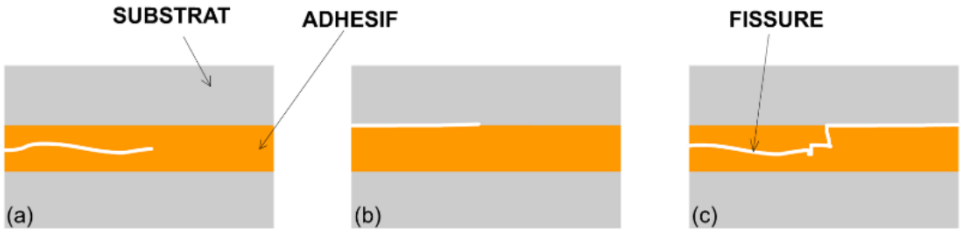


FIGURE 2.14 – Modes de rupture en traction : (a) rupture cohésive, (b) rupture adhésive, (c) rupture mixte

2.3.6 Comportement en cisaillement

La résistance au cisaillement d'un joint de maçonnerie dépend à la fois de l'adhérence entre la brique et le mortier, de la cohésion initiale du joint et du frottement mobilisé sous l'effet d'une contrainte normale. Ainsi, lorsque le joint est soumis à une compression perpendiculaire à son plan, sa résistance au cisaillement augmente en raison du frottement entre les surfaces en contact [43]. Ce comportement est généralement décrit par une loi de type Mohr–Coulomb :

$$f_{vk} = f_{vk0} + \mu \sigma_d \tag{2.1}$$

où f_{vk} est la résistance au cisaillement, f_{vk0} la résistance initiale au cisaillement en l'absence de précompression, μ le coefficient de frottement interne et σ_d la contrainte normale appliquée perpendiculairement au joint.

Dans cette approche, la résistance initiale f_{vk0} représente la contribution de l'adhérence et de la cohésion du joint, tandis que le terme $\mu \sigma_d$ traduit l'augmentation de la résistance liée au frottement.

L'évaluation expérimentale de cette résistance peut notamment être réalisée au moyen d'essais de cisaillement sur assemblages en triplets, comme illustré à la Figure 2.15. Ces éprouvettes sont constituées de trois éléments de maçonnerie reliés par deux joints de mortier. Une contrainte normale est appliquée perpendiculairement aux joints, tandis qu'un effort horizontal est exercé sur l'élément central afin de mobiliser le cisaillement au niveau des interfaces brique–mortier.

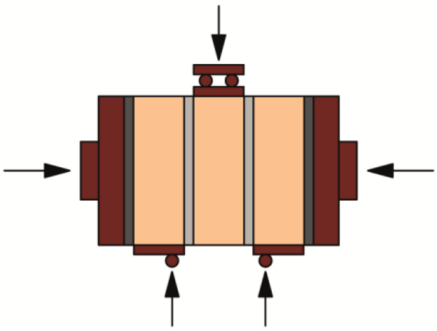


FIGURE 2.15 – Essai de cisaillement sur assemblage en triplet pour caractériser l'adhérence brique–mortier

Ce type d'essai permet d'étudier l'influence de la précompression sur la résistance au cisaillement du joint. Lorsque plusieurs niveaux de contrainte normale sont appliqués, les résultats peuvent être interprétés à l'aide de la loi de Mohr–Coulomb (2.1). La cohésion initiale du joint correspond alors à l'ordonnée à l'origine de la relation entre la contrainte de cisaillement maximale et la contrainte normale appliquée, tandis que le coefficient de frottement correspond à la pente de cette relation.

L'interprétation des résultats ne peut toutefois pas se limiter à la valeur de la force maximale atteinte. Comme pour les essais de traction, l'observation du mode de rupture est essentielle afin d'identifier le mécanisme réellement sollicité.

Chapitre 3

Objectifs de recherche et méthodologie

3.1 Objectifs et portée de la recherche

Ce travail s'inscrit dans la continuité du travail de fin d'études de QUARTO [11], consacré au développement de briques de béton comprimées à base de sable recyclé, de fines de lavage, de ciment et d'eau. Ces briques sont reprises comme éléments de base afin d'étudier leur association avec un mortier de maçonnerie bas-carbone développé dans le cadre de ce travail.

L'objectif principal est de caractériser le comportement mécanique d'assemblages brique–mortier réalisés à partir de matériaux à impact environnemental réduit. L'étude vise à évaluer l'influence de la composition du mortier sur les performances des assemblages, en particulier en compression, en traction directe et en cisaillement. Les résultats obtenus sont également comparés à des ordres de grandeur issus de la pratique ou de la littérature, afin de situer le comportement des assemblages développés par rapport à des maçonneries plus classiques.

La recherche porte donc à la fois sur le développement d'un mortier compatible avec les briques comprimées et sur l'analyse du comportement de l'interface brique–mortier qui constitue un point essentiel pour la résistance.

La portée de ce travail reste expérimentale. Le nombre d'échantillons est limité et certains protocoles sont adaptés aux moyens disponibles au laboratoire. Les résultats ne permettent donc pas d'établir une validation normative complète. Ils permettent toutefois de dégager des tendances, d'identifier les paramètres influençant le comportement des assemblages et d'ouvrir des pistes pour la décarbonation de la maçonnerie, notamment par l'utilisation de matériaux recyclés et par la réduction de la teneur en ciment des mortiers.

3.2 Méthodologie

La méthodologie repose sur une démarche expérimentale progressive. Les matériaux utilisés sont d'abord présentés et caractérisés afin de disposer des données nécessaires à la formulation des briques et des mortiers. Les propriétés étudiées concernent notamment la granulométrie, la masse volumique, l'absorption d'eau et la teneur en eau des constituants.

Les briques comprimées sont ensuite fabriquées à partir de la composition développée par QUARTO [11]. Le travail porte principalement sur leur production à l'aide d'une presse manuelle et sur la vérification de leur reproductibilité. Leur comportement est caractérisé par des mesures de masse volumique, des essais de compression et une étude de l'influence de leur état hydrique.

Le mortier bas-carbone est développé à travers plusieurs campagnes de formulation. Celles-ci visent à obtenir un mortier suffisamment ouvrable pour être mis en œuvre lors de la fabrication des assemblages, tout en limitant la teneur en ciment et en valorisant du sable recyclé ainsi que des fines de lavage. Les mortiers sont caractérisés à l'état frais par leur consistance, puis à l'état durci par des essais de flexion et de compression.

Deux compositions finales de mortier sont retenues. Elles présentent une consistance similaire, mais des rapports E/C, des teneurs en ciment et des résistances mécaniques différentes. Ces deux mortiers sont ensuite utilisés pour fabriquer les assemblages brique–mortier, de manière à étudier l'influence du mortier sur leur comportement.

Les assemblages sont caractérisés par trois types d'essais mécaniques : compression, traction directe et cisaillement. Ces essais permettent d'évaluer à la fois la résistance globale des assemblages et la qualité de l'adhérence à l'interface brique–mortier. Un essai complémentaire de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées est également réalisé afin d'observer les échanges hydriques susceptibles d'influencer la formation de cette adhérence.

Les résultats obtenus sont ensuite analysés et comparés entre les deux mortiers retenus, puis mis en perspective avec des valeurs de référence lorsque cela est possible. Cette approche permet d'évaluer le potentiel des assemblages développés et d'identifier les limites ainsi que les pistes d'amélioration du système brique–mortier étudié.

Chapitre 4

Programme expérimental

4.1 Matériaux

4.1.1 Ciment CEM III/B 32,5 N

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est, à l'instar du travail de QUARTO [11], un ciment CEM III/B 32,5 N. Il s'agit d'un ciment de haut-fourneau fourni par la société Heidelberg Materials. La désignation CEM III/B indique qu'il s'agit d'un ciment composé contenant une proportion importante de laitier granulé de haut-fourneau. Selon la classification des ciments courants, ce type de ciment est généralement constitué de 66 à 80 % de laitier et de 20 à 34 % de clinker Portland, auxquels peuvent s'ajouter jusqu'à 5 % de constituants secondaires. La classe $32,5N$ correspond à la classe de résistance normalisée du ciment, tandis que la lettre N indique un développement normal de la résistance à court terme.



FIGURE 4.1 – Ciment CEM III/B utilisé dans les formulations

Les principales caractéristiques du ciment sont les suivantes :

- masse volumique : 3000 kg/m^3 ;
- classe de résistance à la compression à 28 jours : 32,5 N/mm^2 ;
- constituants principaux : clinker Portland (20–34 %), laitier granulé de haut-fourneau (66–80 %) et constituants secondaires (0–5 %).

L'utilisation d'un CEM III/B, contenant une proportion élevée de laitier de haut-fourneau en substitution du clinker, permet donc de réduire l'empreinte carbone du liant par rapport à un ciment Portland de type CEM I. Il convient toutefois de noter que les ciments à forte teneur en laitier, comme les CEM III/B, présentent généralement une cinétique d'hydratation plus lente que les ciments Portland classiques. Le développement des résistances mécaniques est donc souvent plus progressif, avec des performances à court terme plus faibles, mais une contribution plus marquée aux âges plus avancés.

4.1.2 Sable naturel BUIR 0/2

Le premier sable utilisé est un sable naturel BUIR 0/2 fourni par la société *Eloy*. Il s'agit d'un sable de rivière, utilisé initialement comme sable de référence dans le cadre du développement des mortiers. Par rapport aux sables recyclés étudiés dans ce travail, ce matériau présente a priori une empreinte environnementale plus importante, notamment en raison de son origine naturelle et de l'extraction de ressources primaires. Afin de caractériser ce matériau et de disposer de données comparables avec celles des sables recyclés, des essais de granulométrie et d'absorption d'eau ont été réalisés.



FIGURE 4.2 – Sable naturel utilisé pour les formulations

4.1.3 Sable mixte recyclé : SMR 0/2

Le second sable utilisé est un sable mixte recyclé non lavé fourni par la société *Satea Wanty*. Il provient du traitement de déchets mixtes issus du secteur de la construction, dont le processus de production a été décrit précédemment dans ce travail. Le caractère non lavé de ce sable constitue un élément important à souligner. En effet, en raison de son mode de production, le matériau peut contenir de petites impuretés ou des résidus non minéraux provenant des déchets de construction traités. Ces éléments sont directement liés à l'origine hétérogène du matériau recyclé et peuvent influencer certaines de ses propriétés, notamment sa granulométrie, sa teneur en fines ou encore son absorption d'eau. Les mêmes essais de caractérisation que pour le sable naturel ont été réalisés.



FIGURE 4.3 – Sable mixte recyclé non lavé utilisé pour les formulations

4.1.4 Sable de béton recyclé : SBR 0/4

Le troisième sable utilisé est un sable de béton recyclé et lavé, également fourni par la société *Satea Wanty*. Il provient du traitement de déchets de béton issus du secteur de la construction, dont le processus de production a été décrit précédemment dans ce travail. Contrairement au sable mixte recyclé, ce matériau est principalement composé de béton concassé.
Ce sable présente une granulométrie allant jusqu'à un diamètre maximal de $4\,mm$. Sa composition est donc essentiellement constituée de granulats naturels issus du béton d'origine, mais également de résidus de pâte cimentaire adhérente aux grains. Cette pâte cimentaire résiduelle constitue une caractéristique importante des granulats recyclés de béton, car elle peut influencer certaines propriétés du sable, notamment sa porosité, son absorption d'eau et sa demande en eau lors de la formulation des mortiers. Les mêmes essais de caractérisation que pour les autres sables ont été réalisés.



FIGURE 4.4 – Sable de béton recyclé utilisé pour les formulations

4.1.5 Fines de lavage



(a) Fines de lavage livrées sous forme de galets compacts en *big bag*



(b) Fines de lavage après humidification préalable

FIGURE 4.5 – Fines de lavage utilisées pour la fabrication des briques et des mortiers

Les fines de lavage utilisées dans ce travail ont également été fournies par la société *Satea Wanty*. Elles proviennent du processus de lavage d'un mélange terre–cailloux issu de déchets inertes. Ce lavage permet de séparer et de revaloriser les fractions granulaires récupérées. Les particules les plus fines sont entraînées avec l'eau de lavage et constituent une fraction plus difficile à valoriser. À l'heure actuelle, leur évacuation représente donc un coût important, en raison de l'absence de filière de valorisation clairement établie.

Après le lavage, les fines humides sont dirigées vers un filtre-presse. Cette étape permet d'extraire une partie de l'eau contenue dans le matériau et conduit à la formation de galets compacts, arrondis et durcis. Ces galets arrivent ensuite au laboratoire, fragmentés et conditionnés en *big bag*, comme illustré à la Figure 4.5a. En l'état, ils ne peuvent pas être incorporés directement dans les mélanges, car leur compacité et leur dureté empêchent une dispersion homogène dans la matrice cimentaire.

Avant leur utilisation, les fines sont donc préalablement humidifiées avec une quantité d'eau déterminée. Cette étape permet de les désagréger partiellement et de faciliter leur incorporation dans les mélanges de béton et de mortier, comme montré à la Figure 4.5b. Elle permet également de mieux maîtriser leur état hydrique avant le malaxage, ce qui est essentiel puisque ces fines présentent une forte demande en eau.

Des essais de caractérisation avaient déjà été réalisés dans le travail de QUARTO [11]. Les résultats relatifs à la masse volumique, à la demande en eau ainsi qu'à l'analyse granulométrique par granulométrie laser sont considérés comme toujours représentatifs des fines utilisées dans le cadre de ce travail.

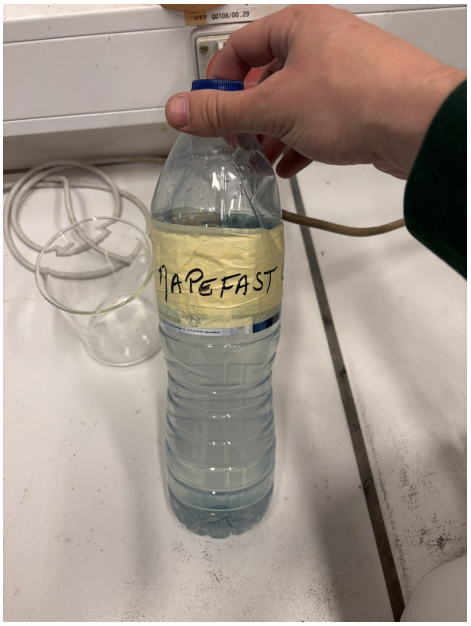
4.1.6 Adjuvants

L'accélérateur de prise *Mapefast CF/L* est utilisé dans certaines formulations développées dans le cadre de ce travail. Il s'agit d'un adjuvant liquide destiné à accélérer le développement des résistances au jeune âge des mélanges cimentaires.

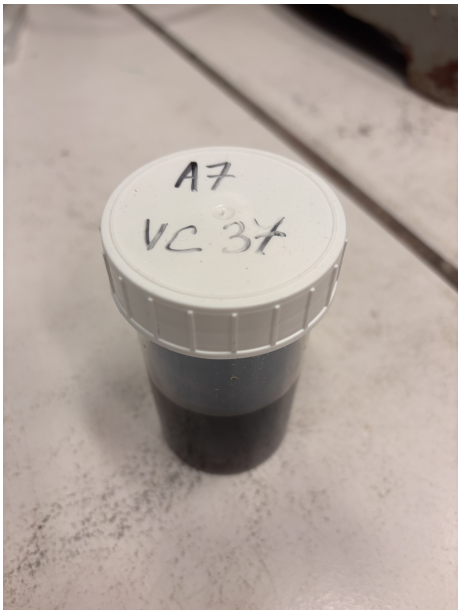
Un superplastifiant *Viscocrete 37* de la gamme Sika a également été utilisé lors de la phase de développement des mortiers. Cet adjuvant a été introduit dans certaines formulations préliminaires afin d'ajuster la consistance du mortier.

Le recours à un superplastifiant permet en principe d'augmenter la fluidité du mélange à rapport eau/ciment constant. Il peut donc constituer une solution intéressante lorsque l'objectif est d'améliorer la maniabilité du mortier sans pénaliser excessivement ses performances mécaniques par un ajout d'eau trop important.

Il convient toutefois de souligner que l'incorporation de tels adjuvants peut avoir une influence sur l'impact environnemental global du mortier. L'influence réelle de ces adjuvants, tant sur les performances mécaniques que sur l'empreinte environnementale du mélange, pourrait faire l'objet d'une étude spécifique afin de justifier plus précisément leur emploi. Le dosage retenu pour l'accélérateur de prise reste néanmoins limité, de l'ordre de 1 % de la masse de ciment.



(a) Accélérateur de prise *Mapefast CF/L*



(b) Superplastifiant *Viscocrete 37*

FIGURE 4.6 – Adjuvants utilisés lors du développement des mortiers

4.1.7 Eau

L'eau utilisée pour la fabrication des mélanges est l'eau de distribution du laboratoire. Conformément à la norme NBN EN 1008 :2002, l'eau potable est considérée comme apte à être utilisée comme eau de gâchage pour les matériaux cimentaires. Aucun traitement particulier ni essai complémentaire n'a donc été réalisé sur cette eau avant son incorporation dans les mélanges.

4.2 Caractérisation des matériaux

4.2.1 Caractérisation des sables

4.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique des sables est réalisée selon le principe de la norme NBN EN 933-1. L'essai consiste à séparer un matériau granulaire en plusieurs classes de dimensions au moyen d'une série de tamis d'ouvertures décroissantes. Il permet ainsi de déterminer la répartition des grains selon leur taille et de construire la courbe granulométrique du matériau.
Avant l'essai, l'échantillon est séché en étuve jusqu'à masse constante. Sa masse sèche initiale est ensuite mesurée et notée M_1. Pour les sables étudiés, dont le diamètre maximal est inférieur ou égal à $4\,mm$, la masse minimale de la prise d'essai est de $0,2\,kg$.
L'essai est réalisé en deux étapes. Premièrement, l'échantillon est lavé sur un tamis de $63\,\mu m$ afin d'éliminer les particules fines. Le refus est ensuite récupéré, séché et pesé. Cette masse est notée M_2.



FIGURE 4.7 – Colonne de tamis utilisée pour l'analyse granulométrique des sables

Deuxièmement, le matériau sec est placé dans une colonne de tamis classés du plus grand au plus petit diamètre d'ouverture. Après tamisage, la masse retenue sur chaque tamis est mesurée. Pour chaque tamis i, le pourcentage retenu r_i est calculé par rapport à la masse sèche initiale :

$$r_i[\%] = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \tag{4.1}$$

où R_i est la masse retenue sur le tamis i.

La teneur en fines, correspondant aux particules inférieures à $63\,\mu m$, est calculée par :

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \tag{4.2}$$

où P correspond à la masse récupérée dans le fond de la colonne de tamisage.

La courbe granulométrique est ensuite obtenue à partir des pourcentages passants cumulés. Ceux-ci sont calculés en retranchant à $100\,\%$ les refus cumulés sur les tamis :

$$p_i[\%] = 100 - \sum r_i \tag{4.3}$$

La courbe représente donc, pour chaque ouverture de tamis, le pourcentage de matériau passant correspondant. Elle permet de visualiser la distribution granulométrique du sable et de comparer les trois

sables utilisés dans ce travail.

4.2.1.2 Masse volumique réelle et absorption d'eau

La masse volumique réelle et l'absorption d'eau des sables sont déterminées à l'aide d'un pycnomètre, selon le principe de la norme NBN EN 1097-6.

Avant l'essai, les échantillons sont lavés puis séchés. La méthode utilisée dépend de la dimension des granulats. Pour les sables étudiés dans ce travail, dont les grains sont inférieurs à $4\,mm$, l'essai est réalisé selon la méthode adaptée aux granulats fins. La masse minimale de l'échantillon est alors de $1\,kg$.

La masse du pycnomètre rempli d'eau, sans sable, est d'abord mesurée et notée M_3. L'échantillon de sable est ensuite introduit dans le pycnomètre, qui est à nouveau rempli d'eau. L'air occlus est expulsé à l'aide du bouchon en verre, puis l'ensemble est pesé. Cette masse est notée M_2.

L'échantillon est ensuite immergé dans l'eau pendant $24\,h$, à une température de $22 \pm 3\,°C$. Cette étape permet aux grains d'absorber l'eau jusqu'à atteindre un état proche de la saturation. Après cette période, l'eau est retirée et les granulats sont progressivement séchés en surface à l'aide d'un courant d'air chaud produit par un sèche-cheveux placé à environ $30\,cm$ du plateau contenant le sable.



(a) Séchage progressif du sable à l'aide d'un sèche-cheveux



(b) Contrôle de l'état saturé surface sèche à l'aide du cône

FIGURE 4.8 – Détermination de l'état saturé surface sèche des sables

L'objectif est d'obtenir un état dit saturé surface sèche. Dans cet état, les pores accessibles des grains sont remplis d'eau, tandis que leur surface extérieure n'est plus recouverte d'eau libre. Pour vérifier que cet état est atteint, un cône est rempli de sable puis tassé à 25 reprises à l'aide d'un pilon. Le cône est ensuite soulevé verticalement. Si le sable s'affaisse en conservant une forme de pyramide, l'état

saturé surface sèche est considéré comme atteint. La masse de l'échantillon dans cet état est alors mesurée et notée M_1.

Enfin, l'échantillon est séché en étuve à $105\,^{\circ}C$ jusqu'à masse constante, puis pesé. Cette masse sèche est notée M_4.

L'absorption d'eau après $24\,h$ est calculée à partir de la différence entre la masse de l'échantillon à l'état saturé surface sèche et sa masse sèche :

$$WA_{24} = \frac{(M_1 - M_4) \cdot 100}{M_4} \tag{4.4}$$

où WA_{24} représente l'absorption d'eau exprimée en pourcentage, M_1 la masse de l'échantillon saturé surface sèche et M_4 la masse de l'échantillon séché en étuve.

La masse volumique absolue peut ensuite être calculée à partir des différentes pesées réalisées au pycnomètre :

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \tag{4.5}$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau.

Cette valeur correspond au rapport entre la masse de l'échantillon séché en étuve et le volume qu'il occupe dans l'eau, en incluant les pores fermés mais en excluant les pores accessibles à l'eau. Elle permet donc de caractériser la densité réelle du matériau.

L'absorption d'eau constitue un paramètre particulièrement important pour les sables recyclés, car ceux-ci présentent généralement une porosité plus élevée que les sables naturels. Une absorption d'eau importante peut réduire la quantité d'eau réellement disponible dans le mélange, ce qui peut modifier la consistance du mortier ainsi que ses performances à l'état durci.

4.2.1.3 Teneur en eau par séchage en étuve

La teneur en eau des sables est déterminée selon le principe de la norme NBN EN 1097-5. Cet essai permet de mesurer la quantité d'eau présente dans un échantillon de granulat. Cette eau peut se trouver à la surface des grains ou dans les pores accessibles du matériau.

L'essai consiste à peser un échantillon à l'état humide, puis à le sécher en étuve ventilée à une température de $105 \pm 5\,^{\circ}C$ jusqu'à masse constante. La différence de masse entre l'échantillon humide et l'échantillon sec permet alors de déterminer la teneur en eau du matériau.

La masse de l'échantillon humide est d'abord mesurée et notée M_1. L'échantillon est ensuite placé dans une étuve ventilée jusqu'à masse constante. Après séchage, sa masse sèche est mesurée et notée M_2.

La teneur en eau w est calculée par la relation suivante :

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100 \tag{4.6}$$

où W représente la teneur en eau exprimée en pourcentage, M_1 la masse de l'échantillon à l'état humide et M_2 la masse de l'échantillon après séchage.

4.2.2 Caractérisation des fines de lavage

4.2.2.1 Humidification et teneur en eau

Les fines de lavage ne sont pas utilisables de manière optimale à l'état sec, telles qu'elles sont livrées dans le *big bag*. Une étape d'humidification préalable est donc nécessaire avant leur incorporation dans les bétons ou les mortiers.

Dans le travail de QUARTO [11], un protocole spécifique a été mis en place afin de déterminer le rapport eau/fines optimal. Le rapport eau/fines est défini comme le rapport entre la masse d'eau ajoutée E et la masse de fines sèches F :

$$\frac{E}{F} = 0{,}20 \tag{4.7}$$

Cela signifie que la masse d'eau ajoutée correspond à 20 % de la masse de fines sèches. La masse de fines humides F_h correspond alors à la somme de la masse de fines sèches et de la masse d'eau ajoutée. Elle peut donc être exprimée par :

$$F_h = F + E = 1{,}20F \tag{4.8}$$

Ainsi, lorsque la formulation impose une certaine masse de fines humides, la masse de fines sèches à prélever est obtenue en divisant cette masse par 1,20. Les fines sèches représentent donc environ 83,3 % de la masse des fines humidifiées. La masse d'eau à ajouter est ensuite déterminée par différence entre la masse de fines humides visée et la masse de fines sèches prélevée.

La quantité d'eau correspondant au rapport eau/fines visé est ajoutée dans un bac plastique contenant les fines sèches. Ce bac est ensuite fermé et les fines sont laissées au repos pendant 24 h, afin de permettre une répartition progressive de l'eau dans le matériau.

Après cette période, les fines sont mélangées afin d'homogénéiser le contenu du bac. Un échantillon est ensuite prélevé et placé en étuve ventilée pendant 24 h, selon le principe décrit à la section 4.2.1.3. Cette mesure permet de déterminer la teneur en eau réelle des fines au moment de leur utilisation.

Dans ce protocole, l'hypothèse est posée que la teneur en eau des fines reste constante entre le moment de leur humidification et la réalisation du mélange de béton ou de mortier. Cette durée est d'environ 48 h, comprenant les 24 h de repos après humidification et les 24 h nécessaires à la détermination de la teneur en eau par séchage en étuve. Le stockage dans un bac hermétique permet de limiter les pertes d'eau par évaporation et de rendre cette hypothèse acceptable.

4.2.2.2 Masse volumique absolue par pycnomètre à gaz

La masse volumique absolue des fines de lavage n'a pas été déterminée dans le cadre de ce travail. Les résultats issus du travail de QUARTO [11] sont repris, puisque les fines utilisées proviennent du même matériau. Dans ce travail antérieur, la masse volumique absolue a été déterminée par pycnomètre à gaz, selon la norme NBN EN ISO 8130-2. Cette méthode permet de mesurer le volume réel occupé par les particules solides, à l'exclusion des vides intergranulaires. La masse volumique absolue des fines de lavage considérée dans ce travail est donc égale à $2,400\,g/cm^3$.

4.3 Réalisation des briques comprimées

4.3.1 Composition retenue pour les assemblages

La composition des briques comprimées utilisées dans ce travail est reprise du travail de QUARTO [11]. Il s'agit de la composition A8 optimale contenant 30 % de fines de lavage en fraction volumique par rapport à l'ensemble fines–sable. Cette formulation est synthétisée à la Table 4.1 :

Matériau	**Quantité pour** $1\,m^3$ $[kg/m^3]$	**Fraction volumique** [%]
Ciment CEM III/B 32,5 N	180	6
Fines de lavage	428	18
Sable mixte recyclé	1019	41
Eau ajoutée	215	22
Eau totale	346	35
Total	1973	100

TABLE 4.1 – Composition des briques de béton comprimées

L'eau totale correspond à l'ensemble de l'eau présente dans le mélange. Elle comprend l'eau ajoutée lors du gâchage, l'eau absorbée par les constituants ainsi que l'eau déjà contenue dans les matériaux avant le malaxage.

4.3.2 Protocole de fabrication

Pour fabriquer les briques comprimées, une procédure de malaxage précise est suivie afin d'obtenir un mélange homogène avant son introduction dans le moule. La procédure est la suivante :

1. Ajouter le sable et les fines dans le malaxeur ;
2. Malaxer pendant 30 s ;
3. Ajouter la moitié de l'eau ;
4. Malaxer pendant 120 s ;
5. Laisser reposer pendant 120 s ;
6. Ajouter le ciment dans le malaxeur ;
7. Malaxer pendant 30 s ;
8. Ajouter la seconde moitié de l'eau ;
9. Malaxer pendant 90 s.



FIGURE 4.9 – Malaxeur utilisé pour la préparation du mélange des briques comprimées

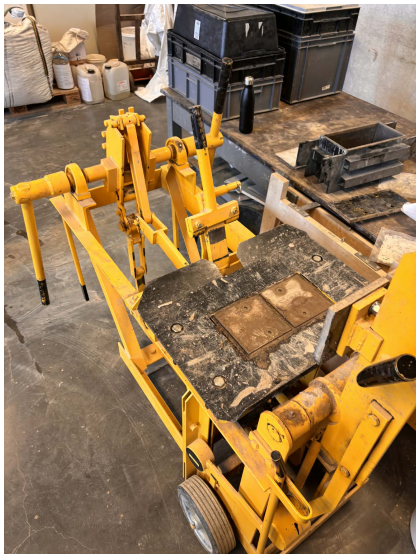
L'ajout de la première moitié de l'eau permet d'humidifier les fines de lavage et le sable recyclé avant l'incorporation du ciment. Le temps de repos favorise ensuite la pénétration progressive de l'eau dans ces matériaux, qui présentent une capacité d'absorption non négligeable. La seconde moitié de l'eau est ajoutée après l'introduction du ciment, afin de permettre son hydratation et de contribuer au développement des résistances mécaniques de la brique.

Une fois cette procédure terminée, le mélange obtenu présente l'aspect illustré à la Figure 4.10a. Au laboratoire, la capacité du malaxeur (Figure 4.9) est de 30 L. Les quantités sont donc adaptées afin de réaliser un mélange correspondant à ce volume. Un tel mélange permet de fabriquer 14 briques comprimées à l'aide de la presse manuelle.

La presse manuelle utilisée est la presse *TERSTARAM*, présentée à la figure 4.10. Cette presse permet de comprimer simultanément deux briques.



(a) Mélange introduit dans le moule avant compaction.



(b) Zone de compaction des briques



(c) Vue générale de la presse manuelle

FIGURE 4.10 – Protocole de fabrication des briques comprimées

Afin d'obtenir des briques correctement compactées et d'exploiter pleinement la force de compaction développée par la presse, une quantité précise de mélange doit être introduite dans chaque moule. Cette masse est fixée à $3,8\,kg$ par moule. Si cette quantité n'est pas respectée, les deux briques produites simultanément peuvent présenter des niveaux de compaction différents. Une brique peut alors être davantage compactée que l'autre, ce qui nuit à l'homogénéité des éléments produits et augmente la variabilité des résultats expérimentaux.

Le remplissage du moule est réalisé en deux étapes. Le mélange est d'abord introduit jusqu'à environ la moitié de la hauteur du moule, puis tassé manuellement afin de libérer un volume suffisant pour incorporer le reste du mélange. Une fois le moule rempli, le bras de levier est actionné jusqu'à atteindre la force de compaction maximale développée par la presse.

Lorsque la masse de mélange introduite dans chaque moule est correctement maîtrisée, les briques obtenues présentent des dimensions d'environ $14 \times 14\,cm$ et une hauteur de $9,5\,cm$. La figure 4.11 illustre, d'une part, l'effet d'une quantité de mélange mal répartie entre les moules et, d'autre part, l'aspect d'une brique correctement comprimée.



(a) Influence d'une quantité de mélange mal répartie



(b) Briques correctement comprimées

FIGURE 4.11 – Briques comprimées obtenues avec la presse manuelle

Après compaction, les briques sont déposées dans des bacs en plastique hermétiques, similaires à ceux utilisés pour maintenir les fines à humidité constante. Elles y sont conservées pendant 28 *jours* afin de permettre leur durcissement.

L'utilisation de bacs hermétiques permet de limiter les échanges d'humidité avec l'extérieur, tout en évitant d'emballer individuellement chaque brique dans un film plastique. Avant la mise en place des briques, les bacs sont rincés à l'eau afin d'humidifier leurs parois et de favoriser une atmosphère humide pendant la période de conservation.

4.3.3 Caractérisation des briques comprimées

4.3.3.1 Brûlage

L'objectif de cet essai est de déterminer la teneur en eau réelle du mélange frais utilisé pour la fabrication des briques. Cette mesure doit être réalisée rapidement, avant que le ciment n'ait le temps de s'hydrater de manière significative au contact de l'eau. Pour cette raison, la teneur en eau est déterminée par brûlage au micro-ondes. Le principe est similaire à celui du séchage en étuve ventilée, mais l'essai présente l'avantage d'être beaucoup plus rapide, avec une durée d'environ $1\,h$ au lieu de $24\,h$.

Dans le travail de QUARTO [11], cette méthode a été utilisée afin d'identifier la teneur en eau optimale des mélanges destinés à la fabrication des briques comprimées. Pour la formulation A8 contenant 30 % de fines de lavage, reprise dans le cadre de ce travail, la teneur en eau optimale mesurée est d'environ 21,5 %. Cette valeur est utilisée comme teneur en eau théorique de référence lors de la préparation des mélanges de briques.

Le mélange frais est déposé sur un plateau préalablement pesé, puis l'ensemble est pesé. Cette masse

est notée M_1. La masse sèche de l'échantillon doit être supérieure à $1\,kg$; une masse de mélange frais comprise entre 1,1 et $1{,}2\,kg$ est donc généralement prélevée. L'ensemble est ensuite placé au micro-ondes pendant environ $1\,h$, jusqu'à masse constante. Après séchage, la masse du plateau contenant le mélange sec est mesurée et notée M_2.

La teneur en eau du mélange frais, notée w, est alors calculée selon l'équation 4.6. La valeur obtenue est comparée à la teneur en eau théorique de référence afin de vérifier que le mélange présente une humidité proche de celle identifiée comme optimale pour la fabrication des briques comprimées.

4.3.3.2 Masse volumique

La masse volumique des briques est déterminée avant et après la cure de 28 jours. Pour chaque brique, la masse ainsi que les dimensions sont mesurées. La masse volumique est ensuite calculée à partir du rapport entre la masse de la brique et son volume apparent :

$$MV\,[kg/m^3] = \frac{m}{L \cdot l \cdot H} \cdot 10^6 \tag{4.9}$$

avec :
MV : masse volumique de la brique $[kg/m^3]$;
m : masse de l'échantillon $[g]$;
$L \cdot l \cdot H$: volume apparent de l'échantillon $[mm^3]$.

Le facteur 10^6 permet de convertir la masse volumique obtenue à partir d'une masse exprimée en grammes et d'un volume exprimé en mm^3 en une masse volumique exprimée en kg/m^3.

4.3.3.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression des briques est déterminée à l'aide d'une presse *Instron 5585* électromécanique. Les essais sont réalisés selon le principe de la norme NBN EN 772-1, relative à la détermination de la résistance à la compression des éléments de maçonnerie.
Avant l'essai, les dimensions de chaque échantillon sont mesurées afin de déterminer la section chargée. Les briques testées présentent toujours une hauteur d'environ $95\,mm$. Selon l'objectif de l'essai, deux formats sont utilisés : les briques entières, de section $140 \times 140\,mm$, et les échantillons découpés, de section approximative $70 \times 70\,mm$. Pour les briques entières, l'essai de compression est réalisé sur une presse ayant une capacité de charge plus importante, capable d'atteindre $65\,t$.



FIGURE 4.12 – Presse *Instron 5585* de 25 t utilisée pour les essais de compression sur briques

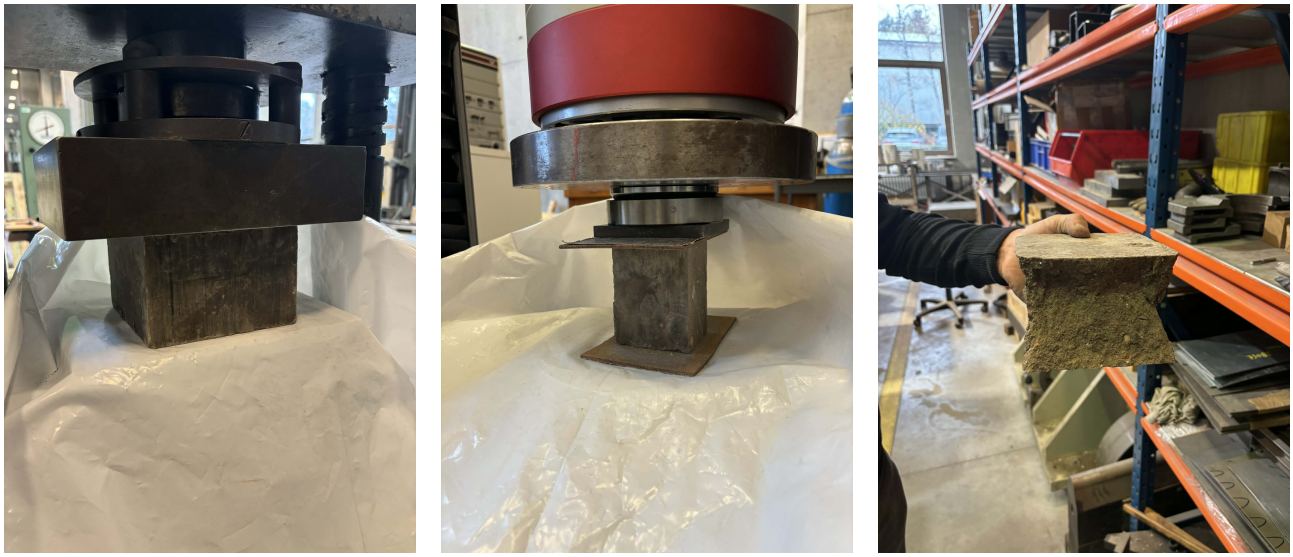
L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux de la presse, avec ses faces horizontales en contact avec les plateaux de chargement. L'effort est appliqué verticalement, de manière aussi centrée que possible, jusqu'à la rupture de l'échantillon. La vitesse de chargement imposée est de $2400 \pm 200 N/s$.

La force maximale F_{max} atteinte au cours de l'essai est relevée. La résistance à la compression R_c est ensuite calculée en divisant cette force maximale par l'aire de la section chargée :

$$R_c = \frac{F_{max}}{A} \tag{4.10}$$

avec :

- R_c : résistance à la compression $[MPa]$;
- F_{max} : force maximale atteinte lors de l'essai $[N]$;
- A : aire de la section chargée $[mm^2]$.



(a) Brique entière comprimée

(b) Brique coupée en quatre comprimée

(c) Faciès de rupture

FIGURE 4.13 – Essais de compression réalisés sur les briques comprimées

À noter que le faciès de rupture visible sur la Figure 4.13c est le même pour une brique entière comprimée ou pour une brique coupée en 4.

Pour tenir compte de l'influence de la géométrie des échantillons sur la résistance en compression mesurée, la norme NBN EN 772-1+A1 ainsi que l'Eurocode 6 définissent un facteur de forme. Ce facteur permet de ramener la résistance mesurée sur un échantillon donné à une résistance équivalente pour un échantillon de référence de dimensions $100 \times 100 \times 100 mm$. Cette résistance corrigée est appelée résistance normalisée, notée f_b et est calculée selon la relation suivante :

$$f_b = f_{mean} \cdot \delta \cdot \delta_c \tag{4.11}$$

avec :
f_b : résistance normalisée $[MPa]$;
f_{mean} : résistance moyenne mesurée sur les échantillons testés $[MPa]$;
δ : facteur de forme tenant compte des dimensions de l'échantillon ;
δ_c : facteur de conditionnement, pris égal à 1 pour les blocs de terre cuite et de béton.

Au vu des dimensions des échantillons testés dans ce travail, et sur base du tableau présenté à l'annexe A, deux facteurs de forme sont retenus :

- échantillons de dimensions $70 \times 70 \times 95\,mm$: $\delta = 1,065$;
- échantillons de dimensions $140 \times 140 \times 95\,mm$: $\delta = 0,9$.

Les résistances moyennes obtenues lors des essais de compression sont donc corrigées à l'aide du facteur de forme correspondant au format d'échantillon considéré. Cette correction est principalement utilisée lorsque des échantillons de dimensions différentes doivent être comparés entre eux, par exemple lors de la représentation des résultats sur un même graphique.

4.4 Développement d'un mortier bas-carbone

4.4.1 Compositions finales retenues pour les assemblages

La Table 4.2 présente les compositions finales retenues pour les assemblages. Celles-ci résultent de plusieurs campagnes d'essais qui sont détaillées dans la section 5.3 consacrée à l'analyse des résultats.

Composition	**E/C** [-]	**Sable** $[kg/m^3]$	**Fines** $[kg/m^3]$	**Ciment** $[kg/m^3]$	**Eau totale** $[kg/m^3]$	**Acc. de prise** $[kg/m^3]$
SMR 0.8 + F	2,3	1211	303	144	578	1,44
SMR 1.8 + F	1,0	1107	277	324	550	3,24

TABLE 4.2 – Compositions des mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage.

La Table 4.3 présente les fractions volumiques associées à ces deux dernières compositions.

Composition	**Sable** [%]	**Fines** [%]	**Ciment** [%]	**Eau totale** [%]	**Total** [%]
SMR 0.8 + F	49,5	12,6	4,8	33,1	100,0
SMR 1.8 + F	45,2	11,5	10,9	32,4	100,0

TABLE 4.3 – Fractions volumiques des mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage.

Les fractions volumiques des trois dernières compositions sont plus proches les unes des autres. Pour ces trois formulations, le rapport volumique entre les fines et le sable est conservé. Les fines représentent ainsi 20 % du volume total de granulats, tandis que le sable en représente 80 %. Le rapport volumique fines/sable est donc maintenu à $1/4$ pour chaque composition.

4.4.2 Protocole de fabrication

Le protocole de fabrication des mortiers est très similaire à celui des briques de béton comprimées, puisque les mêmes matériaux sont utilisés, mais dans des proportions différentes. Les quantités préparées pour les mortiers étant nettement plus faibles que pour les briques, le mélange est réalisé dans un petit malaxeur *Hobart*. Celui-ci permet d'atteindre une vitesse de rotation plus élevée et donc de désagréger partiellement les fines avant l'incorporation des autres constituants, afin de limiter la présence de gros agglomérats.

Les étapes de fabrication sont les suivantes :

1. Ajouter les fines dans le malaxeur ;
2. Malaxer pendant 30 s sur la vitesse 2 ;
3. Ajouter le sable dans le malaxeur ;
4. Malaxer pendant 30 s ;
5. Ajouter la moitié de l'eau ;
6. Malaxer pendant 120 s ;
7. Laisser reposer pendant 120 s ;
8. Ajouter le ciment dans le malaxeur ;
9. Malaxer pendant 30 s ;
10. Ajouter la seconde moitié de l'eau ;
11. Malaxer pendant 90 s.



(a) Malaxeur *Hobart* utilisé pour la préparation des mortiers



(b) Fines de lavage avant l'étape 1



(c) Fines de lavage après l'étape 2

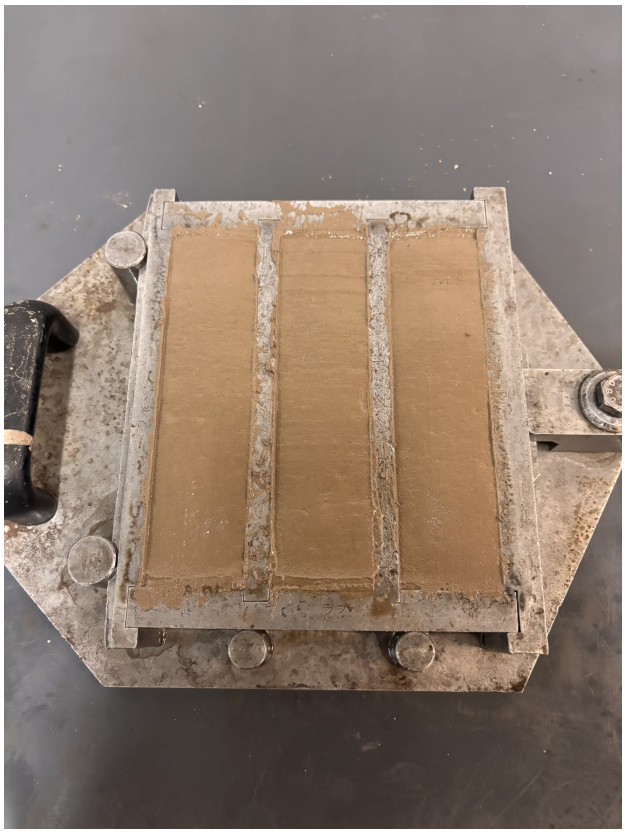
FIGURE 4.14 – Malaxeur et préparation préalable des fines de lavage pour la fabrication des mortiers

Une fois le malaxage terminé, l'essai de consistance est réalisé sur une table à secousses selon la norme NBN EN 1015-3, comme présenté à la section 4.4.3.2.

Le mortier est ensuite placé dans le moule permettant de réaliser les trois barrettes selon la norme NBN EN 196-1. Le mélange est compacté dans le fond du moule à l'aide de l'appareil de compactage,

à raison de 60 coups. Une fois le mortier correctement tassé, l'excédent est retiré à l'aide d'une latte métallique. La surface est ensuite lissée afin de limiter la présence de bulles d'air en surface.

Trois barrettes sont alors obtenues, comme illustré à la figure 4.15a. Une feuille plastique est ensuite placée sur le moule afin de limiter l'évaporation de l'eau pendant le début de la cure. Le moule est placé en chambre humide pendant 24 h. Après cette période, les barrettes ont suffisamment durci pour être démoulées, comme présenté à la figure 4.15b. Elles sont ensuite directement replacées dans un bac en plastique rempli d'eau jusqu'aux échéances de 7 et 28 *jours*, avant d'être testées en flexion selon la section 4.4.3.3, puis en compression selon la section 4.4.3.4. Leur cure est donc réalisée entièrement sous eau après démoulage.



(a) Barrettes de mortier SMR 1,8 + F (6) à l'état frais dans le moule



(b) Barrettes de mortier SMR 1,8 + F (6) après démoulage

FIGURE 4.15 – Fabrication et démoulage des barrettes de mortier SMR 1,8 + F (6)

4.4.3 Caractérisation des mortiers

4.4.3.1 Masse volumique

La masse volumique des barrettes de mortier est déterminée avant les essais de compression et flexion à 7 jours. Chaque barrette fait sa cure dans l'eau donc elle est simplement épongée avant d'être pesée. Les dimensions sont mesurées. La masse volumique est ensuite calculée à partir du rapport entre la

masse de la barrette et son volume apparent, comme cela a été réalisé pour les briques à la section 4.3.3.2.

4.4.3.2 Consistance du mortier frais à la table à secousses

La consistance du mortier frais est déterminée à l'aide de la table à secousses, selon le principe de la norme NBN EN 1015-3. Cet essai permet d'évaluer l'ouvrabilité du mortier à l'état frais en mesurant son étalement après application d'un nombre défini de secousses.

Dans le cadre de ce travail, l'étalement cible est fixé à $140 \pm 10\,mm$. Cette plage est retenue afin d'obtenir un mortier suffisamment ouvrable pour être appliqué facilement lors de la réalisation des assemblages brique–mortier, tout en conservant une cohésion suffisante.

L'essai est réalisé sur un prélèvement de mortier frais. Le mortier est introduit dans un moule tronconique placé au centre du plateau de la table à secousses. Le moule est rempli en deux couches successives. Chaque couche est compactée par au moins 10 coups brefs de dame afin d'assurer une mise en place homogène du mortier dans le moule et la surface supérieure est ensuite arasée.

Ensuite, le moule est soulevé lentement et verticalement et la table à secousses est actionnée afin d'appliquer 15 secousses à une fréquence d'une secousse par seconde. Sous l'effet de ces secousses, le mortier s'étale sur le plateau.



(a) Mortier avant application des 15 secousses

(b) Mortier après application des 15 secousses

(c) Mesure de l'étalement du mortier

FIGURE 4.16 – Essai de consistance du mortier frais à la table à secousses

L'étalement est déterminé en mesurant le diamètre de la galette de mortier dans deux directions perpendiculaires (Figure 4.16c). Conformément à la version actuelle de la norme, le résultat de l'essai correspond à la moyenne de ces deux mesures, exprimée au millimètre près :

$$E = \frac{d_1 + d_2}{2} \tag{4.12}$$

Avec : E : étalement moyen du mortier $[mm]$;

d_1 : premier diamètre mesuré $[mm]$;
d_2 : second diamètre mesuré, perpendiculaire au premier $[mm]$.

L'essai est réalisé pour chaque composition de mortier afin de vérifier que la consistance obtenue se situe dans la plage visée. Lorsque l'étalement mesuré est inférieur à la plage cible, le mortier est considéré comme trop ferme pour l'application recherchée. À l'inverse, un étalement trop élevé indique un mortier trop fluide, susceptible de perdre en cohésion lors de la mise en œuvre.

4.4.3.3 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion du mortier durci est déterminée selon le principe de la norme NBN EN 196-1. L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160\,mm$, préparées selon le protocole présenté à la section 4.4.2.
Dans le cadre de ce travail, l'essai de flexion est réalisé à 7 *jours*. Cette échéance permet de rompre la barrette en deux parties, afin de tester une moitié en compression à 7 *jours* et de conserver l'autre moitié pour un essai de compression à 28 *jours*. Les barrettes sont sorties de l'eau peu avant l'essai, puis positionnées sur les deux appuis de la machine d'essai. Le chargement est appliqué au centre de l'éprouvette, selon un essai de flexion en trois points, jusqu'à la rupture (Figure 4.17). La vitesse de chargement utilisée est de $3000\,N/min$, soit $50\,N/s$.



FIGURE 4.17 – Essai de flexion en trois points sur une barrette de mortier

La résistance à la flexion f est calculée à partir de la charge maximale appliquée lors de l'essai :

$$f = 1{,}5\frac{Fl}{bd^2} \tag{4.13}$$

avec :
f : résistance à la flexion $[MPa]$;
F : charge maximale appliquée en flexion $[N]$;
l : distance entre les appuis $[mm]$;
b : largeur de l'éprouvette $[mm]$;
d : hauteur de l'éprouvette $[mm]$.

Après l'essai de flexion, chaque barrette est rompue en deux demi-prismes. Ces demi-prismes sont ensuite utilisés pour la réalisation des essais de compression.

4.4.3.4 Résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier durci est également déterminée selon le principe de la norme NBN EN 772-1. Contrairement à la flexion, qui est réalisée uniquement à 7 *jours*, les essais de compression sont réalisés à 7 et 28 *jours*.
L'essai de compression est réalisé sur les demi-prismes issus de l'essai de flexion. Chaque demi-prisme est placé entre les plateaux de compression de la machine, de manière à appliquer l'effort sur une surface de contact connue de $40 \times 40\,mm^2$, soit $1600\,mm^2$. La charge est ensuite appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon.
La vitesse de chargement utilisée pour les essais de compression est de $0,2\,MPa/s$. Comme la surface chargée est de $1600\,mm^2$, cette vitesse correspond à une augmentation de charge de $320\,N/s$.



FIGURE 4.18 – Essai de compression sur une barrette de mortier

La résistance à la compression R_c est calculée à partir de la charge maximale atteinte lors de l'essai. Le calcul est réalisé selon l'équation 4.10, également utilisée pour déterminer la résistance à la compression des briques.

Les résultats de compression à 7 *jours* permettent d'évaluer le développement des résistances au jeune âge, tandis que les résultats à 28 *jours* servent de référence pour caractériser les performances mécaniques finales des mortiers étudiés.

4.4.3.5 Essai de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées

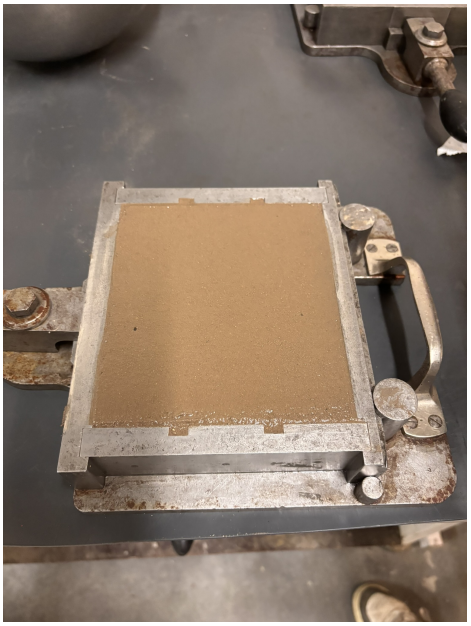
Pour la rétention d'eau des mortiers, il n'existe pas de norme bien spécifique à notre application. Pour cela, une méthode expérimentale a été développée afin de comparer les résultats des essais réalisés entre eux mais pas de les comparer à des valeurs issues directement de la littérature.

Afin d'étudier cette interaction, un essai comparatif de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées est mis en place. Les deux mortiers utilisés pour les assemblages sont étudiés, à savoir :

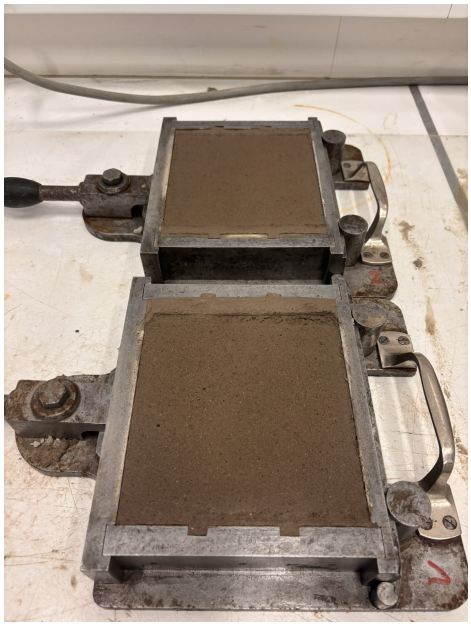
- SMR 0.8 + F
- SMR 1.8 + F

Chaque mortier, à l'état frais, est placé dans un moule séparé, puis une brique comprimée est déposée à sa surface.

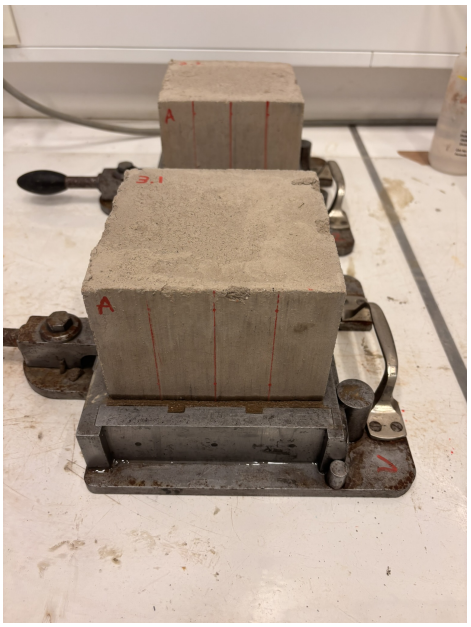
Les briques utilisées pour cet essai proviennent du même mélange à l'état frais et ont subi la même cure. Elles présentent donc une composition, un historique de conservation et un état hydrique initial comparables. Cette précaution permet de limiter l'influence de la variabilité propre aux briques et de concentrer l'analyse sur l'effet du mortier utilisé. La comparaison entre les deux configurations repose ainsi principalement sur la capacité du mortier à conserver son eau ou, au contraire, à la transférer vers la brique.



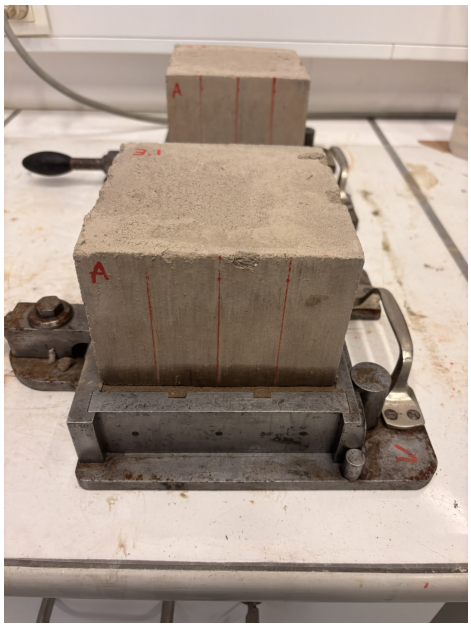
(a) Mortier frais placé dans le moule au début de l'essai



(b) Mortier dans le moule à la fin de l'essai



(c) Brique déposée sur le mortier frais au début de l'essai (5 min)



(d) Brique déposée sur le mortier à la fin de l'essai (480 min)

FIGURE 4.19 – Essai de transfert d'eau entre les mortiers frais et les briques comprimées

L'essai consiste à mesurer l'évolution de la masse de chaque brique après sa mise en contact avec le mortier. Les pesées sont réalisées après 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 420 et 480 min. La durée totale de suivi est donc de 8 h. Le suivi sur 8 h permet de décrire la cinétique d'absorption et de vérifier si la masse tend à se stabiliser ou non après cette durée.

En parallèle des pesées, la hauteur atteinte par l'eau dans la brique est également suivie le long des 3 traits rouges tracés sur chaque face de la brique. Cette observation permet de compléter la mesure de masse en donnant une indication visuelle de la progression du front d'humidification dans la brique.

4.5 Assemblages brique–mortier

Cette section présente le raisonnement suivi pour la réalisation des assemblages brique–mortier, ainsi que les essais de cisaillement, de traction directe et de compression réalisés pour les caractériser.

Deux mortiers différents sont utilisés pour la fabrication des assemblages. L'objectif est d'évaluer si le comportement mécanique des assemblages varie en fonction du mortier employé. Les deux mortiers retenus présentent en effet des résistances différentes ainsi que des rapports E/C distincts. Dans la suite du travail, les assemblages notés avec le numéro 1 correspondent au mortier SMR 0,8 + F (4), tandis que ceux notés avec le numéro 2 correspondent au mortier SMR 1,8 + F (6).

Pour l'essai de cisaillement, deux assemblages sont réalisés avec chaque composition de mortier, soit quatre assemblages au total. Cette configuration nécessite huit briques. Un nombre de trois assemblages par composition aurait permis une meilleure représentativité expérimentale, mais cette option n'a pas été retenue en raison du nombre limité de briques disponibles et du temps nécessaire à leur fabrication.

Pour l'essai de traction directe, deux assemblages sont également réalisés avec chaque mortier. Quatre assemblages sont donc fabriqués au total, nécessitant également huit briques.

Pour l'essai de compression, quatre assemblages sont réalisés, à raison de deux assemblages par composition de mortier. Chaque assemblage étant constitué de trois briques, cet essai nécessite douze briques au total.

Il est important de noter que, pour chaque type d'essai, les briques utilisées proviennent d'un même mélange à l'état frais. Elles ont été fabriquées le même jour et ont suivi une cure identique. Ainsi, les briques utilisées pour les assemblages testés en compression proviennent du même mélange et présentent le même historique de cure. Le même raisonnement est appliqué aux briques utilisées pour les essais de cisaillement et de traction directe. Cette précaution permet de limiter la variabilité liée aux briques et de concentrer l'analyse sur l'influence du mortier et du type de sollicitation.

4.5.1 Protocole de fabrication

Tous les assemblages sont réalisés avec l'aide d'un technicien du laboratoire. Celui-ci possède une dizaine d'années d'expérience en maçonnerie, acquise avant son arrivée au laboratoire des matériaux de l'Université de Liège. L'étape de mise en œuvre du mortier et de maçonnerie des assemblages est donc réalisée par ses soins, afin d'assurer une exécution aussi représentative et régulière que possible.

4.5.1.1 Assemblages brique–mortier pour les essais de cisaillement

Les assemblages destinés aux essais de cisaillement sont réalisés sous forme de doublets brique–mortier. Dans la littérature, les essais de cisaillement sur maçonnerie sont souvent réalisés sur des triplets, pour lesquels les deux briques d'extrémité sont maintenues tandis qu'un effort est appliqué

sur la brique centrale. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas le dispositif capable de réaliser un cisaillement sur un triplet de briques de cette taille. Une configuration plus simple est retenue et les assemblages sont donc constitués de deux carottes de briques séparées par un joint de mortier.

Cette configuration est adaptée à l'utilisation de la boîte de Casagrande disponible au laboratoire. Avant la réalisation des assemblages, les briques sont carottées afin d'obtenir des échantillons cylindriques (Figure 4.20). Le carottage est réalisé avant l'assemblage afin d'éviter d'endommager l'interface brique–mortier après durcissement du joint. Cette précaution permet de préserver la microstructure de l'interface, qui constitue la zone d'intérêt de l'essai.

Les carottes présentent un diamètre de 100 *mm*. La carotte destinée à être placée dans la partie inférieure de la boîte est découpée à une hauteur de 45 *mm*, de manière à positionner le plan de cisaillement au niveau de l'interface brique–mortier lors de l'essai. Les découpes sont réalisées à la scie circulaire sur table et sous eau afin de limiter l'échauffement, la poussière et les dégradations du matériau.



(a) Carottage des briques comprimées



(b) Échantillons cylindriques utilisés pour les assemblages

FIGURE 4.20 – Préparation des carottes cylindriques destinées aux essais de cisaillement

La dernière étape consiste à fabriquer les doublets brique–mortier. Une première carotte est placée sur la table, puis une quantité de mortier frais est étalée sur sa face supérieure. La seconde carotte est ensuite déposée sur le mortier. Une légère pression est appliquée manuellement afin d'obtenir un contact homogène entre les deux carottes et de contrôler l'épaisseur du joint, fixée à 1 *cm*. L'alignement de l'ensemble est vérifié à l'aide d'un mètre afin de limiter les excentricités lors de l'essai de cisaillement. Les assemblages sont ensuite conservés jusqu'à l'âge d'essai prévu. Le mode de cure des assemblages est le même pour tous les assemblages et est détaillé dans la section 4.5.2



(a) Mise en place du joint de mortier frais



(b) Assemblage brique–mortier après cure

FIGURE 4.21 – Préparation des assemblages brique–mortier destinés au cisaillement

Le détail du dispositif de cisaillement, du positionnement des assemblages dans la boîte de Casagrande et de la méthode de chargement sont présentés dans la section 4.5.3.1 consacrée à l'essai de cisaillement.

4.5.1.2 Assemblages brique–mortier pour les essais de traction directe

Pour les essais de traction directe, les assemblages sont également réalisés sous forme de doublets brique–mortier. Dans ce cas, les deux briques sont assemblées au moyen d'un joint de mortier, puis l'ensemble est sollicité en traction perpendiculairement au plan du joint. Le détail du dispositif d'essai et du mode de chargement est présenté à la section 4.5.3.2.

Les plaques métalliques utilisées pour transmettre l'effort de traction présentent des dimensions de $10 \times 10\,cm$. Les briques sont donc préalablement découpées à ces dimensions à l'aide d'une scie circulaire sur table avec coupe à l'eau, afin d'obtenir des éléments cubiques compatibles.

Avant la réalisation des assemblages, les faces des briques sur lesquelles les plaques métalliques sont collées, sont rectifiées. Il s'agit de la face supérieure de la brique supérieure et de la face inférieure de la brique inférieure. Cette étape est réalisée avant la mise en place du joint de mortier afin de ne pas solliciter ni endommager l'interface brique–mortier après durcissement. La rectification permet d'assurer une meilleure planéité des surfaces de collage et de limiter les excentricités lors de l'essai de traction.

Pour vérifier que l'ensemble de la surface est bien rectifié, des traces de craie sont appliquées avant rectification ; celles-ci doivent disparaître après l'opération. Les faces en contact avec le joint de mortier ne sont pas rectifiées. Cette précaution permet de ne pas modifier l'état de surface au niveau de

l'interface brique–mortier, qui constitue la zone d'intérêt de l'essai. Une rectification de ces faces pourrait en effet influencer la formation de l'adhérence et perturber l'interprétation des résultats.

La fabrication des doublets est ensuite réalisée de manière similaire aux assemblages destinés au cisaillement, à la différence que les éléments sont ici cubiques et non cylindriques. Une première brique découpée et rectifiée est placée sur une surface plane, face non rectifiée vers le haut. Une quantité de mortier frais est alors étalée sur cette face afin de former le joint. La seconde brique est ensuite déposée sur le mortier, face non rectifiée vers le bas. Une légère pression est appliquée manuellement afin d'obtenir un contact homogène et un joint d'épaisseur contrôlée, fixé à 1 *cm*. Cette étape est illustrée à la Figure 4.22a.



(a) Mise en place du joint de mortier frais



(b) Assemblage brique–mortier après cure

FIGURE 4.22 – Préparation des assemblages brique–mortier destinés aux essais de traction directe

Après fabrication, les assemblages sont conservés jusqu'à l'âge d'essai prévu. Un assemblage après cure et avant collage des plaques métalliques est présenté à la Figure 4.22b.

En complément des assemblages brique–mortier, des briques seules sont également équipées de plaques métalliques afin d'être testées en traction directe. Ces essais permettent d'obtenir un ordre de grandeur de la résistance en traction propre de la brique. Ils fournissent ainsi des données supplémentaires utiles lorsque la rupture d'un assemblage ne se produit pas au niveau de l'interface brique–mortier.

4.5.1.3 Assemblages brique–mortier pour les essais de compression

Pour les essais de compression, les assemblages sont réalisés sous forme de murets de trois briques de hauteur. Cette configuration permet de représenter plus fidèlement une maçonnerie réelle, en intégrant

à la fois des joints horizontaux et un joint vertical. Les briques sont disposées de manière à obtenir un alignement brique - joint vertical - brique au niveau de l'assise intermédiaire, comme illustré à la Figure 4.23a.

La réalisation d'un assemblage nécessite deux briques entières et une brique coupée en deux. Lors de la découpe, une tranche d'environ $0,5\,cm$ est retirée afin de laisser la place nécessaire à la réalisation d'un joint vertical d'épaisseur $1\,cm$. Les joints de mortier sont ensuite réalisés selon une procédure similaire à celle utilisée pour les assemblages destinés aux essais de cisaillement et de traction directe.

Comme pour les assemblages en traction, les faces des briques qui seront en contact avec les plateaux de la presse sont rectifiées à l'eau avant l'essai.

La fabrication débute par la mise en place d'une première brique entière. Une couche de mortier frais est ensuite étalée sur sa face supérieure afin de former le premier joint horizontal. Les deux demi-briques sont alors positionnées sur ce joint. Du mortier est également appliqué sur les faces verticales en vis-à-vis afin de former le joint vertical. Si la quantité de mortier appliquée initialement ne permet pas de remplir complètement ce joint, du mortier supplémentaire est ajouté dans l'espace restant afin d'obtenir un joint vertical correctement rempli.

Une nouvelle couche de mortier frais est ensuite étalée sur l'assise intermédiaire, puis la troisième brique est déposée au sommet de l'assemblage. L'ensemble est aligné manuellement afin de limiter les défauts géométriques avant la cure.

La réalisation de l'assemblage avec le mortier encore à l'état frais est illustrée à la figure 4.23a, tandis que l'assemblage final après cure est présenté à la figure 4.23b.



(a) Mise en place des joints de mortier à l'état frais



(b) Assemblages brique–mortier après cure

FIGURE 4.23 – Préparation des assemblages brique–mortier destinés aux essais de compression

4.5.2 Cure des assemblages

La cure des assemblages est réalisée dans des bacs en plastique humidifiés, selon un principe similaire à celui utilisé pour la conservation des briques comprimées. Les bacs sont préalablement rincés à l'eau afin d'humidifier leurs parois, puis les assemblages y sont déposés et les bacs sont refermés. Cette méthode permet de limiter les échanges d'humidité avec l'extérieur, sans devoir envelopper individuellement chaque assemblage dans un film plastique.

Les assemblages sont conservés pendant 25 jours dans ces bacs hermétiques, comme illustré à la Figure 4.24. Ils sont ensuite placés pendant 3 jours dans le laboratoire des mortiers, où les conditions de température et d'humidité sont contrôlées. La température y est de 20 °C et l'humidité relative de 60 %. Les assemblages sont donc testés à l'âge de 28 jours.



FIGURE 4.24 – Cure des assemblages brique–mortier dans des bacs en plastique humidifiés

4.5.3 Caractérisation des assemblages

4.5.3.1 Essai de cisaillement

L'essai de cisaillement est réalisé à l'aide d'une boîte de Casagrande adaptée aux dimensions des assemblages cylindriques. La partie inférieure de l'assemblage est placée dans la partie fixe de la boîte, tandis que la partie supérieure est déplacée latéralement. Le plan de cisaillement est ainsi positionné au niveau de l'interface brique–mortier.

Pour réaliser l'essai, une précompression verticale est d'abord appliquée. Celle-ci est indispensable afin de maintenir correctement l'assemblage dans la boîte de Casagrande. La contrainte verticale appliquée est toutefois choisie aussi faible que possible, de manière à limiter son influence sur la résistance au cisaillement mesurée.

Ce choix est lié au critère de cisaillement présenté dans l'état de l'art à l'équation 2.1. La résistance au cisaillement dépend en effet de la cohésion, de la contrainte normale appliquée et du coefficient de frottement interne. En appliquant une précompression minimale, la contribution liée au frottement est réduite, ce qui permet d'obtenir une estimation plus directe de la cohésion de l'interface brique–mortier.

Lors de l'essai, la force latérale appliquée ainsi que les déplacements horizontal et vertical sont enregistrés. Ces mesures permettent de suivre le comportement de l'assemblage jusqu'à la rupture et d'identifier le mode de rupture obtenu. La vitesse de mise en charge est de $1\,mm/min$.



(a) Assemblage positionné dans la boîte de Casagrande



(b) Mise en place de la précompression verticale



(c) Assemblage après rupture en cisaillement

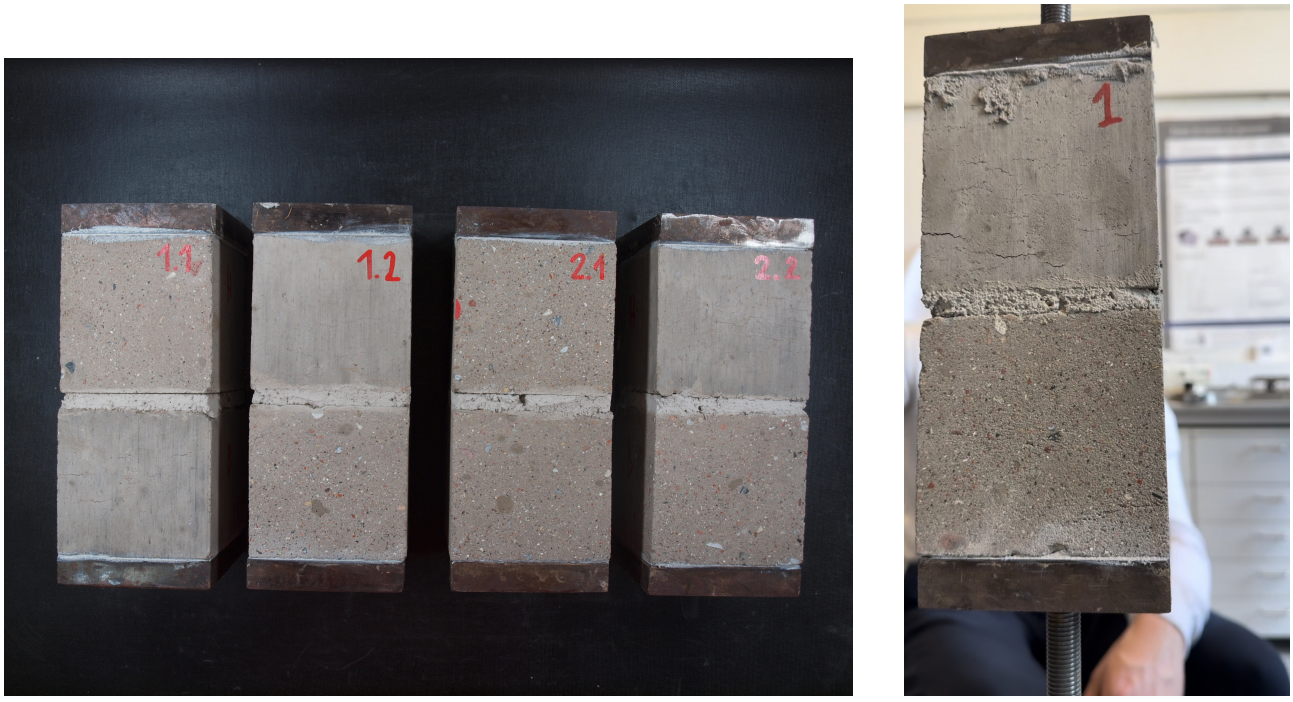
FIGURE 4.25 – Essai de cisaillement des assemblages brique–mortier à la boîte de Casagrande

Le dispositif expérimental est illustré à la Figure 4.25. L'assemblage positionné dans la boîte de Casagrande est montré à la Figure 4.25a, tandis que l'application de la précompression est présentée à la Figure 4.25b. Un exemple d'assemblage après rupture est présenté à la Figure 4.25c. En complément, une carotte de brique seule est également testée en cisaillement afin d'obtenir un ordre de grandeur de la résistance au cisaillement propre du matériau brique.

4.5.3.2 Essai de traction directe

Après la cure des assemblages, les plaques métalliques sont collées sur les faces des briques préalablement rectifiées. Une résine époxy est utilisée en double encollage afin d'assurer une adhérence suffisante entre la plaque métallique et la brique. L'assemblage muni de ses plaques est illustré à la Figure 4.26a. Ces plaques permettent ensuite de transmettre l'effort de traction à l'échantillon lors de l'essai.

L'essai de traction directe est réalisé à l'aide de la presse *Instron 5585*, comme présenté à la Figure 4.26b. L'effort est appliqué perpendiculairement au plan du joint de mortier, jusqu'à la rupture de l'assemblage.



(a) Assemblage muni des plaques métalliques (b) Essai de traction directe

FIGURE 4.26 – Essai de traction directe des assemblages brique–mortier

La méthode utilisée s'inspire de la norme NBN EN 1015-12, relative à la détermination de l'adhérence des mortiers d'enduits durcis appliqués sur des supports. Cette norme ne correspond pas exactement à la configuration étudiée dans ce travail, puisqu'elle prévoit notamment des éprouvettes cylindriques de $50\,mm$ de diamètre. Cependant, elle constitue une référence pertinente, car elle décrit un essai de traction directe destiné à caractériser une adhérence entre un mortier et un support.

Selon cette norme, la vitesse de chargement dépend de l'adhérence attendue. Par sécurité, la vitesse correspondant à la plus faible plage d'adhérence est retenue, soit une adhérence inférieure à $0,2\,MPa$. La vitesse de chargement appliquée est donc de $0,03\,MPa/s$. La norme recommande également que la rupture se produise entre 20 et $60\,s$ après le début de l'essai.

Comme mentionné à la Figure 2.13 dans la revue de littérature, d'autres essais permettent également de caractériser l'adhérence brique–mortier. Cependant, ces dispositifs ne sont pas directement disponibles au laboratoire et leur mise en place n'est pas possible dans le temps imparti pour ce travail. L'essai de traction directe constitue donc la solution expérimentale la plus accessible pour solliciter l'interface brique–mortier en traction.

4.5.3.3 Essai de compression

L'essai de compression est également réalisé sur la presse *Instron 5585*. Contrairement aux essais de compression réalisés sur les briques seules, pour lesquels le pilotage est effectué en contrainte, les essais sur assemblages sont réalisés sous déplacement imposé. La vitesse de déplacement de la presse est fixée à $0{,}01\,mm/s$.
Ce choix de mise en charge est retenu afin de mieux contrôler le déroulement de l'essai et d'observer progressivement le comportement de l'assemblage jusqu'à la rupture. En effet, l'objectif n'est pas uniquement de déterminer une charge maximale, mais également d'identifier le mode de ruine de l'échantillon, la localisation des fissures et l'influence des joints de mortier sur le comportement global de l'assemblage.
L'échantillon est placé entre les plateaux de la presse, de manière à appliquer l'effort verticalement sur les faces rectifiées de l'assemblage, comme représenté à la Figure 4.27. La force appliquée et le déplacement vertical sont enregistrés tout au long de l'essai.



FIGURE 4.27 – Essai de compression des assemblages brique–mortier

Chapitre 5

Analyse des résultats et discussion

Ce chapitre présente l'analyse des résultats obtenus au cours de la campagne expérimentale. L'objectif est d'évaluer progressivement les propriétés des matériaux utilisés, le comportement des briques comprimées, les performances du mortier bas-carbone développé, puis le comportement mécanique des assemblages brique–mortier.

L'analyse suit la même logique que la méthodologie expérimentale. Dans un premier temps, les matériaux de base sont caractérisés afin d'identifier les propriétés susceptibles d'influencer les formulations étudiées.

Dans un deuxième temps, les résultats relatifs aux briques comprimées sont analysés. Cette partie permet d'abord de justifier le choix de la composition retenue pour la fabrication des assemblages. Les briques sont ensuite caractérisées à travers leur résistance à la compression, leur masse volumique et l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux, tels que la taille des échantillons, la variabilité de la presse manuelle et la teneur en eau au moment de l'essai.

La troisième partie est consacrée au développement du mortier bas-carbone. Les différentes campagnes d'essais sont analysées afin de comprendre l'influence du type de sable, de l'ajout de fines de lavage et du rapport eau/liant sur les propriétés du mortier. Les deux compositions finales retenues sont ensuite comparées à travers leur masse volumique, leur consistance à l'état frais, leur résistance à la flexion, leur résistance à la compression et leur comportement à l'état frais au contact des briques comprimées.

Enfin, la dernière partie porte sur les assemblages brique–mortier. Les résultats des essais de cisaillement, de traction directe et de compression sont analysés afin d'évaluer la qualité de l'interface entre les briques et le mortier. Une attention particulière est portée aux modes de rupture observés. Les résultats sont comparés aux sollicitations susceptibles d'être rencontrées dans un cas réel de maçonnerie, afin d'évaluer la pertinence des assemblages étudiés.

5.1 Caractérisation des matériaux

5.1.1 Caractérisation des sables

5.1.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique présentée à la Figure 5.1 met en évidence des différences nettes entre les trois sables étudiés.

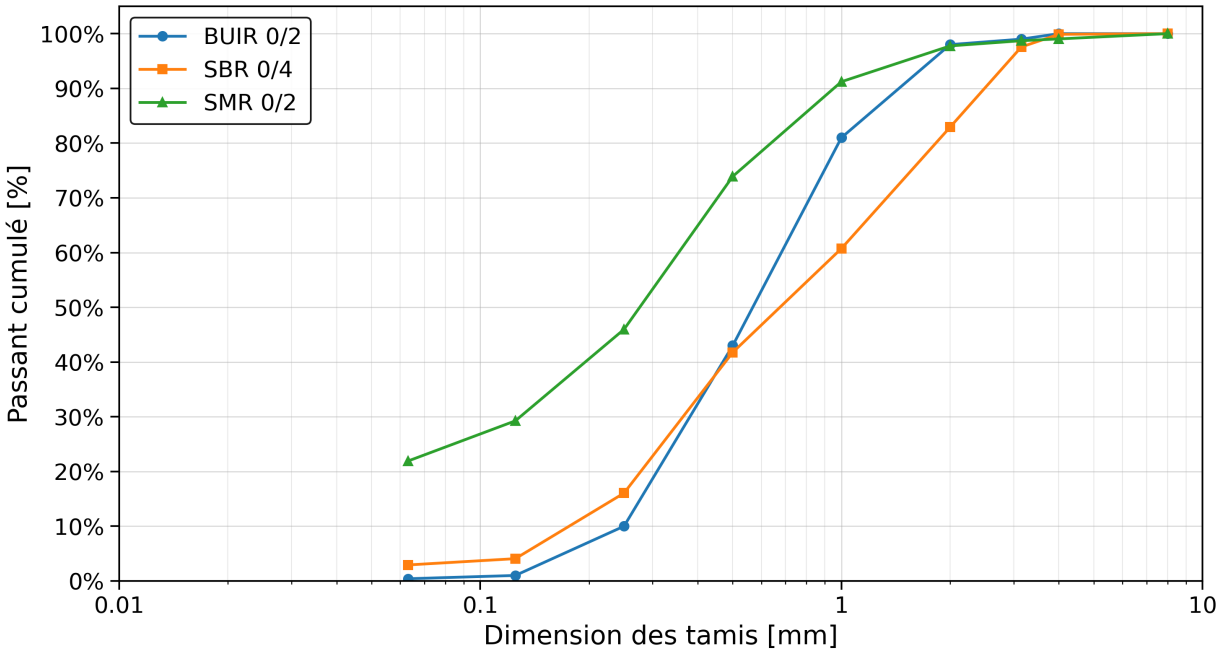


FIGURE 5.1 – Analyse granulométrique des trois sables

Le sable naturel BUIR présente une courbe relativement raide et une très faible teneur en fines. Le passant au tamis de 0,063 *mm* est limité à 0,40 %, ce qui en fait le sable le plus pauvre en particules fines parmi les matériaux étudiés. La montée rapide de la courbe entre les tamis intermédiaires indique qu'une grande partie des grains est concentrée dans une plage granulométrique resserrée. Le BUIR présente donc une granulométrie plutôt uniforme, caractéristique d'un sable naturel lavé.

Le sable de béton recyclé SBR présente une courbe plus progressive et plus étalée. Par rapport au BUIR, il contient davantage de grains grossiers, ce qui se traduit par une augmentation plus régulière du passant jusqu'aux tamis les plus élevés. Sa teneur en fines reste toutefois limitée, avec environ 3 % de passant à 0,063 *mm*. Cette faible proportion de fines est cohérente avec un sable recyclé lavé, dont une partie des particules les plus fines a été éliminée lors du traitement.

Le sable mixte recyclé SMR se distingue nettement par une proportion plus importante de particules fines. Le passant au tamis de 0,063 *mm* atteint environ 22 %, ce qui traduit une fraction fine beaucoup plus marquée que pour les deux autres sables. La courbe reste néanmoins progressive, ce qui indique que le matériau ne se compose pas uniquement de fines, mais présente une distribution continue jusqu'à la fraction sableuse plus grossière. Cette particularité peut être liée à l'origine mixte du

matériau recyclé, aux opérations de concassage et à la présence éventuelle de résidus de mortier, de pâte cimentaire ou de fragments de briques plus friables.

Ainsi, les trois sables présentent des profils granulométriques distincts. Le BUIR est le sable le plus pauvre en fines et le plus uniforme. Le SBR présente une granulométrie plus étalée, avec une fraction grossière plus marquée et une teneur en fines limitée. Le SMR est, quant à lui, nettement plus riche en particules fines. Ces différences sont susceptibles d'influencer la formulation des mortiers, notamment la demande en eau, la consistance à l'état frais, la compacité du squelette granulaire et le comportement mécanique à l'état durci.

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

Les valeurs obtenues sont reprises dans la Table 5.1. La masse volumique considérée correspond ici à la masse volumique absolue des grains.

Sable	**Masse volumique réelle [kg/m^3]**	**Absorption d'eau [%]**
BUIR	2650	0,70
SBR	2300	5,88
SMR	2450	8,07

TABLE 5.1 – Masse volumique réelle et absorption d'eau des sables étudiés

Le sable naturel BUIR présente l'absorption d'eau la plus faible, avec une valeur de 0,70 %, ainsi que la masse volumique réelle la plus élevée, égale à $2650\,kg/m^3$. Ces valeurs sont cohérentes avec un sable naturel peu poreux. À l'inverse, les deux sables recyclés présentent des absorptions nettement plus élevées et des masses volumiques réelles plus faibles, ce qui traduit une porosité plus importante des grains.

Le sable SBR présente une absorption d'eau de 5,88 % et une masse volumique réelle d'environ $2300\,kg/m^3$. Ces valeurs confirment son caractère plus poreux que le sable naturel. Cette porosité plus élevée peut être liée à son origine recyclée, notamment à la présence de particules issues de mortier ou de pâte cimentaire résiduelle.

Le sable SMR présente l'absorption d'eau la plus élevée des trois matériaux, avec une valeur de 8,07 %. Sa masse volumique réelle, égale à environ $2450\,kg/m^3$, reste inférieure à celle du sable naturel, mais supérieure à celle du SBR. Ce comportement montre que le SMR est plus absorbant que les deux autres sables, malgré une masse volumique réelle intermédiaire. Cette forte absorption peut être mise en relation avec sa teneur importante en fines observée lors de l'analyse granulométrique, ainsi qu'avec la nature recyclée du matériau.

Ces différences sont importantes pour la formulation des mortiers. Un sable plus absorbant peut capter une partie de l'eau de gâchage, ce qui réduit l'eau disponible pour la pâte cimentaire et peut modifier la consistance à l'état frais. Les sables recyclés nécessitent donc une attention particulière lors du dosage en eau. Dans le cas du SMR, la combinaison d'une forte absorption d'eau et d'une teneur

élevée en fines est susceptible d'augmenter significativement la demande en eau et d'influencer la maniabilité du mortier.

5.1.1.3 Teneur en eau par séchage en étuve

Sable	Teneur en eau [%]
BUIR	0,94
SBR	1,12
SMR	1,88

TABLE 5.2 – Teneur en eau des sables stockés en *big bag*

Les teneurs en eau des sables stockés en *big bag* sont présentées à la Table 5.2. Les valeurs mesurées restent faibles pour l'ensemble des matériaux, ce qui s'explique par des conditions de stockage peu humides.

Le sable naturel BUIR présente la teneur en eau la plus faible, avec 0,94 %. Le sable de béton recyclé SBR présente une teneur en eau légèrement plus élevée, égale à 1,12 %. Le sable mixte recyclé SMR présente quant à lui la teneur en eau la plus importante, avec 1,88 %.

Ces valeurs montrent que les sables sont utilisés dans un état relativement sec. Elles sont néanmoins prises en compte dans les calculs de formulation afin de distinguer l'eau déjà présente dans les granulats de l'eau effectivement ajoutée lors du malaxage.

5.1.2 Caractérisation des fines recyclées

5.1.2.1 Humidification et teneur en eau

Les paramètres d'humidification des fines utilisées pour un mélange de 30 L, destiné à la fabrication de 14 briques comprimées, sont présentés dans la Table 5.3. La teneur en eau finale est systématiquement vérifiée avant la réalisation du mélange, car les fines humidifiées peuvent perdre une partie de leur humidité lors du stockage, même lorsque celui-ci est réalisé en bac fermé.

Paramètre	Valeur
Rapport E/F	0,20
Volume du mélange	$30\,L$
Fines humides visées	$12{,}84\,kg$
Fines sèches à prélever	$10{,}65\,kg$
Eau à ajouter	$2{,}13\,kg$
Teneur en eau finale mesurée	26 %

TABLE 5.3 – Paramètres d'humidification des fines utilisées pour la réalisation d'un mélange de $30\,L$ destiné à la fabrication de 14 briques comprimées

5.2 Réalisation des briques comprimées

5.2.1 Composition retenue pour les assemblages

La composition des briques comprimées utilisées pour les assemblages a déjà été présentée à la section 4.3.1. Elle est reprise du travail de QUARTO [11] et correspond à la formulation A8 optimale, contenant 30 % de fines de lavage en fraction volumique par rapport à l'ensemble fines–sable. Cette formulation n'est donc pas redéveloppée dans le cadre de ce travail.

L'objectif de cette partie n'est pas de réoptimiser la composition des briques, mais de caractériser les briques effectivement utilisées pour la réalisation des assemblages brique–mortier. Les analyses portent dès lors sur les paramètres susceptibles d'influencer le comportement des assemblages, à savoir la teneur en eau du mélange au moment de la fabrication, la masse volumique des briques, leur résistance en compression et leur état hydrique au moment des essais.

Cette caractérisation est nécessaire car les propriétés mesurées sur les assemblages ne dépendent pas uniquement du mortier. Elles sont également influencées par les caractéristiques des briques comprimées, notamment leur compacité, leur porosité, leur capacité d'absorption et leur résistance mécanique.

5.2.2 Caractérisation des briques comprimées

5.2.2.1 Détermination de la teneur en eau par brûlage

La teneur en eau réelle des mélanges de briques est vérifiée avant la fabrication afin de contrôler l'écart avec la teneur en eau théorique de référence, fixée à 21,5 %. Les résultats obtenus par brûlage sont présentés à la Table 5.4.

Mélange	Masse humide [g]	Masse sèche [g]	Teneur en eau réelle [%]
Mélange 1	1466,5	1194,2	22,80
Mélange 2	1140,0	939,1	21,39
Mélange 3	1015,9	834,8	21,69
Moyenne	–	–	21,96

TABLE 5.4 – Teneur en eau réelle des mélanges de briques à l'état frais déterminée par brûlage

Les teneurs en eau réelles mesurées sont comprises entre 21,39 % et 22,80 %, avec une moyenne de 21,96 %. Ces valeurs restent proches de la teneur en eau théorique de référence. Les mélanges réalisés présentent donc une teneur en eau globalement maîtrisée et cohérente avec la formulation retenue pour la fabrication des briques comprimées.

5.2.2.2 Variabilité de la presse manuelle sur la résistance à la compression

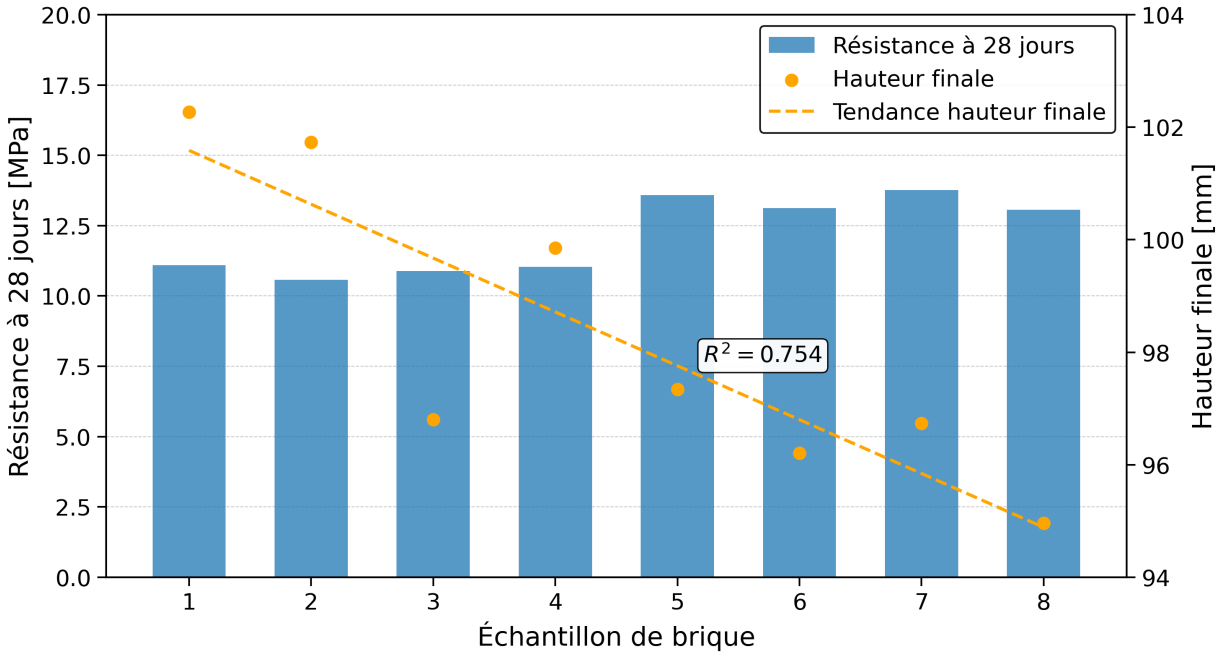


FIGURE 5.2 – Résistance à la compression et hauteur finale des briques en fonction des échantillons 1 à 8

La Figure 5.2 met en relation la résistance à la compression à 28 jours et la hauteur finale des différents échantillons de briques comprimées. Après leur fabrication, ces briques ont suivi une cure de 28 jours sous film plastique. La hauteur finale constitue un indicateur indirect du niveau de compactage appliqué lors du pressage. Pour une masse de mélange comparable, une hauteur finale plus faible traduit en effet une densification plus importante du matériau dans le moule.

La courbe de tendance associée à la hauteur finale montre une diminution progressive de celle-ci au fil des échantillons. Le coefficient de détermination, égal à $R^2 = 0{,}754$, indique que cette évolution est relativement marquée. Cette tendance traduit une amélioration progressive de la maîtrise du compactage manuel et du remplissage du moule au cours de la fabrication des briques.

Les premiers échantillons présentent les hauteurs finales les plus élevées, supérieures à 101 *mm*, et les résistances les plus faibles, proches de 10,6 à 11,1 *MPa*. À l'inverse, les échantillons 5 à 8 présentent des hauteurs finales plus faibles, généralement comprises entre 95 et 98 *mm* et atteignent des résistances plus élevées, de l'ordre de 13 à 13,8 *MPa*. Cette évolution suggère qu'un compactage plus important favorise la résistance mécanique des briques comprimées.

Cette relation doit toutefois être interprétée avec prudence. La hauteur finale ne suffit pas à expliquer l'ensemble des variations observées. Par exemple, certains échantillons présentent des hauteurs proches mais des résistances différentes. D'autres paramètres peuvent intervenir, tels que l'homogénéité du mélange, la répartition du matériau dans le moule, la teneur en eau locale ou la présence de défauts internes.

Les derniers échantillons, réalisés avec une masse de mélange mieux contrôlée, présentent globalement des hauteurs finales plus faibles et des résistances plus élevées que les premiers essais.

Les résistances présentent un écart-type de 1,33 *MPa* et un coefficient de variation de 11,33 %. Cette dispersion reste modérée compte tenu de l'utilisation d'une presse manuelle. Elle met toutefois en évidence l'influence possible des variations de compactage et confirme l'importance de contrôler précisément la masse introduite, la répartition du mélange et les conditions de compactage.

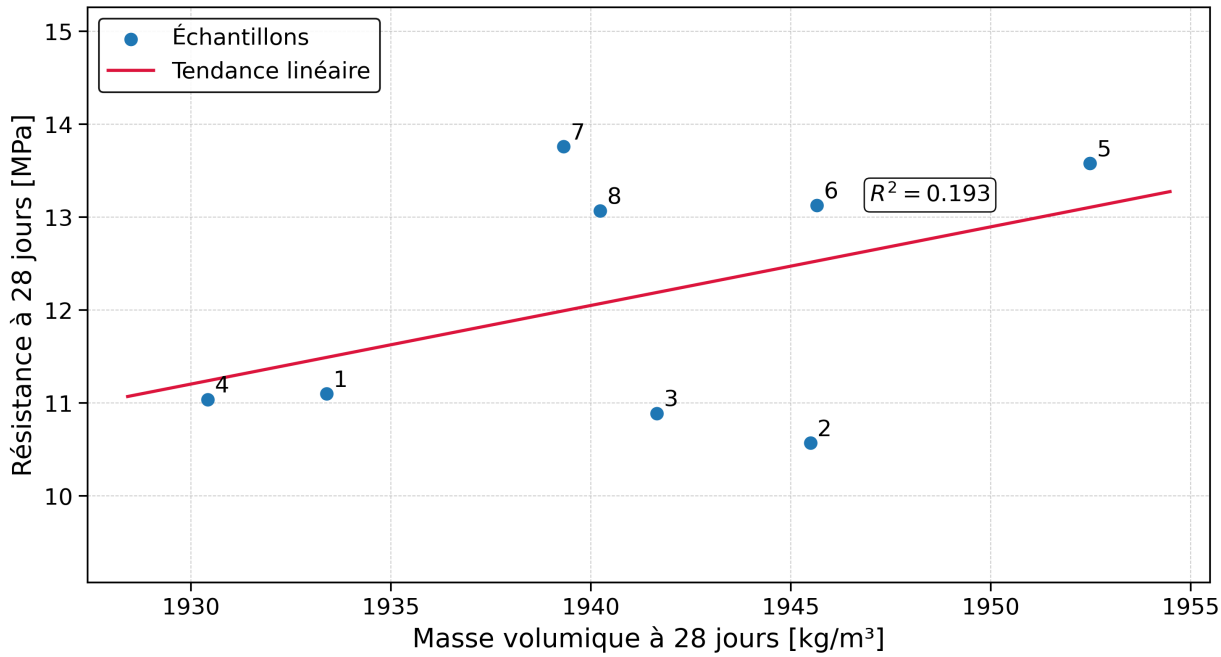


FIGURE 5.3 – Résistance à la compression des briques en fonction de leur masse volumique à 28 jours

La Figure 5.3 complète l'analyse précédente en comparant la résistance à la compression des briques

à 28 jours avec leur masse volumique. La droite de tendance présente une pente légèrement positive, ce qui indique qu'une masse volumique plus élevée tend globalement à être associée à une résistance plus importante. Cette tendance reste toutefois peu marquée.

Le coefficient de détermination est faible, avec $R^2 = 0{,}193$. La masse volumique à 28 jours n'explique donc qu'une faible part de la variabilité des résistances mesurées. Certaines briques présentent des masses volumiques proches, mais des résistances différentes. À l'inverse, plusieurs briques atteignent des résistances élevées malgré des masses volumiques intermédiaires.

Cette faible corrélation montre que la masse volumique finale ne constitue pas, à elle seule, un indicateur suffisant pour prédire la résistance mécanique des briques comprimées. D'une part, les masses volumiques mesurées sont très proches les unes des autres. D'autre part, leur détermination comporte une certaine imprécision, liée à la forme légèrement irrégulière des briques et donc à l'estimation de leur volume. La résistance reste par ailleurs influencée par d'autres paramètres, tels que la qualité du compactage, l'homogénéité du mélange, la répartition du matériau dans le moule, l'état hydrique au moment de l'essai et la présence éventuelle de défauts locaux.

La hauteur finale apparaît donc comme un indicateur complémentaire plus directement lié au compactage appliqué lors du pressage. L'analyse conjointe des Figures 5.2 et 5.3 montre que les résistances les plus élevées sont globalement obtenues pour les briques les plus compactées, mais que la variabilité du procédé manuel ne permet pas d'établir une relation unique entre une grandeur mesurée et la résistance finale.

Sur cette base, le protocole final retenu consiste à introduire $3800\,g$ de mélange dans chaque moule. Ce choix permet d'obtenir des briques suffisamment compactes et des résistances plus élevées que celles observées lors des premiers essais. Il est donc conservé pour la fabrication des briques destinées aux assemblages.

Les résistances obtenues pour l'ensemble des briques permettent également de déterminer une résistance moyenne, utilisée ensuite pour calculer la résistance normalisée des briques. La résistance moyenne mesurée à 28 jours est de $11{,}74\,MPa$.

La résistance normalisée est obtenue en appliquant un facteur de forme à la résistance moyenne mesurée. Dans le cas présent, les briques testées présentent un élancement inférieur à 1, c'est-à-dire une hauteur plus faible que la plus petite dimension horizontale de la section chargée. Selon les valeurs du facteur de forme reprises à l'Annexe A et le calcul présenté à la section 4.3.3.3, un facteur de 0,9 est donc appliqué. La résistance normalisée vaut alors :

$$f_b = 11{,}74 \times 0{,}9 = 10{,}57\,MPa \tag{5.1}$$

Cette valeur constitue la résistance normalisée des briques comprimées à 28 jours. Elle est utilisée comme valeur de référence pour la suite de l'analyse.

Afin de compléter cette caractérisation, l'influence de la teneur en eau des briques est ensuite étudiée. Ce paramètre peut modifier la résistance à la compression mesurée, notamment en influençant l'état hydrique du matériau au moment de l'essai.

5.2.2.3 Influence de la teneur en eau des briques sur la résistance en compression

L'influence de la teneur en eau des briques sur leur résistance en compression est étudiée à partir d'échantillons conservés dans différentes conditions d'humidité. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure l'état hydrique des briques au moment de l'essai peut modifier leur comportement mécanique.

La teneur en eau des briques est déterminée par séchage en étuve et est calculée à l'aide de l'équation 4.6. Afin d'obtenir différents états hydriques, les échantillons sont conservés dans trois environnements distincts, présentant chacun des conditions de température et d'humidité spécifiques.

- **Étuve** : Le premier environnement correspond à une étuve réglée à $70 \pm 5\,°C$. Les échantillons ne sont pas séchés à $105 \pm 5\,°C$, car une température trop élevée pourrait modifier leur structure microscopique et influencer leur résistance mécanique. L'objectif est donc de réduire leur teneur en eau sans altérer significativement le matériau. L'humidité est considérée à $0\,\%$ dans cette condition de séchage.
- **Laboratoire** : Le deuxième environnement correspond au laboratoire des mortiers, dans lequel les conditions de température et d'humidité sont contrôlées. La température y est de $21 \pm 3\,°C$ et l'humidité relative de $60\,\%$. Ces conditions permettent de représenter un état de conservation intermédiaire, proche des conditions ambiantes contrôlées du laboratoire.
- **Chambre humide** : Le troisième environnement correspond à la chambre humide. Dans ce cas, les briques sont immergées dans l'eau, ce qui impose un état hydrique proche de la saturation. L'humidité relative peut donc être considérée comme égale à $100\,\%$. La température y est de $21 \pm 3\,°C$.

Le choix de ces trois conditionnements permet de couvrir un état relativement sec, un état intermédiaire et un état fortement humide.

Afin de disposer d'un nombre suffisant d'échantillons pour les différentes conditions de conservation et les essais de compression, les briques initiales de dimensions $14\,cm \times 14\,cm$ sont découpées en quatre. Des échantillons de dimensions approximatives $7\,cm \times 7\,cm$ sont ainsi obtenus, avec une hauteur conservée de $9,5\,cm$.

Les échantillons utilisés proviennent de briques initialement fabriquées pour les assemblages brique–mortier. Les briques restantes, insuffisantes en nombre pour réaliser de nouveaux assemblages, ont été découpées afin d'étudier l'influence de l'état hydrique sur la résistance en compression.

La cure initiale de ces briques est identique à celle des briques destinées aux assemblages. Elles sont d'abord conservées pendant 28 jours dans des bacs en plastique hermétiques. Elles sont ensuite placées dans le laboratoire des mortiers, à une température de $21\,°C$ et une humidité relative de $60\,\%$, jusqu'à l'âge de 60 jours.

À partir de cet âge, les échantillons découpés sont répartis dans les trois environnements de stockage décrits précédemment. Ils y sont conservés pendant 3 jours avant d'être testés en compression, à l'âge de 63 jours. Cette dernière phase de conditionnement permet d'obtenir des états hydriques différents selon le milieu de stockage, tout en conservant une cure similaire pour l'ensemble des échantillons avant les essais.

Conditionnement	**Teneur en eau** [%]	**MV** [kg/m^3]	$f_{b,63}$ [MPa]	**E-T** [MPa]	**CV** [%]
Étuve – 70 °C – 0%	2,29	1676,9	6,16	0,21	3,67
Labo mortier – 21 °C – 60%	9,96	1800,6	7,38	0,58	8,41
Chambre humide – 21 °C – 100%	19,07	1976,4	5,72	0,35	6,54

TABLE 5.5 – Influence de la teneur en eau des briques sur leur résistance à la compression

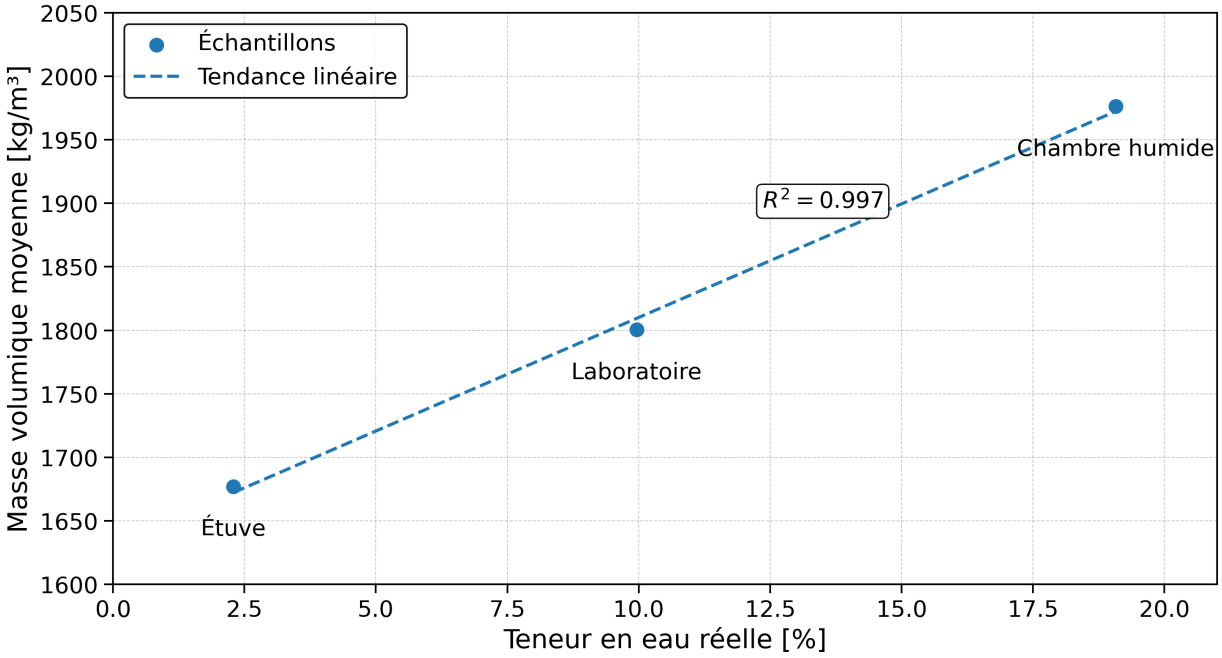


FIGURE 5.4 – Influence de la teneur en eau sur la masse volumique

La Table 5.5 et la Figure 5.4 montrent une augmentation nette de la masse volumique moyenne avec la teneur en eau réelle. Celle-ci passe de 1676,96 kg/m^3 pour les briques séchées en étuve à 1976,37 kg/m^3 pour les briques conservées en chambre humide.

Cette évolution est logique, car la masse volumique mesurée tient compte de la masse d'eau contenue dans les pores du matériau. Une brique plus humide présente donc une masse plus importante pour un volume comparable. La masse volumique apparente ne traduit donc pas uniquement la compacité de la brique, mais dépend également fortement de son état hydrique au moment de l'essai.

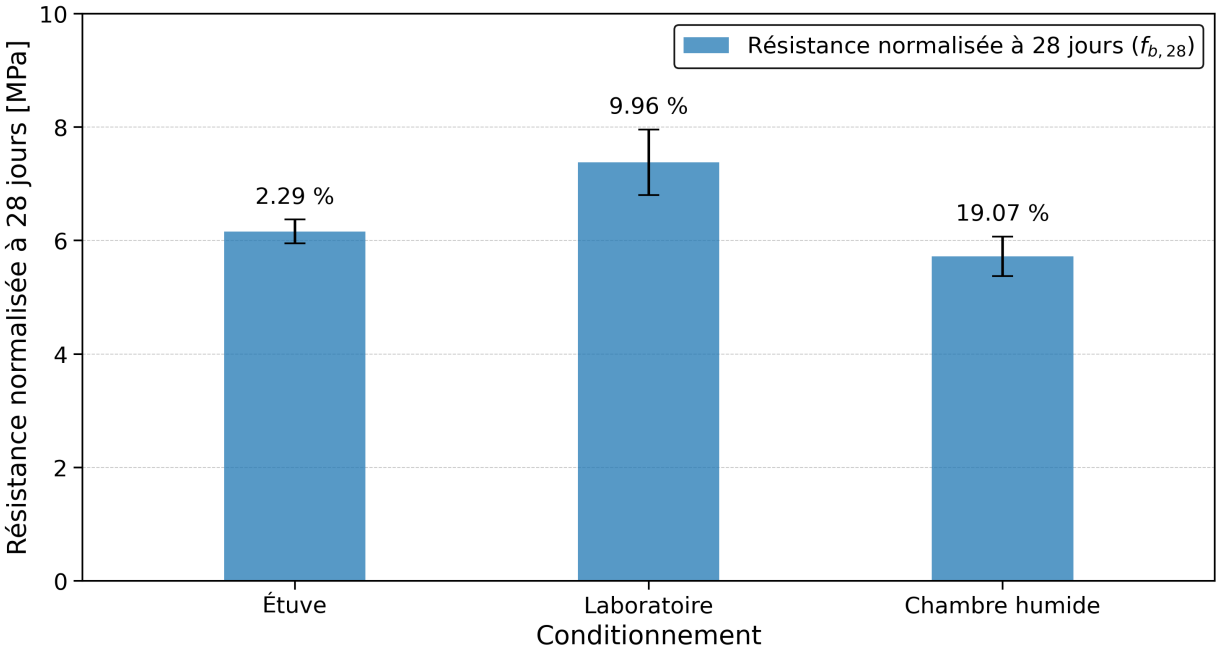


FIGURE 5.5 – Influence de la teneur en eau sur la résistance en compression

La Figure 5.5 montre qu'une teneur en eau intermédiaire semble plus favorable à la résistance à la compression. Les briques séchées en étuve peuvent présenter une résistance réduite. À l'inverse, une teneur en eau trop élevée est également défavorable, car la présence importante d'eau dans les pores peut réduire la résistance apparente du matériau lors de l'essai. La teneur en eau influence donc directement le comportement mécanique mesuré.

Ces observations peuvent être mises en relation avec les résultats présentés dans l'état de l'art, notamment ceux de CRUZ et al. [4], illustrés à la Figure 2.10. Dans cette étude, les briques de terre comprimée stabilisées présentent généralement une résistance plus élevée lorsqu'elles sont testées à l'état sec, tandis qu'une diminution de résistance est observée en condition saturée. Cette diminution est attribuée à la présence d'eau dans les pores, qui peut générer des pressions interstitielles et réduire les contraintes effectives dans le matériau.

Les résultats obtenus dans le présent travail sont donc cohérents avec la littérature en ce qui concerne l'effet défavorable d'un état fortement humide. Les briques conservées en chambre humide présentent en effet l résistance moyenne la plus faible, égale à $5{,}72\,MPa$, malgré leur masse volumique plus élevée. Cette masse volumique importante traduit principalement la présence d'eau dans les pores et ne peut donc pas être interprétée comme une amélioration de la compacité mécanique.

En revanche, une différence apparaît pour les briques séchées. Dans l'étude de CRUZ et al. [4], les échantillons secs présentent les résistances les plus élevées, alors que, dans le présent travail, les briques séchées en étuve atteignent une résistance moyenne de $6{,}16\,MPa$, inférieure à celle des briques conservées en laboratoire, égale à $7{,}38\,MPa$. Cette différence peut s'expliquer par la nature des matériaux étudiés et par les conditions de conditionnement. Les briques analysées ici sont des briques comprimées à base de sables recyclés et de fines de lavage, liées par un liant cimentaire. Leur comportement peut donc être plus sensible à l'état hydrique, notamment en raison de la porosité des

matériaux recyclés et de la présence de fines.

De plus, le séchage en étuve à $70\,°C$ peut avoir modifié localement l'état hydrique interne du matériau ou favorisé certains phénomènes de retrait. Une autre hypothèse est liée aux effets de succion capillaire. Dans un état partiellement humide, ces effets peuvent contribuer à une cohésion apparente du matériau. En revanche, lorsque le matériau est fortement séché ou proche de la saturation, cette contribution peut diminuer. Cette interprétation reste toutefois qualitative et devrait être confirmée par des essais complémentaires.

Il est également possible de comparer les résultats à l'aide du rapport entre la résistance en condition humide et la résistance en condition sèche, noté $\frac{f_{c,s}}{f_{c,d}}$ dans l'état de l'art. Dans le cas présent, en assimilant les briques conservées en chambre humide à l'état humide et les briques séchées en étuve à l'état sec, ce rapport vaut :

$$\frac{f_{c,s}}{f_{c,d}} = \frac{5{,}72}{6{,}16} = 0{,}93 \tag{5.2}$$

Cette valeur est largement supérieure au seuil minimal de 0,33 mentionné dans l'état de l'art, ainsi qu'au seuil plus conservatif de 0,5 retenu dans le travail de QUARTO [11]. Cela indique que les briques étudiées conservent une part importante de leur résistance lorsqu'elles sont placées dans un environnement fortement humide. Toutefois, cette comparaison doit être interprétée avec prudence, car le conditionnement réalisé ici ne correspond pas nécessairement à une saturation complète et durable comparable à celle appliquée dans les études de référence.

Ainsi, l'état hydrique apparaît comme un paramètre important dans l'interprétation des essais de compression. Dans les conditions étudiées, le conditionnement intermédiaire conduit à la résistance moyenne la plus élevée, tandis que l'état fortement humide est le plus défavorable. Cette observation est importante pour la suite de l'étude, car l'humidité des briques peut influencer leur résistance propre, mais aussi les échanges d'eau avec le mortier lors de la fabrication des assemblages.

5.3 Développement d'un mortier bas-carbone

Cette section présente la démarche suivie pour développer un mortier adapté à la réalisation des assemblages brique–mortier. L'objectif n'est pas de maximiser la résistance mécanique du mortier, mais d'obtenir un compromis entre ouvrabilité, résistance suffisante à court terme et réduction de l'impact environnemental. Le mortier doit en effet présenter une consistance compatible avec une mise en œuvre sur chantier, tout en permettant l'élévation de plusieurs assises au cours d'une même journée.

La démarche expérimentale est organisée en deux campagnes. La première campagne compare trois types de sables : un sable naturel, un sable de béton recyclé et un sable mixte recyclé. Elle vise à évaluer l'influence du type de sable sur la consistance à l'état frais et sur les résistances mécaniques à l'état durci. À l'issue de cette étape, le sable mixte recyclé est retenu en raison du compromis obtenu entre ouvrabilité et performances mécaniques. Ce choix présente également un intérêt environnemental, car ce sable est moins valorisé que le sable naturel et le sable de béton recyclé, notamment en raison de l'absence d'étape de lavage.

La deuxième campagne approfondit la formulation du mortier à base de sable mixte recyclé. Des fines de lavage sont incorporées afin de valoriser une fraction recyclée supplémentaire et d'améliorer la texture du mortier frais. Une consistance cible de $140 \pm 10\,mm$ est retenue pour assurer une mise en œuvre comparable entre les différentes compositions.

Enfin, deux compositions sont sélectionnées pour la réalisation et la caractérisation des assemblages brique–mortier. Elles présentent des consistances similaires, mais des résistances mécaniques différentes en raison de rapports eau/ciment distincts. Cette comparaison permet d'évaluer l'influence des propriétés du mortier sur le comportement des assemblages, les briques utilisées présentant une même composition et une résistance comparable. Les différences observées pourront ainsi être mises en relation avec la résistance du mortier, sa teneur en eau et sa capacité à limiter les transferts d'eau vers les briques.

5.3.1 Première campagne d'essais – Comparaison des trois sables

5.3.1.1 Compositions

La première campagne d'essais a pour objectif de comparer l'influence du type de sable sur les propriétés du mortier à l'état frais et à l'état durci. Trois sables sont étudiés :

- Sable naturel : BUIR ;
- Sable de béton recyclé : SBR ;
- Sable mixte recyclé : SMR.

Le premier paramètre de formulation étudié est la teneur en ciment. Un mortier de maçonnerie classique contient généralement de l'ordre de 300 à $350\,kg/m^3$ de ciment. Dans le cadre de ce travail, les teneurs en ciment testées sont définies à partir de la quantité de ciment utilisée dans les briques de béton comprimées, soit $180\,kg/m^3$.

Les mortiers devant assurer la liaison entre les briques et permettre une mise en œuvre correcte des assemblages, des dosages en ciment supérieurs à celui des briques sont retenus. Trois coefficients multiplicateurs sont appliqués à cette valeur de référence : 1,2, 1,5 et 1,8. Ils permettent d'explorer une gamme progressive de teneurs en ciment, depuis un mortier faiblement dosé jusqu'à un mortier dont le dosage se rapproche des valeurs couramment utilisées en maçonnerie. Ces coefficients conduisent respectivement à des teneurs en ciment de 216, 270 et $324\,kg/m^3$.

Pour chaque sable, les trois teneurs en ciment sont testées. Cette première campagne comprend donc neuf compositions de mortier, nommées selon le type de sable utilisé et le coefficient appliqué à la teneur en ciment des briques : BUIR 1.2, BUIR 1.5, BUIR 1.8, SMR 1.2, SMR 1.5, SMR 1.8, SBR 1.2, SBR 1.5 et SBR 1.8.

Afin de comparer les formulations sur une base commune, le rapport eau/ciment est maintenu constant pour l'ensemble des compositions de cette première campagne. Il est fixé à $E/C = 0{,}9$. Ce choix permet de conserver une logique de formulation comparable entre les différents mortiers, quel que soit le sable utilisé. La consistance est ensuite ajustée, si nécessaire, par l'ajout d'un superplastifiant, avec un dosage maximal fixé à 3 % de la masse de ciment.

Les compositions détaillées de cette première campagne d'essais sont présentées à la Table 5.6 :

Composition	Ciment $[kg/m^3]$	Sable $[kg/m^3]$	Eau totale $[kg/m^3]$	Superplastifiant $[kg/m^3]$	E/C [-]
BUIR 1.2	216	1943	190	10,17	0,9
BUIR 1.5	270	1766	239	3,96	0,9
BUIR 1.8	324	1589	288	0,76	0,9
SBR 1.2	216	1683	293	11,02	0,9
SBR 1.5	270	1530	323	2,62	0,9
SBR 1.8	324	1377	373	0	0,9
SMR 1.2	216	1796	338	10,37	0,9
SMR 1.5	270	1633	374	6,86	0,9
SMR 1.8	324	1469	401	1,46	0,9

TABLE 5.6 – Compositions des mortiers de la première campagne d'essais

Il convient de préciser que le rapport E/C utilisé pour cette première campagne est défini sur base de l'eau de gâchage et non sur base de l'eau totale présente dans le mélange. L'eau de gâchage correspond à l'eau ajoutée pour assurer l'hydratation du ciment et permettre la mise en œuvre du mortier. L'eau totale comprend, quant à elle, l'eau de gâchage, l'eau nécessaire à l'absorption des granulats et l'eau déjà présente dans les sables.

Cette distinction est particulièrement importante dans le cas des sables recyclés. En effet, ceux-ci présentent une capacité d'absorption d'eau plus élevée que le sable naturel. Si le rapport E/C était défini sur base de l'eau totale, il dépendrait fortement du sable utilisé et ne permettrait plus une comparaison cohérente entre les compositions.

Pour cette raison, le rapport $E/C = 0,9$ est maintenu constant uniquement sur base de l'eau de gâchage. L'eau d'absorption est ajoutée séparément afin de compenser la demande en eau propre à chaque sable. Cette approche permet de conserver un même rapport entre l'eau disponible pour le ciment et la quantité de ciment, tout en tenant compte des différences d'absorption entre les sables naturels et recyclés.

Les propriétés des sables utilisées pour établir les compositions sont reprises à la Table 5.7 :

Propriété	BUIR	SBR	SMR
Masse volumique réelle $[kg/m^3]$	2650	2300	2450
Absorption d'eau à $24\,h$ [%]	0,70	5,88	8,07
Teneur en eau [%]	0,94	1,12	1,88
Teneur en fines [%]	0,40	3,44	22,12

TABLE 5.7 – Propriétés des sables utilisées pour la formulation des mortiers

Les rapports volumiques associés aux trois niveaux de teneur en ciment sont présentés à la Table 5.8. Ces rapports sont identiques pour les trois types de sables, car les compositions ont été établies sur une base volumique commune.

Composition	Sable [%]	Ciment [%]	Eau totale [%]
x1.2	73,3	7,2	19,4
x1.5	66,6	9,1	24,3
x1.8	60,0	10,9	29,2

TABLE 5.8 – Fractions volumiques des compositions de mortier de la première campagne d'essais

La Table 5.8 montre que l'augmentation de la teneur en ciment se fait principalement au détriment du volume de sable. En parallèle, la fraction volumique d'eau augmente, puisque le rapport E/C est maintenu constant. Les compositions x1.2 présentent donc la plus grande fraction volumique de sable et la plus faible fraction volumique d'eau. Elles sont dès lors susceptibles de présenter une consistance moins favorable. À l'inverse, les compositions x1.8 contiennent davantage de ciment et d'eau, ce qui peut faciliter la mise en œuvre, mais augmente également la teneur en liant du mortier.

5.3.1.2 Résistance en compression

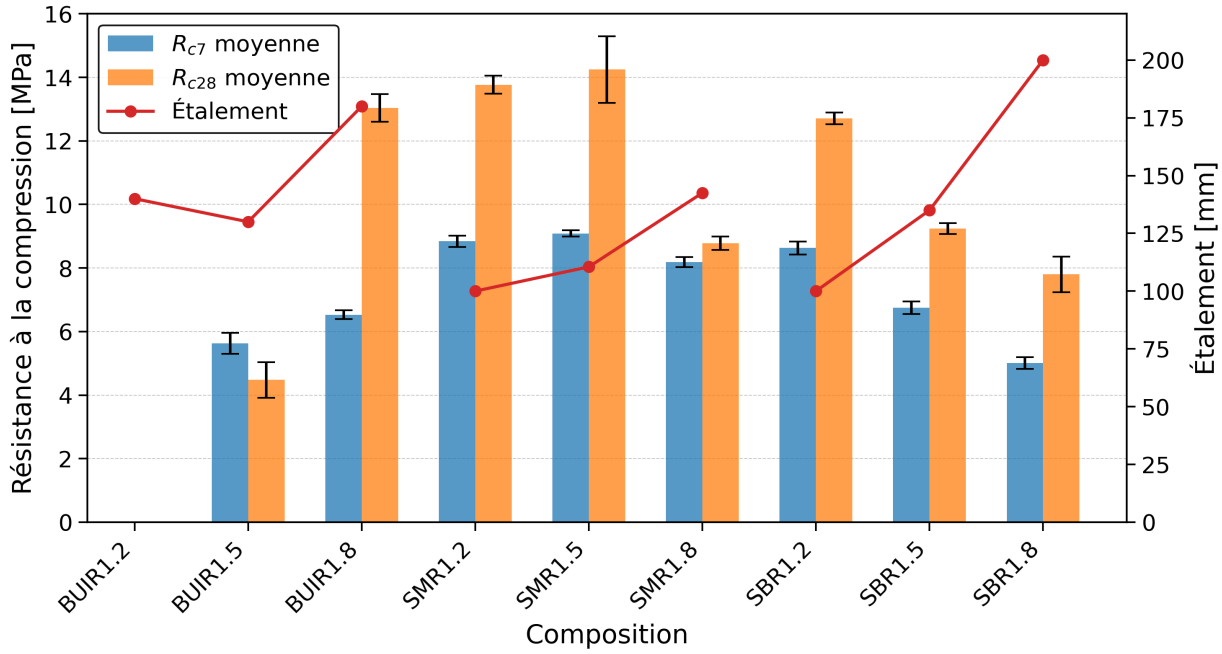


FIGURE 5.6 – Résistances moyennes à 7 et 28 jours et étalement des mortiers de la première campagne

La Figure 5.6 permet de comparer les performances mécaniques des différentes compositions avec leur consistance à l'état frais. Les résultats montrent que les mortiers à base de sable SMR présentent les résistances à 28 jours les plus élevées. Les compositions SMR 1.2 et SMR 1.5 atteignent respectivement des résistances moyennes de 13,77 MPa et 14,25 MPa, soit des valeurs supérieures à celles obtenues avec les autres sables pour des dosages en ciment comparables.

Ces performances mécaniques doivent toutefois être mises en relation avec l'état frais. Les compositions SMR 1.2 et SMR 1.5 présentent des étalements limités, respectivement proches de 100 *mm* et 110,5 *mm*. Ces valeurs traduisent une maniabilité encore insuffisante pour une mise en œuvre confortable dans des assemblages brique–mortier. À l'inverse, une consistance plus élevée ne conduit pas nécessairement à une meilleure résistance. Le mortier SBR 1.8 atteint ainsi l'étalement le plus important, proche de 200 *mm*, mais présente une résistance à 28 jours nettement plus faible que les compositions SMR.

La première campagne d'essais met donc en évidence le potentiel du sable SMR pour le développement du mortier. Malgré une consistance encore perfectible, ce sable permet d'obtenir les meilleures résistances mécaniques et présente un intérêt environnemental particulier, puisqu'il s'agit d'un matériau recyclé moins valorisé que le sable naturel ou le sable de béton recyclé lavé. Sur cette base, le sable mixte recyclé SMR est retenu pour la deuxième campagne d'essais. Celle-ci vise à améliorer la consistance du mortier, tout en conservant les performances mécaniques observées lors de la première campagne.

5.3.1.3 Influence du superplastifiant

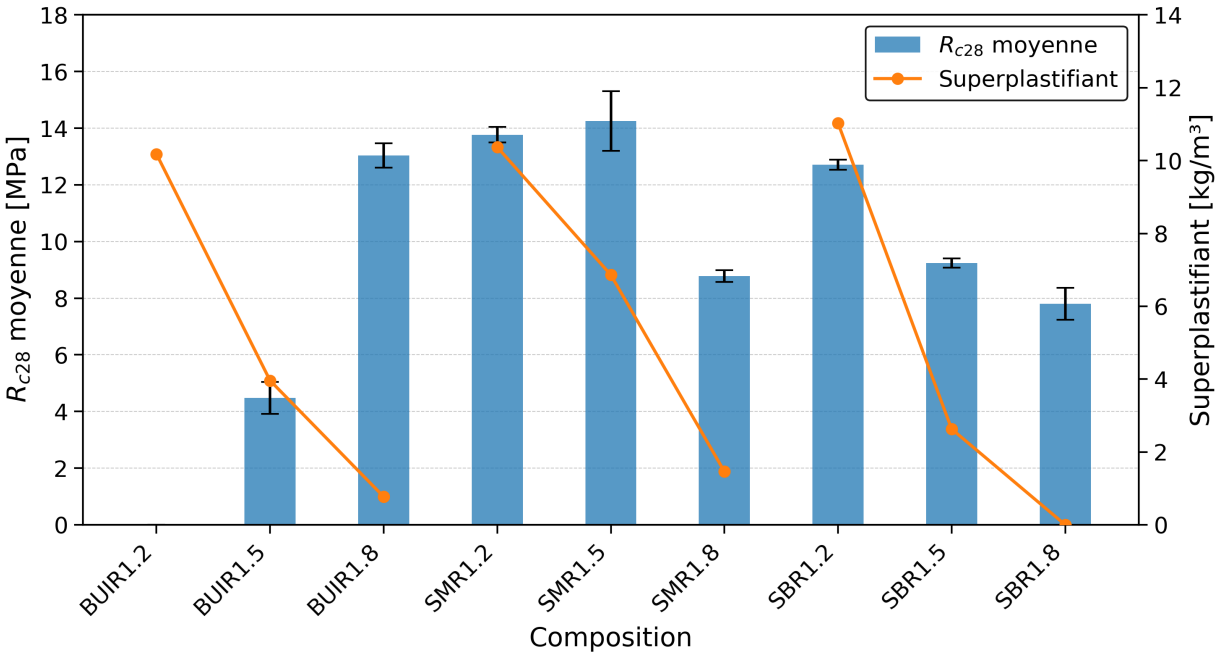


FIGURE 5.7 – Résistance moyenne à 28 jours et quantité de superplastifiant utilisée pour les mortiers de la première campagne

La Figure 5.7 présente, pour chaque composition de la première campagne, la quantité de superplastifiant utilisée et la résistance moyenne en compression à 28 jours. Cette représentation permet de visualiser simultanément l'ajustement réalisé à l'état frais et les performances mécaniques obtenues à l'état durci.

Les résultats montrent que les compositions les moins dosées en ciment nécessitent généralement

davantage de superplastifiant. Cette tendance est particulièrement visible pour les formulations BUIR 1.2, SMR 1.2 et SBR 1.2. Ces mortiers contiennent une fraction volumique de sable plus importante et une fraction de ciment et d'eau plus faible, ce qui peut rendre la mise en œuvre plus difficile. Le superplastifiant est alors utilisé pour améliorer la maniabilité sans augmenter directement l'eau de gâchage.

La quantité de superplastifiant diminue ensuite lorsque le coefficient multiplicateur augmente. Les compositions 1.8 nécessitent peu ou pas de superplastifiant, car elles contiennent davantage de ciment et d'eau de gâchage, ce qui augmente le volume de pâte disponible pour enrober les grains et faciliter la mise en œuvre. Cette évolution traduit donc principalement une adaptation de la formulation à l'état frais.

En revanche, la quantité de superplastifiant ne permet pas d'expliquer directement les résistances à 28 jours. Les résistances dépendent simultanément du type de sable, de la teneur en ciment, de la compacité du squelette granulaire, de l'absorption d'eau des granulats et de la qualité de la matrice cimentaire. De plus, même si le rapport E/C de gâchage est maintenu constant, l'eau réellement disponible pour le ciment peut varier selon l'absorption effective des sables recyclés. Une estimation imparfaite de cette absorption peut donc modifier localement le rapport E/C effectif et influencer les résistances mesurées.

Ainsi, cette figure ne doit pas être interprétée comme une relation directe entre superplastifiant et résistance mécanique. Elle montre plutôt que le superplastifiant a été utilisé comme un paramètre d'ajustement de la consistance, en particulier pour les formulations les plus pauvres en pâte. Les performances mécaniques restent principalement liées au type de sable et à l'équilibre global de la formulation. Les mortiers à base de SMR conservent les résistances les plus élevées à 28 jours, malgré des dosages en superplastifiant variables, ce qui confirme l'intérêt de ce sable pour la suite de l'étude.

5.3.2 Deuxième campagne d'essais – Ajout de fines de lavage

5.3.2.1 Compositions

La deuxième campagne d'essais est réalisée uniquement avec le sable mixte recyclé SMR, retenu à l'issue de la première campagne. L'objectif est d'améliorer la consistance des mortiers sans recourir à un superplastifiant, tout en réduisant l'impact environnemental des formulations. Pour cela, des fines de lavage sont incorporées dans les compositions.

L'ajout de fines de lavage présente plusieurs intérêts. D'une part, il permet de valoriser une fraction recyclée supplémentaire, issue du traitement des granulats. D'autre part, la granulométrie très fine de ce matériau peut modifier la texture du mortier frais et améliorer le remplissage des vides entre les grains de sable. Cette action peut contribuer à une meilleure compacité du mélange. Toutefois, les fines présentent une demande en eau importante.

Sur base des résultats obtenus lors de la première campagne, les teneurs en ciment sont adaptées afin d'explorer une plage plus large de dosages. Les coefficients multiplicateurs appliqués à la quantité de ciment contenue dans les briques comprimées sont fixés à 0,8, 1,2 et 1,8. Ils conduisent respectivement à des teneurs en ciment de 144, 216 et $324\,kg/m^3$.

Le coefficient 0.8 permet d'étudier une formulation fortement réduite en ciment, afin d'évaluer jus-

qu'où le dosage en liant peut être diminué tout en conservant une consistance et une résistance suffisantes pour la réalisation des assemblages. Le coefficient 1.2 correspond à une formulation intermédiaire, proche du dosage minimal testé lors de la première campagne. Enfin, le coefficient 1.8 est conservé comme formulation plus riche en ciment, proche des dosages habituellement rencontrés pour des mortiers de maçonnerie classiques. Cette composition sert également de référence haute pour comparer l'effet d'une teneur en ciment plus importante. L'objectif est d'obtenir des résistances différentes, idéalement inférieures ou du même ordre de grandeur que celles des briques, afin d'observer plus clairement l'influence du mortier et de l'interface dans les essais sur assemblages brique–mortier.

Contrairement à la première campagne, le rapport E/C n'est plus maintenu constant entre les compositions. La première campagne ayant montré que les résistances obtenues étaient suffisantes, l'attention est ici principalement portée sur la consistance du mortier. Le but est d'obtenir un matériau suffisamment ouvrable pour la réalisation des assemblages brique–mortier, sans recourir à un superplastifiant. Les rapports E/C sont donc ajustés afin d'atteindre la consistance cible, tout en tenant compte du fait qu'une augmentation du rapport E/C peut entraîner une diminution des résistances mécaniques. Cette approche se rapproche des études dans lesquelles l'eau de gâchage est adaptée pour atteindre une consistance cible, comme chez MARTÍNEZ-GARCÍA et al. [26] et LEDESMA et al. [27].

Les compositions sont nommées comme suit :

- SMR 0.8 + F ;
- SMR 1.2 + F ;
- SMR 1.8 + F.

Cette notation désigne des mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage, suivis du coefficient multiplicateur appliqué à la quantité de ciment des briques comprimées.

Une première série de trois mortiers à base de SMR et de fines de lavage est présentée à la Table 5.9.

Composition	**E/C** [-]	**Sable** $[kg/m^3]$	**Ciment** $[kg/m^3]$	**Fines** $[kg/m^3]$	**Eau totale** $[kg/m^3]$	**Acc. de prise** $[kg/m^3]$
SMR 0.8 + F (1)	2,0	1136	144	480	251	1,44
SMR 1.2 + F (2)	1,6	936	216	480	297	2,16
SMR 1.8 + F (3)	1,5	503	324	480	411	3,24

TABLE 5.9 – Compositions des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (1)–(2)–(3)

Dans ces formulations, la teneur en fines est fixée à 20 % du volume total. Cette approche s'est toutefois révélée imparfaite. Une quantité d'eau supplémentaire était encore nécessaire afin d'atteindre une consistance acceptable. De plus, les fractions volumiques diffèrent fortement d'une composition à l'autre, ce qui rend la comparaison des résultats moins directe.

Pour ces raisons, une deuxième série de trois formulations a été réalisée. L'objectif de cette nouvelle série est d'obtenir des fractions volumiques plus comparables entre les mortiers, tout en conservant des teneurs en ciment différentes. Ces compositions sont présentées à la Table 5.10.

Composition	**E/C** [-]	**Sable** $[kg/m^3]$	**Fines** $[kg/m^3]$	**Ciment** $[kg/m^3]$	**Eau totale** $[kg/m^3]$	**Acc. de prise** $[kg/m^3]$
SMR 0.8 + F (4)	2,3	1211	303	144	578	1,44
SMR 1.2 + F (5)	1,5	1178	295	216	564	2,16
SMR 1.8 + F (6)	1,0	1107	277	324	550	3,24

TABLE 5.10 – Compositions des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (4)–(5)–(6)

La Table 5.11 présente les fractions volumiques associées à ces trois dernières compositions.

Composition	**Sable** [%]	**Fines** [%]	**Ciment** [%]	**Eau totale** [%]	**Total** [%]
SMR 0.8 + F (4)	49,5	12,6	4,8	33,1	100
SMR 1.2 + F (5)	48,1	12,3	7,2	32,4	100
SMR 1.8 + F (6)	45,2	11,5	10,9	32,4	100

TABLE 5.11 – Fractions volumiques des mortiers à base de SMR et de fines de lavage (4)–(5)–(6)

Les fractions volumiques des trois dernières compositions sont plus proches les unes des autres. Pour ces trois formulations, le rapport volumique entre les fines et le sable est conservé. Les fines représentent ainsi 20 % du volume total du squelette inerte, tandis que le sable en représente 80 %. Le rapport volumique fines/sable est donc maintenu à $1/4$ pour chaque composition.

De plus, aucune eau supplémentaire n'a été nécessaire pour atteindre la consistance visée. Les trois mortiers présentent ainsi des consistances similaires, tandis que leur teneur en ciment varie fortement. Cette approche permet d'étudier plus clairement l'influence de la teneur en ciment et du rapport E/C sur les résistances en flexion et en compression, en limitant l'influence d'autres paramètres de formulation.

5.3.2.2 Résistance en flexion/compression

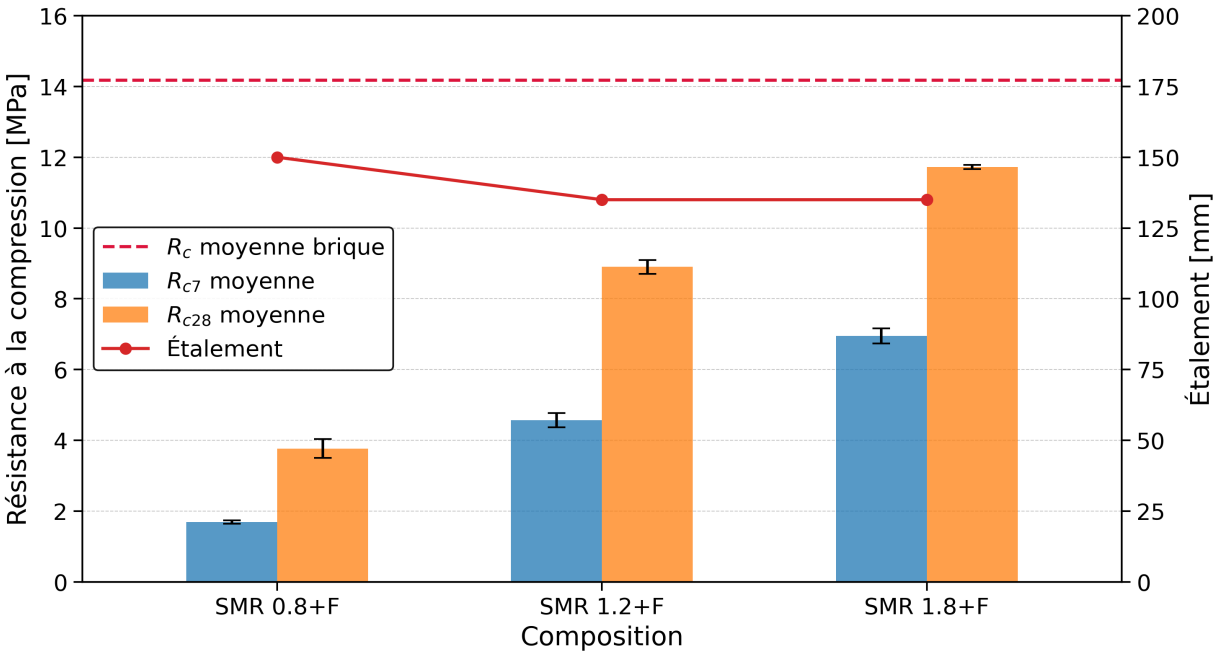


FIGURE 5.8 – Évolution des résistances en compression des mortiers entre 7 et 28 jours et comparaison avec la résistance moyenne des briques

La Figure 5.8 présente les résistances moyennes en compression à 7 et 28 jours des trois compositions de mortier retenues pour la deuxième campagne, ainsi que leur étalement à l'état frais. La résistance moyenne des briques est également représentée afin de situer les performances des mortiers par rapport aux unités utilisées pour les assemblages.

Les résultats montrent une augmentation nette de la résistance avec la teneur en ciment. À 28 jours, la résistance moyenne passe de 3,77 MPa pour le mortier SMR 0.8+F à 8,88 MPa pour le mortier SMR 1.2+F, puis à 11,72 MPa pour le mortier SMR 1.8+F. Les résistances à 7 jours suivent la même tendance, ce qui indique que le classement des formulations est déjà visible à court terme.

Les trois compositions présentent également un gain de résistance entre 7 et 28 jours. Ce gain est particulièrement marqué pour les mortiers SMR 1.2+F et SMR 1.8+F. Chaque composition contient toutefois une quantité différente d'accélérateur de prise ; l'influence de ce paramètre sur le développement des résistances précoces est donc analysée séparément à la section 5.3.2.4.

Les étalements mesurés restent relativement proches, compris entre environ 135 et 150 mm. Les trois mortiers atteignent donc une consistance compatible avec la cible fixée, malgré des rapports E/C et des teneurs en ciment différents. Cette observation confirme que l'ajustement de l'eau de gâchage permet d'obtenir une ouvrabilité comparable sans recourir à un superplastifiant.

La comparaison avec la résistance moyenne des briques montre que les trois mortiers restent moins résistants que les briques. Le mortier SMR 1.8+F s'en rapproche toutefois davantage, tandis que le mortier SMR 0.8+F présente une résistance nettement inférieure. Cette différence constitue un critère

important pour le choix des compositions destinées aux assemblages, car elle permet de comparer un mortier faiblement dosé et peu résistant à un mortier plus riche en ciment, dont la résistance est du même ordre de grandeur que celle des briques.

La résistance des briques considérée correspond ici à la résistance mesurée à 63 jours, notée R_{c63}, puisque les essais sur assemblages sont réalisés lorsque les briques ont cet âge.

5.3.2.3 Influence du rapport E/C

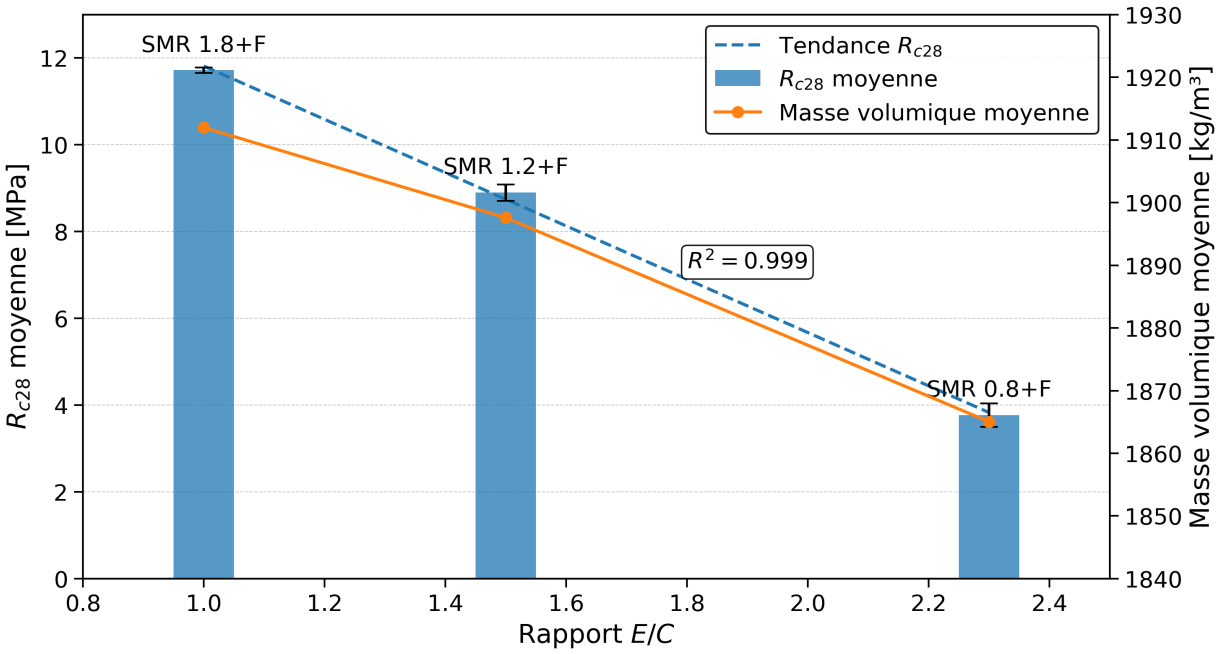


FIGURE 5.9 – Influence du rapport E/C sur la résistance en compression à 28 jours et sur la masse volumique des mortiers

La Figure 5.9 met en relation le rapport E/C, la résistance en compression à 28 jours et la masse volumique moyenne des mortiers. Pour les trois compositions étudiées, les mortiers présentant les rapports E/C les plus élevés sont également ceux qui présentent les résistances les plus faibles. Cette tendance doit toutefois être interprétée avec prudence, car le rapport E/C varie ici en même temps que la teneur en ciment.

En effet, la diminution du dosage en ciment impose, pour atteindre une consistance comparable, une quantité d'eau relativement plus importante par rapport à la masse de ciment. Le rapport E/C augmente donc lorsque la teneur en ciment diminue. La baisse de résistance observée ne doit dès lors pas être attribuée uniquement au rapport E/C, mais plutôt à l'effet combiné d'une teneur en ciment plus faible, d'une quantité d'eau relative plus élevée et d'une matrice cimentaire potentiellement plus poreuse.

Cette interprétation est cohérente avec les tendances présentées dans l'état de l'art. MORA-ORTIZ et al. [28] montrent, pour des mortiers incorporant des sables recyclés, qu'une augmentation du rapport E/C s'accompagne généralement d'une diminution de la masse volumique sèche. Cette diminution

est associée à une porosité plus importante de la matrice cimentaire. Dans le cas présent, le mortier SMR 0.8+F, qui présente le rapport E/C le plus élevé, possède également la masse volumique la plus faible et la résistance la plus faible à 28 jours.

La Figure 5.9 montre également que la masse volumique augmente avec la teneur en ciment et avec la résistance à 28 jours. Cette évolution peut être liée à une matrice plus dense lorsque le dosage en ciment est plus élevé. La masse volumique constitue donc un indicateur complémentaire pour interpréter les différences observées entre les formulations.

Il convient enfin de rappeler que seules trois compositions sont comparées. La relation observée ne permet donc pas d'établir une loi générale entre le rapport E/C et la résistance mécanique. Elle montre plutôt que, dans les formulations étudiées, les mortiers les moins dosés en ciment nécessitent un rapport E/C plus élevé pour atteindre la consistance visée, ce qui s'accompagne d'une masse volumique plus faible et d'une résistance mécanique réduite.

5.3.2.4 Influence de l'accélérateur de prise

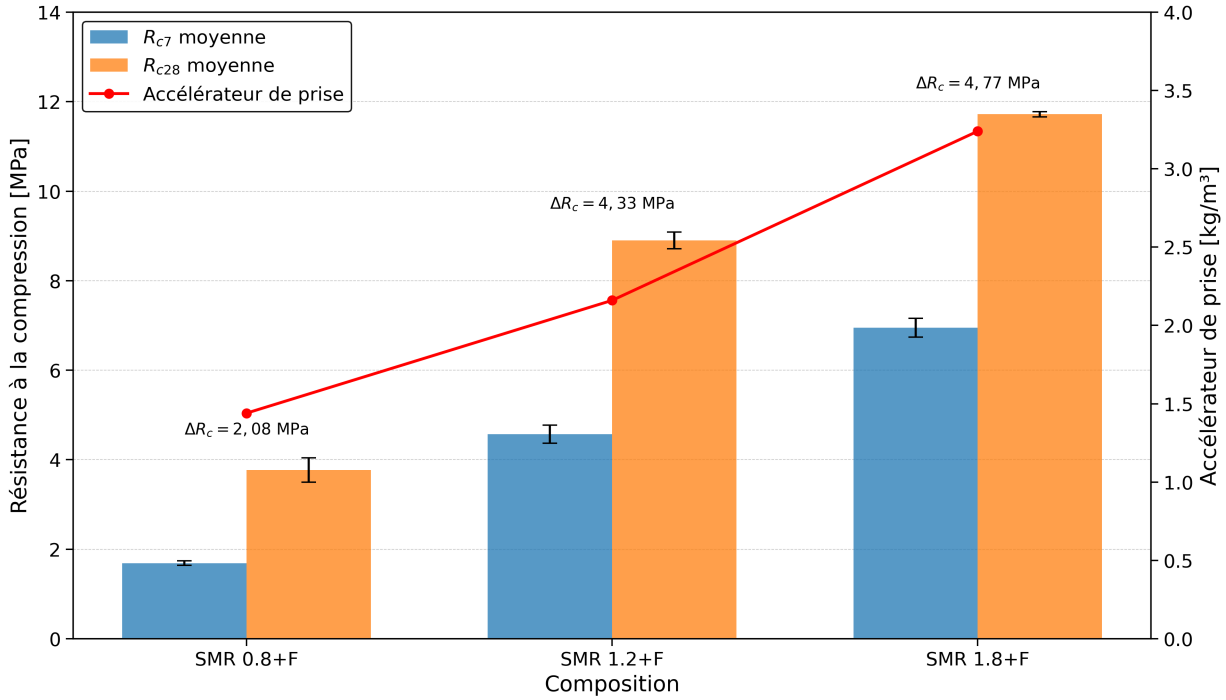


FIGURE 5.10 – Influence de la quantité d'accélérateur de prise sur le rapport entre la résistance en compression à 7 jours et à 28 jours

La Figure 5.10 présente les résistances moyennes en compression à 7 et 28 jours pour les trois mortiers de la deuxième campagne, ainsi que la quantité d'accélérateur de prise incorporée dans chaque formulation. Cette représentation permet d'évaluer le développement des résistances au jeune âge.

Les résultats montrent que la résistance à 7 jours augmente avec la teneur en ciment. Elle passe de 1,69 MPa pour le mortier SMR 0.8+F à 4,57 MPa pour le mortier SMR 1.2+F, puis à 6,95 MPa pour

le mortier SMR 1.8+F. La même tendance est observée à 28 jours, avec des résistances respectives de 3,77 MPa, 8,90 MPa et 11,72 MPa.

Le gain de résistance entre 7 et 28 jours augmente également avec le dosage en ciment. Il vaut 2,08 MPa pour le mortier SMR 0.8+F, 4,33 MPa pour le mortier SMR 1.2+F et 4,77 MPa pour le mortier SMR 1.8+F. Les formulations les plus riches en ciment présentent donc non seulement des résistances plus élevées à 7 jours, mais également un développement plus important entre 7 et 28 jours.

Cette évolution ne peut toutefois pas être attribuée uniquement à l'accélérateur de prise. Celui-ci est dosé proportionnellement à la masse de ciment ; sa quantité augmente donc en même temps que la teneur en ciment. Par ailleurs, le rapport E/C diminue entre les formulations, ce qui influence également la compacité de la matrice cimentaire et les résistances mécaniques. L'effet propre de l'accélérateur ne peut donc pas être isolé à partir de cette campagne car son rôle ne peut pas être dissocié de celui de la teneur en ciment et du rapport E/C.

5.3.2.5 Détermination des deux compositions optimales

La littérature montre que le comportement mécanique des assemblages brique–mortier dépend à la fois des propriétés des unités de maçonnerie, des propriétés du mortier et de l'adhérence développée à l'interface. La résistance des briques, la résistance du mortier et la qualité du contact entre les deux matériaux contribuent donc conjointement au comportement global de l'assemblage. Le choix des compositions finales ne peut dès lors pas être basé uniquement sur la résistance mécanique du mortier, même si ce critère reste déterminant.

Les deux compositions finales retenues sont les suivantes :

- SMR 0.8+F, correspondant à la composition 4 ;
- SMR 1.8+F, correspondant à la composition 6.

Ces deux mortiers présentent des résistances à 7 et 28 jours nettement différentes. À 28 jours, la composition SMR 0.8+F atteint une résistance moyenne en compression de 3,77 MPa, tandis que la composition SMR 1.8+F atteint 11,72 MPa. En les comparant à la résistance moyenne des briques à 63 jours, notée $R_{c63,brique}$, cela correspond respectivement à :

$$\frac{3{,}77}{R_{c63,brique}} \times 100 = \frac{3{,}77}{14{,}18} \times 100 = 26{,}6\,\% \tag{5.3}$$

$$\frac{11{,}72}{R_{c63,brique}} \times 100 = \frac{11{,}72}{14{,}18} \times 100 = 82{,}7\,\% \tag{5.4}$$

de la résistance moyenne des briques. Cette comparaison permet d'étudier deux situations distinctes : d'une part, un mortier présentant une résistance nettement inférieure à celle des briques et d'autre part, un mortier dont la résistance est du même ordre de grandeur que celle des briques développées.

Le choix de ces deux compositions permet également de comparer deux formulations présentant des rapports E/C très différents. La composition SMR 0.8+F possède un rapport E/C élevé, égal à 2,30, tandis que la composition SMR 1.8+F présente un rapport E/C plus faible, égal à 1,00. Malgré cette

différence importante, les consistances mesurées restent proches. Cette différence de teneur en eau peut toutefois influencer l'interaction entre le mortier frais et les briques comprimées, notamment par les phénomènes d'absorption d'eau par la brique et de développement de l'adhérence à l'interface.

Les deux mortiers retenus se distinguent également par leur teneur en ciment. La composition SMR 0.8+F présente une teneur en ciment limitée, égale à $144\,kg/m^3$, ce qui en fait la formulation la plus intéressante du point de vue de la réduction de l'impact environnemental. À l'inverse, la composition SMR 1.8+F contient $324\,kg/m^3$ de ciment, soit une teneur plus proche des dosages habituellement rencontrés pour des mortiers de maçonnerie classiques. Cette différence permet donc également d'évaluer l'influence du dosage en ciment sur le comportement des assemblages.

Le choix des compositions SMR 0.8+F et SMR 1.8+F repose donc sur une volonté de comparer deux mortiers contrastés : l'un, plus faiblement dosé en ciment, plus riche en eau et moins résistant, et l'autre, plus fortement dosé en ciment, moins riche en eau et plus résistant. Cette comparaison doit permettre d'identifier l'influence combinée de la résistance du mortier, du rapport E/C et de la teneur en ciment sur le comportement mécanique des assemblages brique–mortier.

Leurs compositions détaillées ainsi que les fractions volumiques des constituants sont présentées aux Tables 5.10 et 5.11.

5.3.3 Caractérisation des deux compositions optimales

5.3.3.1 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression

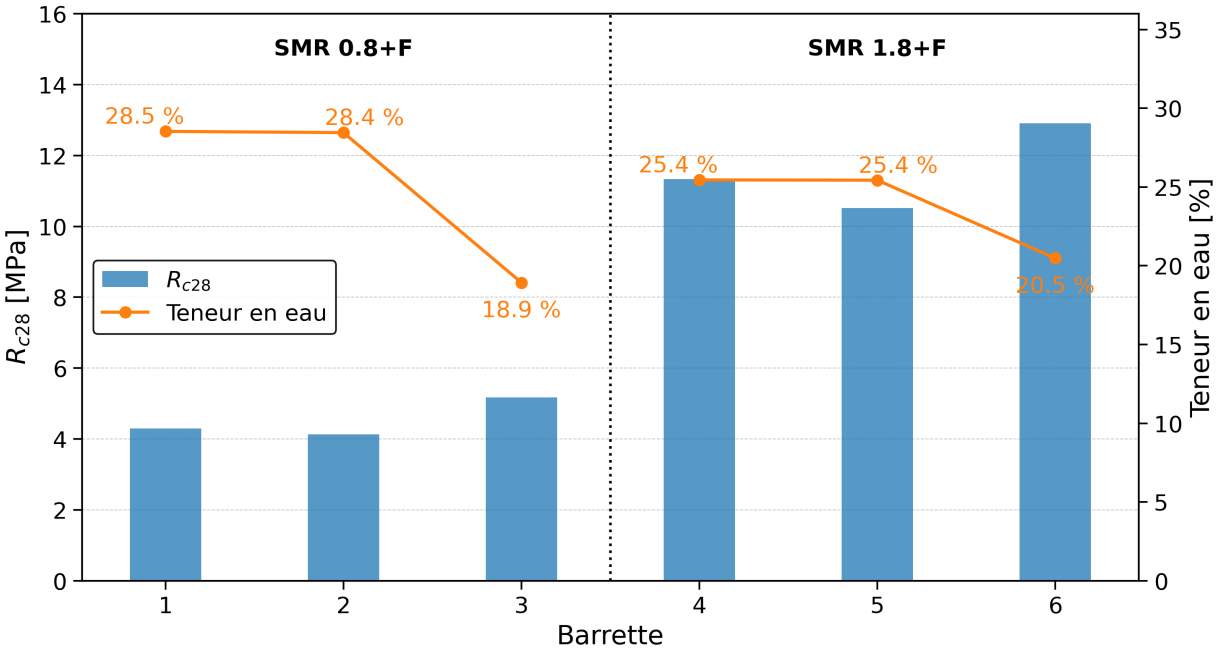


FIGURE 5.11 – Influence de la teneur en eau sur la résistance en compression des barrettes de mortier à 28 jours

La Figure 5.11 présente l'influence de la teneur en eau sur la résistance en compression des barrettes de mortier à 28 jours. Les barrettes 1 à 3 correspondent à la composition SMR 0.8+F, tandis que les barrettes 4 à 6 correspondent à la composition SMR 1.8+F. Pour chaque composition, les deux premières barrettes sont testées directement après la cure sous eau de 28 jours, tandis que la troisième est placée pendant 1 h à l'étuve à 70 $^{\circ}C$ avant l'essai de compression. Les barrettes 3 et 6 correspondent donc aux éprouvettes partiellement séchées avant essai.

Les résultats montrent que, pour chacune des deux compositions, la barrette ayant subi un passage à l'étuve présente une teneur en eau plus faible et une résistance en compression plus élevée que les barrettes testées directement après la cure sous eau. Ce comportement est cohérent avec les observations réalisées sur les briques comprimées : une diminution de la teneur en eau au moment de l'essai peut conduire à une augmentation de la résistance mesurée. L'état hydrique des éprouvettes apparaît donc comme un paramètre important pour l'interprétation des résultats mécaniques.

Pour la composition SMR 0.8+F, les barrettes 1 et 2 présentent des teneurs en eau proches de 28,5 %, tandis que la barrette 3, passée à l'étuve, présente une teneur en eau de 18,9 %. La perte de teneur en eau est donc d'environ 9,6 %. Pour la composition SMR 1.8+F, les barrettes 4 et 5 présentent des teneurs en eau proches de 25,4 %, tandis que la barrette 6 atteint 20,5 % après étuvage, soit une diminution d'environ 4,9 %.

Cette différence de perte d'eau après un même temps d'étuvage suggère que les barrettes SMR 0.8+F présentent une capacité de désorption plus importante que les barrettes SMR 1.8+F. Cette observation peut être liée à une porosité plus importante ou à un réseau poreux plus accessible dans la formulation SMR 0.8+F. En effet, cette composition possède un rapport E/C plus élevé et une teneur en ciment plus faible, deux paramètres susceptibles de conduire à une matrice cimentaire moins compacte.

Ces résultats confirment que l'état hydrique au moment de l'essai influence les résistances mesurées, comme déjà observé pour les briques, et doit donc être pris en compte dans l'interprétation des performances mécaniques.

5.3.3.2 Essai de transfert d'eau entre le mortier frais et les briques comprimées

La rétention d'eau des mortiers et la capacité d'absorption des unités de maçonnerie jouent un rôle important dans le développement de l'adhérence à l'interface. Un mortier présentant une bonne rétention d'eau limite les pertes d'eau rapides vers la brique et conserve ainsi une quantité d'eau plus favorable à l'hydratation du liant. À l'inverse, une brique fortement absorbante peut capter une partie importante de l'eau du mortier, ce qui peut modifier localement son rapport E/C et perturber la formation de l'adhérence.

Dans le cadre de ce travail, cette interaction est particulièrement importante, car les briques de béton comprimées utilisées présentent une porosité relativement élevée. L'absorption d'eau de ces briques a été étudiée par QUARTO [11] et atteint 19 %. Cette valeur est élevée pour une brique de béton et se situe dans la partie supérieure des valeurs généralement observées pour des briques de terre comprimée.

Toutefois, aucune méthode normalisée parfaitement adaptée à cette configuration n'a été identifiée pour évaluer directement ces échanges d'eau entre le mortier frais et la brique. Une méthode expérimentale spécifique, détaillée à la section 4.4.3.5, a donc été mise en place afin de comparer les deux

mortiers étudiés.

L'objectif de cet essai n'est pas de déterminer une valeur normalisée de rétention d'eau du mortier, mais de comparer le comportement des deux mortiers dans une configuration représentative des assemblages étudiés. Si l'un des mortiers entraîne une augmentation de masse plus faible de la brique et une progression plus limitée du front d'humidification, il pourra être considéré comme présentant une meilleure capacité de rétention d'eau vis-à-vis des briques utilisées.

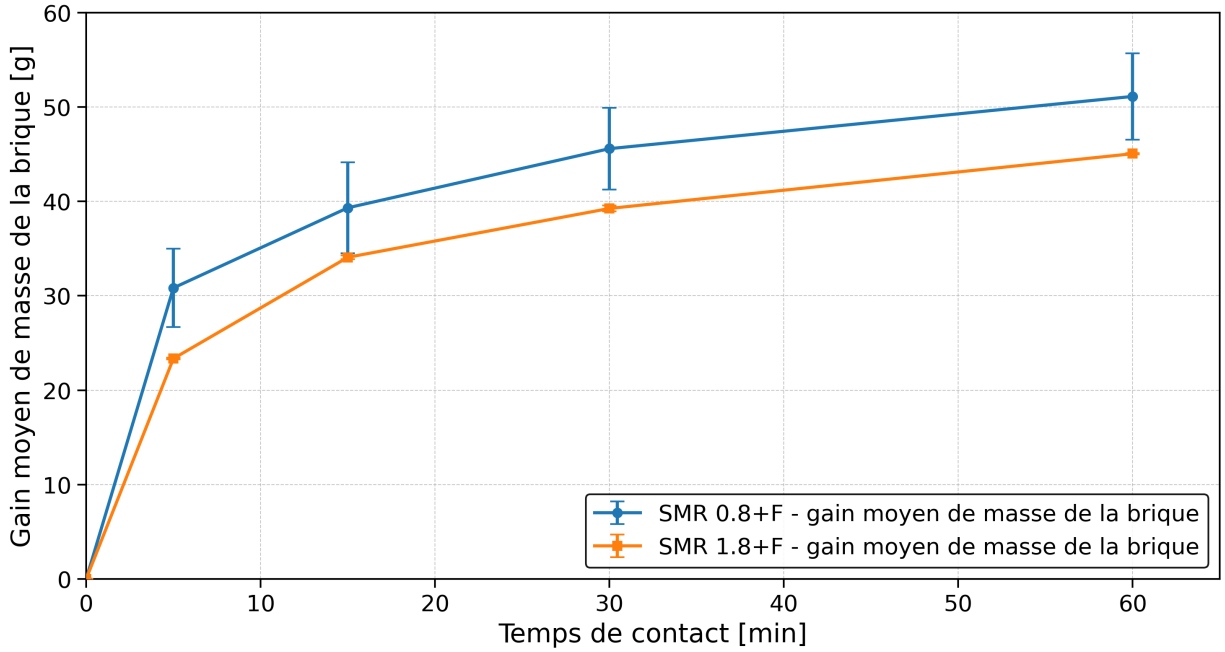


FIGURE 5.12 – Évolution du gain moyen de masse des briques durant les 60 premières minutes de contact avec les mortiers frais

La Figure 5.12 présente l'évolution du gain moyen de masse des briques durant les 60 premières minutes de contact avec les deux mortiers frais. Ce focus sur la première heure est particulièrement important, car les échanges d'eau les plus rapides se produisent dès les premières minutes de contact entre le mortier et l'unité de maçonnerie. Or, cette période correspond également au moment où le mortier est encore à l'état frais et où se met en place le contact initial à l'interface brique–mortier.

Les résultats montrent qu'une part importante du transfert d'eau a lieu très rapidement. Dès les premières minutes, les briques placées au contact du mortier SMR 0.8+F présentent un gain de masse plus élevé que celles placées au contact du mortier SMR 1.8+F. À $5\,min$, le gain moyen de masse est d'environ $30{,}8\,g$ pour le mortier SMR 0.8+F, contre $23{,}4\,g$ pour le mortier SMR 1.8+F. Cette différence indique que le système brique–mortier SMR 0.8+F conduit à un transfert d'eau plus important vers la brique dès le début de l'essai.

Entre 5 et $60\,min$, les deux courbes présentent ensuite une évolution similaire. La différence entre les gains moyens de masse reste relativement stable, ce qui suggère que le transfert initial est déterminant dans l'écart observé entre les deux mortiers. Le mortier SMR 1.8+F semble donc limiter davantage

le transfert d'eau vers la brique durant les premières minutes, ce qui peut être interprété comme une meilleure capacité de rétention d'eau dans les conditions de l'essai.

Il convient toutefois de noter que les résultats obtenus pour le mortier SMR 0.8+F présentent des écarts-types plus importants que ceux obtenus pour le mortier SMR 1.8+F. Cette dispersion peut provenir d'une variabilité d'absorption entre les briques utilisées, d'une différence locale de contact entre la brique et le mortier frais, ou encore d'une hétérogénéité du mortier au moment de la mise en place.

Les briques utilisées pour cet essai avaient été stockées dans le laboratoire des mortiers avant la mise en contact avec le mortier frais. Elles se trouvaient donc dans un état relativement sec. Dans ces conditions, l'absorption d'eau par les briques peut être importante dès les premières minutes de contact, comme le montrent les gains de masse mesurés. Ces résultats mettent ainsi en évidence l'importance de l'état hydrique du support lors de la réalisation d'un assemblage brique–mortier. Une humidification préalable des briques pourrait limiter une absorption trop rapide de l'eau du mortier et favoriser une mise en place plus homogène de l'interface.

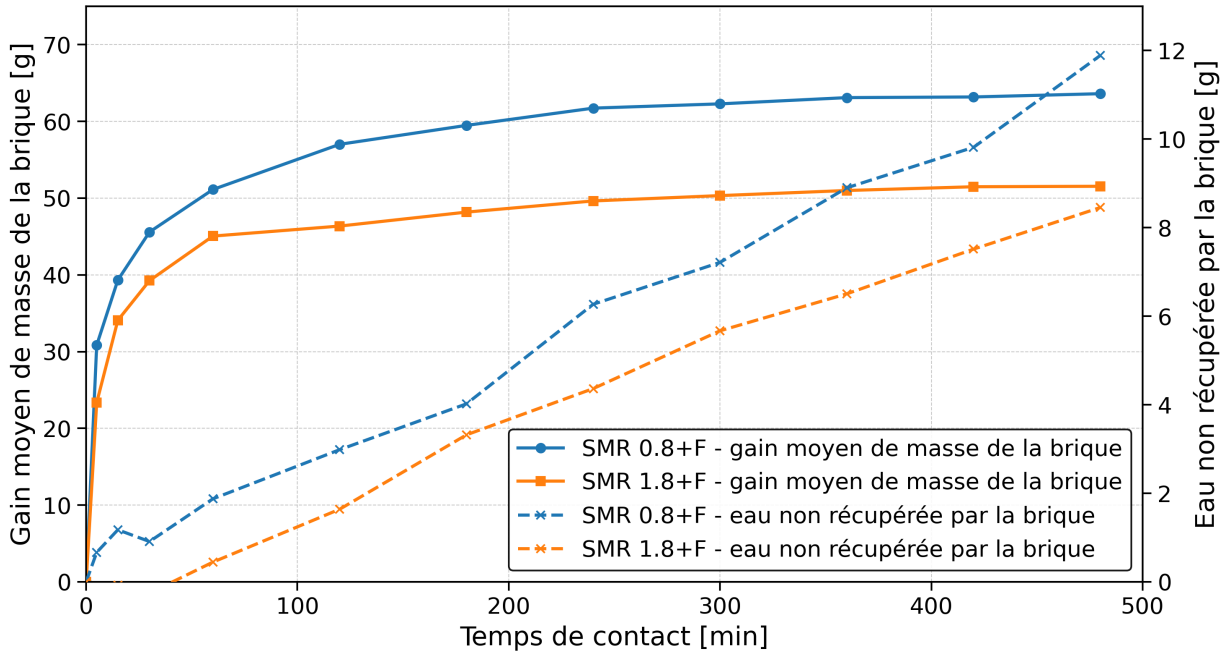


FIGURE 5.13 – Évolution du gain moyen de masse des briques et des différences de masse associées au transfert d'eau entre les mortiers frais et les briques comprimées

La Figure 5.13 présente l'évolution du gain moyen de masse des briques sur l'ensemble de la durée de l'essai, ainsi que la quantité d'eau perdue par le mortier mais non récupérée par la brique. Les deux courbes principales montrent que le gain de masse augmente rapidement durant les premières minutes, puis ralentit progressivement jusqu'à tendre vers une stabilisation après environ 240 min. Cette évolution traduit une diminution progressive de la vitesse de transfert d'eau entre le mortier frais et la brique, jusqu'à atteindre un état proche de l'équilibre.

Le gain de masse final des briques est plus élevé pour le mortier SMR 0.8+F que pour le mortier SMR

1.8+F. À la fin de l'essai, les briques en contact avec le mortier SMR 0.8+F présentent un gain moyen d'environ 63,6 g, contre environ 51,5 g pour le mortier SMR 1.8+F. Cette différence confirme que le transfert d'eau vers la brique est globalement plus important avec le mortier SMR 0.8+F.

L'analyse des premières minutes montre que ce transfert est très rapide pour les deux mortiers. Après seulement 5 *min*, le gain moyen de masse atteint environ 30,8 g pour le mortier SMR 0.8+F, soit près de 48 % du gain final. Pour le mortier SMR 1.8+F, il atteint environ 23,4 g, soit environ 45 % du gain final. Une part importante de l'eau transférée à la brique est donc absorbée dès les premières minutes de contact.

Après 60 *min*, le gain de masse représente déjà la majeure partie du gain final. Pour le mortier SMR 0.8+F, il atteint environ 51,1 g, soit près de 80 % du gain total. Pour le mortier SMR 1.8+F, il atteint environ 45,1 g, soit près de 87 % du gain total. Ces valeurs montrent que l'absorption par la brique est principalement concentrée durant la première heure de contact. Au-delà de cette période, le gain de masse évolue beaucoup plus lentement, ce qui indique que la capacité d'absorption immédiate de la brique devient progressivement moins déterminante.

Les courbes en pointillés représentent la quantité d'eau perdue par le mortier mais non récupérée par la brique. Cette grandeur est obtenue par différence entre la perte moyenne de masse du mortier et le gain moyen de masse de la brique.

L'évolution de ces courbes montre que l'eau non récupérée par la brique augmente surtout après la première heure, lorsque le gain de masse des briques commence à se stabiliser. Cette tendance suggère qu'au début de l'essai, l'eau perdue par le mortier est principalement absorbée par la brique. Ensuite, lorsque l'absorption ralentit, une part croissante de l'eau perdue par le mortier n'est plus transférée vers la brique et peut être attribuée en grande partie à l'évaporation. Le transfert d'eau vers la brique est donc dominant au début de l'essai, tandis que l'évaporation devient plus significative lorsque l'absorption diminue.

5.4 Assemblages brique–mortier

L'analyse des assemblages brique–mortier vise à évaluer le comportement mécanique du système formé par les briques comprimées et les mortiers développés. Contrairement aux essais réalisés sur les matériaux pris séparément, les essais sur assemblages permettent d'étudier l'interaction entre les constituants, en particulier au niveau de l'interface brique–mortier.

Cette interface joue un rôle déterminant dans les sollicitations de traction et de cisaillement, pour lesquelles la rupture dépend directement de la qualité de l'adhérence entre la brique et le mortier. En compression, le comportement est plus global : il dépend à la fois de la résistance des briques, des propriétés du mortier, de la qualité de l'interface et de la répartition des contraintes dans l'assemblage.

L'analyse est organisée en trois étapes. Les essais de cisaillement sont d'abord étudiés afin d'évaluer la cohésion initiale de l'interface. Les essais de traction directe permettent ensuite d'analyser l'adhérence sous une sollicitation normale au plan du joint. Enfin, les essais de compression sont interprétés en tenant compte des résistances propres des constituants, des modes de rupture observés et des résultats obtenus lors des essais d'adhérence.

Dans la suite, le premier mortier désigne le mortier SMR 0.8+F, tandis que le second désigne le mortier SMR 1.8+F.

5.4.1 Essai de cisaillement

5.4.1.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues

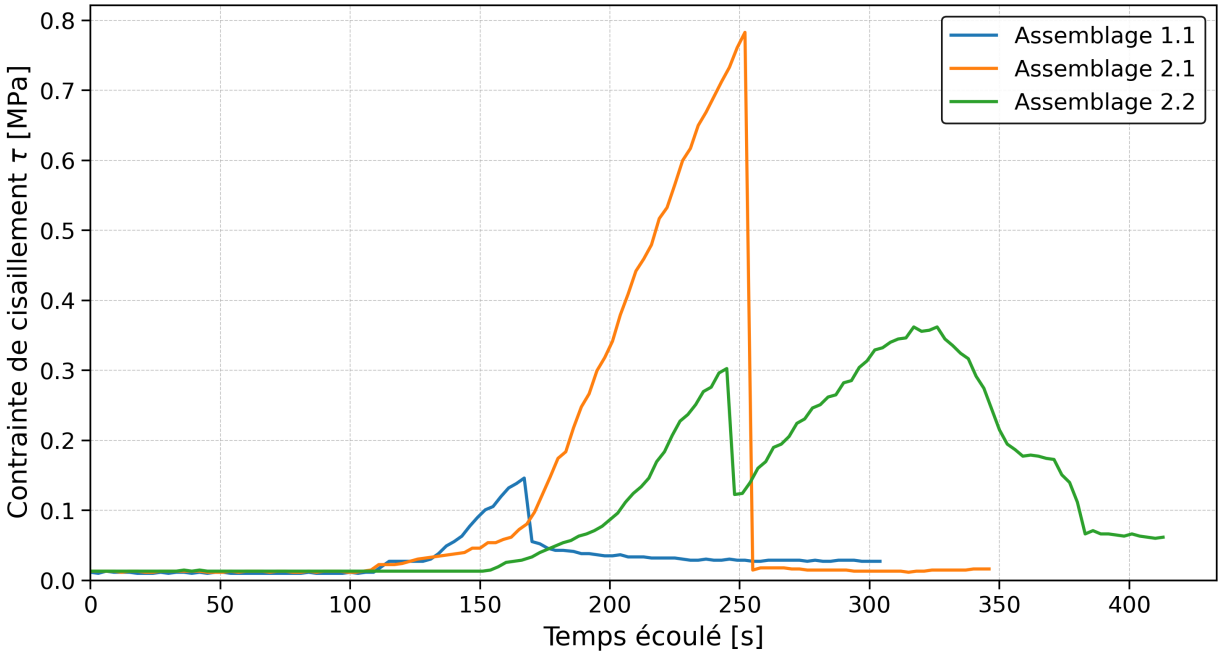


FIGURE 5.14 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les assemblages testés

La Figure 5.14 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du temps pour les assemblages testés. Les courbes mettent en évidence un comportement fragile, caractérisé par une montée progressive de la contrainte jusqu'à un pic, suivie d'une chute rapide après rupture.

L'assemblage 1.1, réalisé avec le premier mortier, atteint une contrainte maximale d'environ $0{,}146\,MPa$. Après ce pic, la contrainte chute brutalement et se stabilise à une valeur résiduelle faible, proche de $0{,}03\,MPa$. Ce comportement traduit une rupture rapide de l'interface brique–mortier. L'assemblage 1.2 s'est quant à lui rompu avant l'essai, à la suite d'une erreur de manipulation. Cette rupture prématurée ne peut pas être exploitée comme une mesure de résistance, mais elle souligne la fragilité de l'assemblage réalisé avec ce mortier.

Les assemblages 2.1 et 2.2, réalisés avec le second mortier, présentent des résistances plus élevées. L'assemblage 2.1 atteint une contrainte maximale d'environ $0{,}78\,MPa$, suivie d'une chute brutale de la contrainte. L'assemblage 2.2 présente un premier pic proche de $0{,}30\,MPa$, puis une remontée de la contrainte jusqu'à environ $0{,}36\,MPa$. Cette seconde augmentation n'est pas retenue comme résistance d'adhérence, car elle correspond à un mauvais contact après rupture entre le dispositif de cisaillement

et le joint de mortier, entraînant un écrasement local du mortier. Pour cet assemblage, la résistance retenue correspond donc au premier pic.

Ces résultats montrent que le second mortier permet de mobiliser une résistance au cisaillement plus élevée que celle du premier. La différence entre les assemblages 2.1 et 2.2 met toutefois en évidence une dispersion importante des résultats.

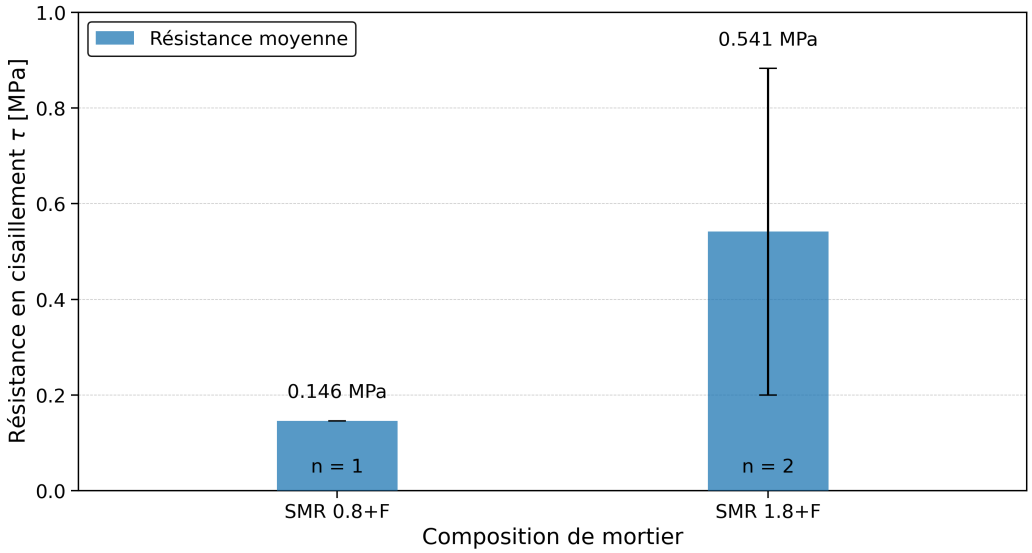


FIGURE 5.15 – Comparaison des résistances moyennes en cisaillement des assemblages brique–mortier

La Figure 5.15 compare les résistances moyennes en cisaillement obtenues pour les deux mortiers. Pour le premier mortier, une seule valeur exploitable est disponible, car le second assemblage s'est rompu avant l'essai. Aucun écart-type ne peut donc être calculé pour cette formulation.

Pour le second mortier, la résistance moyenne est calculée à partir des deux assemblages testés. La barre d'erreur montre une dispersion importante entre les deux résultats, ce qui impose une interprétation prudente. Malgré cette variabilité, la résistance moyenne obtenue avec le second mortier reste nettement supérieure à celle mesurée avec le premier mortier. Cette différence confirme une meilleure cohésion initiale de l'interface brique–mortier pour la seconde formulation.

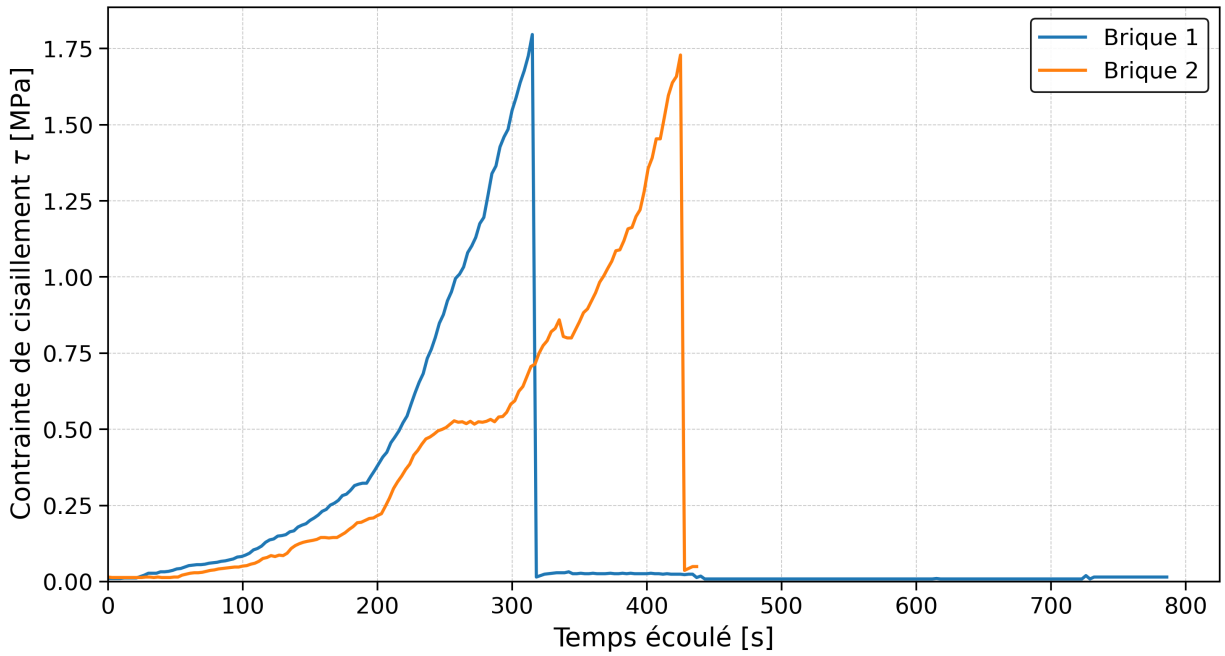


FIGURE 5.16 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les briques seules

La Figure 5.16 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du temps pour deux éprouvettes de brique testées seules. Les deux courbes présentent un comportement fragile similaire, avec une augmentation progressive de la contrainte jusqu'au pic, puis une chute brutale après rupture.

Les résistances maximales obtenues sont proches, avec des valeurs de $1{,}80\,MPa$ et $1{,}73\,MPa$. Cette faible différence indique une bonne répétabilité de l'essai dans les conditions considérées. Ces valeurs ne doivent toutefois pas être interprétées comme une résistance normalisée de la brique au cisaillement, mais comme un point de comparaison avec les assemblages.

Les résistances mesurées sur les briques seules sont nettement supérieures à celles obtenues sur les assemblages brique–mortier. La comparaison montre donc que la zone critique sous sollicitation de cisaillement n'est pas la brique elle-même, mais bien l'interface brique–mortier.

5.4.1.2 Observation des modes de rupture

L'objectif des essais de cisaillement sur assemblages est d'obtenir une rupture au niveau de l'interface brique–mortier, afin d'évaluer la cohésion développée entre les deux matériaux. Lorsque la rupture se produit dans la brique ou au sein du joint de mortier, la valeur mesurée ne caractérise plus directement l'adhérence interfaciale. Elle correspond alors plutôt à la résistance au cisaillement du matériau dans lequel la rupture s'est produite. Dans ce cas, le résultat doit être interprété avec prudence.



FIGURE 5.17 – Assemblages brique–mortier après l'essai de cisaillement



FIGURE 5.18 – Éprouvettes de brique après l'essai de cisaillement



FIGURE 5.19 – Faces de rupture des assemblages brique–mortier



FIGURE 5.20 – Faces de rupture des éprouvettes de brique

Dans les essais réalisés, les assemblages brique–mortier présentent principalement une rupture localisée au niveau de l'interface (Figure 5.17 et Figure 5.19). Ce mode de rupture est cohérent avec l'objectif de l'essai, puisqu'il permet d'évaluer la qualité de l'adhérence entre la brique et le mortier.

Les faces de rupture des assemblages sont relativement planes et peu rugueuses. Cette observation suggère un accrochage mécanique limité entre le mortier et la surface de la brique. L'adhérence semble donc principalement gouvernée par la qualité du contact et par les mécanismes physico-chimiques développés à l'interface, plutôt que par un ancrage mécanique.

Cette faible rugosité peut expliquer en partie les ruptures nettes observées à l'interface, en particulier pour le premier mortier. Elle rend également l'assemblage plus sensible aux conditions de mise en œuvre, à l'état hydrique de la brique et à la capacité du mortier à conserver suffisamment d'eau au contact du support.

Les éprouvettes de brique testées seules présentent un mode de rupture différent. Dans ce cas, la rupture se développe à l'intérieur même du matériau et non au niveau d'une interface (Figure 5.18). Les surfaces de rupture sont plus irrégulières et plus granulaires que celles observées pour les assemblages (Figure 5.20). Cette différence confirme que les valeurs plus élevées obtenues sur les briques seules correspondent à la résistance propre du matériau, tandis que les valeurs mesurées sur les assemblages sont principalement contrôlées par la faiblesse de l'interface brique–mortier.

5.4.1.3 Interprétation de la résistance initiale au cisaillement

Les essais de cisaillement réalisés sur les assemblages doivent être interprétés comme une évaluation de la résistance initiale au cisaillement de l'interface brique–mortier. En effet, les échantillons ont été testés avec une précompression verticale très faible. La force verticale appliquée était de l'ordre de $85\,N$ pour une surface d'environ $7853\,mm^2$, ce qui correspond à une contrainte normale proche de $0{,}01\,MPa$. Cette valeur est trop faible pour mobiliser de manière représentative la composante de frottement entre la brique et le mortier.

Dans ces conditions, la résistance mesurée correspond principalement à la composante cohésive de l'interface. Elle peut donc être rapprochée de la résistance initiale au cisaillement, notée f_{vk0}, mais ne peut pas être considérée comme une résistance au cisaillement complète telle qu'elle serait définie par un critère de type Mohr–Coulomb, comme décrit par l'équation 2.1. Pour déterminer correctement une telle loi de comportement, il serait nécessaire de réaliser plusieurs essais avec différents niveaux de précompression. La pente de la droite obtenue permettrait alors d'évaluer le coefficient de frottement, tandis que l'ordonnée à l'origine donnerait la cohésion initiale.

À titre de comparaison, l'Eurocode 6 propose des valeurs de base de la résistance initiale au cisaillement f_{vk0} en fonction du type d'élément de maçonnerie et de la classe de mortier [45]. Les classes M2,5–M9 et M10–M20 désignent des classes de résistance en compression des mortiers. Un mortier M2,5–M9 correspond ainsi à un mortier faiblement résistant, dont la résistance caractéristique en compression est de l'ordre de $2,5$ à $9\,MPa$, tandis qu'un mortier M10–M20 correspond à un mortier plus résistant, avec une résistance caractéristique comprise entre 10 et $20\,MPa$.

Pour une maçonnerie réalisée avec un mortier d'usage général, les valeurs usuelles peuvent être prises égales à $0{,}20\,MPa$ pour un mortier de classe M2,5–M9, et à $0{,}30\,MPa$ pour un mortier de classe M10–M20 (Annexe B). Ces valeurs constituent des résistances caractéristiques de référence et ne correspondent donc pas directement à des valeurs moyennes expérimentales.

Dans le cadre de ce travail, le premier mortier présente une résistance initiale moyenne au cisaillement de $0{,}146\,MPa$. Cette valeur est inférieure à la valeur de base $f_{vk0} = 0{,}20\,MPa$ associée aux mortiers de classe M2,5–M9, tout en restant dans le même ordre de grandeur. Elle traduit donc une cohésion initiale faible, mais non négligeable, à l'interface brique–mortier.

Le second mortier présente quant à lui une résistance initiale moyenne au cisaillement de $0{,}541\,MPa$. Cette valeur est nettement supérieure à la valeur de base $f_{vk0} = 0{,}30\,MPa$ associée aux mortiers de classe M10–M20. Ce résultat indique une meilleure adhérence entre la brique et le mortier, ainsi qu'une cohésion initiale plus importante de l'interface.

La différence entre les deux mortiers est marquée : la résistance initiale moyenne au cisaillement passe de $0{,}146\,MPa$ pour le premier mortier à $0{,}541\,MPa$ pour le second, soit une valeur environ 3,7

fois plus élevée. Cette augmentation est cohérente avec les observations réalisées sur les faciès de rupture, qui indiquent une interface plus efficace pour le second mortier.

Ainsi, les essais réalisés ne permettent pas de déterminer une loi complète de cisaillement de type Mohr–Coulomb, car le niveau de précompression appliqué est trop faible pour mobiliser correctement la composante de frottement. Ils permettent en revanche de comparer la cohésion initiale développée à l'interface. Dans ces conditions, le second mortier présente une adhérence nettement supérieure à celle du premier mortier.

5.4.2 Essai de traction directe

5.4.2.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues

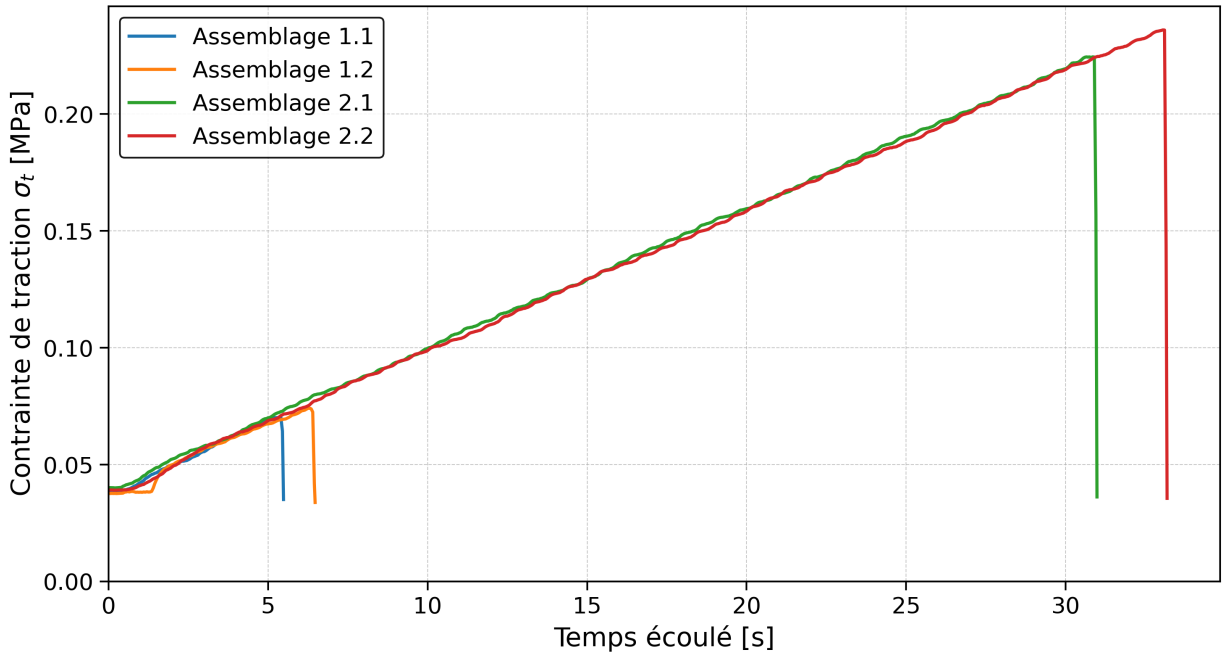


FIGURE 5.21 – Évolution de la contrainte de traction en fonction du temps pour les assemblages brique–mortier

La Figure 5.21 présente l'évolution de la contrainte de traction σ_t en fonction du temps pour les assemblages brique–mortier. Les courbes montrent un comportement fragile, caractérisé par une augmentation progressive de la contrainte jusqu'à un pic, suivie d'une chute rapide après rupture. Ce comportement est attendu pour un essai d'adhérence sollicité perpendiculairement au plan du joint.

Les assemblages réalisés avec le premier mortier présentent des résistances faibles, comprises entre 0,070 et 0,073 MPa. Les assemblages réalisés avec le second mortier atteignent des valeurs plus élevées, comprises entre 0,22 et 0,24 MPa. La résistance en traction directe est donc environ trois fois plus élevée avec le second mortier.

Cette différence indique une meilleure adhérence entre la brique et le mortier pour la seconde formulation. Elle est cohérente avec les résultats obtenus en cisaillement, où le second mortier développait

également une cohésion initiale plus importante à l'interface. La traction directe confirme donc que l'amélioration apportée par le second mortier concerne principalement la qualité de liaison avec la brique.

Dans ce type d'essai, la sollicitation est appliquée perpendiculairement au plan du joint. La résistance mesurée dépend donc principalement de la qualité de l'interface brique–mortier. Les essais de traction directe doivent ainsi être interprétés comme des essais d'adhérence.

En complément, les briques testées seules en traction directe présentent également un comportement fragile, mais avec des résistances plus élevées. Cette comparaison confirme que la rupture des assemblages est principalement gouvernée par la faiblesse du joint ou de l'interface brique–mortier, et non par la résistance propre de la brique.

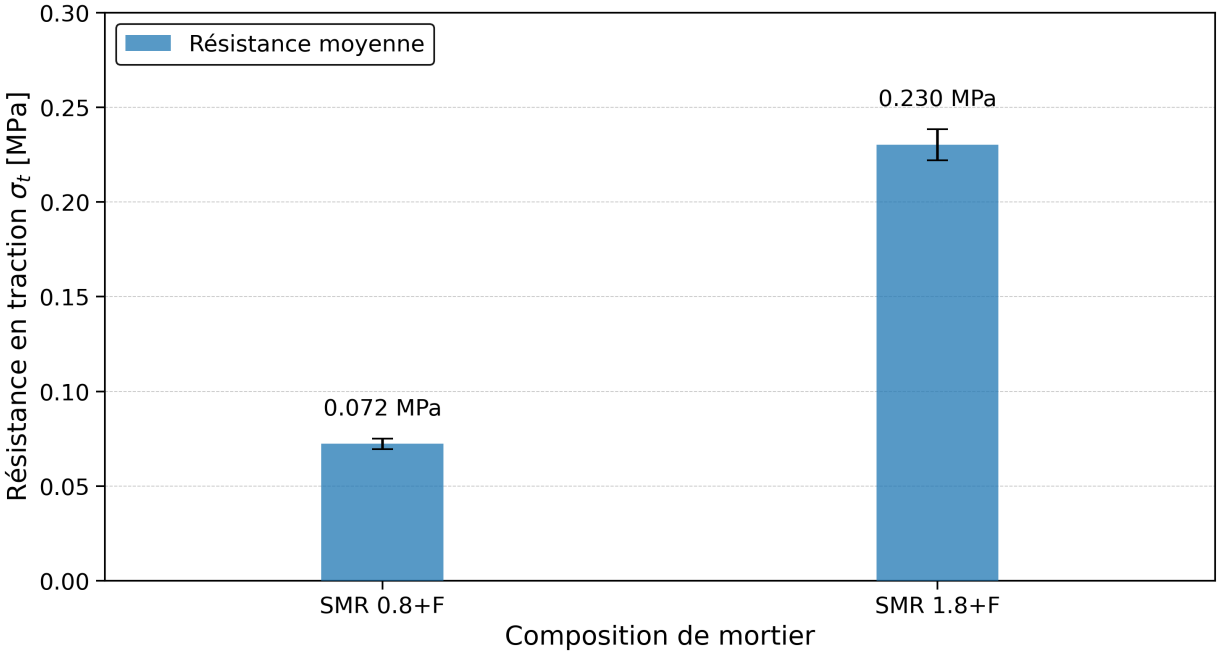


FIGURE 5.22 – Comparaison des résistances moyennes en traction directe des assemblages

La Figure 5.22 compare les résistances moyennes en traction directe obtenues pour les deux compositions de mortier. Le premier mortier atteint une résistance moyenne de 0,072 MPa, contre 0,230 MPa pour le second. Cette augmentation confirme l'effet favorable de la seconde formulation sur l'adhérence brique–mortier.

Les écarts-types restent faibles pour les deux séries d'essais, avec 0,0027 MPa pour le premier mortier et 0,0082 MPa pour le second. Les coefficients de variation sont également proches, respectivement 3,68 % et 3,56 %. Malgré le nombre limité d'échantillons, ces valeurs indiquent une bonne répétabilité des essais de traction directe.

5.4.2.2 Observation des modes de rupture

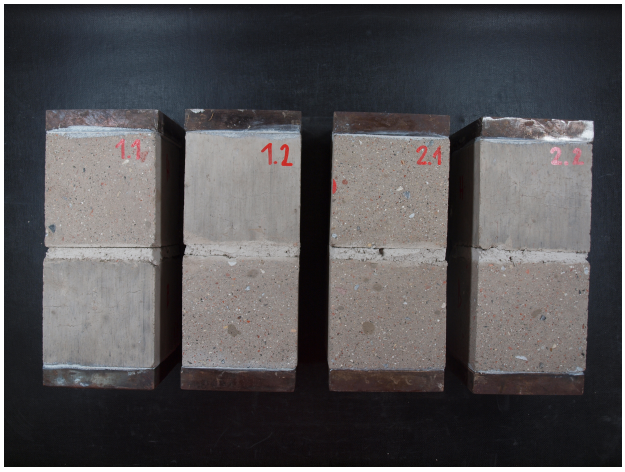


FIGURE 5.23 – Assemblages brique–mortier après l'essai de traction directe



FIGURE 5.24 – Éprouvettes de brique après l'essai de traction directe

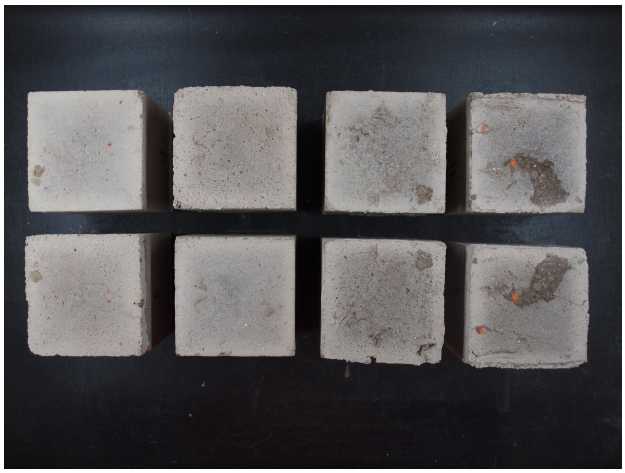


FIGURE 5.25 – Faces de rupture des assemblages brique–mortier

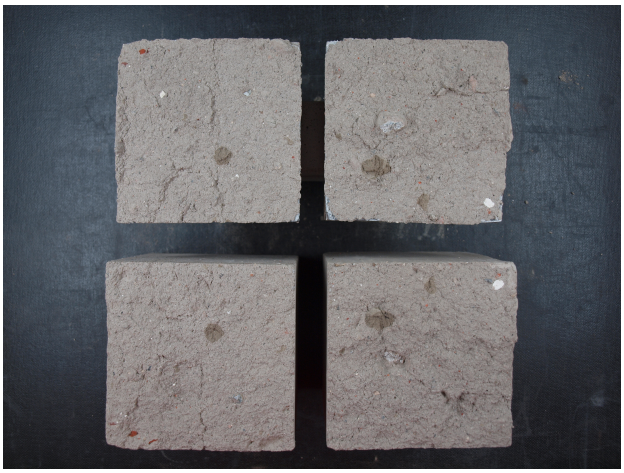


FIGURE 5.26 – Faces de rupture des éprouvettes de briques

Les Figures 5.23 et 5.24 présentent respectivement les assemblages brique–mortier et les briques utilisées pour les essais de traction directe. Les Figures 5.25 et 5.26 montrent les faces de rupture obtenues après traction directe.

Pour les assemblages réalisés avec le premier mortier, la rupture est principalement localisée à l'interface brique–mortier. Les surfaces de rupture sont relativement propres et peu de mortier reste accroché aux faces des briques. Ce faciès correspond à une rupture majoritairement adhésive et traduit une faible qualité de liaison entre les deux matériaux.

Pour les assemblages réalisés avec le second mortier, le faciès est plus mixte. Une partie du mortier reste localement attachée aux surfaces des briques et certaines zones montrent un léger arrachement

du matériau support. La rupture ne se limite donc plus strictement à l'interface, ce qui indique une adhérence plus efficace et une mobilisation partielle du mortier ou de la surface de la brique.

Cette différence de faciès est cohérente avec les résistances mesurées. Le premier mortier conduit à un décollement plus net de l'interface, tandis que le second mortier développe une liaison plus importante avec la brique.

Les essais réalisés sur briques seules servent de point de comparaison. Dans ce cas, la rupture ne se produit pas au niveau d'une interface brique–mortier, mais au voisinage de l'interface entre la brique et la plaque métallique collée à l'époxy. Les surfaces de rupture sont plus irrégulières et plus granulaires que celles observées pour les assemblages.

Ces essais doivent être interprétés avec prudence, car la rupture peut être influencée par la qualité du collage entre la plaque métallique et la brique. Ils montrent néanmoins que les résistances obtenues sur les briques seules sont supérieures à celles des assemblages. Dans les conditions étudiées, la zone critique en traction directe est donc bien l'interface brique–mortier.

La zone critique des assemblages sollicités en traction est donc bien le joint de mortier ou l'interface brique–mortier et non la résistance propre de la brique. En revanche, les essais sur briques seules ne permettent pas de déterminer de manière parfaitement fiable la résistance intrinsèque en traction de la brique, en raison de l'influence possible du collage des plaques métalliques.

5.4.2.3 Interprétation de l'adhérence en traction

Les essais de traction directe réalisés sur les assemblages évaluent principalement la capacité du joint à transmettre une sollicitation normale à son plan. Comme la rupture est localisée au niveau du joint ou de l'interface brique–mortier, la résistance mesurée peut être interprétée comme une résistance d'adhérence en traction.

Dans les approches normatives de la maçonnerie, ce type de sollicitation peut être rapproché des résistances caractéristiques en flexion f_{xk1} et f_{xk2} (Annexe C). La valeur f_{xk1} correspond à une rupture selon un plan parallèle aux joints horizontaux, tandis que f_{xk2} concerne une rupture selon un plan perpendiculaire aux joints horizontaux. L'essai réalisé sollicite directement l'interface en traction normale ; il est donc plus proche du mécanisme associé à f_{xk1}, sans pouvoir être directement assimilé à un essai de flexion normalisé.

À titre indicatif, les valeurs caractéristiques de f_{xk1} proposées pour les maçonneries courantes sont généralement faibles, de l'ordre de 0,05 à $0{,}20\,MPa$ selon le type d'élément et la classe de mortier [45]. Cet ordre de grandeur confirme que la traction normale au joint constitue généralement une sollicitation défavorable pour les assemblages maçonnés.

Dans le présent travail, le premier mortier atteint une résistance moyenne de $0{,}072\,MPa$, située dans la partie basse de cet ordre de grandeur. Le second mortier atteint $0{,}230\,MPa$, soit une valeur légèrement supérieure aux valeurs courantes associées à f_{xk1}. Cette comparaison confirme l'amélioration de l'adhérence avec la seconde formulation.

5.4.3 Essai de compression

5.4.3.1 Analyse des courbes et des résistances obtenues

Les essais de compression sur assemblages sont réalisés sous déplacement imposé. La représentation de la contrainte en fonction du déplacement vertical est donc privilégiée, car elle permet d'observer directement la raideur apparente, la résistance maximale et l'évolution post-pic des assemblages.

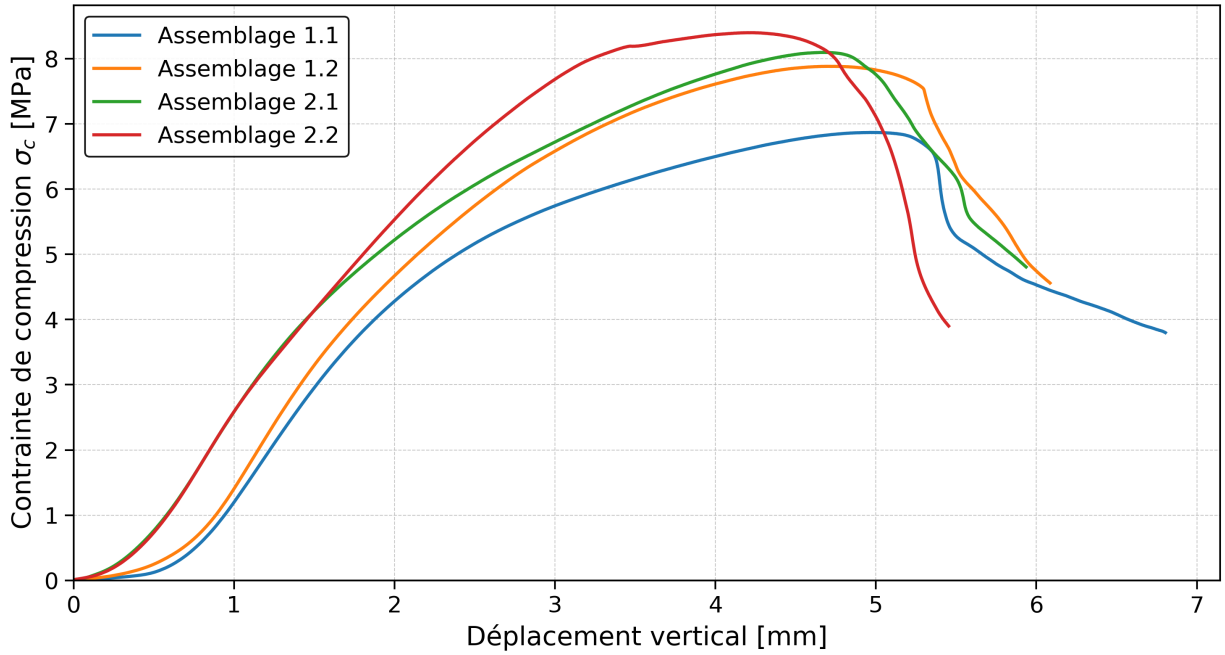


FIGURE 5.27 – Évolution de la contrainte de compression en fonction du déplacement vertical pour les assemblages brique–mortier

La Figure 5.27 montre que les quatre assemblages présentent un comportement globalement similaire en compression. La contrainte augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue après le pic, ce qui traduit l'endommagement progressif de l'assemblage.

Les assemblages réalisés avec le second mortier atteignent des résistances légèrement plus élevées que ceux réalisés avec le premier mortier. L'écart reste toutefois limité au regard de la différence importante entre les résistances propres des deux mortiers. Cela indique que, sous compression, la résistance de l'assemblage est principalement gouvernée par le comportement global du système brique–mortier, et non par la seule résistance du mortier.

Les courbes des assemblages réalisés avec le premier mortier présentent une pente initiale plus faible. Cette observation suggère une raideur apparente plus limitée, probablement liée à la résistance plus faible du mortier et à une interface moins efficace. La phase post-pic semble également légèrement plus étalée pour ces assemblages, ce qui peut traduire un endommagement plus progressif après atteinte de la résistance maximale. Il convient toutefois de rester prudent dans l'interprétation, car le nombre d'échantillons est limité et la réponse post-pic peut être influencée par les conditions d'appui, les défauts de planéité, l'excentricité éventuelle du chargement ou encore la localisation des fissures.

Ainsi, les courbes de compression permettent principalement de comparer les résistances maximales et la forme générale de la réponse mécanique. Elles ne permettent pas, dans la configuration expérimentale utilisée, de déterminer précisément les propriétés élastiques intrinsèques des assemblages.

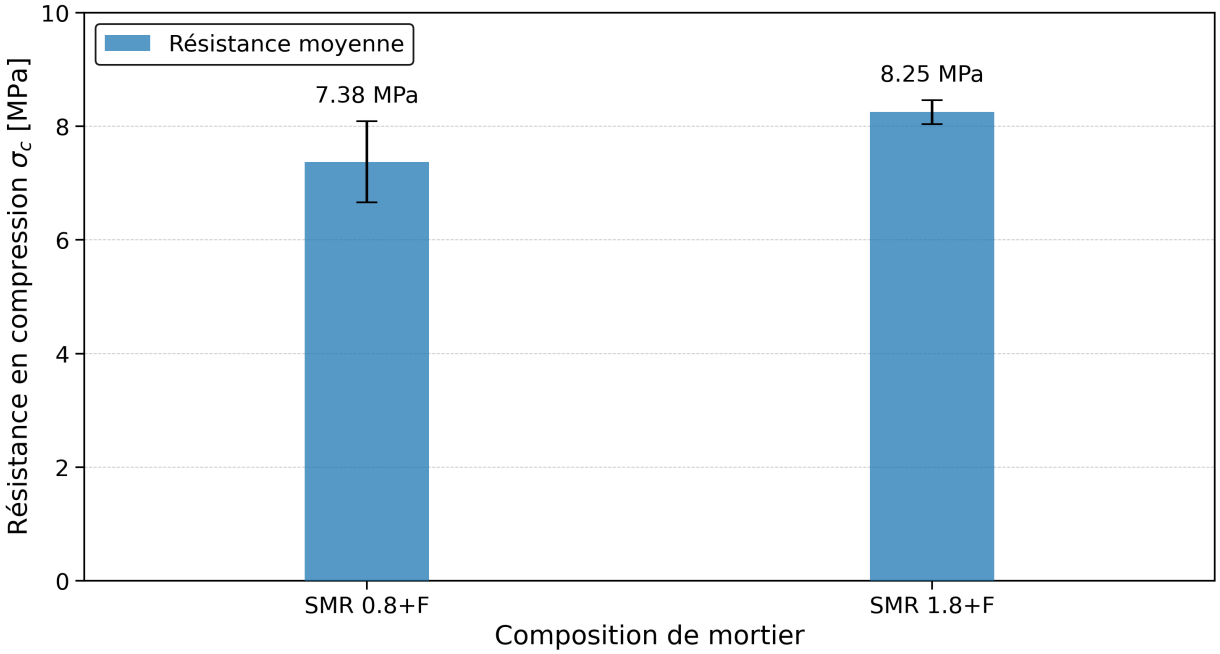


FIGURE 5.28 – Comparaison des résistances moyennes en compression des assemblages brique–mortier

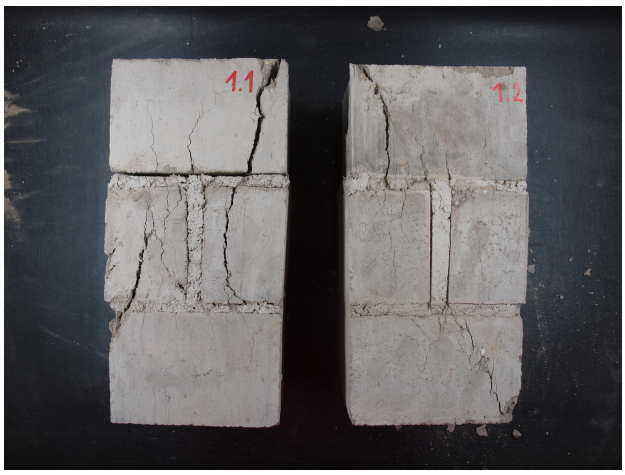
La Figure 5.28 compare les résistances moyennes en compression obtenues pour les assemblages réalisés avec les deux mortiers. Le premier mortier conduit à une résistance moyenne de 7,38 MPa, tandis que le second atteint 8,25 MPa. L'augmentation est donc d'environ 12 %.

Cette différence reste modérée par rapport à l'écart entre les résistances propres des deux mortiers (Section 5.3.2.2). Le second mortier présente en effet une résistance en compression environ trois fois plus élevée que le premier, mais cette différence ne se répercute pas proportionnellement sur la résistance des assemblages. Sous compression, les briques assurent une part importante de la reprise des efforts, tandis que le mortier intervient principalement dans la transmission des charges et la répartition des contraintes entre les unités.

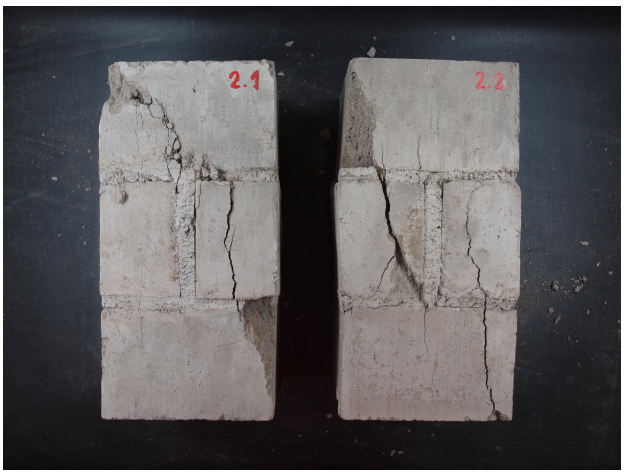
La dispersion des résultats distingue davantage les deux formulations. Pour les assemblages réalisés avec le premier mortier, l'écart-type est de 0,71 MPa, soit un coefficient de variation de 9,68 %. Pour le second mortier, l'écart-type est limité à 0,21 MPa, soit un coefficient de variation de 2,57 %. Cette plus faible dispersion suggère une transmission des efforts plus homogène dans les assemblages réalisés avec le second mortier.

Cette dispersion plus importante peut être liée à la plus faible adhérence observée pour le premier mortier lors des essais de traction directe et de cisaillement. Une interface moins adhérente peut entraîner une transmission des contraintes moins homogène et rendre le comportement de l'assemblage plus sensible aux défauts locaux de contact, de planéité ou de mise en œuvre.

5.4.3.2 Observation des modes de rupture



(a) Assemblages avec mortier SMR 0.8+F – face avant



(b) Assemblages avec mortier SMR 1.8+F – face avant



(c) Assemblages avec mortier SMR 0.8+F – face latérale



(d) Assemblages avec mortier SMR 1.8+F – face latérale

FIGURE 5.29 – Modes de rupture observés après les essais de compression sur assemblages brique–mortier

La Figure 5.29 présente les modes de rupture observés après les essais de compression sur assemblages. Les fissures sont principalement verticales ou subverticales et traversent plusieurs briques. Ce type de fissuration est caractéristique d'un matériau fragile soumis à une compression axiale.

Sous l'effet du chargement vertical, les briques tendent à se dilater latéralement par effet de Poisson. Cette dilatation génère des contraintes de traction transversales dans les unités. Comme la résistance en traction des briques est nettement plus faible que leur résistance en compression, ces contraintes provoquent un fendage vertical ou subvertical. Les ruptures observées ne correspondent donc pas à un simple écrasement du matériau, mais à un mécanisme de fendage induit par la compression.

Les assemblages réalisés avec le premier mortier (Figure 5.29a et Figure 5.29c) présentent plusieurs fissures traversant les briques, ainsi que des ouvertures localisées au voisinage des joints. Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus en traction directe et en cisaillement, qui ont montré une adhérence plus faible pour ce mortier. Une interface moins efficace peut favoriser des décollements locaux lorsque les tractions transversales se développent sous compression.

Les assemblages réalisés avec le second mortier (Figure 5.29b et Figure 5.29d) présentent également une fissuration verticale marquée. Toutefois, les fissures semblent moins strictement localisées au niveau de l'interface brique–mortier. Cette observation est cohérente avec une meilleure adhérence du second mortier qui limite le décollement local du joint. La rupture reste néanmoins contrôlée par le comportement global de l'assemblage et par la fissuration des briques sous l'effet des tractions transversales.

Certaines fissures présentent localement une orientation inclinée. Ces déviations peuvent être liées à de légères excentricités de chargement, à des défauts de planéité, à des hétérogénéités locales dans les briques ou à une propagation préférentielle à travers des zones plus faibles.

Sur les Figures 5.29c et 5.29d, les faces arrière ne présentent pas de joint vertical. Les fissures observées y sont principalement verticales ou subverticales, ce qui confirme que le mode de rupture général est dominé par le fendage des briques sous l'effet des tractions latérales. De plus petites fissures verticales sont également visibles, traduisant un endommagement progressif du matériau avant ou au moment de la rupture principale.

Les résultats doivent être interprétés avec prudence, car les assemblages testés ne comportent que trois rangées de briques. Les effets de bord et les imperfections de chargement peuvent donc influencer plus fortement les modes de rupture que dans un muret normalisé.



FIGURE 5.30 – Brique avant l'essai de compression



FIGURE 5.31 – Fissuration observée après l'essai de compression – face avant



FIGURE 5.32 – Fissuration observée après l'essai de compression – face latérale

Les Figures 5.30, 5.31 et 5.32 présentent les briques seules avant et après les essais de compression. Après rupture, les briques présentent principalement des fissures verticales ou subverticales, comme observé précédemment sur les assemblages. Ce mode de fissuration confirme que la rupture est principalement liée au fendage du matériau sous compression.

Les fissures sont visibles sur les faces avant, mais également sur les faces latérales. Sur ces dernières, certaines zones donnent l'impression d'un décollement superficiel de la peau de la brique. Ce phéno-

mène peut être lié à la formation d'un cône de rupture. Lors de l'essai, les zones proches des surfaces chargées sont fortement contraintes par le contact avec les plateaux, ce qui modifie localement l'état de contrainte. La rupture ne se développe donc pas uniquement sous forme de fissures verticales traversantes, mais peut aussi provoquer des éclats ou des arrachements superficiels en périphérie de la brique.

La comparaison avec les assemblages montre donc que la fissuration verticale est déjà présente lorsque la brique est testée seule. Les joints de mortier ne sont donc pas à l'origine du mécanisme principal de rupture en compression, mais ils peuvent modifier localement la trajectoire des fissures et favoriser certains décollements au niveau des interfaces.

5.4.3.3 Interprétation des résistances en compression

Dans le cadre de ce travail, la résistance moyenne en compression des briques au moment des essais sur assemblages est de $14{,}18\,MPa$. Les assemblages réalisés avec le premier mortier atteignent une résistance moyenne de $7{,}38\,MPa$, tandis que ceux réalisés avec le second mortier atteignent $8{,}25\,MPa$. Le rapport entre la résistance moyenne de l'assemblage et celle de la brique seule vaut donc :

$$R_1 = \frac{7{,}38}{14{,}18} = 0{,}520 \approx 52\,\% \tag{5.5}$$

$$R_2 = \frac{8{,}25}{14{,}18} = 0{,}582 \approx 58\,\% \tag{5.6}$$

Les assemblages testés présentent donc une résistance en compression équivalente à environ 52 % de la résistance de la brique seule pour le premier mortier, et à environ 58 % pour le second. Ces ratios se situent dans la partie supérieure des valeurs rapportées pour les maçonneries de terre comprimée. Selon REDDY [42], la résistance en compression de l'assemblage représente généralement 25 à 40 % de la résistance du bloc seul, tandis que d'autres études mentionnent des rapports pouvant atteindre 45 à 60 %.

La relation proposée par l'Eurocode 6 pour les maçonneries conventionnelles permet également de situer les résultats obtenus. Elle exprime la résistance caractéristique en compression de la maçonnerie sous la forme :

$$f_k = K\, f_b^{\alpha}\, f_m^{\beta} \tag{5.7}$$

Dans cette expression, f_k désigne la résistance caractéristique en compression de la maçonnerie, f_b la résistance moyenne normalisée des éléments de maçonnerie, f_m la résistance en compression du mortier, tandis que K, α et β dépendent du type d'élément et du type de mortier [45]. Pour un mortier d'usage général, les exposants généralement utilisés sont $\alpha = 0{,}7$ et $\beta = 0{,}3$. La résistance de l'élément de maçonnerie intervient donc avec un poids plus important que celle du mortier. Cela permet d'expliquer pourquoi l'augmentation de la résistance propre du second mortier ne se traduit pas par une augmentation proportionnelle de la résistance de l'assemblage.

À titre indicatif, en considérant $K = 0{,}55$ (Annexe D), une résistance moyenne des briques de $f_b = 14{,}18\,MPa$ et les résistances moyennes des deux mortiers à 28 jours, cette relation donne :

$$f_{k,1} = 0{,}55 \times 14{,}18^{0{,}7} \times 3{,}77^{0{,}3} \approx 5{,}2\,MPa \tag{5.8}$$

$$f_{k,2} = 0{,}55 \times 14{,}18^{0{,}7} \times 11{,}72^{0{,}3} \approx 7{,}4\,MPa \tag{5.9}$$

Ces valeurs sont inférieures aux résistances moyennes mesurées expérimentalement, égales à $7{,}38\,MPa$ et $8{,}25\,MPa$. Cet écart reste cohérent, car la relation de l'Eurocode 6 fournit une résistance caractéristique, généralement inférieure à une résistance moyenne expérimentale. De plus, cette relation est établie pour des maçonneries conventionnelles, tandis que les assemblages étudiés ici sont des éléments expérimentaux de dimensions réduites. La comparaison doit donc être considérée comme un repère d'ordre de grandeur.

L'estimation issue de l'Eurocode 6 met néanmoins en évidence une tendance similaire à celle observée expérimentalement. Le passage du premier au second mortier augmente la résistance estimée, mais cette augmentation reste limitée par rapport à l'augmentation de la résistance propre du mortier. En effet, la résistance du mortier est multipliée par environ 3,1, tandis que la résistance moyenne des assemblages augmente seulement d'environ 12 %. Cette observation confirme le rôle prépondérant des briques dans la résistance en compression de l'assemblage, le mortier intervenant surtout dans la transmission des efforts et l'homogénéité de l'interface.

5.4.4 Synthèse comparative et limites expérimentales

Les essais réalisés sur les assemblages brique–mortier permettent de comparer le comportement des deux formulations de mortier sous différentes sollicitations. L'objectif de cette synthèse n'est pas de reprendre séparément chaque essai, mais de confronter les résultats mécaniques et hydriques afin d'identifier les paramètres qui influencent le comportement global des assemblages.

Le Tableau 5.12 reprend les principales valeurs obtenues pour les trois essais mécaniques. Les valeurs de référence indiquées ne constituent pas des limites strictes, car les essais réalisés ne correspondent pas toujours aux configurations normalisées. Elles permettent toutefois de situer les résultats expérimentaux par rapport à des ordres de grandeur usuels.

Essai	Mortier	Résistance moyenne [MPa]	Valeur de référence [MPa]
Traction directe	SMR 0.8+F	0,072	$f_{xk1} \approx 0{,}05$–$0{,}20$
	SMR 1.8+F	0,230	
Cisaillement	SMR 0.8+F	0,146	$f_{vk0} = 0{,}20$
	SMR 1.8+F	0,541	$f_{vk0} = 0{,}30$
Compression	SMR 0.8+F	7,38	$f_{k,1} \approx 5{,}2$
	SMR 1.8+F	8,25	$f_{k,2} \approx 7{,}4$

TABLE 5.12 – Synthèse comparative des résultats mécaniques obtenus sur les assemblages brique–mortier

Le Tableau 5.13 synthétise, quant à lui, les résultats principaux de l'essai de transfert d'eau. Les gains à $5\,min$ et à $60\,min$ sont exprimés en pourcentage du gain final de masse de la brique. Ils permettent d'évaluer la rapidité du transfert d'eau au début du contact entre le mortier frais et la brique.

Mortier	Gain à $5\,min$ [%]	Gain à $60\,min$ [%]	Gain final [g]
SMR 0.8+F	48 %	80 %	63,6
SMR 1.8+F	45 %	87 %	51,5

TABLE 5.13 – Synthèse des gains de masse des briques lors de l'essai de transfert d'eau

Les écarts les plus marqués entre les deux mortiers sont observés lorsque la sollicitation mobilise directement l'interface brique–mortier. En traction directe, la résistance moyenne passe de $0{,}072\,MPa$ avec le mortier SMR 0.8+F à $0{,}230\,MPa$ avec le mortier SMR 1.8+F. En cisaillement, elle passe de $0{,}146\,MPa$ à $0{,}541\,MPa$. Dans les deux cas, le mortier SMR 1.8+F conduit donc à des résistances environ trois à quatre fois plus élevées. Cette cohérence entre traction et cisaillement confirme que cette formulation développe une adhérence plus efficace avec les briques comprimées.

Cette amélioration peut être mise en relation avec les propriétés du mortier SMR 1.8+F. Celui-ci présente une teneur en ciment plus élevée, un rapport E/C plus faible et une résistance mécanique supérieure à celle du mortier SMR 0.8+F. Les résultats du Tableau 5.13 montrent également que le gain final de masse des briques est plus faible avec le mortier SMR 1.8+F, soit $51{,}5\,g$ contre $63{,}6\,g$ avec le mortier SMR 0.8+F. Le transfert d'eau vers la brique est donc globalement plus limité avec le mortier le plus riche en ciment.

Cette différence est importante pour l'interprétation des essais d'interface. Un transfert d'eau trop important depuis le mortier frais vers la brique peut réduire l'eau disponible pour l'hydratation du liant au voisinage du joint et perturber la formation de l'adhérence. Le mortier SMR 1.8+F semble

mieux limiter cette perte d'eau initiale, ce qui peut contribuer à la meilleure liaison observée en traction directe et en cisaillement.

Les deux mortiers présentent toutefois un transfert très rapide au début de l'essai. Après $5\,min$, les briques ont déjà atteint 48 % du gain final avec le mortier SMR 0.8+F et 45 % avec le mortier SMR 1.8+F. Après $60\,min$, ces valeurs atteignent respectivement 80 % et 87 %. Le transfert d'eau vers la brique est donc principalement concentré durant la première heure de contact, c'est-à-dire pendant une période déterminante pour la mise en place de l'interface brique–mortier.

En compression, l'écart entre les deux formulations est nettement moins marqué. La résistance moyenne des assemblages passe de $7{,}38\,MPa$ avec le mortier SMR 0.8+F à $8{,}25\,MPa$ avec le mortier SMR 1.8+F, soit une augmentation d'environ 12 %. Cette évolution reste limitée par rapport à l'écart entre les résistances propres des deux mortiers. La résistance en compression de l'assemblage est donc principalement gouvernée par le comportement global du système, en particulier par la résistance des briques et par la répartition des contraintes entre les unités. Le mortier intervient néanmoins dans l'homogénéité de la transmission des efforts, ce qui peut expliquer la dispersion plus faible observée avec le mortier SMR 1.8+F.

Les modes de rupture confirment cette distinction entre les sollicitations. En traction directe et en cisaillement, les ruptures sont principalement localisées au niveau de l'interface, en particulier pour le mortier SMR 0.8+F. En compression, les fissures sont majoritairement verticales ou subverticales et traduisent un mécanisme de fendage des briques sous l'effet des tractions transversales induites par le chargement. L'interface n'est donc pas l'unique zone critique en compression, mais elle peut influencer localement la propagation des fissures et la régularité de la réponse mécanique.

L'ensemble des résultats montre ainsi que le mortier SMR 1.8+F améliore principalement les propriétés d'interface. Cette amélioration est déterminante pour les sollicitations de traction et de cisaillement, mais elle ne se traduit que partiellement sur la résistance en compression, où les briques jouent un rôle prépondérant. À l'inverse, le mortier SMR 0.8+F présente un intérêt environnemental plus marqué en raison de sa teneur réduite en ciment, mais son transfert d'eau plus important vers les briques et son adhérence plus faible limitent ses performances dans les sollicitations d'interface.

Ces conclusions doivent être replacées dans les limites de la campagne expérimentale. Le nombre d'échantillons testés reste limité, avec seulement deux assemblages par formulation pour chaque type d'essai. Les résultats ne permettent donc pas d'établir des tendances statistiques robustes. De plus, les assemblages étudiés sont de dimensions réduites et ne correspondent pas à des murets normalisés. Les effets de bord, les défauts de planéité, l'excentricité éventuelle du chargement, la qualité du contact brique–mortier et l'état hydrique des briques peuvent donc influencer les résistances mesurées et les modes de rupture observés.

Malgré ces limites, les essais réalisés permettent de comparer efficacement les deux formulations. Ils montrent que l'amélioration de la résistance propre du mortier ne suffit pas à expliquer seule le comportement des assemblages. La qualité de l'interface, les échanges d'eau entre le mortier frais et la brique, ainsi que la capacité du mortier à transmettre les contraintes jouent un rôle essentiel dans la performance mécanique globale du système brique–mortier.

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'étudier le comportement en assemblage de briques comprimées à base de matériaux recyclés, associées à des mortiers de maçonnerie à faible impact environnemental. Il s'inscrit dans une logique de valorisation de fractions fines issues du recyclage, en particulier le sable mixte recyclé et les fines de lavage, tout en cherchant à limiter l'utilisation de ressources naturelles et la teneur en ciment des formulations.

La première contribution du travail concerne la fabrication et la caractérisation des briques comprimées. La composition retenue, issue du travail de QUARTO [11], a pu être reproduite à l'aide d'une presse manuelle. Les essais ont montré que la qualité du compactage influence directement la régularité et les performances des briques. Malgré la variabilité liée au procédé manuel, les briques obtenues présentent des résistances intéressantes, avec une résistance moyenne à la compression de 11,74 MPa et une résistance normalisée de 10,57 MPa. Ces valeurs confirment le potentiel de ce type de brique pour des applications de maçonnerie.

Une deuxième contribution réside dans le développement de deux mortiers à base de sable mixte recyclé et de fines de lavage. Ces deux formulations présentent des teneurs en ciment différentes, ce qui a permis de comparer un mortier plus sobre en liant, le SMR 0.8+F, à un mortier plus performant mécaniquement, le SMR 1.8+F. Les résistances propres des deux mortiers sont très différentes, avec environ 3,77 MPa pour le premier et 11,72 MPa pour le second à 28 jours. Cette différence a permis d'évaluer dans quelle mesure la résistance du mortier influence réellement le comportement global de l'assemblage.

Les essais réalisés sur assemblages montrent que l'influence du mortier dépend fortement du type de sollicitation. En traction directe et en cisaillement, où l'interface brique–mortier est directement mobilisée, le mortier SMR 1.8+F conduit à des résistances nettement plus élevées. Les résistances moyennes passent notamment de 0,072 MPa à 0,230 MPa en traction directe, et de 0,146 MPa à 0,541 MPa en cisaillement. Ces résultats montrent que le second mortier développe une meilleure adhérence avec les briques comprimées.

En compression, l'écart entre les deux assemblages est beaucoup plus limité. Les résistances moyennes

atteignent 7,38 MPa pour le mortier SMR 0.8+F et 8,25 MPa pour le mortier SMR 1.8+F. Ainsi, alors que la résistance propre du mortier est multipliée par environ 3,1, la résistance en compression de l'assemblage n'augmente que d'environ 12 %. Ce résultat confirme que la résistance en compression de la maçonnerie ne peut pas être déduite directement de la résistance du mortier seul. Elle dépend du comportement composite de l'ensemble brique–mortier, de la résistance des briques, de la qualité de l'interface et de la manière dont les contraintes sont transmises dans l'assemblage.

Enfin, l'essai de transfert d'eau a permis de mieux comprendre le rôle des échanges hydriques entre le mortier frais et les briques comprimées. Le transfert est très rapide durant les premières minutes de contact. Le mortier SMR 0.8+F entraîne un gain final de masse plus élevé dans les briques, soit 63,6 g, contre 51,5 g pour le mortier SMR 1.8+F. Cette différence suggère que le second mortier retient davantage son eau, ce qui peut favoriser l'hydratation du liant à l'interface et expliquer en partie ses meilleures performances.

De manière générale, ce travail montre que l'association de briques comprimées et de mortiers incorporant des matériaux recyclés constitue une piste prometteuse pour le développement de maçonneries à plus faible impact environnemental. Les résultats mettent toutefois en évidence que la performance d'un tel système ne dépend pas uniquement des résistances propres des constituants, mais surtout de leur interaction. La qualité de l'interface brique–mortier, les transferts d'eau au jeune âge et le comportement composite de l'assemblage apparaissent comme des paramètres déterminants.

6.2 Suggestions pour un travail futur

Le présent travail a permis d'ouvrir une piste intéressante pour le développement d'assemblages brique–mortier à base de matériaux recyclés. Une partie importante du temps expérimental a toutefois été consacrée au développement du mortier, à l'incorporation des fines de lavage, à l'obtention d'une consistance adaptée et à la maîtrise de la fabrication des briques comprimées avec une presse manuelle. Maintenant que ces étapes sont mieux définies, un travail futur pourrait s'appuyer sur les protocoles établis pour produire un nombre plus important de briques et réaliser une campagne d'essais plus complète.

La première amélioration concernerait donc l'échelle des assemblages testés. Dans ce travail, les essais ont été réalisés sur un nombre limité d'échantillons, avec deux assemblages par mortier pour chaque type de sollicitation. Ce choix s'explique par le temps nécessaire à la fabrication des briques et par les moyens expérimentaux disponibles. Une étude ultérieure pourrait réaliser des assemblages de plus grande taille, notamment des murets normalisés testés en compression, des triplets de briques pour les essais de cisaillement et des dispositifs plus proches des essais normalisés utilisés pour caractériser l'adhérence en traction ou en flexion hors plan. Cela permettrait de comparer plus directement les résultats obtenus à des valeurs issues de la littérature ou des normes, ce qui reste limité dans le cadre de ce travail puisque certains dispositifs ont dû être adaptés aux moyens du laboratoire.

Une deuxième piste concerne l'amélioration de l'adhérence entre la brique comprimée et le mortier. Les résultats obtenus montrent que les sollicitations de traction et de cisaillement sont fortement dépendantes de la qualité de l'interface. Une solution simple consisterait à modifier l'état de surface des briques au niveau des faces destinées à recevoir le mortier. La réalisation de stries ou d'une surface plus rugueuse permettrait d'augmenter l'ancrage mécanique du mortier. Cette modification pourrait

être intégrée directement au procédé de fabrication, par exemple en plaçant un élément texturé dans le fond du moule afin d'obtenir une face moins lisse après compactage.

Dans la même logique, une évolution plus importante du produit pourrait consister à développer des briques avec une géométrie d'emboîtement. Des encoches ou reliefs pourraient permettre aux briques de s'assembler partiellement entre elles, à la manière d'un système autobloquant. Cette solution apporterait un ancrage mécanique supplémentaire qui n'existe pas dans les assemblages étudiés ici. Elle pourrait améliorer la stabilité de l'ensemble, limiter la dépendance à la seule adhérence chimique et capillaire du mortier, et rendre le système plus robuste en traction ou en cisaillement. Cette piste semble particulièrement intéressante si l'objectif est d'évoluer vers un produit plus facilement valorisable à l'échelle constructive.

Le mortier pourrait également faire l'objet d'une optimisation complémentaire. Les deux formulations étudiées dans ce travail représentent deux situations relativement contrastées : le mortier SMR 0.8+F, faiblement dosé en ciment mais moins performant en adhérence, et le mortier SMR 1.8+F, plus riche en ciment mais nettement plus performant en traction et en cisaillement. Une formulation intermédiaire, par exemple de type SMR 1.2+F, pourrait constituer un compromis intéressant entre réduction de l'impact environnemental et amélioration des performances mécaniques. L'objectif serait de conserver une teneur en ciment modérée tout en obtenant une adhérence suffisante pour garantir un comportement satisfaisant de l'assemblage.

Enfin, les essais de transfert d'eau devraient être approfondis. Dans ce travail, une méthode expérimentale spécifique a été développée, car aucune méthode normalisée parfaitement adaptée à l'interaction entre mortier frais et brique comprimée n'a été identifiée. Cette méthode a permis de comparer les deux mortiers, mais elle gagnerait à être améliorée et répétée sur un nombre plus important d'échantillons. Une étude future pourrait notamment mieux contrôler l'état hydrique initial des briques, mesurer leur succion initiale, comparer différentes humidifications préalables et relier plus précisément l'absorption d'eau aux résistances d'adhérence obtenues. Ces aspects sont importants, car les briques comprimées utilisées présentent une absorption d'eau élevée et les échanges d'eau au jeune âge jouent un rôle direct dans la formation de l'interface brique–mortier.

De manière générale, les résultats obtenus montrent que le système étudié présente un potentiel réel pour le développement de maçonneries à impact environnemental réduit. Les briques et les mortiers développés pourraient constituer une base intéressante pour un produit constructif plus abouti. Pour aller dans ce sens, les travaux futurs devraient principalement viser à améliorer l'adhérence, augmenter l'échelle des essais et quantifier plus précisément le bénéfice environnemental réel du système complet.

Annexes

Annexe A – Valeurs du facteur de forme δ pour la résistance normalisée

Hauteur in (mm)	Largeur en mm										
	50	90	100	115	140	150	175	190	200	240	⩾250
40	0,80	0,72	0,70								
45	0,83	0,75	0,73								
50	0,85	0,77	0,75	0,74	0,71	0,70					
65	0,95	0,87	0,85	0,82	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,66	0,65
70	0,98	0,89	0,87	0,84	0,79	0,77	0,74	0,73	0,71	0,67	0,66
80	1,04	0,94	0,91	0,88	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,70	0,69
90	1,09	0,99	0,96	0,93	0,88	0,86	0,81	0,79	0,77	0,73	0,72
100	1,15	1,03	1,00	0,97	0,92	0,90	0,85	0,82	0,80	0,76	0,75
115	1,20	1,09	1,06	1,03	0,98	0,96	0,91	0,88	0,86	0,82	0,81
140	1,27	1,18	1,16	1,13	1,08	1,06	1,01	0,98	0,96	0,92	0,91
150	1,30	1,22	1,20	1,17	1,12	1,10	1,05	1,02	1,00	0,96	0,95
175	1,38	1,30	1,28	1,25	1,20	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,03
190	1,42	1,34	1,32	1,29	1,24	1,22	1,17	1,14	1,12	1,08	1,07
200	1,45	1,37	1,35	1,32	1,27	1,25	1,20	1,17	1,15	1,11	1,10
240	1,53	1,45	1,43	1,40	1,35	1,33	1,28	1,25	1,23	1,16	1,14
⩾250	1,55	1,47	1,45	1,42	1,37	1,35	1,30	1,27	1,25	1,17	1,15

FIGURE A.1 – Facteur de forme δ [45]

Annexe B – Valeurs de f_{vk0}

Éléments de maçonnerie	f_{vk0} (N/mm^2)			
	Mortier d'usage courant de la classe de résistance donnée		Mortier de joints minces (joint d'assise ≥ 0,5 mm ≤ 3 mm)	Mortier allégé
Terre cuite	M10 — M20	0,30	0,30	0,15
	M2,5 — M9	0,20		
	M1 — M2	0,10		
Silico-calcaire	M10 — M20	0,20	0,40	0,15
	M2,5 — M9	0,15		
	M1 — M2	0,10		
Béton de granulats	M10 — M20	0,20	0,30	0,15
Béton cellulaire autoclavé	M2,5 — M9	0,15		
Pierre reconstituée et pierre naturelle prétaillée	M1 — M2	0,10		

FIGURE B.1 – Valeurs de résistance initiale au cisaillement de la maçonnerie f_{vk0} [45]

Annexe C – Valeurs de f_{xk1}

Éléments de maçonnerie	f_{xk1} (N/mm^2)			
	Mortier d'usage courant		Mortier de joints minces	Mortier allégé
	f_m < 5 N/mm^2	f_m ≥ 5 N/mm^2		
Terre cuite	0,10	0,10	0,15	0,10
Silico-calcaire	0,05	0,10	0,20	non utilisé
Béton de granulats	0,05	0,10	0,20	non utilisé
Béton cellulaire autoclavé	0,05	0,10	0,15	0,10
Pierre reconstituée	0,05	0,10	non utilisé	non utilisé
Pierre naturelle prétaillée	0,05	0,10	0,15	non utilisé

FIGURE C.1 – Valeurs de f_{xk1} pour plan de rupture parallèle aux lits de pose [45]

Annexe D – Valeurs de K

Éléments de maçonnerie		Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces (joint d'assise ≥ 0,5 mm et ≤ 3 mm)	Mortier allégé de masse volumique	
				$600 \leq \rho \leq 800$ kg/m^3	$800 < \rho \leq 1\,300$ kg/m^3
Terre cuite	Groupe 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Groupe 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Groupe 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Groupe 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Silico-calcaire	Groupe 1	0,55	0,80	‡	‡
	Groupe 2	0,45	0,65	‡	‡
Béton de granulats	Groupe 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Groupe 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Groupe 3	0,40	0,50	‡	‡
	Groupe 4	0,35	‡	‡	‡
Béton cellulaire autoclavé	Groupe 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Pierre reconstituée	Groupe 1	0,45	0,75	‡	‡
Pierre naturelle prétaillée	Groupe 1	0,45	‡	‡	‡
‡ La combinaison de mortier/élément n'étant généralement pas utilisée, aucune valeur n'est ainsi donnée.					

FIGURE D.1 – Valeurs de K à utiliser avec des mortiers d'usage courant, des mortiers de joints minces et allégés [45]

Annexe E – Déclaration relative à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle

L'Université de Liège encourage une utilisation transparente des outils d'intelligence artificielle générative dans le cadre des travaux académiques. La présente annexe vise donc à préciser les outils utilisés durant la préparation de ce travail de fin d'études, ainsi que les tâches pour lesquelles ils ont été mobilisés.

ChatGPT

L'outil ChatGPT, développé par OpenAI, a été utilisé comme aide à la rédaction et à la structuration de certaines parties du travail. Son utilisation a principalement concerné :

- la reformulation de paragraphes afin d'améliorer la clarté, la fluidité et la cohérence du texte ;
- l'aide à la structuration de certaines sections, notamment l'état de l'art, l'analyse des résultats, la conclusion, le résumé, l'abstract et les remerciements ;
- la vérification de la logique d'enchaînement entre différentes idées ;
- l'aide à la mise en forme de certains passages en LaTeX.

Les propositions générées ont systématiquement été relues, adaptées et validées par l'auteur. L'outil n'a pas été utilisé pour produire des résultats expérimentaux ni pour remplacer l'analyse personnelle des résultats.

LLM Notebook

L'outil LLM Notebook a été utilisé comme aide à l'analyse et à la compréhension de plusieurs articles scientifiques, principalement dans le cadre de l'état de l'art. Il a notamment permis de synthétiser certains documents, d'identifier les idées principales, de comparer différentes sources et de faire des liens entre les informations issues de la littérature.

Cet outil a donc été employé comme support à la recherche bibliographique et à la compréhension des références scientifiques. Les informations reprises dans le mémoire ont toutefois été vérifiées à partir des articles originaux, qui restent les sources de référence citées dans le texte.

GitHub Copilot

L'outil GitHub Copilot, intégré à l'environnement Visual Studio Code, a été utilisé comme aide ponctuelle à la programmation, principalement pour la réalisation et la mise en forme de graphiques. Il a servi à accélérer certaines tâches de codage, notamment la génération de scripts Python, l'organisation de données expérimentales et la production de figures destinées à l'analyse des résultats.

Les codes proposés ont été contrôlés, corrigés et adaptés en fonction des besoins du travail. Les résultats, graphiques et interprétations présentés dans ce mémoire restent issus des données expérimentales obtenues dans le cadre de cette étude.

Bibliographie

[1] Asaad ALMSSAD, Amjad ALMUSAED et Raad Z. HOMOD. « Masonry in the Context of Sustainable Buildings : A Review of the Brick Role in Architecture ». en. In : *Sustainability* 14.22 (jan. 2022), p. 14734. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su142214734. URL : https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14734 (visité le 21/04/2026).

[2] Paulo B. LOURENÇO. « Masonry Structures, Overview ». en. In : *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Sous la dir. de Michael BEER, Ioannis A. KOUGIOUMTZOGLOU, Edoardo PATELLI et Ivan Siu-Kui AU. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 1-9. ISBN : 978-3-642-36197-5. DOI : 10.1007/978-3-642-36197-5_111-1. URL : https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-36197-5_111-1 (visité le 21/04/2026).

[3] Filipe Emerick CALDEIRA, Gustavo Henrique NALON, Diôgo Silva de OLIVEIRA, Leonardo Gonçalves PEDROTI, José Carlos Lopes RIBEIRO, Flávio Antônio FERREIRA et José Maria Franco de CARVALHO. « Influence of joint thickness and strength of mortars on the compressive behavior of prisms made of normal and high-strength concrete blocks ». In : *Construction and Building Materials* 234 (fév. 2020), p. 117419. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117419. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819328715 (visité le 15/04/2026).

[4] Ricardo CRUZ, José Alexandre BOGAS, Andrea BALBOA et Paulina FARIA. « Water Resistance of Compressed Earth Blocks Stabilised with Thermoactivated Recycled Cement ». en. In : *Materials* 17.22 (jan. 2024), p. 5617. ISSN : 1996-1944. DOI : 10.3390/ma17225617. URL : https://www.mdpi.com/1996-1944/17/22/5617 (visité le 15/04/2026).

[5] Joy OKE et Hossam ABUEL-NAGA. « Engineering and Durability Properties of Sustainable Bricks Incorporating Lime Kiln Dust, Ground Granulated Blast Furnace Slag, and Tyre Rubber Wastes ». In : *Buildings* 15 (juin 2025), p. 2079. DOI : 10.3390/buildings15122079.

[6] Federica VITALE et Maurizio NICOLELLA. « Mortars with Recycled Aggregates from Building-Related Processes : A 'Four-Step' Methodological Proposal for a Review ». en. In : *Sustainability* 13.5 (mars 2021), p. 2756. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su13052756. URL : https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2756 (visité le 20/04/2026).

[7] Layachi BERREDJEM, Laurent MOLEZ, Van-Minh NGUYEN, Houria MEFTAH et Nourredine ARABI. « Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé ». In : *34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC 2016)*. Liège, Belgium, mai 2016. URL : https://hal.science/hal-01366545 (visité le 27/04/2026).

[8] Elhem GHORBEL, George WARDEH, Hector GOMART et Pierre MATAR. « Formulation parameters effects on the performances of concrete equivalent mortars incorporating different ratios of recycled sand ». EN. In : *Journal of Building Physics* 43.6 (mai 2020), p. 545-572.

ISSN : 1744-2591. DOI : 10.1177/1744259119896093. URL : https://doi.org/10.1177/1744259119896093 (visité le 29/04/2026).

[9] « La brique de terre compressée ». fr. In : ().

[10] Mohamed Ramsin RAYEESULHAQ, Mansoor Lizan AHAMED, Rao Arsalan KHUSHNOOD et Hammad Anis KHAN. « Optimization in recipe design of interlocking compressed earth blocks by incorporating fine recycled concrete aggregate ». In : *Construction and Building Materials* 416 (fév. 2024), p. 135167. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2024.135167. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824003088 (visité le 30/04/2026).

[11] K QUARTO. « 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 ». fr. In : *2025* ().

[12] Dirk R. W. MARTENS. « Typical masonry wall enclosures in Belgium and The Netherlands ». In : *Enclosure Masonry Wall Systems Worldwide*. Num Pages : 14. CRC Press, 2007.

[13] *Archives des Bloc de construction*. URL : https://www.hansez-dalem.be/categ/bloc-de-construction/ (visité le 21/04/2026).

[14] *Appareillages de maçonnerie*. fr-BE. URL : https://www.wienerberger.be/fr/facade/inspiration-et-conseils/mise-en-oeuvre.html (visité le 21/04/2026).

[15] *La conception globale de l'enveloppe et l'énergie - L'Énergie en Wallonie*. URL : https://energie.wallonie.be/home/performance-energetuique-des-batiments/pour-les-professionnels--outils-formations-et-agrements/outils/autres-outils-pratiques/guides-pratiques-pour-les-architectes/publications/la-conception-globale-de-l-enveloppe-et-l-energie.html (visité le 23/04/2026).

[16] *Mur creux : raccord de pied de mur au droit d'une porte-fenêtre (mur porteur en blocs isolants)*. fr-BE. URL : https://www.buildwise.be (visité le 23/04/2026).

[17] *Home*. en-US. URL : https://gccassociation.org/ (visité le 23/04/2026).

[18] Luc COURARD. *Historique des ciments et des bétons*. Cours. (Visité le 22/04/2026).

[19] *Ecocem* -. fr-be. URL : https://www.ecocemglobal.com/fr-be/ (visité le 23/04/2026).

[20] Robbie M ANDREW. « Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018 ». In : *Earth System Science Data* 11 (nov. 2019), p. 1675-1710. DOI : 10.5194/essd-11-1675-2019.

[21] *Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton*. fr-BE. URL : https://www.buildwise.be/fr/publications/innovation-papers/32/ (visité le 04/02/2026).

[22] *Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie | Les granulats recyclés*. URL : https://www.granulatsrecycles.be/fr/guide-technique-pour-lutilisation-des-granulats-recycles-en-wallonie (visité le 23/04/2026).

[23] Ruan L. S. FERREIRA, Marcos A. S. ANJOS, Cinthia MAIA, Licarion PINTO, Afonso R. G. DE AZEVEDO et Jorge DE BRITO. « Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars ». en. In : *Construction and Building Materials* 274 (mars 2021), p. 121796. ISSN : 09500618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.121796. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820338009 (visité le 20/04/2026).

[24] Vishojit Bahadur THAPA, Danièle WALDMANN, Jean-Frank WAGNER et André LECOMTE. « Assessment of the suitability of gravel wash mud as raw material for the synthesis of an alkali-activated binder ». In : *Applied Clay Science* 161 (sept. 2018), p. 110-118. ISSN : 0169-

1317. DOI : 10.1016/j.clay.2018.04.025. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131718301856 (visité le 29/04/2026).

[25] Abiza YAAKOUB, Saleh HAYAT, Ferroukhi Mohammed YACINE, Mesticou ZYED, Kacem MARIEM et Si Larbi AMIR. « Assessment of the pozzolanic reactivity of aggregate washing fines for use in Cement-Based Materials ». In : *Developments in the Built Environment* 25 (mars 2026), p. 100856. ISSN : 2666-1659. DOI : 10.1016/j.dibe.2026.100856. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165926000141 (visité le 29/04/2026).

[26] Rebeca MARTÍNEZ-GARCÍA, María Isabel Sánchez de ROJAS, Julia Mª Morán-del POZO, Fernando J. FRAILE-FERNÁNDEZ et Andrés JUAN-VALDÉS. « Evaluation of Mechanical Characteristics of Cement Mortar with Fine Recycled Concrete Aggregates (FRCA) ». en. In : *Sustainability* 13.1 (jan. 2021), p. 414. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su13010414. URL : https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/414 (visité le 17/02/2026).

[27] Enrique Fernández LEDESMA, José Ramón JIMÉNEZ, Jesús AYUSO, José María FERNÁNDEZ et Jorge de BRITO. « Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – Part-I : ceramic masonry waste ». In : *Journal of Cleaner Production* 87 (jan. 2015), p. 692-706. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2014.10.084. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614011275 (visité le 27/04/2026).

[28] René Sebastián MORA-ORTIZ, Emmanuel MUNGUÍA-BALVANERA, Sergio Alberto DÍAZ, Francisco MAGAÑA-HERNÁNDEZ, Ebelia DEL ANGEL-MERAZ et Álvaro BOLAINA-JUÁREZ. « Mechanical Behavior of Masonry Mortars Made with Recycled Mortar Aggregate ». In : *Materials* 13.10 (mai 2020), p. 2373. ISSN : 1996-1944. DOI : 10.3390/ma13102373. URL : https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7287965/ (visité le 05/02/2026).

[29] Samuel ROQUE, Cinthia MAIA PEDERNEIRAS, Catarina BRAZÃO FARINHA, Jorge de BRITO et Rosário VEIGA. « Concrete-Based and Mixed Waste Aggregates in Rendering Mortars ». In : *Materials* 13.8 (avr. 2020), p. 1976. ISSN : 1996-1944. DOI : 10.3390/ma13081976. URL : https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7254318/ (visité le 09/02/2026).

[30] Ganou KOUNGANG et Bernard MORINO. « Construction en brique de terre comprimée et granulats biosourcés : une solution pour un habitat durable à Douala ». French. In : (2021). URL : https://orbi.uliege.be/handle/2268/263307 (visité le 15/04/2026).

[31] François WIOMONT et Fin UNIVERSITÉ DE LIÈGE > MASTER INGÉ. CIV. CONSTR. « Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés ». fr. In : (juin 2022). Accepted : 2022-07-02T02 :04 :28Z. URL : https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/14340 (visité le 30/04/2026).

[32] K. A. HEATHCOTE. « Durability of earthwall buildings ». In : *Construction and Building Materials* 9.3 (juin 1995), p. 185-189. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/0950-0618(95)00035-E. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095006189500035E (visité le 04/05/2026).

[33] S. N. MALKANTHI, W. G. S. WICKRAMASINGHE et A. A. D. A. J. PERERA. « Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production ». In : *Case Studies in Construction Materials* 15 (déc. 2021), e00717. ISSN : 2214-5095. DOI : 10.1016/j.cscm.2021.e00717. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002321 (visité le 30/04/2026).

[34] L. BINDA. « 2.4 Mechanical tests on mortars and assemblages ». en. In : *RILEM Report 28 : Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair*. RILEM Publications SARL, 2004, p. 57-76. ISBN : 978-2-912143-67-9. DOI : 10.1617/2912143675.005. URL : https://www.rilem.net/boutique/fiche.php?cat=book&reference=rep028-005 (visité le 05/02/2026).

[35] Jan VÁLEK, John J. HUGHES et Caspar J. W. P. GROOT. « Historic Mortars : Characterisation, Assessment and Repair. A State-of-the-Art Summary ». en. In : *Historic Mortars*. Sous la dir. de Jan VÁLEK, John J. HUGHES et Caspar J. W. P. GROOT. ASSEMBLAGES_Historic_Mortar. Dordrecht : Springer Netherlands, 2012, p. 1-12. ISBN : 978-94-007-4635-0. DOI : 10.1007/978-94-007-4635-0_1.

[36] *Adhérence "élément - mortier" de maçonnerie : méthodes et valeurs de référence*. fr-BE. URL : https://www.buildwise.be/fr/recherche-innovation/articles-scientifiques/ref00018703-adherence-element-mortier-de-maconnerie-methodes-et-valeurs-de-reference/ (visité le 16/04/2026).

[37] Adrian COSTIGAN et Sara PAVÍA. « Influence of the Mechanical Properties of Lime Mortar on the Strength of Brick Masonry ». en. In : *Historic Mortars*. Sous la dir. de Jan VÁLEK, John J. HUGHES et Caspar J. W. P. GROOT. Dordrecht : Springer Netherlands, 2012, p. 359-372. ISBN : 978-94-007-4635-0. DOI : 10.1007/978-94-007-4635-0_28.

[38] « MS.A.3. Unidirectional freeze-thaw test for masonry units and wallettes ». en. In : *Materials and Structures* 31.8 (oct. 1998), p. 513-519. ISSN : 1359-5997, 1871-6873. DOI : 10.1007/BF02481531. URL : http://link.springer.com/10.1007/BF02481531 (visité le 15/04/2026).

[39] H O SUGO, A W PAGE et S J LAWRENCE. « THE DEVELOPMENT OF MORTAR/UNIT BOND ». en. In : ().

[40] Mike LAWRENCE, Pete WALKER et Zhaoxia ZHOU. « Influence of Interfacial Material Pore Structure on the Strength of the Brick/Lime Mortar Bond ». en. In : *Historic Mortars*. Sous la dir. de Jan VÁLEK, John J. HUGHES et Caspar J. W. P. GROOT. Dordrecht : Springer Netherlands, 2012, p. 373-381. ISBN : 978-94-007-4635-0. DOI : 10.1007/978-94-007-4635-0_29.

[41] iTeh INC. *EN 1052-5 :2005 - Bond Strength Test for Masonry by Bond Wrench Method*. en. URL : https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/4faecb80-4d3d-4e87-b6a4-885dd68edbcd/en-1052-5-2005 (visité le 06/05/2026).

[42] B. V. Venkatarama REDDY. *Compressed Earth Block & Rammed Earth Structures*. en. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Singapore : Springer Nature, 2022. ISBN : 978-981-16-7876-9 978-981-16-7877-6. DOI : 10.1007/978-981-16-7877-6. URL : https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-7877-6 (visité le 25/05/2026).

[43] Thomas ZIMMERMANN et Alfred STRAUSS. « VARIATION OF SHEAR STRENGTH OF MASONRY WITH DIFFERENT MORTAR PROPERTIES ». en. In : ().

[44] Mahfoudh Taleb ALI. « Effet des défauts d'adhésion sur la résistance mécanique des assemblages collés ». fr. Thèse de doct. Université de Bordeaux, mai 2018. URL : https://theses.hal.science/tel-01897782 (visité le 06/05/2026).

[45] *NBN EN 1996-1-1 +A1 : Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 1-1 : Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée*. URL : https://www.buildwise.be/fr/normes-et-reglementations/chercher/nbn-en-1996-1-1-fr-2013/ (visité le 16/04/2026).