

---

## Valorisation des produits issus du broyage des fibres-ciment par carbonatation accélérée

**Auteur :** Kameni Wontcheu, Armel Florent

**Promoteur(s) :** Courard, Luc

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/17872>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---



---

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

---

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

Titre : Valorisation des produits issus du broyage des  
fibres-ciment par carbonatation accélérée

---

Promoteur : COURARD Luc

Membre(s) du jury :

Léonard Grégoire

Grigoletto Sophie

Bissonnette Benoît

Collin Frédéric

Auteur : Arnel Florent KAMENI WONTCHEU

Date de soutenance : Juin 2023

Année Académique 2022-2023



## Remerciements

Je tiens à remercier tout le personnel de l'Université de Liège ainsi que tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements au promoteur de ce travail de fin d'études, Monsieur Luc Courard, pour la confiance qu'il m'a accordée en me permettant de réaliser cette étude.

Je tiens à remercier Madame Sophie Grigoletto pour ses conseils, son soutien et sa promptitude à répondre à toutes mes questions.

Je remercie également les partenaires du projet Mineral Loop pour leur partage d'informations, et tout particulièrement Tradecowall pour la fourniture de fibres-ciment et le Centre Terre et Pierre pour leur broyage fin.

Mes remerciements sont également adressés à Monsieur Frédéric Michel ainsi qu'à tout le personnel du laboratoire de mortier de l'Université de Liège, notamment Amaury Daras, Yoan Van Puyvelde et Céline Van Puyvelde. Leur disponibilité, leur dévouement, leur courtoisie et surtout leur partage d'expérience ont été précieux.

De même, je remercie tous les enseignants et les assistants qui m'ont toujours encouragé à ne pas baisser les bras dans les moments difficiles. Je pense notamment à Vincent Denoël, Anass Mayou et Vincent Schmitz.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres du corps enseignant qui m'ont inspiré sans le savoir, grâce à leur professionnalisme et à leur expertise. Je pense notamment à Jean-Pierre Jaspert, Boyan Mihaylov et Frédéric Collin.

Merci particulièrement à ma mère, Madame Ngatcheu Epse Tchokouaha Wontcheu Honorine, pour les sacrifices qu'elle a faits pour moi. Elle est mon Dieu sur terre.

Enfin, merci aux membres de ma famille et à mes amis pour leur soutien moral, leur soutien financier et leur présence dans ma vie.

## Résumé

Ce travail de fin d'études vise à apporter une valeur ajoutée aux déchets de matériaux en fibres-ciment en les utilisant comme substitut partiel du ciment dans la composition des mortiers. Dans cette étude, les tôles usées en fibres-ciment fournies par Tradecowal sont broyées par le CTP (Centre Terre et Pierre) jusqu'à obtenir une granulométrie allant de 0 à 100  $\mu\text{m}$ . Les fines particules ainsi obtenues sont séparées en deux lots. Le premier lot est utilisé directement comme substitut du ciment, tandis que le second subit une transformation par carbonatation avant d'être utilisé comme substitut du ciment.

Une première série d'essais est réalisée sur le ciment ainsi que sur ses substituts, comprenant une analyse granulométrique laser, le calcul de la densité au pycnomètre à gaz, le calcul de la surface spécifique, ainsi que des analyses thermiques et thermogravimétriques. Ces essais ont pour but de déterminer les caractéristiques physico-chimiques et géométriques de ces matériaux, ainsi que d'évaluer l'impact de la carbonatation sur la composition chimique et minéralogique des fines de fibres-ciment.

Une deuxième série d'essais est effectuée sur des mortiers frais en remplaçant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées. Cela permet d'évaluer l'impact de ces matériaux recyclés sur la maniabilité des mortiers. Il en résulte que, pour un même taux de substitution, la transformation par carbonatation des fines de fibres-ciment améliore l'ouvrabilité des mortiers, car la carbonatation réduit la porosité des fines de fibres-ciment.

Une troisième et dernière série d'essais est réalisée sur les éprouvettes de mortier durci afin de déterminer leur porosité et leur résistance mécanique en fonction du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées, ainsi que des conditions de cure des éprouvettes après démoulage. À cet effet, trois conditions de cure des mortiers ont été retenues, à savoir : cure dans une chambre humide, cure dans une enceinte de carbonatation et cure dans une salle climatisée. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette troisième série d'essais :

- Après sept jours et pour une même condition de cure, la carbonatation des fines contribue à améliorer les performances mécaniques des éprouvettes de mortier ;
- Après vingt-huit jours et pour une cure dans la chambre humide ou dans l'enceinte de carbonatation, la carbonatation des fines a peu d'incidence sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes de mortier ;
- La transformation des fines par une réaction de carbonatation permet de réduire la porosité du mortier durci et, par conséquent, d'améliorer sa durabilité.

En conclusion, la substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées permet d'améliorer légèrement la durabilité des mortiers, mais elle entraîne une perte de résistance mécanique. Cependant, l'indice d'activité reste supérieur à 75 % pour des taux de substitution inférieurs ou égaux à 15 %, et ce, lors d'une cure dans une chambre humide ou dans une enceinte de carbonatation.

## Abstract

This end-of-studies project aims to bring added value to waste materials of fiber-cement by using them as a partial substitute for cement in mortar composition. In this study, the used fiber-cement sheets provided by Tradecowal are crushed by the CTP (Centre Terre et Pierre) until obtaining a particle size ranging from 0 to 100  $\mu\text{m}$ . The resulting fine particles are separated into two batches. The first batch is directly used as a cement substitute, while the second undergoes a carbonation process before being used as a cement substitute.

A first series of tests is conducted on cement as well as its substitutes, including laser granulometric analysis, gas pycnometer density calculation, specific surface area calculation, as well as thermal and thermogravimetric analyses. These tests aim to determine the physicochemical and geometric characteristics of these materials and evaluate the impact of carbonation on the chemical and mineralogical composition of the fine cement fibers.

A second series of tests is carried out on fresh mortars by replacing cement with carbonated or non-carbonated fine cement fibers. This allows for evaluating the impact of these recycled materials on the workability of the mortars. It is found that, for the same substitution rate, the carbonation transformation of the fine cement fibers improves the workability of the mortars because carbonation reduces the porosity of the fine cement fibers.

The third and final series of tests is conducted on hardened mortar specimens to determine their porosity and mechanical strength based on the substitution rate of cement with carbonate or non-carbonate fine cement fibers, as well as the curing conditions of the specimens after demolding. For this purpose, three mortar curing conditions were selected: curing in a humid chamber, curing in a carbonation chamber, and curing in a climate-controlled room. The following conclusions can be drawn from this third series of tests:

- After seven days, and under the same curing condition, carbonation of the fine fibers contributes to improving the mechanical performance of the mortar specimens ;
- After twenty-eight days, for curing in a humid chamber or in a carbonation chamber, the carbonation of the fine fibers has little impact on the mechanical characteristics of the mortar specimens ;
- The transformation of the fine fibers through a carbonation reaction helps reduce the porosity of the hardened mortar and, consequently, improves its durability.

In conclusion, substituting cement with carbonate fine cement fibers slightly improves the durability of mortars, but it results in a loss of mechanical strength. However, the activity index remains above 75% for substitution rates equal to or less than 15% during curing in a humid chamber or a carbonation chamber.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte . . . . .	1
1.2	Objet et objectifs du travail . . . . .	2
1.3	Plan du travail . . . . .	2
1.4	Contraintes de l'étude . . . . .	2
<b>2</b>	<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>3</b>
2.1	Gestion des déchets . . . . .	3
2.1.1	Contexte . . . . .	3
2.1.2	Modes de gestion de déchets . . . . .	4
2.1.3	Composition du gisement de déchets . . . . .	5
2.1.4	Gestion des déchets municipaux en Belgique . . . . .	7
2.1.5	Gestion des déchets de construction en Belgique . . . . .	8
2.1.6	Gestion des boues et des sédiments . . . . .	11
2.1.7	Gestion des déchets de briques de terre . . . . .	13
2.2	La carbonatation des matériaux cimentaires . . . . .	16
2.2.1	Mécanisme de la carbonatation . . . . .	16
2.2.2	Modes opératoires de carbonatation accélérée . . . . .	16
2.2.3	Facteurs influençant la carbonatation . . . . .	18
2.2.4	Effets de la carbonatation sur les matériaux cimentaires . . . . .	24
2.3	Fibres-ciment . . . . .	27
2.3.1	Histoire du Fibro-ciment . . . . .	27
2.3.2	Methode de production . . . . .	28
2.3.3	Composition . . . . .	29
2.3.4	Caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques . . . . .	30
2.3.5	Effets des fibres sur les propriétés des mortiers . . . . .	31
<b>3</b>	<b>PROGRAMME EXPÉRIMENTAL</b>	<b>34</b>
3.1	Matériaux utilisés . . . . .	34
3.1.1	Eau de gachage . . . . .	34
3.1.2	Ciment . . . . .	34
3.1.3	Sable . . . . .	35
3.1.4	Fines de fibres-ciment . . . . .	35
3.2	Matériels utilisés . . . . .	36
3.2.1	Balance électronique . . . . .	36
3.2.2	Malaxeur . . . . .	36
3.2.3	Appareil à chocs . . . . .	37
3.2.4	Moule prismatique . . . . .	37
3.3	Composition des mortiers et conditions de cure . . . . .	38
3.3.1	Conditions de cure des éprouvettes . . . . .	38
3.3.2	Composition des mortiers . . . . .	39
3.3.3	Appareillage pour la composition du mortier . . . . .	39
3.4	Protocoles expérimentaux . . . . .	40
3.4.1	La mesure de la masse volumique . . . . .	40
3.4.2	L'analyse granulométrique laser . . . . .	41
3.4.3	La détermination de la finesse du ciment . . . . .	43
3.4.4	L'analyse thermogravimétrique (ATG) . . . . .	44
3.4.5	La détermination de la profondeur de carbonatation du mortier . . . . .	44
3.4.6	La détermination du temps de prise du ciment . . . . .	45
3.4.7	La mesure de la consistance du mortier frais . . . . .	47
3.4.8	La détermination de la résistance à la flexion et la résistance à la compression . . . . .	49
3.4.9	La mesure de la porosité accessible à l'eau . . . . .	51



<b>4</b>	<b>ANALYSE DES RESULTATS</b>	<b>53</b>
4.1	Caractérisation des matériaux . . . . .	53
4.1.1	Caractéristiques physiques et géométriques . . . . .	53
4.1.2	Caractéristiques chimiques et minéralogiques . . . . .	54
4.2	Comportement à l'état frais . . . . .	57
4.2.1	Consistance du mortier . . . . .	57
4.2.2	Temps de prise du ciment . . . . .	58
4.3	Comportement à l'état durci . . . . .	59
4.3.1	Porosité accessible à l'eau . . . . .	59
4.3.2	Profondeur de carbonatation du mortier . . . . .	60
4.3.3	Résistance à court terme . . . . .	61
4.3.4	Résistance après 28 jours . . . . .	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>66</b>
5.1	Conclusions . . . . .	66
5.2	Perspectives . . . . .	66
<b>6</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>V</b>
6.1	ANNEXE A : Fiche technique échantillon Ciment Portland CEM I 52,5 N Juillet 2021 . . . . .	V
6.2	ANNEXE B : Fiche technique du Ciment Portland CEM I 52,5 N . . . . .	VI

## Liste des figures

1	Émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) ( $CO_{2eq.}$ ) en l'an 2000 et contribution de la production de ciment (données issues de Humphreys et Mahasenan, 2002 [1]). [2] . . . . .	1
2	: Hiérarchie des modes de gestion des déchets (Échelle de Lansink) [3] . . . . .	4
3	: Composition du gisement de déchets industriels en Wallonie (2013) [4] . . . . .	6
4	Traitement des déchets municipaux en 1995 et 2007 (Source: SPF Economie). [5] . . . . .	7
5	: Différentes étapes de la production des Granulats Recyclés de Planète Recyclage : (1) Préparation par broyage des blocs de béton armé et déferrage à l'aide d'une pince de type BRH, (2) concassage, (3) criblage et (4) stockage (source : Recyment). [6] . . . . .	8
6	: Maniabilité du béton en fonction du pourcentage de volume de granulats fins recyclés (RFA) [7] . . . . .	9
7	: Evolution de la profondeur de carbonatation des bétons composés avec des granulats recyclés en fonction de leur âge [7] . . . . .	9
8	Porosité du béton en fonction du pourcentage de volume de granulats fins recyclés (RFA) [7] . . . . .	10
9	: Gestion des boues de STEP en Wallonie (Région Wallonne, 2018) [8] . . . . .	11
10	: Aptitude du sol à recevoir l'épandage de boues de station d'épuration selon les normes en nickel de l'AGW 12/01/95 [9] . . . . .	12
11	: Évolution des résistances à la compression de mortiers sans et avec 25 et 50% de cendres de boues de Step en remplacement du ciment. [10] . . . . .	13
12	: Essais d'étalement : comparaison entre les 3 fines de référence (B1, B2 et B3).[11] . . . . .	14
13	: Essais de résistance en compression sur les formulations avec les trois types de fines : B1, B2 et B3. [11] . . . . .	14
14	: Influence du taux de substitution sur la résistance en Compression des mortiers à base de déchets de briques [12]. . . . .	15
15	: Influence du taux de substitution sur la résistance en Traction des mortiers à base de déchets de briques [12]. . . . .	15
16	: Fractions molaires des espèces $H_2CO_3$ , $HCO_3^-$ et $CO_3^{2-}$ en fonction du pH (à 20°C et à l'équilibre). [13] [14] . . . . .	16
17	: Mécanisme de carbonatation de la portlandite. [15] [13] . . . . .	16
18	: Carbonatation accélérée à chambre sous pression [16] . . . . .	17
19	Carbonatation dynamique [16] . . . . .	17
20	: Mise en place des expériences de carbonatation roulante à l'échelle du laboratoire. (1) bouteille de gaz $CO_2$ ; (2) pompe à vide et contrôleur automatisé de débit de $CO_2$ ; (3) récipient hermétique (avec capteur de pression) pour placer les agrégats de béton ; (4) machine à rouler. [17] . . . . .	17
21	: Effet de la granulométrie des granulats de béton recyclé sur le taux d'absorption de $CO_2$ [16] . . . . .	18
22	Evolution de la profondeur carbonatée en fonction du rapport E/C d'après [Baroghel Bouny et al., 2008] [15] [18] . . . . .	19
23	: Rapport de gain de masse (a) et pourcentage de carbonatation (b) en fonction de la teneur en eau initiale. [19] . . . . .	19
24	: Relation entre $CO_2$ et taux de carbonatation [16] . . . . .	20
25	Effet de l'humidité relative sur l'absorption de $CO_2$ des granulats de béton recyclé [19] , [20] , [21], [22]. . . . .	21
26	: $CO_2$ stocké en 24h, pour les GBR OC 12-20 et BPE 1-4, à 20°C (dessiccateur) et 40°C (incubateur) avec une teneur en eau initiale de 2.8%.. [23] . . . . .	21
27	: Absorption de $CO_2$ en fonction de la durée de carbonatation. [16] . . . . .	22
28	: Effet du débit [16] . . . . .	23
29	Effet de la vitesse de laminage sur la séquestration du $CO_2$ à 3 jours de durée (Teneur en eau variant de 7,5 à 8,2%). [17] . . . . .	23
30	Schématisme du réseau poreux [24] . . . . .	24
31	Microstructure d'un béton ordinaire mettant en évidence l'ITZ obtenue par microscopie [25] . . . . .	25
32	Isothermes de désorption de la vapeur d'eau des mortiers à base de ciment Portland avant et après carbonatation [26] [27]. . . . .	26
33	Evolution temporelle du retrait du mortier pendant la carbonatation [28]. . . . .	27
34	Schéma de production des fibres-ciment [29]. . . . .	28

35	Évolution de la composition des ardoises de toiture en fibres-ciment durcies à l'air produites dans l'entreprise Eternit Kapelle o/d Bos. [29]. . . . .	30
36	Variation de la masse volumique en fonction de temps[30]. . . . .	31
37	La variation de la résistance à la flexion en fonction du temps [30]. . . . .	32
38	La variation de la résistance à la compression en fonction du temps [30]. . . . .	32
39	Déformation de retrait pour différents renforcements de fibres naturelles et artificielles [31]. . . . .	33
40	Sable normalisé . . . . .	35
41	Fines de fibres-ciment . . . . .	35
42	Image microscopique des fibres . . . . .	35
43	Balance . . . . .	36
44	Malaxeur . . . . .	37
45	Appareil à chocs . . . . .	37
46	Moule prismatique . . . . .	37
47	Chambre de laboratoire humide. . . . .	38
48	Salle climatisée. . . . .	38
49	Dispositif de carbonatation accélérée . . . . .	38
50	Enceinte de carbonatation. . . . .	38
51	Principe de mesure du pycnomètre [32] . . . . .	40
52	Vue d'ensemble du dispositif du pycnomètre à gaz . . . . .	41
53	Schéma simplifié de l'unité optique d'un granulomètre laser [33] . . . . .	42
54	Vue d'ensemble du dispositif de l'analyse granulométrique laser . . . . .	42
55	Vue d'ensemble du dispositif d'analyse de détermination de surface spécifique . . . . .	43
56	Vue d'ensemble du dispositif d'analyse thermogravimétrique . . . . .	44
57	Appareil de Vicat . . . . .	45
58	Exemple d'appareil de Vicat pour la détermination de la consistance normalisé et du temps de prise [34] . . . . .	46
59	Table à secousses, dame, pied à coulisse et moule tronconique . . . . .	47
60	Table à secousses [35] . . . . .	48
61	Disposition de charge pour la détermination de la résistance à la flexion [36] . . . . .	49
62	Exemple de dispositif de compression [36] . . . . .	49
63	Dispositif de flexion utilisé . . . . .	50
64	Dispositif de compression utilisé . . . . .	50
65	Vue d'ensemble du dispositif de détermination des résistances . . . . .	50
66	Immersion des éprouvettes de mortier . . . . .	51
67	Pesée à l'air de l'éprouvette humide . . . . .	51
68	Pesée hydrostatique . . . . .	52
69	Étuve de laboratoire . . . . .	52
70	Pesée à l'air de l'éprouvette sèche . . . . .	52
71	Courbes granulométriques cumulatives . . . . .	54
72	Analyses thermogravimétriques des fines carbonatées . . . . .	55
73	Analyses thermogravimétriques des fines non carbonatées . . . . .	55
74	Comparaison des résultats des analyses thermogravimétriques . . . . .	56
75	Comparaison des résultats des analyses thermiques différentielles . . . . .	56
76	Etalement des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution . . . . .	57
77	Temps de prise des ciment substitués par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution . . . . .	58
78	Porosité des mortiers âgés de 28 jours et composés avec du ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	59
79	Evolution de la profondeur maximum de carbonatation des éprouvettes de mortier curées dans l'enceinte de carbonatation (M3) en fonction du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées . . . . .	60
80	Coloration des éprouvettes de mortier curées dans l'enceinte de carbonatation en fonction du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées . . . . .	60
81	Résistance à la compression après sept jours des mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	61

82	Résistance à la flexion après sept jours des mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	62
83	Résistance à la compression après 28 jours des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	63
84	Résistance à la flexion après 28 jours des ciment substitués par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	64
85	Indice d'activité après 28 jours des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure . . . . .	64
86	Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes de mortier en fonction du temps, des conditions de cure et du taux de substitution du ciment par les fines de fibres-ciment (M1: Fines non carbonatées & cure dans la chambre humide ; M2: Fines carbonatées & cure dans la chambre humide ; M3: Fines non carbonatées & cure dans l'enceinte de carbonatation ; M4: Fines non carbonatées & cure dans la salle climatisée) . . . . .	65

## Liste des tables

1	Déchets produits en Belgique par activité économique en tonnes (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37] . . . . .	3
2	Déchets minéraux de construction et de démolition produit en Belgique par activité en 2020 (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37] . . . . .	3
3	Déchets produits en Belgique en 2020 (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37] . . . . .	5
4	Estimation du gisement des déchets produits en Wallonie en 2013 [4] . . . . .	6
5	Déchets d'emballage générés et recyclés - Belgique - En tonnes (Source: SPF Economie) [5] . . .	7
6	Synthèse de la masse volumique absolue et du coefficient d'absorption entre les granulats recyclés et les granulats naturels [38] . . . . .	9
7	Résistance à la compression de béton ordinaire et béton recyclé en fonction des taux de substitution et origines des granulats [7] . . . . .	10
8	Production de boues et sédiments en Région de Bruxelles-Capitale. ( Source : Département Déchets (Bruxelles Environnement) sur base de données BE, Port de Bxl, SBGE, Vivaqua, ABP (2011)) . . . . .	11
9	Composition chimique de la cendre de boues de STEP étudiée (% massique )[10] . . . . .	13
10	Caractéristiques physiques de fines de brique de référence (B1 ; B2 ; B3) [11] . . . . .	14
11	Volume molaire du réactif et du produit de la carbonatation [13] [39] . . . . .	24
12	Composition des bétons [40]. . . . .	25
13	Influence de la carbonatation sur la porosité accessible à l'eau [40]. . . . .	25
14	Caractéristiques mécaniques de quelques fibres d'armature [41]. . . . .	29
15	Analyse chimique moyenne des matériaux fibrociment et du clinker de CBR Antoing [29]. . . . .	29
16	Caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques de l'ardoise pour façade Cedral Board [42] [43]. . . . .	30
17	Masse volumique et composition minéralogiques des fibres naturelles [31]. . . . .	33
18	Masse volumique et composition minéralogiques des fibres naturelles [31]. . . . .	33
19	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM I 52,5 N de chez CBR . . . . .	34
20	Composition chimique du ciment CEM I 52,5 N de chez CBR . . . . .	34
21	Composition granulométrique du sable normalisé [36] . . . . .	35
22	Vitesses du batteur selon la norme EN 196-1 [36] . . . . .	36
23	Composition des mortiers. . . . .	39
24	Masses volumiques . . . . .	53
25	Diamètres des particules( $\mu\text{m}$ ) . . . . .	54

# 1 INTRODUCTION GENERALE

## 1.1 Contexte

La croissance démographique et, par ricochet, les besoins en matière de logement de nos sociétés dites « modernes » posent de nouvelles difficultés en termes de maintien de l'équilibre naturel de notre écosystème. En réponse à ce défi d'urbanisation, la production mondiale de ciment est passée de 100 millions de tonnes en 1920 à plus de 1,5 milliard de tonnes en 2000 et à plus de 4,5 milliards de tonnes en 2015 [44].

Comme le montre la figure 1, la production mondiale de ciment représentait environ 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en l'an 2000 [2]. En effet, à l'échelle de la planète, les cimenteries émettent entre 0,9 et 1,15 tonne de  $CO_2$  par tonne de ciment (CEM I) produit [45]. Cette pollution provient majoritairement de la production de clinker, qui est le constituant principal du ciment Portland. En effet, la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile à une température de 1450 °C produit du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et de l'oxyde de chaux (CaO), qui est le composant principal du clinker. Il en résulte que les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre sont donc le  $CO_2$  produit pendant la décarbonatation du calcaire, la combustion des énergies fossiles utilisées pour élever la température, la consommation d'énergie électrique pendant le processus de production et le transport des matières premières ou des produits finis.

À ce jour, plusieurs solutions sont mises en œuvre par les cimentiers pour limiter l'empreinte carbone de leur production. On peut citer : l'utilisation d'équipements et d'appareils de production plus économes en énergie, le remplacement des carburants à haute teneur en carbone par des carburants à faible teneur en carbone, et la substitution du clinker dans la composition des ciments par des additions minérales telles que le charbon, les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau [46].

Plusieurs études antérieures ont démontré que l'empreinte carbone de l'industrie de la construction peut également être réduite en revalorisant certains déchets comme substitut partiel du ciment dans la composition des mortiers. On peut par exemple citer les études menées par Adèle Grellier [11] sur la substitution du ciment par des fines de briques de terre, ainsi que les études menées par Edouard Halleux [47] sur la substitution du ciment par les cendres de balles de riz.

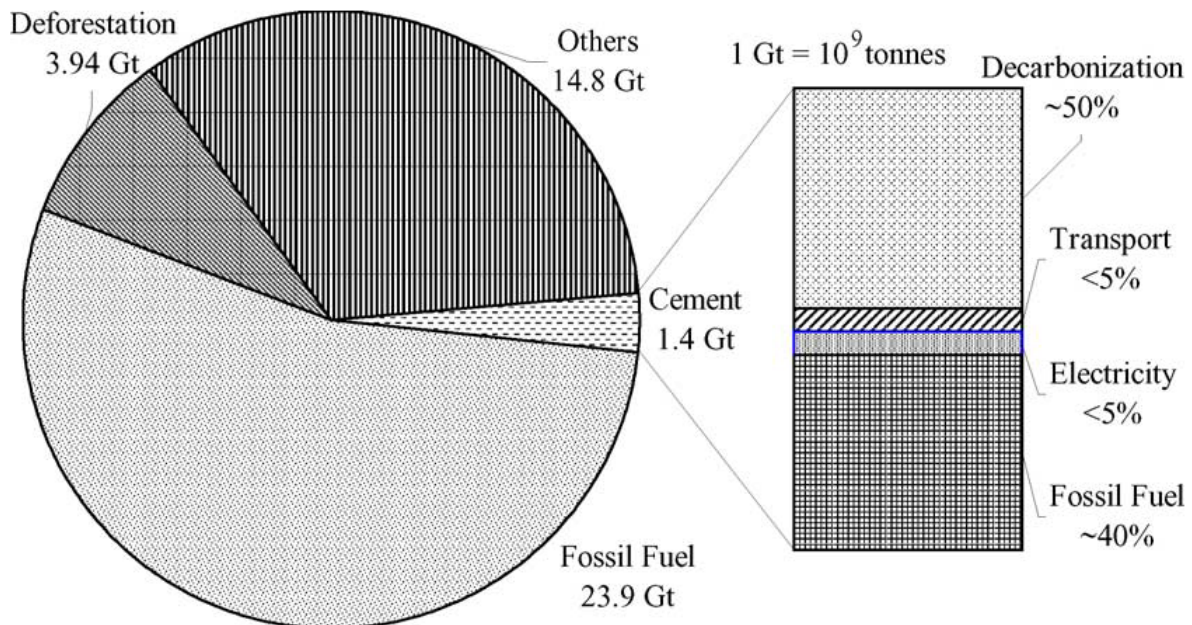


FIG. 1 Émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) ( $CO_2eq.$ ) en l'an 2000 et contribution de la production de ciment (données issues de Humphreys et Mahasanen, 2002 [1]). [2]

## 1.2 Objet et objectifs du travail

L'objet de ce travail est d'apporter une valeur ajoutée aux déchets issus de la déconstruction de matériaux en fibres-ciment en les revalorisant en tant que substitut partiel du ciment dans la composition des mortiers. Ces matériaux seront finement broyés et transformés par carbonatation à une humidité relative de 60 % et une teneur en  $CO_2$  de 1 %. Les objectifs de l'étude sont alors les suivants :

1. Evaluer l'effet de la carbonatation sur les propriétés physico-chimiques et sur la composition minéralogique des fines de fibres-ciment ;
2. Evaluer l'effet de la carbonatation sur la consistance du mortier frais composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées ;
3. Evaluer l'effet des conditions de cure et du taux de substitution du ciment sur la durabilité et les propriétés mécaniques des mortiers composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées.

## 1.3 Plan du travail

L'étude est scindée en trois grandes parties. La première partie est l'étude bibliographique. Elle dresse un état de l'art du mode de gestion des déchets en Belgique, décrit la réaction de carbonatation des matériaux cimentaires et présente les matériaux en fibres-ciment.

La seconde partie porte sur la présentation du programme expérimental. Elle présente les matériaux et le matériel de travail utilisés, la composition des mortiers ainsi que les méthodes d'essais à utiliser pour atteindre les objectifs mentionnés à la partie 1.2.

La troisième et dernière partie concerne l'analyse des résultats des essais effectués. Il s'agit notamment des essais de caractérisation sur le ciment, les fines de fibres-ciment non carbonatées et les fines de fibres-ciment carbonatées. De plus, des essais ont été réalisés sur des mortiers frais et durcis composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées.

## 1.4 Contraintes de l'étude

Durant la réalisation de cette étude, deux contraintes majeures ont été rencontrées. La première contrainte concerne l'incapacité d'évaluer l'effet de l'incorporation des fibres-ciment sur les temps de prise de la pâte de ciment. Cela est dû à l'indisponibilité de la sonde de l'appareil de Vicat nécessaire pour déterminer la teneur en eau à consistance normalisée.

La seconde contrainte est liée à l'incapacité d'évaluer la demande en eau des fines de fibres-ciment. En effet, il n'y avait pas une quantité suffisante de fibres-ciment broyé pour effectuer cet essai.

## 2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre est un recueil des informations et des recherches scientifiques qui seront utiles à la compréhension de ce travail de fin d'étude. Il présente un état de l'art de la gestion des déchets en Belgique, de la carbonatation des matériaux cimentaires et des recherches antérieures menées sur les fines de fibres-ciment.

### 2.1 Gestion des déchets

#### 2.1.1 Contexte

D'après STATBEL, la production de déchets en Belgique était de 68 millions de tonnes en 2020, dont 20 millions du secteur de la construction[37]. Le tableau 1 présente l'évolution temporelle de la répartition de ces déchets par secteur d'activité de 2010 à 2020. On peut constater que chaque année, le secteur de la construction représente environ 30 % de la production total de déchets en Belgique.

Secteur d'activité	Année					
	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Industrie	31.707.672	26.611.266	29.046.813	32.865.656	34.778.422	37.757.757
Construction	16.852.662	17.132.769	18.347.259	19.573.149	22.658.151	20.727.780
Ménages	5.865.753	5.294.743	5.419.043	5.041.208	4.885.123	5.342.388
Services	6.697.911	4.635.229	4.840.455	5.403.172	4.850.496	3.816.533
Agriculture	199.322	165.462	311.833	269.192	257.587	417.301
<b>Total</b>	<b>61.323.320</b>	<b>53.839.470</b>	<b>57.965.403</b>	<b>63.152.377</b>	<b>67.429.779</b>	<b>68.061.760</b>

TAB. 1 Déchets produits en Belgique par activité économique en tonnes (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37]

Afin de limiter les impacts environnementaux de l'industrie de la construction et de réduire son empreinte carbone, il est donc important de diminuer la quantité de déchets produits en les réutilisant, en les recyclant ou en les revalorisant. Il est essentiel d'établir un processus de recyclage efficace qui transforme les déchets de certains en matières premières pour d'autres, ainsi que de mettre en place une législation contraignante pour les producteurs, les obligeant à utiliser des matériaux recyclés. De plus, il est crucial de promouvoir une économie circulaire basée sur des échanges économiques favorisant la réutilisation des déchets. D'où l'intérêt du projet Mineral LOOP qui vise à concevoir une unité pilote de revalorisation des déchets minéraux non-dangereux en les transformant par des réactions de prise hydraulique et de carbonatation. Le tableau 2 montre la répartition de ces déchets minéraux en Belgique par secteur d'activité en 2020. Ces derniers représentent environ 30 % de la production annuelle de déchets en Belgique.

Déchets minéraux	Activité économique					<b>Total</b>
	Construction	Récupération	Assainissement et enlèvement des ordures des voiries	Fabrication d'autres produits minéraux	Autres (Ménages, Agriculture , etc...)	
Dangereux	31.555	11.040	28.112	4.279	45.541	120.527
Non-dangereux	16.802.209	1.825.764	710.754	455.843	872.911	20.667.481

TAB. 2 Déchets minéraux de construction et de démolition produit en Belgique par activité en 2020 (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37]



### 2.1.2 Modes de gestion de déchets

La gestion des déchets se base d'abord sur le principe de la prévention pour réduire la quantité de déchets produits, puis sur le principe de la gestion pour fabriquer de nouvelles matières et éliminer ou stocker les déchets non valorisables. D'après la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets [3], les modes de gestion à appliquer par ordre de priorité sont les suivants : la prévention, la préparation en vue du réemploi, le recyclage, les autres valorisations et l'élimination (voir figure 2).

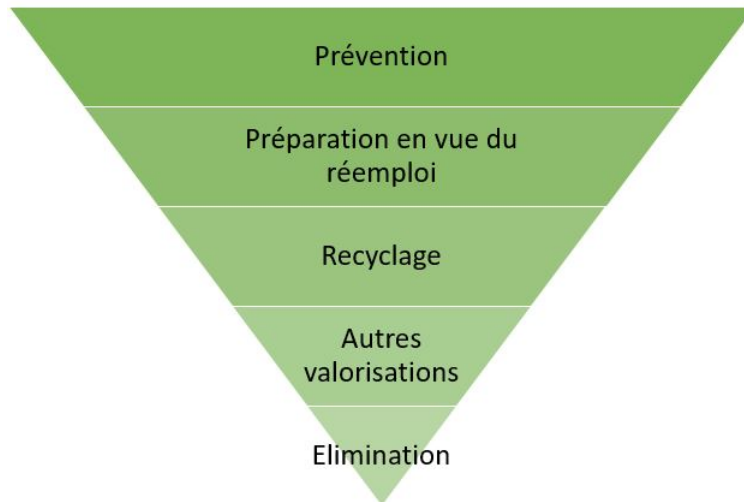


FIG. 2 : Hiérarchie des modes de gestion des déchets (Échelle de Lansink) [3]

La directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets définit plusieurs mots-clés qui seront utiles pour la compréhension de ce chapitre, à savoir :

- Un déchet est : « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » [3];
- La prévention est : « les mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet et réduisant la quantité de déchets; les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine; la teneur en substances dangereuses des matières et produits» [3];
- préparation en vue du réemploi: «toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement» [3];
- Le réemploi : « toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus» [3];
- Le recyclage est : «toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage» [3];
- La valorisation est : «toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie. L'annexe II énumère une liste non exhaustive d'opérations de valorisation» [3];
- L'élimination: « toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances ou d'énergie»[3].

### 2.1.3 Composition du gisement de déchets

#### 2.1.3.1 Composition du gisement de déchets produits en Belgique

Le tableau 3 présente la composition détaillée du gisement de déchets produits en Belgique en 2020. Il est majoritairement composé de déchets minéraux de construction et de démolition.

	Déchets dangereux (tonne)	Déchets non-dangereux (tonne)
Solvants usés	121.984	0
Déchets acides, alcalins ou salins	134.032	442.779
Huiles usées	105.823	0
Déchets chimiques	628.238	128.053
Boues d'effluents industriels	132.310	273.052
Boues et déchets liquides provenant du traitement des déchets	189.538	872.706
Déchets provenant des soins médicaux ou vétérinaires et déchets biologiques	20.628	56.184
Déchets métalliques, ferreux	0	2.343.818
Déchets métalliques, non ferreux	0	692.363
Déchets métalliques, ferreux et non ferreux en mélange	0	424.520
Déchets de verre	104	1.714.246
Déchets de papiers et cartons	0	3.940.453
Déchets de caoutchouc	0	67.620
Déchets de matières plastiques	0	994.897
Déchets de bois	95.363	4.053.161
Déchets textiles	0	179604
Déchets contenant des PCB	1.325	0
Équipements hors d'usage	69.389	126.753
Véhicules au rebut	404.373	35.646
Déchets de piles et accumulateurs	71558	4199
Déchets animaux et déchets alimentaires en mélange	0	1.351.967
Déchets végétaux	0	7.522.806
Fèces, urines et fumier animaux	0	86.857
Déchets ménagers et assimilés	0	4.648.978
Matériaux mélangés et matériaux indifférenciés	23.270	1.943.302
Résidus de tri	48.047	2.308.264
Boues ordinaires (excepté boues de dragage)	0	868.688
<b>Déchets minéraux de construction et de démolition</b>	<b>120.527</b>	<b>20.667.481</b>
Autres déchets minéraux	320.631	1.658.132
Résidus d'opérations thermiques	98.337	3.025.179
Terres	420.172	2.395.306
Boues de dragage	632.217	400.539
Déchets minéraux provenant du traitement des déchets et déchets stabilisés	307.883	888.446
<b>Total</b>	<b>3.945.753</b>	<b>64.116.007</b>
<b>Total général</b>	<b>68.061.760</b>	

TAB. 3 Déchets produits en Belgique en 2020 (Sources: Statbel (Direction générale Statistique - Statistics Belgium) sur base d'enquêtes, sources administratives (OVAM, IBGE-BIM, DGARNE) et modèles.) [37]

### 2.1.3.2 Composition du gisement de déchets en Wallonie

D'après le Plan wallon des Déchets-Ressources (PWD-R) adopté par le gouvernement wallon le 22 mars 2018, la production de déchets en Wallonie était estimée à 15,2 millions de tonnes en 2013, dont plus de 45 % provenaient de l'industrie de la construction [4]. La figure 3 et le tableau 4 donnent une répartition de ces déchets.

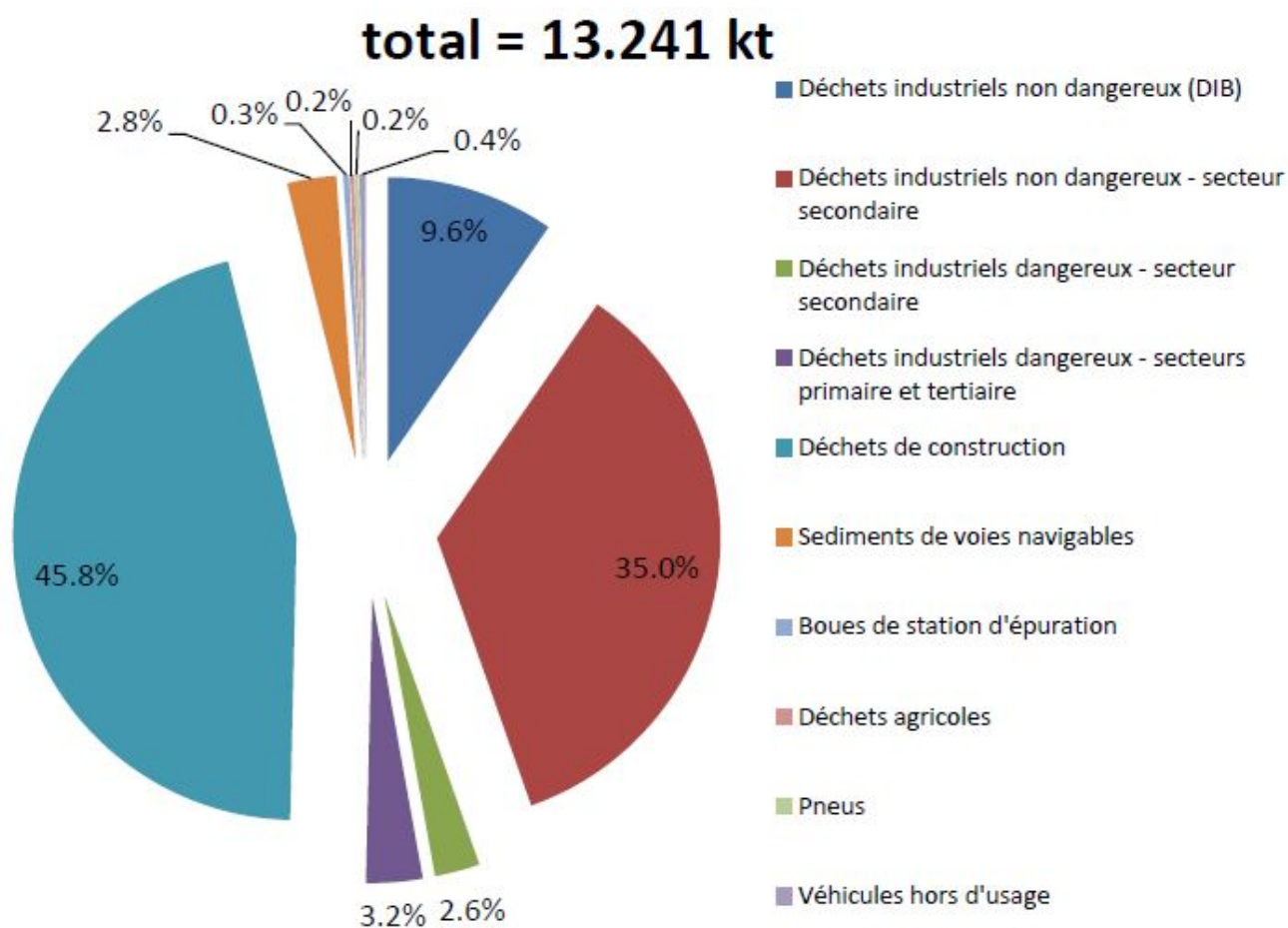


FIG. 3 : Composition du gisement de déchets industriels en Wallonie (2013) [4]

Déchets ménagers	Déchets provenant des ménages	1.526.444
	Déchets assimilés	358.055
	Déchets communaux	95.225
	<b>SOUS TOTAL (Déchets ménagers)</b>	<b>1.979.724</b>
Déchets industriels	Déchets industriels non dangereux	12.478.160
	Déchets industriels dangereux	763.079
	<b>SOUS TOTAL (Déchets industriels)</b>	<b>13.241.239</b>
<b>TOTAL</b>		<b>15.220.963</b>

TAB. 4 Estimation du gisement des déchets produits en Wallonie en 2013 [4]

### 2.1.4 Gestion des déchets municipaux en Belgique

Conformément aux normes européennes, la gestion des déchets ménagers dans les trois régions belges se base sur l'échelle de Lansink. Les déchets sont hiérarchiquement gérés comme suit :

- La **prévention** : Des campagnes de prévention sont mises en place pour inciter les consommateurs à utiliser moins de matières premières et à lutter contre le gaspillage alimentaire, ce qui permet de limiter la production de déchets.
- La **préparation en vue du reemploi** ou la réutilisation s'effectue également par le développement du secteur de la vente d'articles de seconde main. En Région flamande, un réseau de 135 magasins de seconde main, appelés "Les Kringwinkels", est disponible. On y trouve une variété d'articles tels que du mobilier, des équipements ménagers, des vêtements, des livres, des jouets, etc. [48] ;
- Le **recyclage**: Une fois que les déchets sont produits, la première étape du recyclage consiste au tri sélectif des déchets par les producteurs (ménages et industries). Ces déchets sont ensuite collectés et stockés dans des sites où le processus de recyclage pourra commencer. Comme le montre la figure 4 et le tableau 5 , le pourcentage de déchets municipaux recyclés en Belgique a fortement augmenté entre 1995 et 2007 ;
- **Autres revalorisations**: Les déchets verts et les déchets organiques sont valorisés sous forme de compost. Les déchets peuvent également être incinérés avec récupération d'énergie ;
- **L'élimination**: Les deux méthodes d'élimination des déchets sont l'enfouissement technique et l'élimination sans récupération d'énergie. Les déchets enfouis sont généralement ceux qui ne peuvent plus être réutilisés, recyclés ou valorisés.

Matière	Déchets générés 1997	Déchets générés 2007	Recyclage 1997	Recyclage 2007	% recyclage 1997	% recyclage 2007
Verre	310.000	366.864	217.287	366.864	70,09%	100,00%
Plastique	208.000	308.741	52.711	118.695	25,34%	38,44%
Papier/carton	529.600	639.798	410.620	588.517	77,53%	91,98%
Métaux	120.500	135.561	84.682	123.916	70,28%	91,41%
Bois	142.000	201.322	75.000	143.878	52,82%	71,47%
Autres	46.000	16.716	5.180	549	11,26%	3,29%
Total	1.356.100	1.669.002	845.480	1.342.420	62,35%	80,43%

TAB. 5 Déchets d'emballage générés et recyclés - Belgique - En tonnes (Source: SPF Economie) [5]

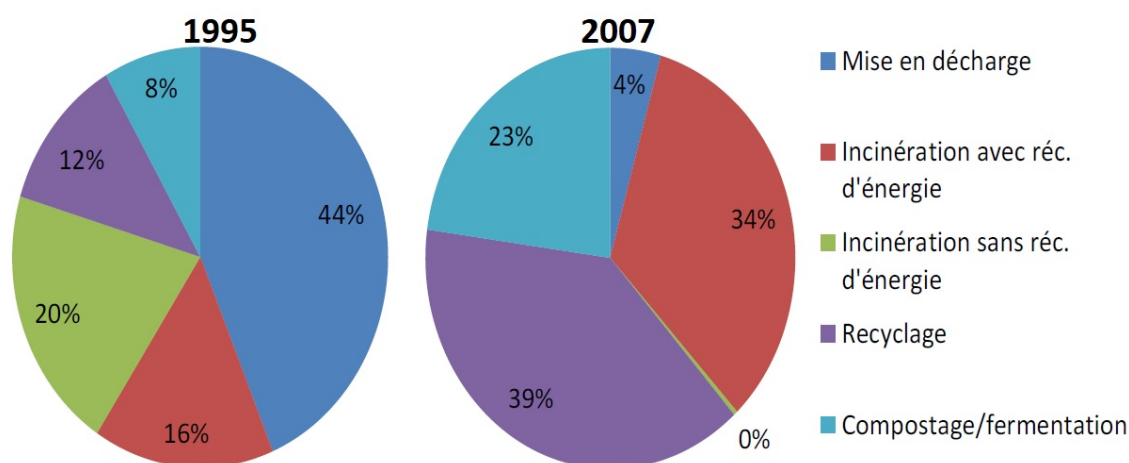


FIG. 4 Traitement des déchets municipaux en 1995 et 2007 (Source: SPF Economie). [5]

## 2.1.5 Gestion des déchets de construction en Belgique

### 2.1.5.1 Origines du gisement de déchets de construction en Belgique

Le domaine de la construction regroupe plusieurs types de chantiers, parmi lesquels les ouvrages de travaux publics et de génie civil, les travaux de démolition de bâtiments, les travaux de construction neuve, les travaux d'entretien, d'amélioration, de rénovation et de réhabilitation. Les déchets produits par ce domaine se répartissent principalement en trois types :

- Les déchets inertes représentent 72% [49]. Ils sont parfois réutilisés sur chantier. Cette catégorie est constituée de béton, de mortier, de gravats, de briques (cuites et crues), d'ardoises naturelles, de pierres naturelles, de verre et de terres non polluées [50] ;
- Les déchets non dangereux non inertes représentent 24% [49]. Ils proviennent généralement de chantiers de bâtiments et d'ouvrages d'art. Ils sont constitués de métaux (aluminium, cuivre, zinc, ferraille), de bois non traités, d'isolants, de câbles électriques, de peintures en phase aqueuse et d'huile végétale [50] ;
- Les déchets dangereux représentent 4% [49]. Cette catégorie est constituée d'amiante, de bois traités, de produits goudronnés, d'adjuvants pour le béton, de peinture, de vernis, de déchets mélangés contaminés, de terres et de déblais contaminés.

### 2.1.5.2 Modes de gestion des déchets de construction en Belgique

La destination initiale des déchets produits par les entreprises de construction par ordre de priorité est la suivante : réutilisation sur chantier, recyclage, remblaiement en carrière, remise à un collecteur et stockage [51]. La méthode de recyclage la plus courante pour le béton est la production de granulats recyclés qui sont ensuite utilisés comme matières premières pour la production de nouveau béton. La figure 5 illustre les différentes étapes de production des granulats recyclés.

Selon le Plan Wallon des Déchets adopté par le gouvernement wallon le 22 mars 2018, on estime que 4 millions de tonnes de granulats recyclés sont produits chaque année en Wallonie. L'objectif du gouvernement wallon était d'utiliser au moins 30% de granulats recyclés dans l'ensemble des granulats utilisés en Wallonie d'ici 2020 [4].



FIG. 5 : Différentes étapes de la production des Granulats Recyclés de Planète Recyclage : (1) Préparation par broyage des blocs de béton armé et déferrage à l'aide d'une pince de type BRH, (2) concassage, (3) criblage et (4) stockage (source : Recyment). [6]

### 2.1.5.3 Etudes antérieures menées sur les granulats recyclés

La table 6 présente les résultats de plusieurs études comparatives des propriétés des granulats recyclés (GR) et des granulats naturels (GN). Les GR ont une masse volumique absolue inférieure à celle des GN, car la masse volumique du résidu de pâte de ciment collée sur les GR est inférieure à celle des GN. La même raison explique également l'absorption et la porosité plus élevées des GR. Par conséquent, les bétons composés avec des granulats recyclés pourraient être moins durables, d'où la nécessité de limiter le taux de substitution des GN par les GR.

Références bibliographiques	Granulats recyclés			Granulats naturels		
	Masse volumique absolue ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Absorption (%)	Porosité (%)	Masse volumique absolue ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Absorption (%)	Porosité (%)
Abbas et al [52]	2640	3,3 - 5,4	8,1 - 12,3	2760 - 2790	0,54 - 0,89	2,4
Gomez – Soberon [53]	2350 - 2410	5,8 - 8,2	13,4 - 14,9	2590 - 2600	0,88 - 1,49	2,7 - 2,82
Evangelista [54]	2165	13,1	-	2564	0,80	-
Hansen et Narud [55]	2340 - 2490	3,7 - 8,7	-	2500 - 2610	0,8 - 3,7	-
Hasaba et al [56]	2430	7	-	2700	1,14	-
B.C.S.J [57]	2120 - 2430	3,6 - 8	-	2290 - 2510	-	-
Ravindrarahah [58]	2320	6,2	-	2610	0,63	-
Djerbi [59]	2235	3,1 - 5,3	-	2504	0,30 - 0,57	0,64 - 1,92
Kou et al [60]	2350 - 2450	5,63 - 7,42	8,46	2620	1,11 - 1,12	-

TAB. 6 Synthèse de la masse volumique absolue et du coefficient d'absorption entre les granulats recyclés et les granulats naturels [38]

SK Kirthika et al. [7] ont mené une étude sur la durabilité, l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats recyclés. Leur étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Pour une même teneur en eau, la maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés, car une partie de l'eau de gâchage du béton est absorbée par la porosité intragranulaire des granulats recyclés, ce qui diminue la fluidité du mélange (voir figure 6);
2. Pour un taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés égal à 30 %, la profondeur de carbonatation et le coefficient de perméabilité diminuent. En revanche, ils augmentent avec l'augmentation du taux de substitution lorsqu'il est supérieur à 30 % (voir figure 7);

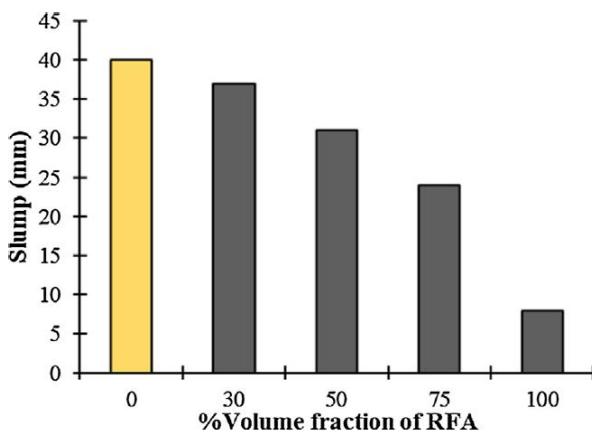


FIG. 6 : Maniabilité du béton en fonction du pourcentage de volume de granulats fins recyclés (RFA) [7]

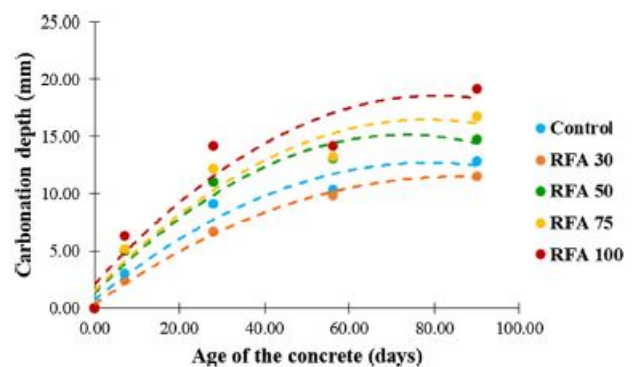


Fig. 25. Carbonation depth of RS and RFA concrete as function of age.

FIG. 7 : Evolution de la profondeur de carbonatation des bétons composés avec des granulats recyclés en fonction de leur âge [7]

3. Pour un taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés égal à 30 %, la porosité du mortier diminue. En revanche, elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution lorsqu'il est supérieur à 30 %. Cette augmentation est notamment due à la présence de vides et de poussière sur l'ancienne pâte de ciment [7] (voir figure 8) ;

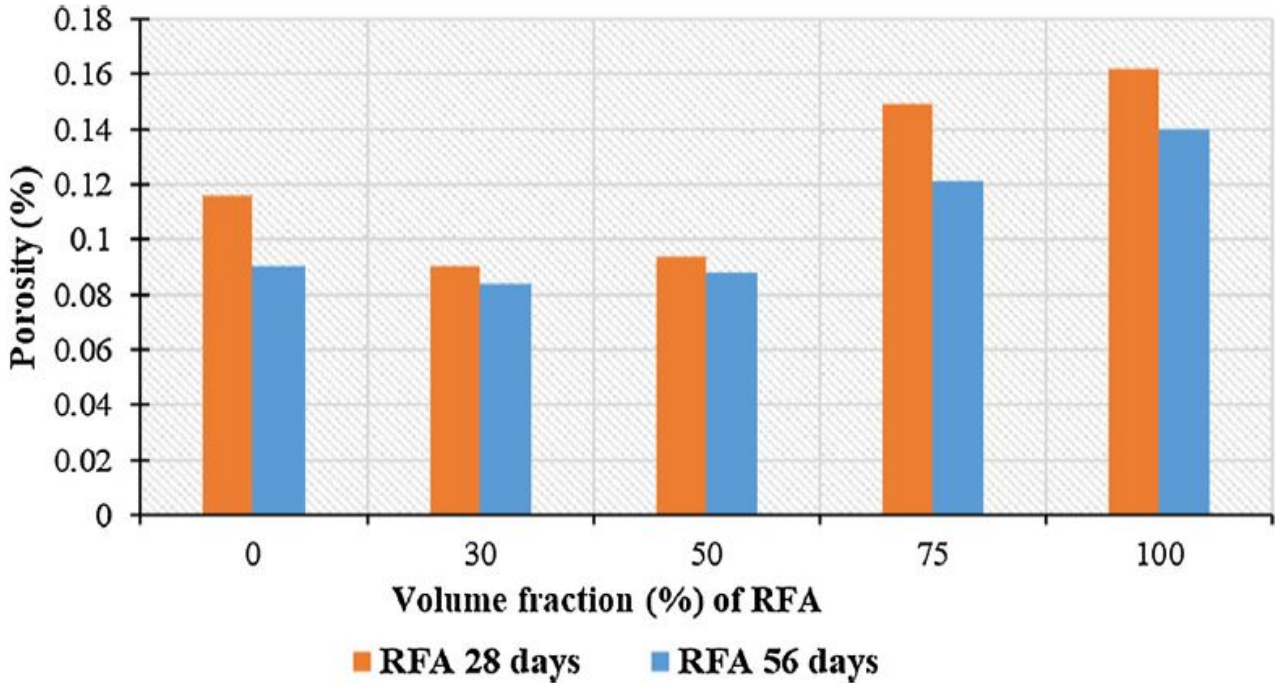


FIG. 8 Porosité du béton en fonction du pourcentage de volume de granulats fins recyclés (RFA) [7]

4. Les résistances mécaniques du béton à base de granulats recyclés diminuent lorsque le taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés augmente. Cette diminution peut être attribuée à la présence de l'ancienne pâte cimentaire autour des granulats recyclés. Cependant, pour un taux de substitution inférieur à 30 %, les propriétés mécaniques du béton recyclé s'améliorent. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la porosité du mortier frais (voir tableau 7).

Designation l'échantillon de Béton	Résistance à la compression (MPa)				Résistance à la traction (MPa)				Résistance à la flexion (MPa)			
	7 j	28 j	56 j	90 j	7 j	28 j	56 j	90 j	7 j	28 j	56 j	90 j
Control	26,8	36,2	45,5	50,0	1,9	3,1	3,7	3,9	4,0	4,5	4,7	4,8
RFA 30	27,0	36,8	50,5	51,1	1,8	3,2	3,9	4,1	4,1	4,9	5,2	5,3
RFA 50	24,9	33,8	44,1	45,1	2,0	3,1	3,4	3,6	3,9	4,8	5,1	5,1
RFA 75	23,1	31,7	40,8	45,0	2,0	3,0	3,3	3,4	3,8	4,7	5,0	5,1
RFA 100	21,5	30,1	39,0	44,3	1,90	2,9	3,0	3,2	3,6	4,6	4,8	4,9

TAB. 7 Résistance à la compression de béton ordinaire et béton recyclé en fonction des taux de substitution et origines des granulats [7]

## 2.1.6 Gestion des boues et des sédiments

### 2.1.6.1 Origines des boues de dragage et des sédiments

Les boues de dragage sont issues de l'épuration des eaux et de la production d'eau potable. En Région de Bruxelles-Capitale, ces boues proviennent de la Station d'Épuration de Bruxelles-Sud (STEP Sud) et de la station d'épuration de Bruxelles-Nord (STEP Nord). Cette dernière « permet de traiter les eaux usées en provenance de la Région de Bruxelles-Capitale et du bassin flamand de la Woluwe » [61].

Les sédiments sont principalement issus du dragage des cours d'eau, du curage du réseau d'assainissement urbain et du balayage des rues. Comme le montre le tableau 8, la région de Bruxelles-Capitale produit en moyenne 120 000 tonnes de boues de dragage et de sédiments chaque année.

Boues de dragage				
Origines	STEP Nord	STEP Sud	Fosses septiques	STEPs industrielles
Tonnes de matériaux humides collectées	44 795	4 850	5 980	1 500
Sédiments				
Origines	Dragage du Canal	Curage cours d'eau principaux	Nettoyage des voiries et curage des avaloirs régionaux	Nettoyage des voiries et curage des avaloirs communaux
Tonnes de matériaux humides collectées	43 200	4 750	7 740	5 080

TAB. 8 Production de boues et sédiments en Région de Bruxelles-Capitale. ( Source : Département Déchets (Bruxelles Environnement) sur base de données BE, Port de Bxl, SBGE, Vivaqua, ABP (2011))

### 2.1.6.2 Modes de gestion des boues de dragage

La figure 9 illustre parfaitement l'évolution temporelle de ces différents modes de gestion en Région wallonne. Elle met en évidence la gestion très écoresponsable des déchets de boues de dragage depuis l'année 2002, ce qui se traduit par une forte diminution de l'élimination par enfouissement.

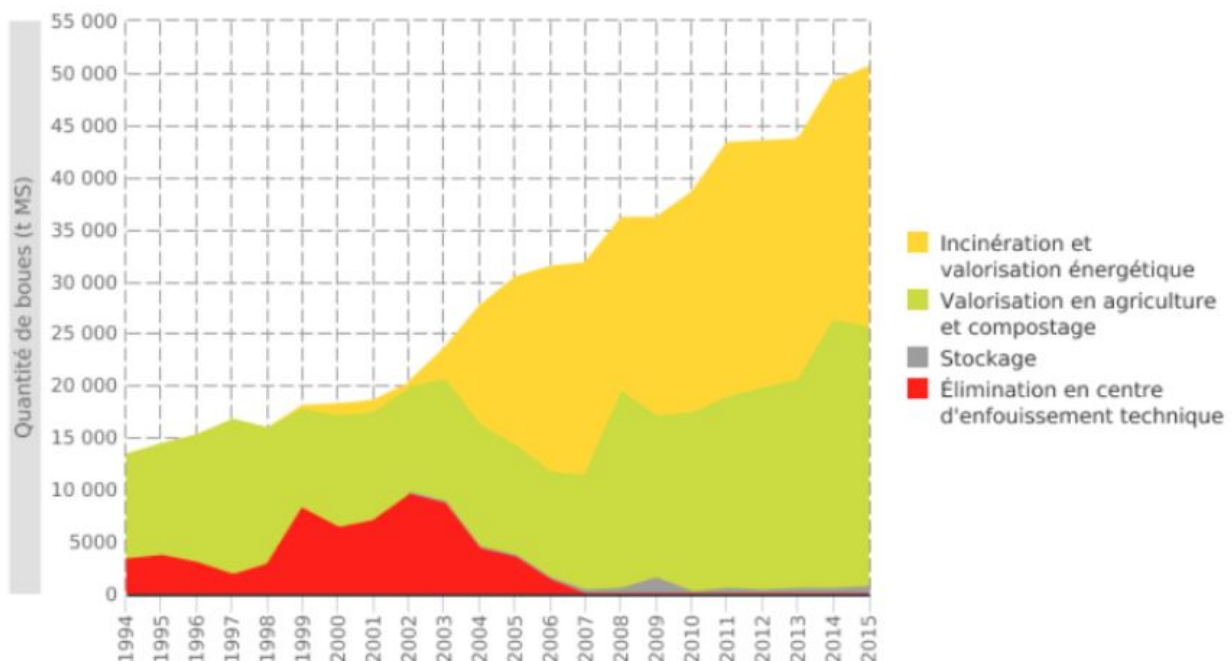


FIG. 9 : Gestion des boues de STEP en Wallonie (Région Wallonne, 2018) [8]



Cependant, il est important de noter que la valorisation des boues sur les sols agricoles est controversée en raison de leur teneur en métaux lourds et en polluants organiques. Cette pratique est interdite en Région flamande et n'est pas encore appliquée en Région bruxelloise. En Région wallonne, l'épandage des boues est limité sur des sols présentant des teneurs élevées en Éléments Trace Métalliques (ETM) [9]. La figure 10 représente les zones en Wallonie où l'analyse des sols est obligatoire avant l'épandage des boues.

La méthode de valorisation la plus courante des sédiments est le lavage, qui permet d'obtenir des sables pouvant être utilisés par les professionnels de la construction.

Comme illustré dans la figure 9, l'incinération est l'une des méthodes de gestion des boues de dragage. Cette opération génère des cendres qui peuvent être revalorisées dans la fabrication de mortier ou de béton en tant que substitut partiel du ciment.

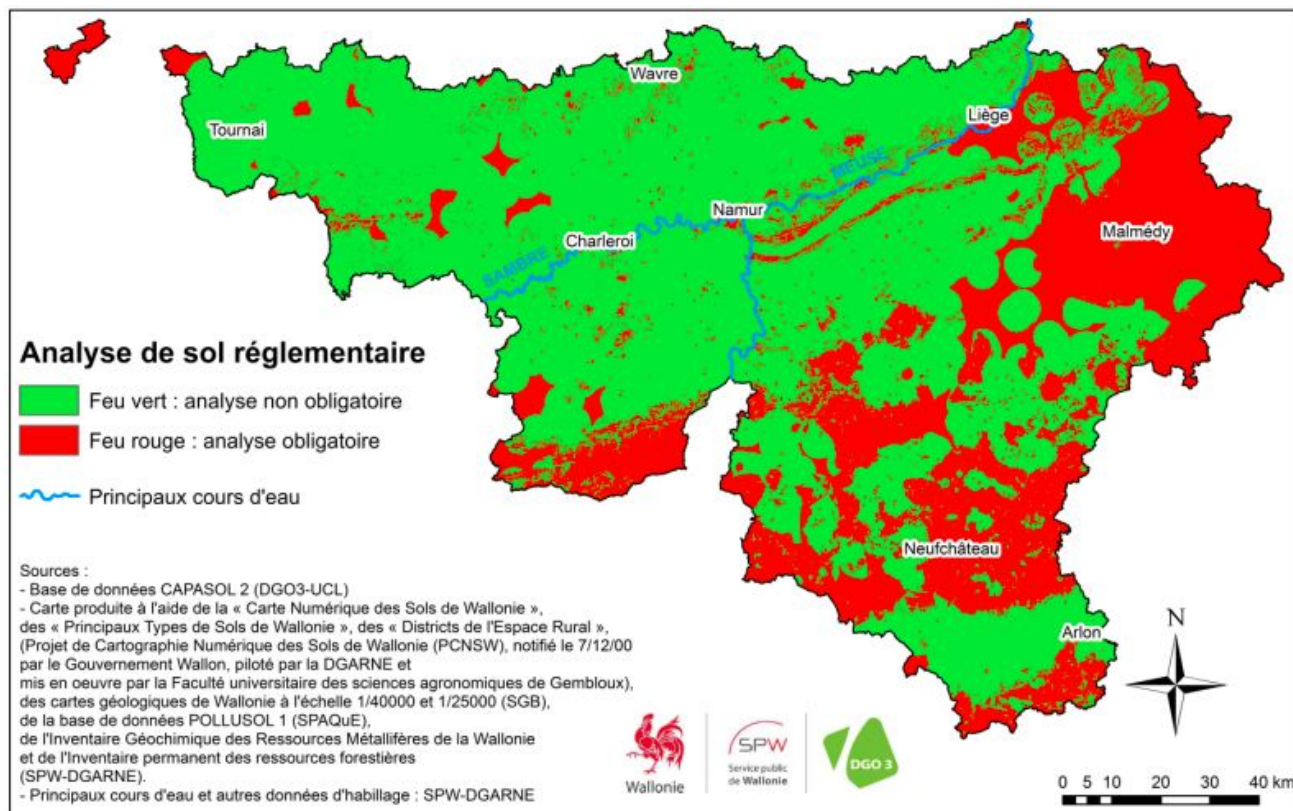


FIG. 10 : Aptitude du sol à recevoir l'épandage de boues de station d'épuration selon les normes en nickel de l'AGW 12/01/95 [9]

### 2.1.6.3 Etudes menées sur la valorisation des boues de dragage

Martin Cyr et al. [10] ont étudié les caractéristiques d'un mortier composé avec une substitution de 25 % et 50 % du ciment par de la cendre de boues de la STEP française. Le tableau 9 présente la composition chimique de ces cendres. On constate qu'elles sont composées d'environ 20 % d'oxyde de calcium (CaO). Pendant le malaxage du mortier, ce minéral réagit avec de l'eau pour produire de la portlandite. La portlandite mélangée avec les matériaux pouzzolaniques du ciment produit un composé ayant des propriétés liantes. Sur la base de ces résultats, les constatations suivantes peuvent être faites :

- Les cendres de boues ont un effet négatif sur la résistance du béton lorsqu'il est encore jeune, mais cet effet diminue rapidement après 28 jours [10];
- Les pertes de résistances sont faibles car les taux de substitution de 25 % et de 50 % conduisent respectivement à une baisse de résistance de 8 % et 16 %.[10].

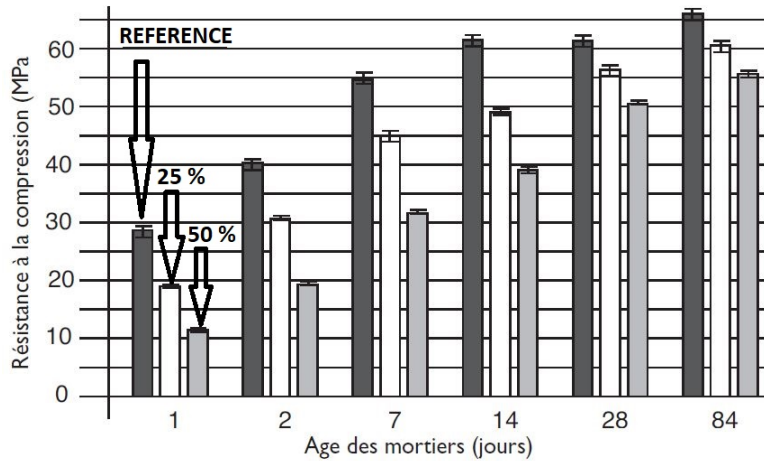


FIG. 11 : Évolution des résistances à la compression de mortiers sans et avec 25 et 50% de cendres de boues de Step en remplacement du ciment. [10]

corps chimique													
$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$K_2O$	$TiO_2$	MgO	CaO	$Na_2O$	$P_2O_5$	$Cr_2O_3$	$SO_3$	MnO	Mgo	Pertes au feu
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
34,2	12,6	4,7	1,7	0,9	0,50	20,69	1,0	14,8	0	0,13	0,06	1,9	5,5

TAB. 9 Composition chimique de la cendre de boues de STEP étudiée (% massique ) [10]

### 2.1.7 Gestion des déchets de briques de terre

En dehors de l'utilisation en tant que remblai en carrière, les méthodes de recyclage couramment étudiées et utilisées pour les déchets de briques sont les suivantes :

- La voie cimentaire consiste à broyer les déchets de briques en particules fines afin de les utiliser comme substitut partiel du ciment dans le mortier ou le béton ;
- La voie granulaire consiste à concasser les déchets de briques afin de les utiliser comme substitut partiel des sables naturels dans le mortier.

#### 2.1.7.1 Recyclage des déchets de briques de terre par la voie cimentaire

Adele Grellier [11] a étudié la valorisation des déchets de briques de terre en tant que substitut partiel du ciment. L'étude a porté sur plusieurs formulations qui prennent en compte non seulement le taux de substitution d'un ciment CEMI par des fines de brique allant de 0 à 90 %, mais aussi la taille des particules. Trois tailles ont été utilisées, à savoir les particules ultrafines (B1), les particules ayant une granulométrie similaire à celle du ciment (B2) et les particules fines plus grossières (B3). Le tableau 10, la figure 12 et la figure 13 présentent respectivement les caractéristiques physiques des fines utilisées pour cette étude, les résultats des essais d'étalement et les résultats des essais de résistance en compression sur pâtes. Cette étude permet de tirer les conclusions suivantes :

- La maniabilité de la pâte est augmentée lorsque les fines de brique utilisées ont une granulométrie supérieure ou égale à celle du ciment ;
- Lorsque le taux de substitution est inférieur à 20 %, la résistance à la compression du mélange est similaire à celle du ciment pour des fines broyées avec une granulométrie inférieure ou égale à celle du ciment (B1 et B2) ;
- À 180 jours, les propriétés mécaniques des mélanges sont similaires pour des taux de substitution inférieurs à 10 %.

		Unité	Fines de brique			
			B1	B2.1	B2.2	B3
Surface spécifique, BET		m <sup>2</sup> /kg	3169	818	868	184
Absorption d'eau		%	1 <=	1,1	1,1	2,2
Granulométrie	d10	µm	0,6	1,5	2,4	31,6
	d50	µm	3,3	17	21,2	191,2
	d90	µm	10,5	47,2	65,9	475,7

TAB. 10 Caractéristiques physiques de fines de brique de référence (B1 ; B2 ; B3) [11]

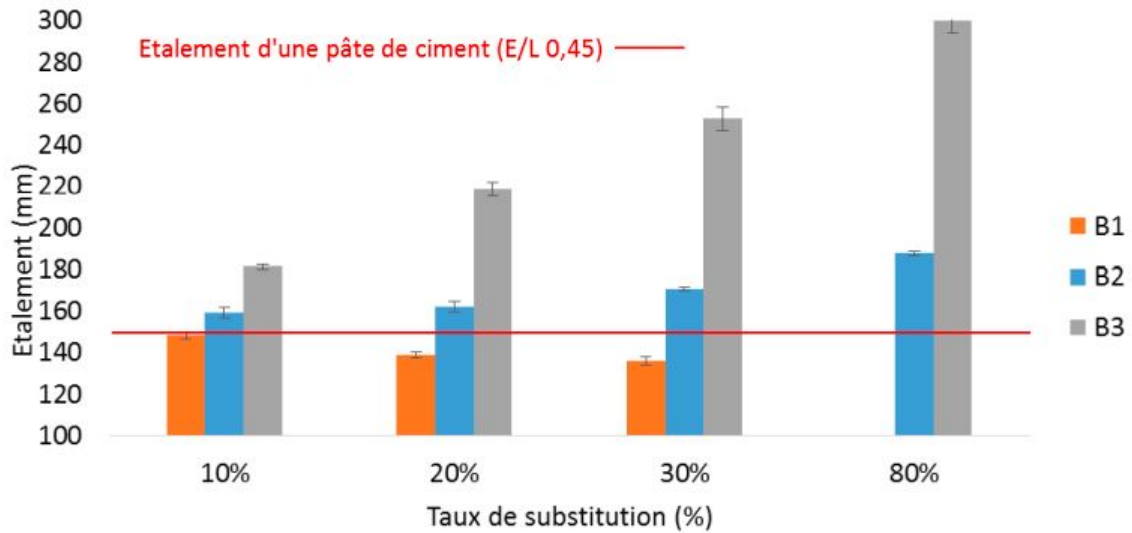


FIG. 12 : Essais d'étalement : comparaison entre les 3 fines de référence (B1, B2 et B3).[11]

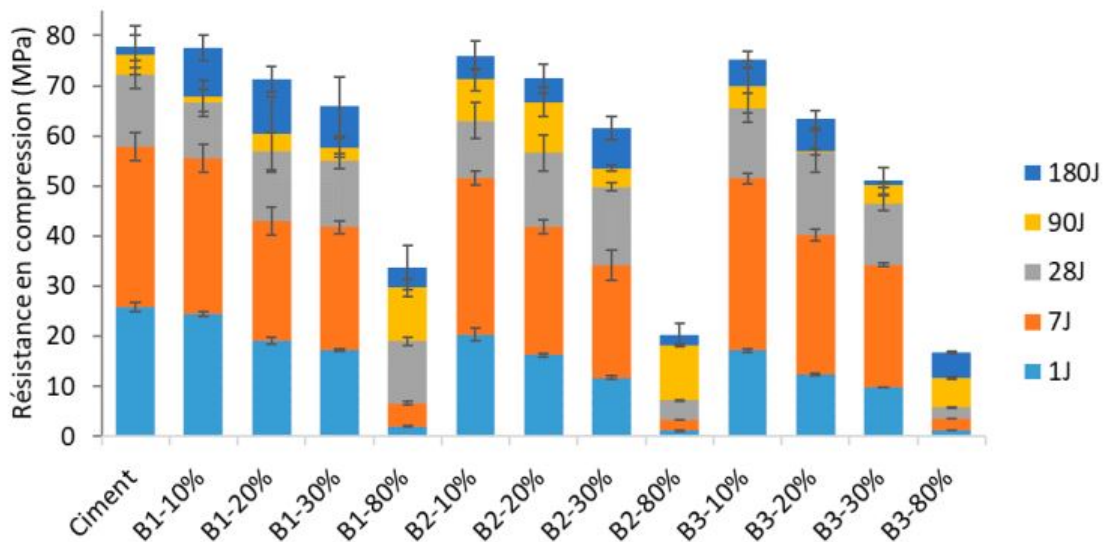


FIG. 13 : Essais de résistance en compression sur les formulations avec les trois types de fines : B1, B2 et B3. [11]

### 2.1.7.2 Recyclage des déchets de briques de terre par la voie granulaire

Nadjoua BOURMATTE et al. [12] ont étudié la valorisation des déchets de briques de terre en tant que substitut partiel du sable dans un mortier. Les granulats de briques de terre ont été élaborés par des opérations de concassage et de criblage. Les mortiers réalisés sont nommés M0, M25, M50, M75, M100 et leurs taux de substitution sont respectivement 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %. Les résultats de l'étude présentés par les figures 14 et 15 permettent de constater que la résistance à la traction et la résistance à la compression diminuent avec l'augmentation du taux de substitution. En revanche, pour un taux de substitution inférieur à 25 %, la résistance à la compression des mortiers à base des granulats de déchets de briques est similaire à celle d'un mortier composé avec des granulats naturels.

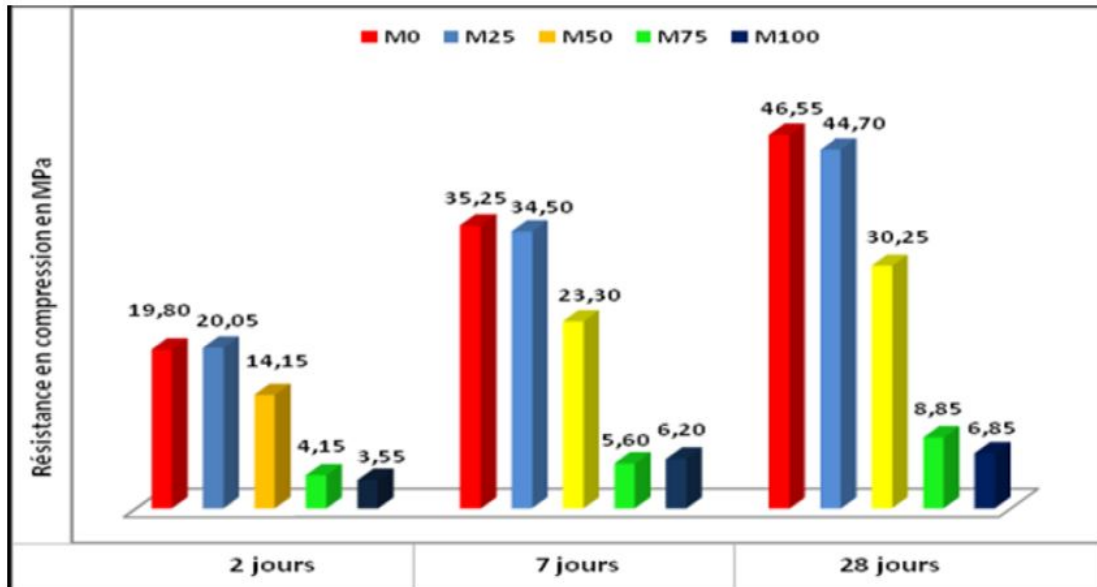


FIG. 14 : Influence du taux de substitution sur la résistance en Compression des mortiers à base de déchets de briques [12].

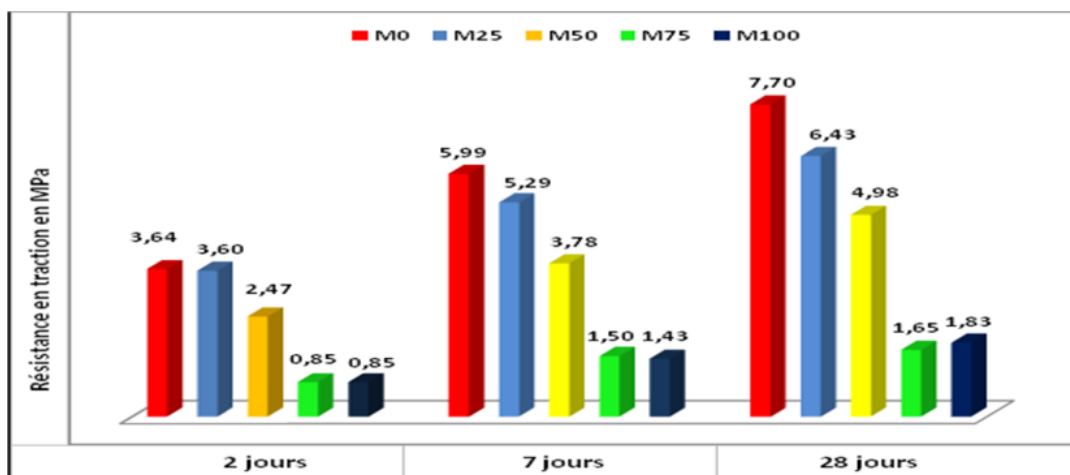
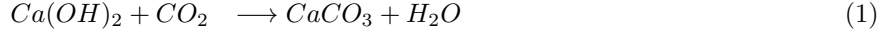


FIG. 15 : Influence du taux de substitution sur la résistance en Traction des mortiers à base de déchets de briques [12].

## 2.2 La carbonatation des matériaux cimentaires

Au niveau macroscopique, la carbonatation d'un matériau cimentaire correspond à la réaction entre le dioxyde de carbone gazeux dissous dans l'eau et l'hydroxyde de calcium, ce qui produit du carbonate de calcium et de l'eau, comme le montre la formule 1.



### 2.2.1 Mécanisme de la carbonatation

Les mécanismes qui régissent la carbonatation d'un matériau cimentaire dans un milieu humide sont illustrés par la figure 17.

Les réactions qui régissent la dissolution du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) gazeux dans l'eau sont données par l'équation 2. Les produits de la réaction sont l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ), l'hydrogénocarbonate ( $HCO_3^-$ ) et l'ion carbonate ( $CO_3^{2-}$ ). Les fractions molaires de ces produits à l'équilibre en fonction du pH sont données par la figure 16.

La réaction qui régit la dissolution des hydrates est donnée par l'équation 3. Les ions en solution réagissent donc pour former du carbonate de calcium, comme le montre l'équation 4 [15].

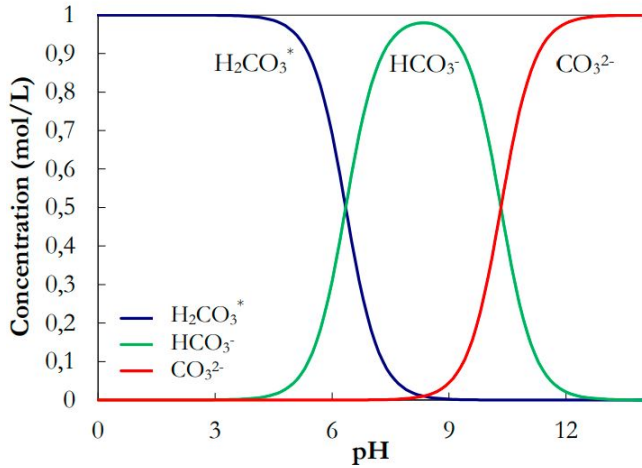
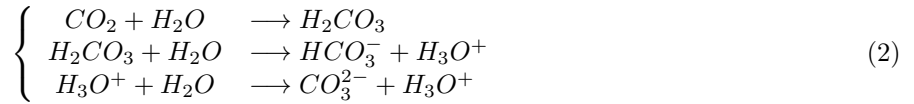


FIG. 16 : Fractions molaires des espèces  $H_2CO_3^*$ ,  $HCO_3^-$  et  $CO_3^{2-}$  en fonction du pH (à 20°C et à l'équilibre). [13] [14]

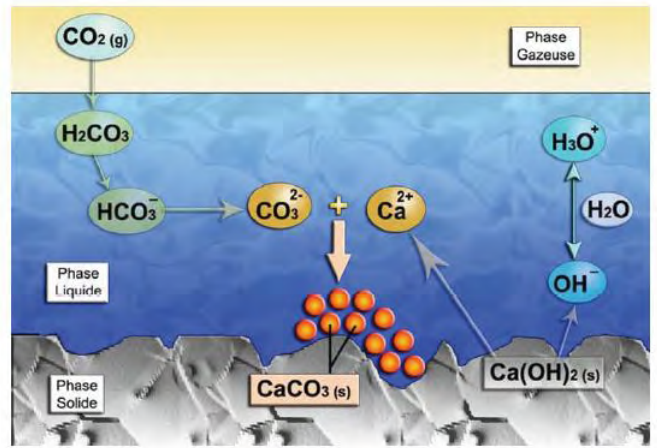


FIG. 17 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite. [15] [13]

### 2.2.2 Modes opératoires de carbonatation accélérée

Plusieurs modes opératoires de carbonatation accélérée peuvent être utilisés, parmi lesquels la carbonatation accélérée en conditions statiques et la carbonatation accélérée en tambour tournant. Dans ces deux modes opératoires, le matériau d'essai est séché et testé à une teneur en eau souhaitée. Cette teneur en eau est obtenue en immergeant le matériau dans l'eau, puis en le séchant jusqu'à atteindre la teneur en eau souhaitée. La teneur en eau est calculée en pesant la masse après séchage partiel et la masse du matériau sec.

### 2.2.2.1 Carbonatation accélérée en conditions statiques

Les modes opératoires de la carbonatation accélérée en conditions statiques sont les suivants : Le matériau d'essai est placé dans un conteneur grillagé pour faciliter la circulation du dioxyde de carbone. Deux types de carbonatation peuvent alors être utilisés : la carbonatation sous pression constante et la carbonatation sous pression variable par régulation du débit d'écoulement du gaz. Ces deux types de carbonatation accélérée en condition statique sont respectivement illustrés par les figures 18 et 19.

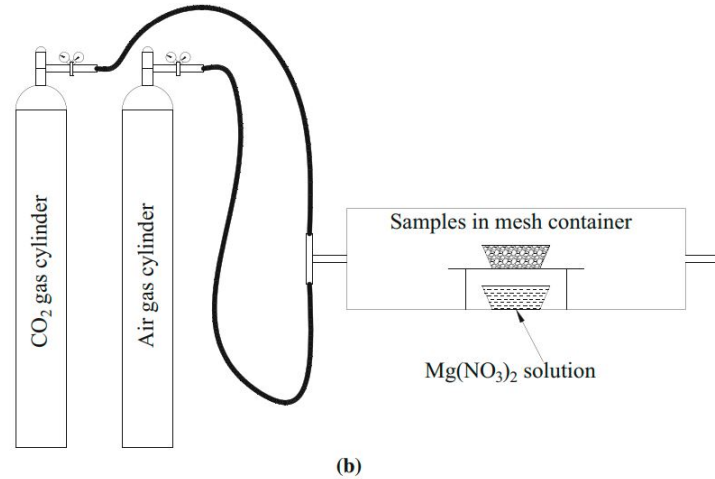
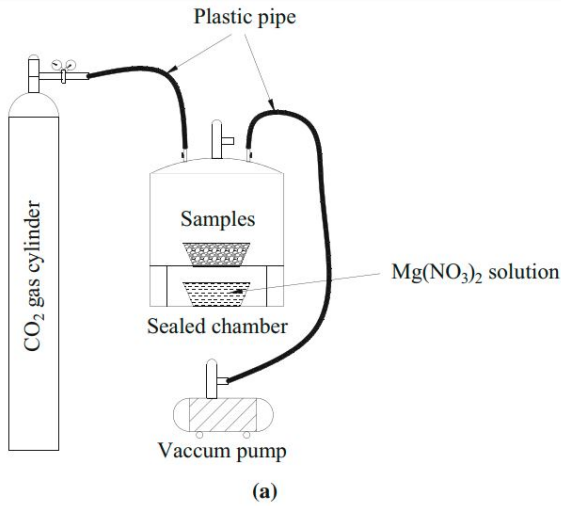


FIG. 18 : Carbonatation accélérée à chambre sous pression [16]

FIG. 19 Carbonatation dynamique [16]

### 2.2.2.2 Carbonatation accélérée en tambour tournant

Le mode opératoire de la carbonatation accélérée en tambour tournant est le suivant : Le matériau d'essai, avec une teneur en eau connue, est placé dans un récipient. Ce dernier est ensuite rempli de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) jusqu'à atteindre la pression atmosphérique, et la température ambiante est maintenue à  $22^\circ C$ . L'impact de la vitesse de rotation sur la carbonatation du matériau cimentaire peut donc être étudié.

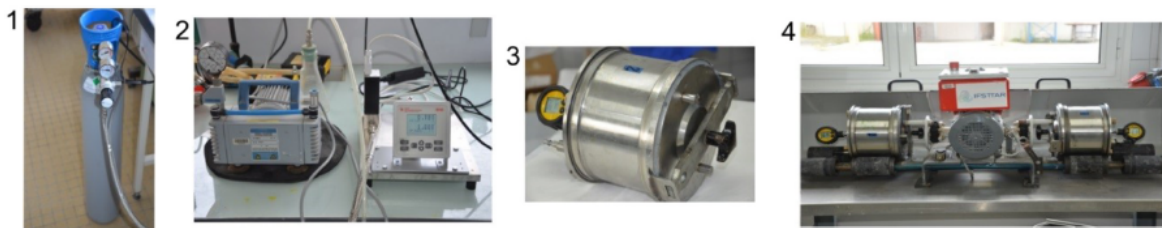


FIG. 20 : Mise en place des expériences de carbonatation roulante à l'échelle du laboratoire. (1) bouteille de gaz  $CO_2$  ; (2) pompe à vide et contrôleur automatisé de débit de  $CO_2$  ; (3) récipient hermétique (avec capteur de pression) pour placer les agrégats de béton ; (4) machine à rouler. [17]

### 2.2.3 Facteurs influençant la carbonatation

Les facteurs influençant la carbonatation sont multiples, mais on peut les distinguer en deux catégories : les facteurs liés à la nature du matériau et les facteurs liés aux conditions d'exposition.

#### 2.2.3.1 Nature du matériau

Les facteurs liés à la nature du matériau qui influencent la carbonatation des matériaux cimentaires sont les suivants:

- **La taille ou la surface spécifique des granulats:**

Xiaoliang Fang et al. [16] ont étudié l'effet de la taille des matériaux sur le taux d'absorption de  $CO_2$ . Les granulats recyclés ont été broyés en quatre tailles, avec des tailles moyennes pour les groupes d'agrégats de 15, 7.5, 3.68 et 1.18 mm. Les résultats obtenus dans cette étude, comme illustré à la figure 21, démontrent que les matériaux cimentaires comportant des particules fines (avec une surface spécifique plus grande) et une concentration plus élevée de pâte de ciment présentent une capacité de stockage de  $CO_2$  plus élevée.

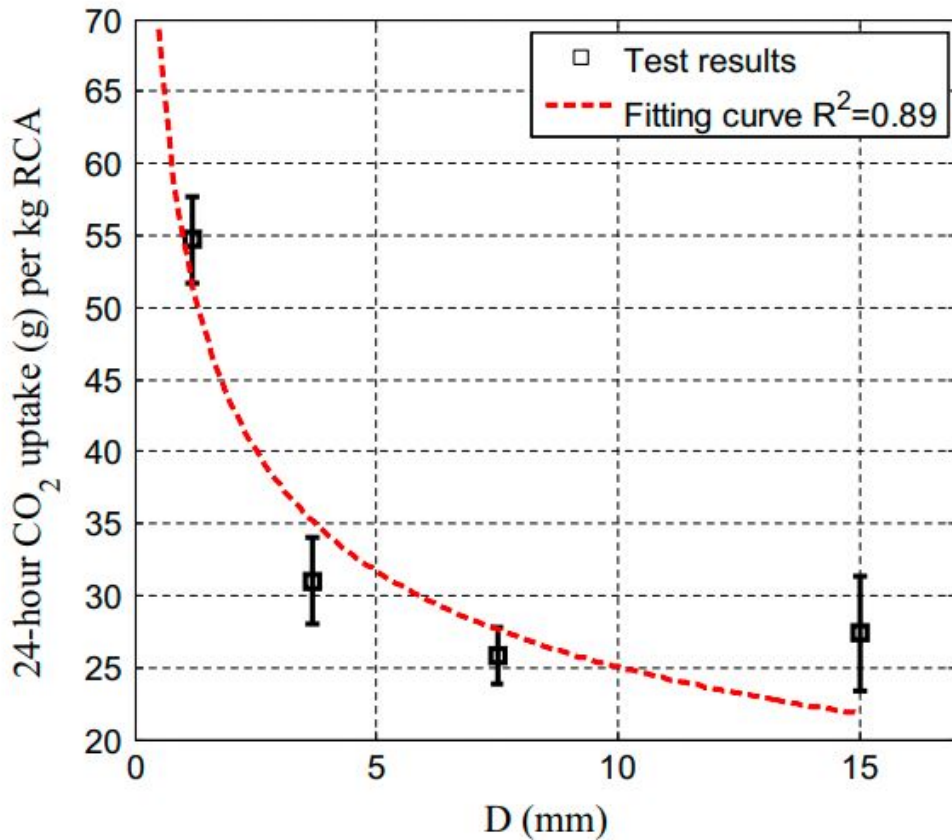


FIG. 21 : Effet de la granulométrie des granulats de béton recyclé sur le taux d'absorption de  $CO_2$  [16]

- **Le rapport eau sur ciment (E/C):**

La carbonatation d'un matériau cimentaire est étroitement liée à sa capacité de diffusion du  $CO_2$  à travers le réseau poreux de la pâte de ciment durcie. Les études menées par Baroghel Bouny et al. [15] ont démontré une augmentation de la profondeur de carbonatation des éprouvettes de mortier lorsque le dosage en eau augmente. Cette augmentation est due aux vides créés par l'excès d'eau et donc à l'augmentation de la porosité intergranulaire, ce qui favorise la diffusion du  $CO_2$  [14]. Les résultats de cette étude sont illustrés par la figure 22.

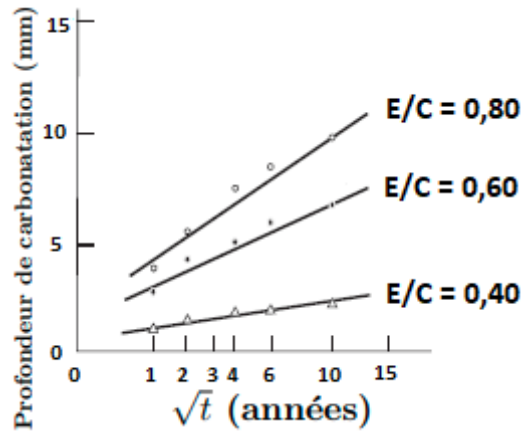


FIG. 22 Evolution de la profondeur carbonatée en fonction du rapport E/C d'après [Baroghel Bouny et al., 2008] [15] [18]

• **La teneur en eau initiale:**

Baojian Zhan et al [19] a donc étudié l'impact de la teneur en eau initiale sur le processus de carbonatation des granulats recyclés de taille 10-14 mm avec les teneurs en eau initiales suivantes: 0,08 %, 3,37 % et 5,03 %. Les reultats de l'étude sont illustrés par la figure 23. Le pourcentage de carbonatation étant plus élevé pour une teneur en eau de 3,37 %, permet de conclure qu'il existe bien une teneur en eau optimale pour une absorption maximum de  $CO_2$ . D'après Jean-Michel Torrenti [23], pour des granulats de béton recyclés, cette teneur en eau optimale est égale à 80 % du coefficient d'absorption d'eau des granulats de béton recyclés.

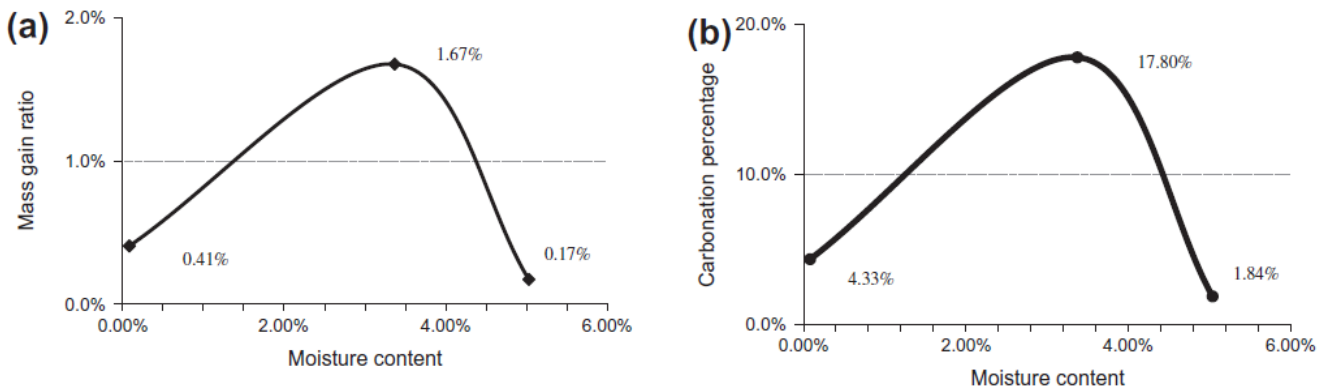


FIG. 23 : Rapport de gain de masse (a) et pourcentage de carbonatation (b) en fonction de la teneur en eau initiale. [19]



### 2.2.3.2 Conditions d'exposition

Les facteurs liés aux conditions d'exposition qui influencent la carbonatation des matériaux cimentaires sont les suivants:

- **La teneur en gaz carbonique dans l'air:**

La figure 24 permet de comprendre l'effet de la teneur en gaz carbonique dans l'air sur la carbonatation des granulats de béton recyclés. Elle présente les résultats d'une étude d'absorption de  $CO_2$  pendant 24 heures, sous trois valeurs de teneur en  $CO_2$  dans l'air : 0.03%, 10% et 100%. Le taux de carbonatation est donc plus élevé pour des concentrations de  $CO_2$  élevées.

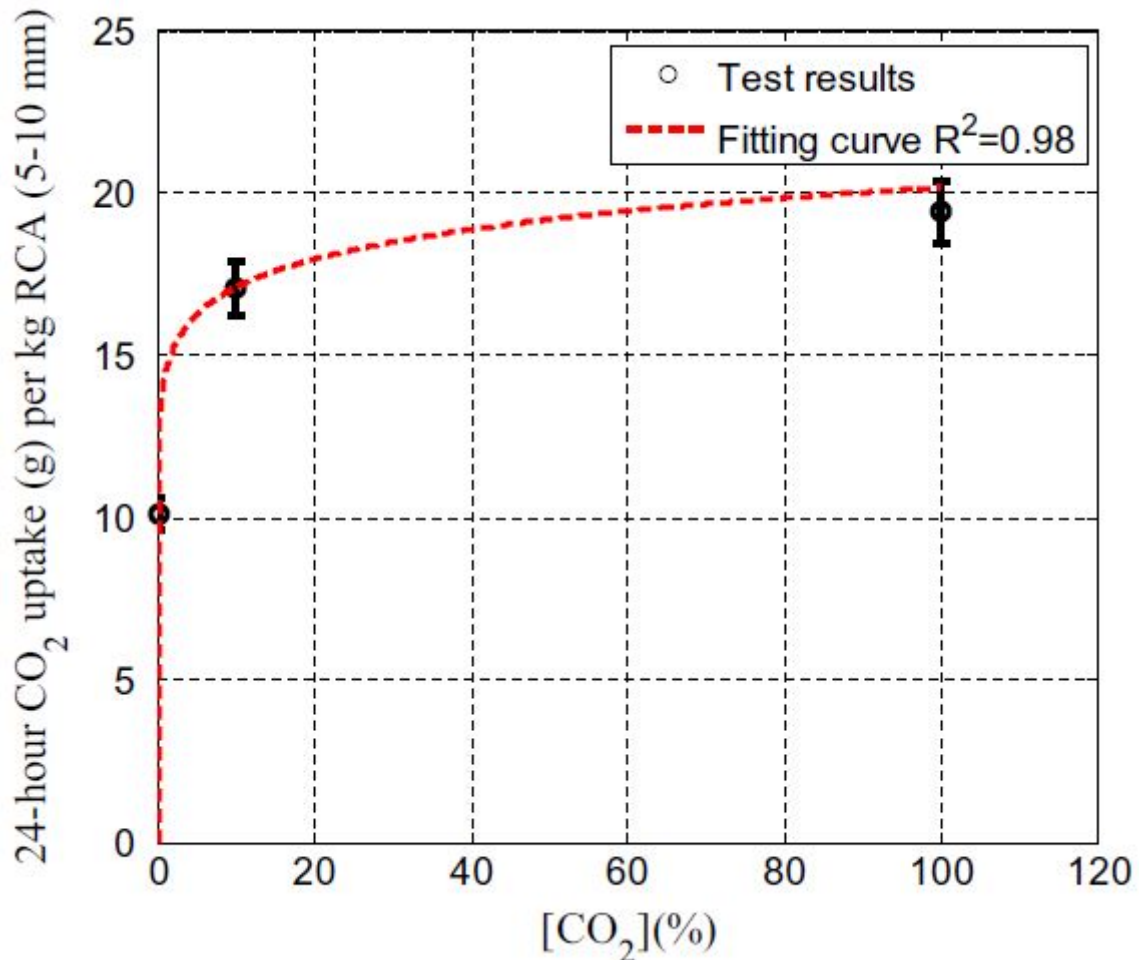


FIG. 24 : Relation entre  $CO_2$  et taux de carbonatation [16]

- **L'humidité relative de l'air:**

Plusieurs études antérieures ont démontré que l'humidité relative affecte le taux d'absorption du  $CO_2$  par les matériaux cimentaires. Une humidité relative trop élevée diminue la diffusion du  $CO_2$  dans les pores, tandis qu'une humidité relative trop faible diminue la dissolution du  $CO_2$  dans l'eau. Comme le montre la figure 25, l'humidité relative optimale semble être comprise entre 40 % et 70 %. Ces courbes sont issues des résultats des recherches menées par Abe [20], J. John et al.[21] et Mark G. Richardson [22].

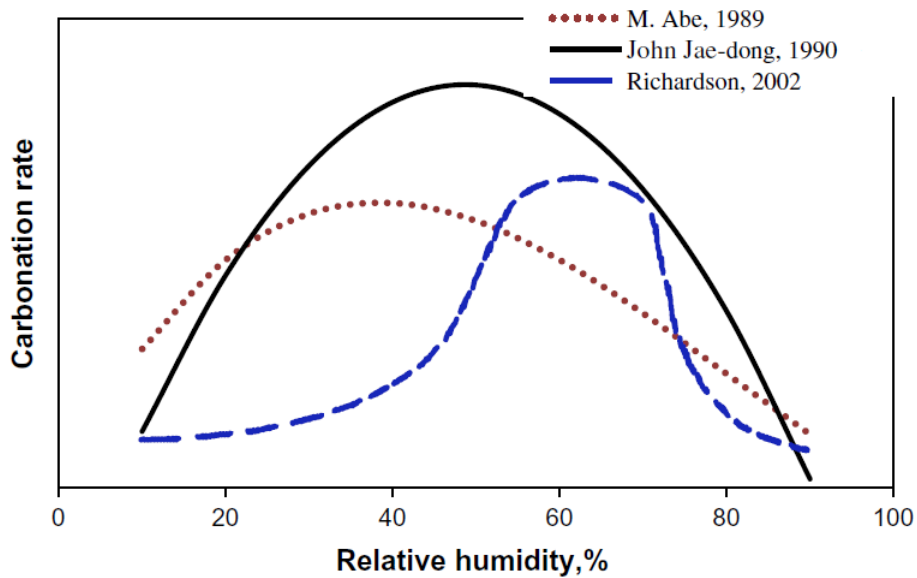


FIG. 25 Effet de l'humidité relative sur l'absorption de  $CO_2$  des granulats de béton recyclé [19] , [20] , [21], [22].

• **La température:**

La figure 26 présente les résultats des essais de carbonatation après une durée de 24 heures, réalisés sur des granulats de taille 1-4 mm obtenus par recyclage d'un Béton Prêt à l'Emploi (BPE) et des granulats de taille 12-20 mm obtenus par recyclage du béton de laboratoire (GGR OC). Il en ressort une augmentation de l'absorption du  $CO_2$  due à la thermo-activation du processus de carbonatation [23]. L'augmentation de la température contribue au séchage des pores, améliorant ainsi la diffusion du  $CO_2$  dans la matrice cimentaire. Cependant, elle peut également diminuer la solubilité du  $CO_2$  et des hydrates. Il existe donc une température optimale pour le processus de carbonatation [14].

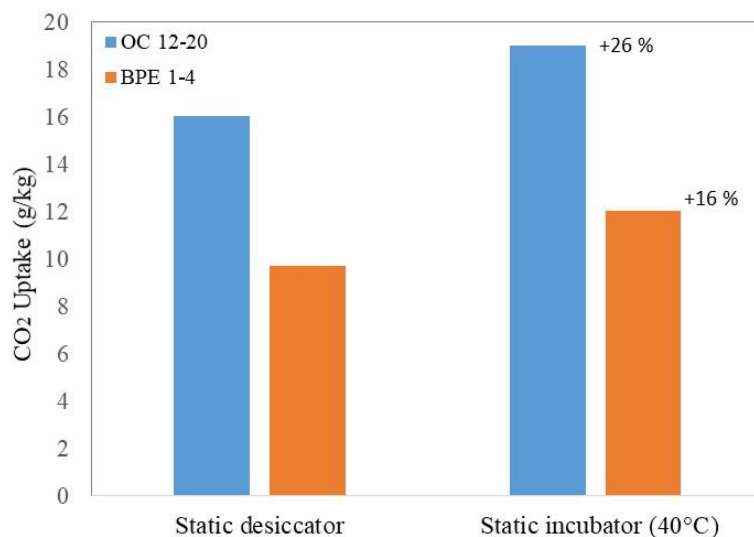


FIG. 26 :  $CO_2$  stocké en 24h, pour les GBR OC 12-20 et BPE 1-4, à 20°C (dessiccateur) et 40°C (incubateur) avec une teneur en eau initiale de 2.8%.. [23]

- **La durée de cure:**

L'effet de la durée de cure sur la carbonatation accélérée a fait l'objet de nombreuses études. Xiaoliang Fang et al. [16] ont étudié l'évolution de la carbonatation en fonction du temps pour des granulats recyclés d'une taille de 5-10 mm, dans une humidité relative de l'air de 50%, sous une pression de 0,1 bar et une teneur en  $CO_2$  de 100%. Il en ressort que la quantité de  $CO_2$  absorbée croît rapidement pendant les deux premières heures de cure. La vitesse du processus de carbonatation semble donc être ralentie par la formation de carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) qui colmate partiellement les pores des granulats recyclés (Figure 27).

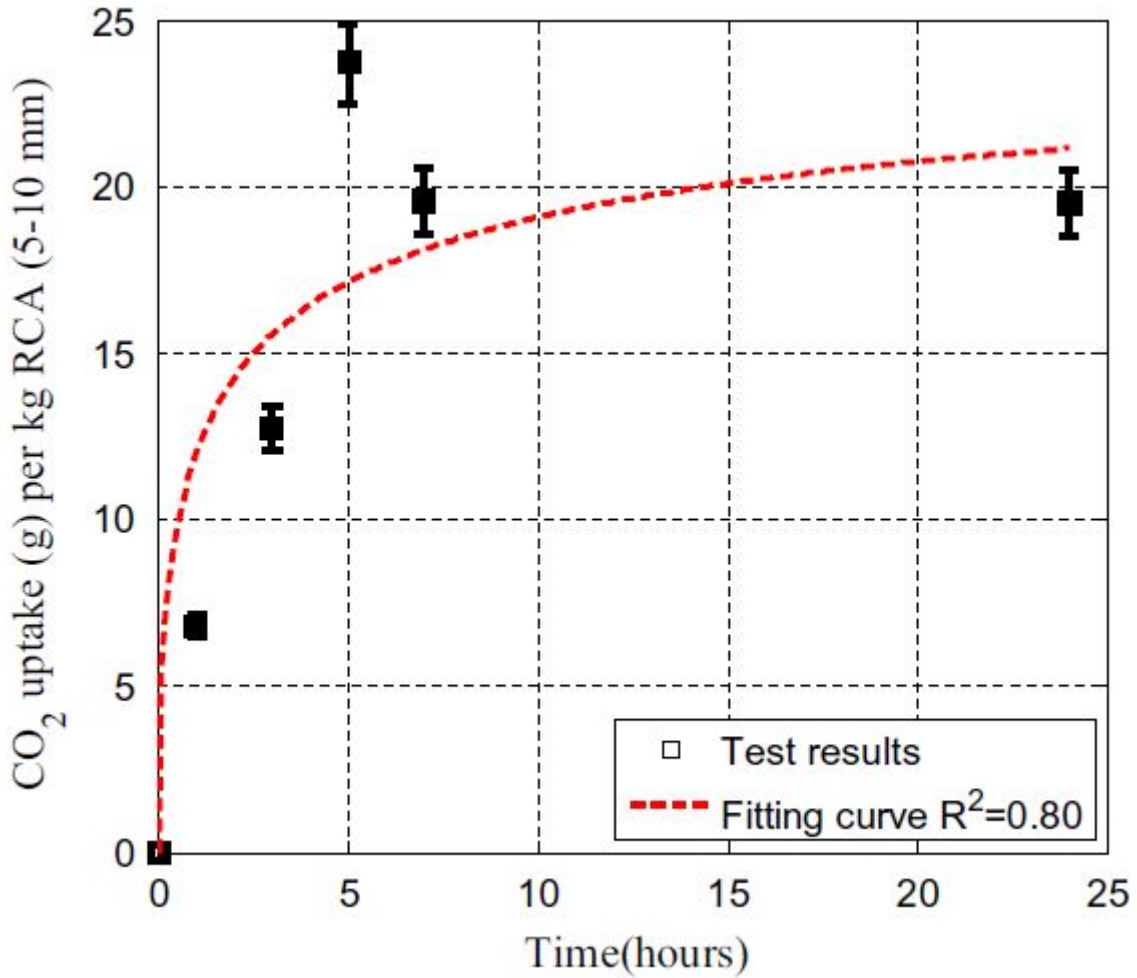


FIG. 27 : Absorption de  $CO_2$  en fonction de la durée de carbonatation. [16]

- **Le débit de l'air et la vitesse de laminage:**

Comme le montre la figure 28, le taux d'absorption de  $CO_2$  augmente en fonction du débit de l'air lors d'une carbonatation dynamique. De même, lors d'une carbonatation accélérée en tambour tournant, le taux d'absorption de  $CO_2$  augmente en fonction de la vitesse de rotation (voir Figure 29).

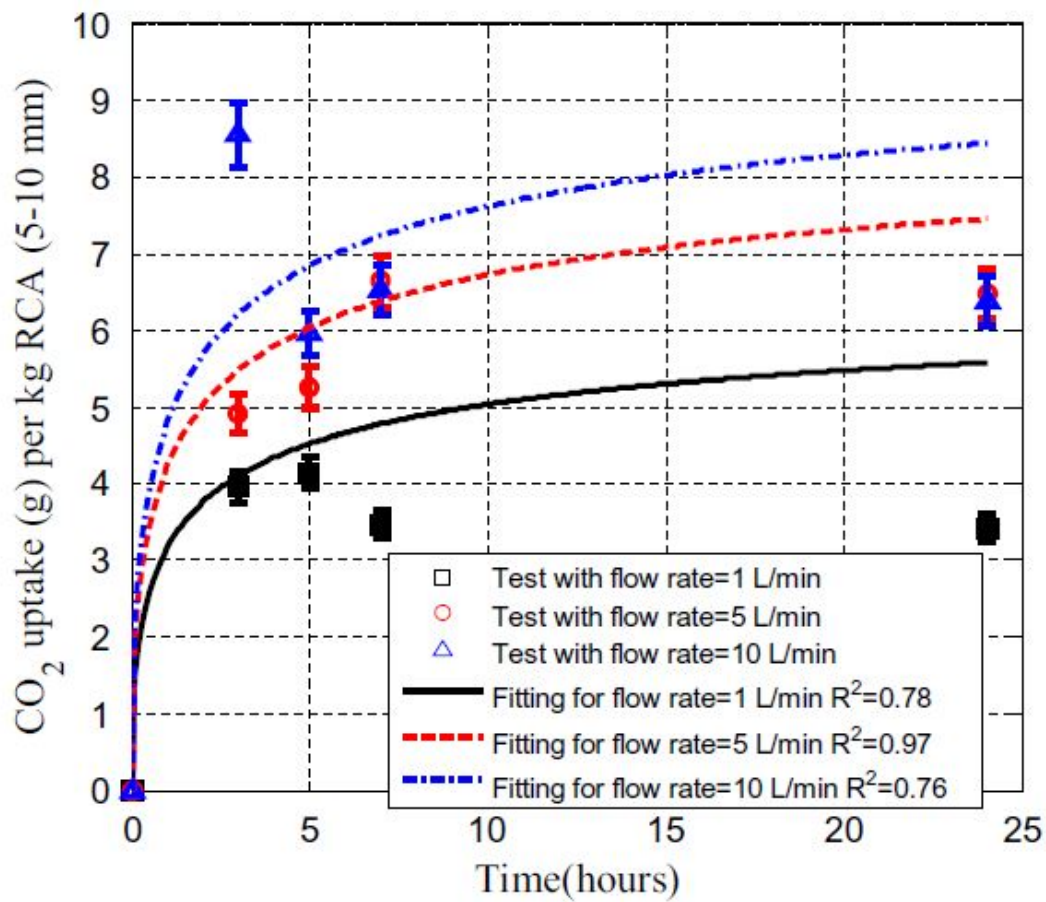


FIG. 28 : Effet du débit [16]

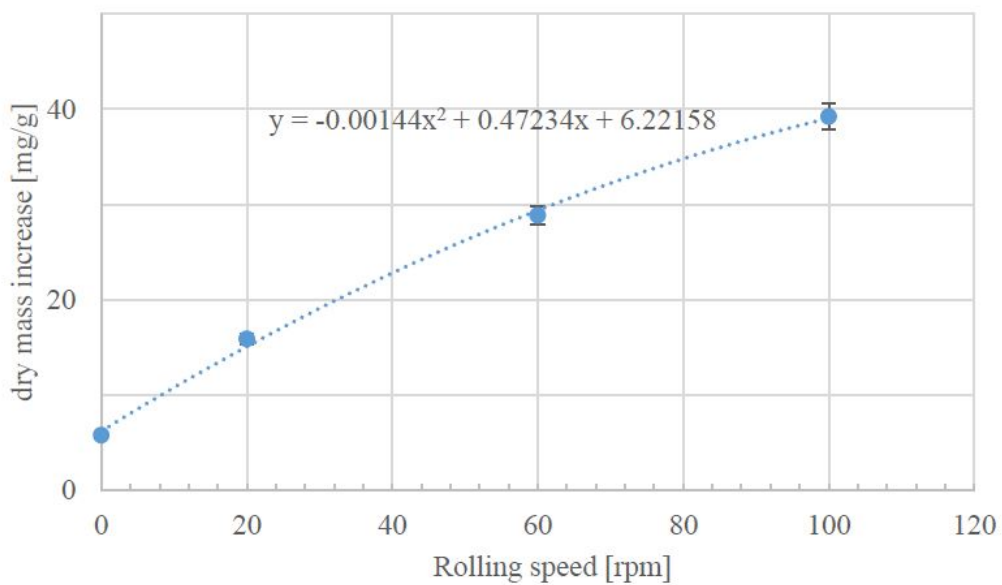


FIG. 29 Effet de la vitesse de laminage sur la séquestration du CO<sub>2</sub> à 3 jours de durée (Teneur en eau variant de 7,5 à 8,2%). [17]

## 2.2.4 Effets de la carbonatation sur les matériaux cimentaires

Plusieurs études antérieures menées sur la carbonatation des matériaux cimentaires montrent qu'elle modifie leur microstructure, augmente leur résistance mécanique, modifie leur teneur en eau et induit un retrait. Ces effets de la carbonatation seront abordés dans cette partie.

### 2.2.4.1 Modification de la composition mineralogique

La réaction de carbonatation d'un matériau cimentaire entraîne la dégradation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Cependant, elle produit également du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) qui peut se présenter sous trois formes : la calcite, l'aragonite et la vaterite.

### 2.2.4.2 Perte d'alcalinité

La carbonatation d'un matériau cimentaire entraîne une baisse de son pH (potentiel hydrogène). Cette réaction est néfaste pour les ouvrages en béton armé car le béton devient incapable de protéger les armatures contre la corrosion.

### 2.2.4.3 Diminution de la porosité

Comme le montre la figure 30, un milieu poreux est constitué d'une phase solide et de vides qui peuvent être occupés par un liquide ou un gaz. La porosité est le rapport entre le volume des pores et le volume apparent [62].

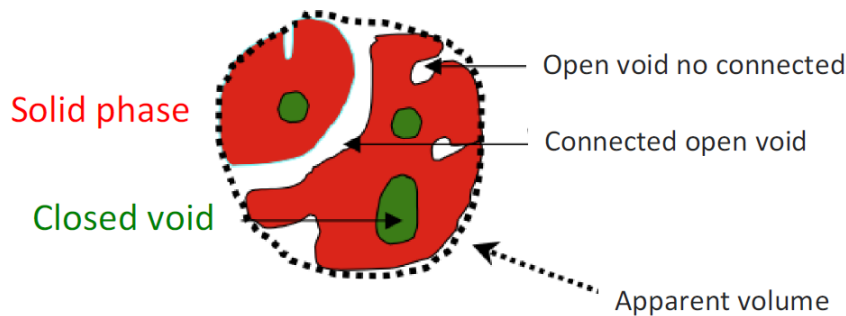


FIG. 30 Schématisation du réseau poreux [24]

Le réseau poreux d'une pâte de ciment est constitué de pores capillaires (espace vide entre les granulats composant le matériau) ainsi que des pores des hydrates C-S-H. Lorsque cette pâte est mélangée à des granulats pour former du mortier ou du béton, l'interface entre les granulats et le liant constitue également une zone poreuse. Cette interface est indiquée par l'auréole de transition sur la figure 31.

La carbonatation d'un matériau cimentaire provoque une augmentation de son volume solide et une diminution du volume des vides. Cela est dû au fait que, comme le montre le tableau 11, les produits de la réaction ont un volume molaire plus élevé que les réactifs.

Cristaux	$Ca(OH)_2$ portlandite	$CaCO_3$		
		Calcite	Vatérite	Aragonite
Volume molaire ( $cm^3.mol^{-1}$ )	33	35	38	34

TAB. 11 Volume molaire du réactif et du produit de la carbonatation [13] [39]

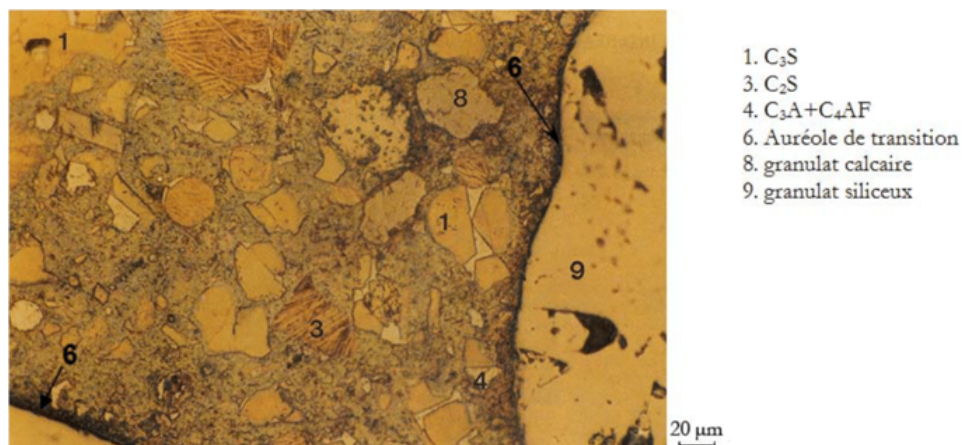


FIG. 31 Microstructure d'un béton ordinaire mettant en évidence l'ITZ obtenue par microscopie [25]

Walid Jaafar [40] a étudié l'influence de la carbonatation sur la porosité des bétons. La composition de chaque béton est reprise dans le tableau 12. Trois éprouvettes de chaque béton sont conservées dans une enceinte de carbonatation et trois autres éprouvettes sont conservées dans une salle climatisée. Les résultats de la porosité accessible à l'eau et par gammadensimétrie sont donnés dans le tableau 13. Ils confirment la diminution de la porosité après carbonatation. On constate également que l'incorporation de cendres volantes dans le liant permet de réduire la porosité du béton et donc d'améliorer la durabilité et la maniabilité de celui-ci. En effet, le mortier M30CV est moins poreux que le mortier M50.

Caractéristiques	M25	B35	M30CV	M50
Sable Seine 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	446	445,1	436	400
Sable Boulonnais 0/5 (kg/m <sup>3</sup> )	453	452,1	443	406
Gravillon Boulonnais 4/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	388	385,6	421	428
Gravillon Boulonnais 12,5/20 (kg/m <sup>3</sup> )	619	615,2	565	509
Ciment CPA-CEM I 52.5 PM ES CP2 (kg/m <sup>3</sup> )	230	300	223	410
Cendres Volantes EDF (%)	–	–	2,1	–
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	193	187,4	166	197
Super plastifiant Résine GT (kg/m <sup>3</sup> )	–	–	1,1	–
Retardateur chrytard (kg/m <sup>3</sup> )	–	–	1,4	–
E/C	0,84	0,62	0,74	0,48
E/L	–	–	0,61	–

TAB. 12 Composition des bétons [40].

Bétons	M25-NC	M25-C	B35-NC	B35-C	M30CV-NC	M30CV-C	M50-NC	M50-C
$\Phi$ (eau) %	15,07	13,69	14,68	11,09	13,24	10,52	13,58	9,72
$\Phi$ ( $\gamma$ ) %	15,84	14,05	15,39	11,18	14,03	10,78	13,94	9,12

TAB. 13 Influence de la carbonatation sur la porosité accessible à l'eau [40].

#### 2.2.4.4 Augmentation de la teneur en eau

Comme le montre l'équation 1, la réaction de carbonatation produit de l'eau libre qui s'accumule dans les pores du matériau cimentaire. Cette eau va augmenter la teneur en eau du matériau, ce qui est favorable pour la dissolution du  $CO_2$ , mais défavorable pour sa diffusion à travers les pores de la matrice cimentaire.

Nicolas Hyver [27] a étudié l'effet de la carbonatation sur la teneur en eau d'un mortier à base de ciment Portland, soumis à différents degrés d'humidité relative. Les résultats de cette étude, présentés à la figure 32, montrent une augmentation de la teneur en eau des mortiers après la carbonatation lorsque l'humidité relative est inférieure à 50%, et une diminution de la teneur en eau après la carbonatation lorsque l'humidité relative est supérieure à 50%.

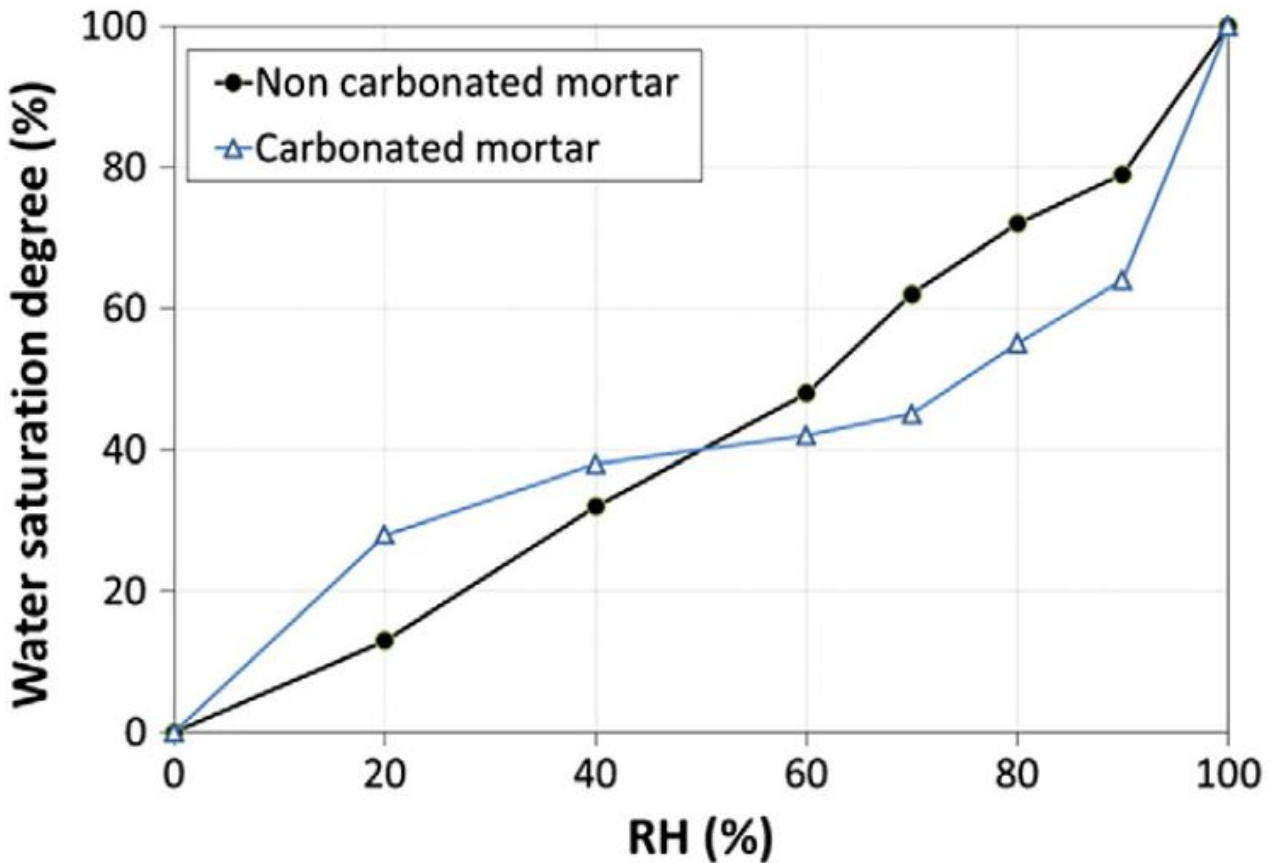


FIG. 32 Isothermes de désorption de la vapeur d'eau des mortiers à base de ciment Portland avant et après carbonatation [26] [27].

#### 2.2.4.5 Retrait de carbonatation

Plusieurs constats expérimentaux mettent en évidence le retrait de la carbonatation, parmi lesquels l'étude sur l'évolution de la microstructure des granulats recyclés pendant la carbonatation accélérée menée par Farah KADDAH et al. [28]. Les résultats présentés à la figure 33 montrent l'évolution temporelle du retrait de la carbonatation d'un mortier curé dans une chambre climatisée (soumis à la carbonatation naturelle) et d'un mortier curé dans une chambre de carbonatation.

Plusieurs auteurs ont émis des hypothèses sur le retrait de la carbonatation. Selon Terval Clifford Powers [63], « le retrait de la carbonatation peut être attribué à la dissolution de l'hydroxyde de calcium dans les zones comprimées et au dépôt du carbonate de calcium dans les zones non comprimées ». Selon Charles M. Hunt et al. [64], « le retrait de la carbonatation est causé non seulement par la carbonatation de la portlandite, mais aussi par la diminution de l'eau chimiquement liée lors de la carbonatation des C-S-H ».

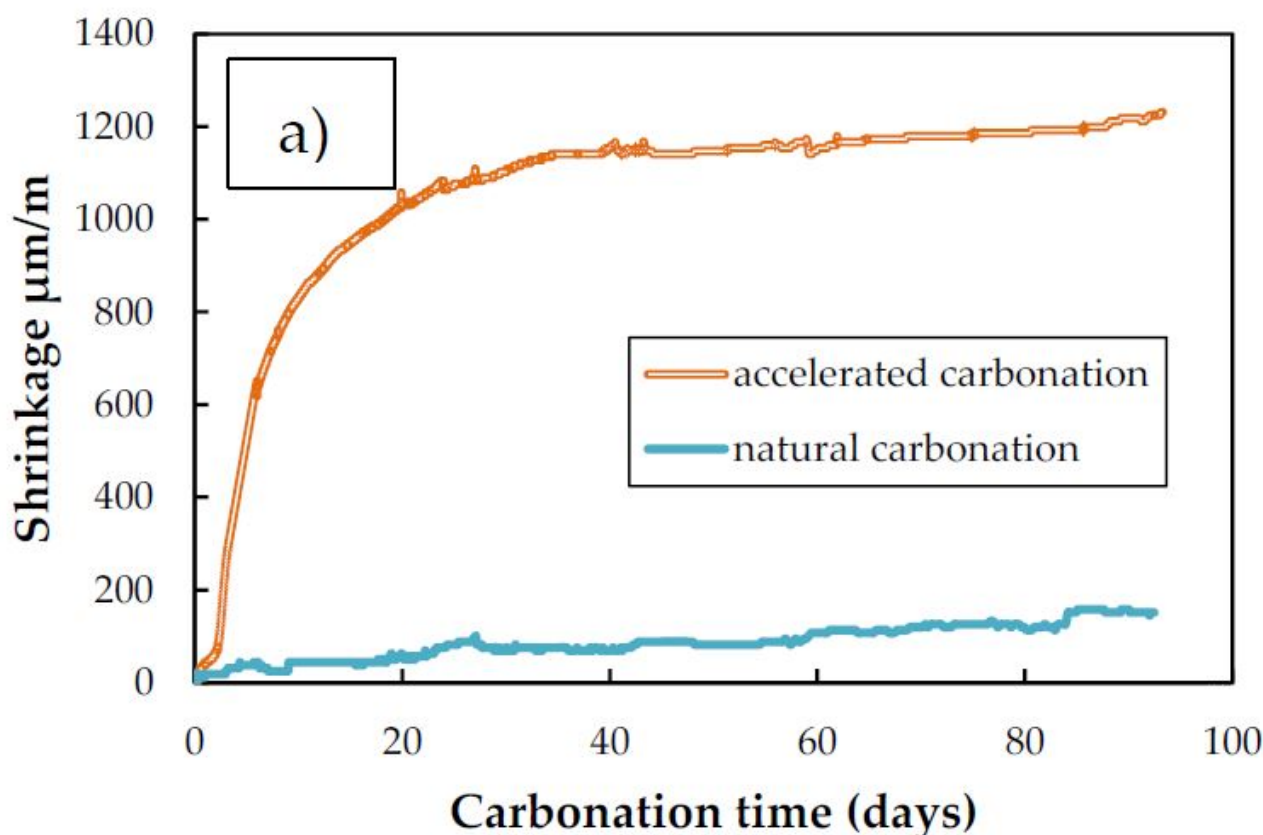


FIG. 33 Evolution temporelle du retrait du mortier pendant la carbonatation [28].

## 2.3 Fibres-ciment

### 2.3.1 Histoire du Fibro-ciment

En 1900, après de nombreuses années de recherche sur la production d'un matériau de couverture moins cher que l'ardoise et plus durable que la tôle, l'entrepreneur autrichien Ludwig Hatschek fait breveter le processus de fabrication du fibro-ciment. Le brevet se nomme : «Production de plaques de pierre artificielle avec des liants hydrauliques». En 1903, il nomme cette pierre artificielle sous le nom commercial ETERNIT. Elle est fabriquée à partir de 10 % d'amiante et 90 % de ciment [65].

Ludwig Hatschek exige que les personnes qui achètent son brevet par licence nomment leurs entreprises ETERNIT. Parmi les acquéreurs de ce brevet par licence, on peut citer : la famille Emsens en Belgique (en 1905), la famille Cuvelie en France (1922) et la famille Schmidheiny en Suisse (1903) [66].

L'industrie du fibrociment a connu un essor important dans les années 1950 et 1960. En 1964, lors d'un congrès de médecine à New York, un ouvrage a été publié sur les problèmes sanitaires liés à l'utilisation de l'amiante. Cependant, ces dénonciations ont été l'objet de conflits entre les professionnels de la santé et les industriels qui produisaient les matériaux contenant de l'amiante. Par conséquent, elles étaient peu connues du grand public jusqu'à ce qu'un cas de contamination à l'amiante survienne sur le site universitaire de Jussieu (France) et soit largement médiatisé. Cela a conduit à l'interdiction définitive de la production et de l'utilisation du fibrociment et des produits à base d'amiante dans les États européens à différentes dates, allant de 1983 (Islande), 1998 (Belgique) jusqu'à 2005 (Grèce et Portugal) [66].

Aujourd'hui, le matériau alternatif au fibrociment est le fibres-ciment sans amiante. Autrefois connu sous le nom Eternit, il fait maintenant partie de la gamme Cedral. Les matériaux de construction de la gamme Cedral sont principalement utilisés comme solution de revêtement pour les façades, les toitures et les terrasses.



### 2.3.2 Methode de production

Les matériaux en fibres-ciment étudiés dans le cadre de ce projet sont produits selon la méthode brevetée par Hatschek. Comme le montre la figure 34, les différentes étapes de production sont les suivantes :

- Stockage des composants dans les silos (ciment, eau, fibres d'armature et fibres opératoires) ;
- Mélange automatisé des différents composants pour garantir la régularité de la composition ;
- Mise en feuille à l'aide de la machine Hatschek. Cette machine règle l'épaisseur de la feuille et répartit les fibres dans deux directions ;
- Le pressage dans une presse à pile ou à feuille unique. Cette opération permet d'améliorer les propriétés mécaniques et la résistance au gel du matériau ;
- Le durcissement :. Cette opération peut être effectuée à l'air libre pour les produits de toitures ou dans un autoclave pour les produits de façades ;
- Découpage : Plusieurs équipements de découpe peuvent être utilisés, notamment la presse à découper, la guillotine et la découpeuse à jet d'eau ;
- Le stockage et l'entreposage.

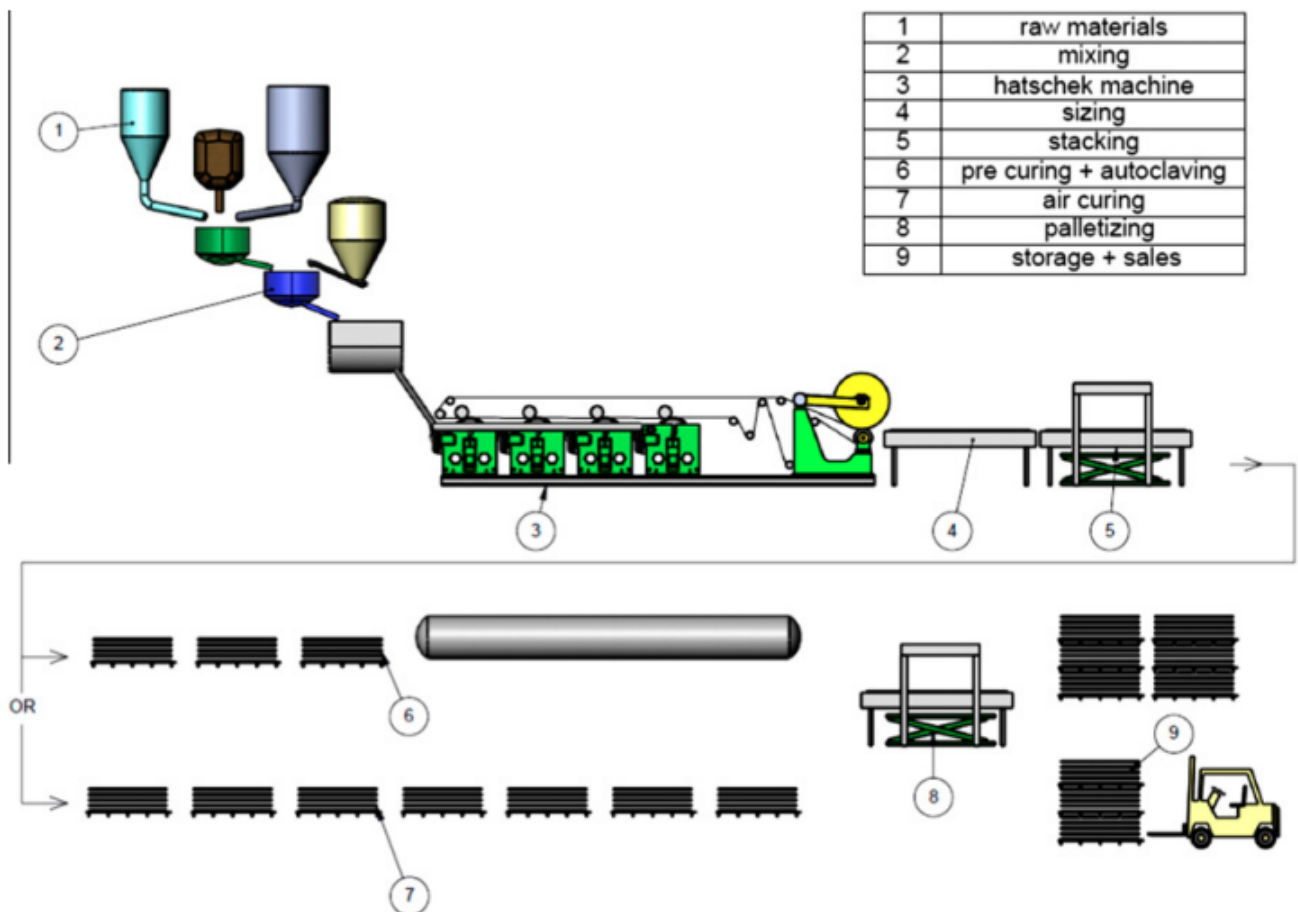


FIG. 34 Schéma de production des fibres-ciment [29].

### 2.3.3 Composition

Comme le montre la figure 35, les composants principaux des matériaux en fibres-ciment sont les suivants :

- Le ciment Portland. Il joue le rôle de liant lorsqu'il est mélangé avec de l'eau ;
- Le calcaire: Il est apprécié pour son isolation thermique et permet également de réduire la quantité de ciment utilisée, ce qui entraîne une diminution des coûts de production ;
- Les cendres volantes : Elles diminuent la porosité et, par ricochet, améliorent la durabilité ;
- Les fibres d'armature (cellulose, verre, amiante, etc..) . Comme le montre le tableau 14, elles ont une résistance à la traction et un module d'élasticité très élevés ;
- Les additions minérales telles que les cendres volantes et les fumées de silice sont utilisées pour améliorer la consistance des mélanges ;
- L'eau. Elle est utilisée pour hydrater le ciment et fluidifier le mélange.

Fibres	Diamètre $\mu\text{m}$	Longueur (mm)	Densité	Résistance en traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)	Prix par kg (FF)
Cellulose	14 - 15	1 à 3	1,50	150 - 500	20 - 40	8 - 12	3
Amiante	0,20 - 20	20 - 80	2,5 - 3,4	300	160	2 - 3	5 - 6
Acier	5 - 500	20 - 80	7,8	1000 - 3000	200	3 - 4	8
Verre	5 - 20	40 - 70	2,6	150 - 300	80	2 - 2,5	20

TAB. 14 Caractéristiques mécaniques de quelques fibres d'armature [41].

Le tableau 15 présente les résultats des recherches menées par Schoon et al. [128] sur la revalorisation des fibres-ciment dans la production du clinker. Ces chercheurs ont utilisé la spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) pour déterminer la composition chimique moyenne de quelques produits en fibres-ciment et du clinker Portland produit par la clinkererie de CBR Antoing . On constate que les fibres-ciment et le clinker ont plusieurs composés en commun. La substitution du clinker par les déchets de fines de fibres-ciment pourrait donc faire l'objet d'une étude pour la production d'un ciment plus écologique.

Composé chimique	Toles ondulées en fibres-ciment	Ardoise en fibres-ciment pour toiture	Panneau autoclavé à haute densité pour façades	Panneau autoclavé à moyenne densité pour façades	Clinker de CBR Antoing
CaO	51.24	52.14	28.55	25.01	65.90
SiO <sub>2</sub>	18.85	18.42	44.2	51.06	21.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.80	3.55	5.95	4.95	4.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.52	3.15	2.37	1.74	2.61
K <sub>2</sub> O	0.37	0.28	0.22	0.15	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.1	7 0.06	0.12	0.21
SO <sub>3</sub>	1.87	1.35	0.69	0.61	1.21
MgO	1.38	1.57	0.59	0.71	1.70
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.43	0.34	0.38	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.44	0.31	0.16	0.18	-
Cl	0.03	0.01	0.01	0.01	0.068
LOI 975°C (O <sub>2</sub> )	19.65	18.11	16.13	14.83	-
C <sub>total</sub>	3.94	4.10	3.66	3.44	-
S <sub>total</sub>	0.86	0.66	0.33	0.31	-
CaO free	-	-	-	-	1.46

TAB. 15 Analyse chimique moyenne des matériaux fibrociment et du clinker de CBR Antoing [29].

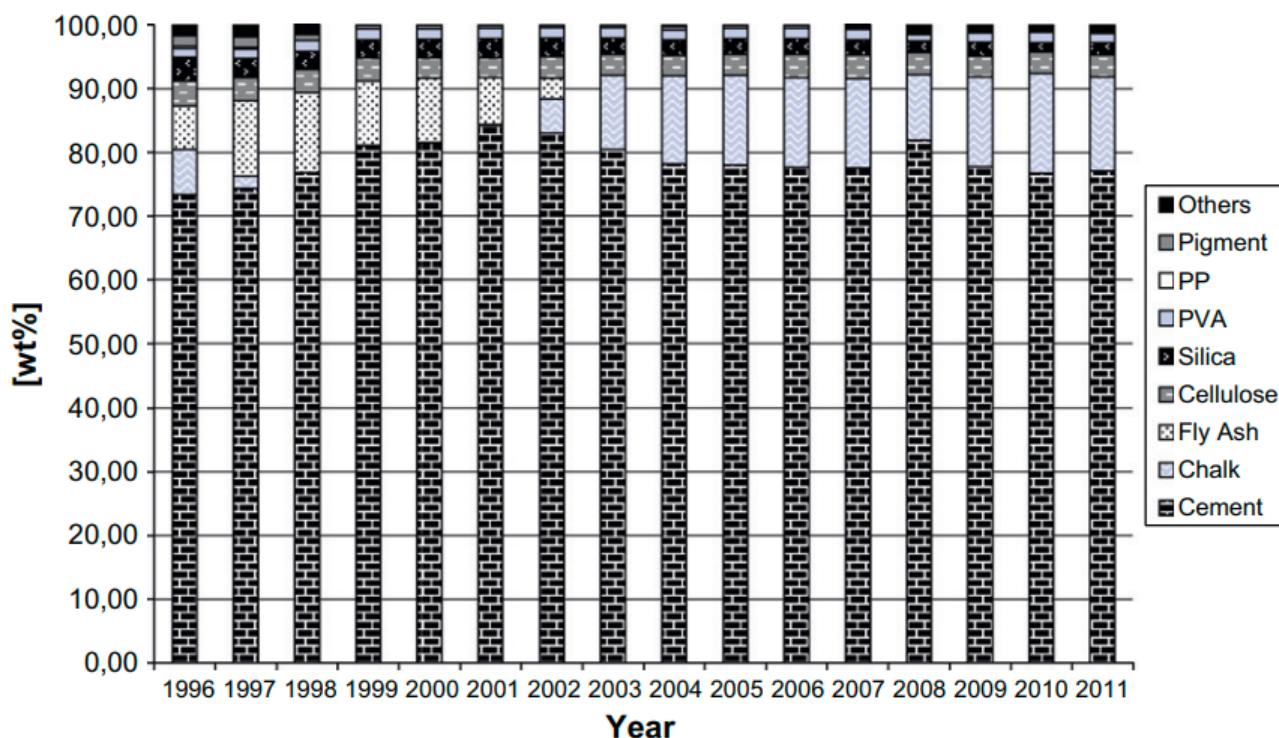


FIG. 35 Évolution de la composition des ardoises de toiture en fibres-ciment durcies à l'air produites dans l'entreprise Eternit Kapelle o/d Bos. [29].

### 2.3.4 Caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques

Les matériaux de construction en fibres-ciment ont en commun le processus de production breveté par Ludwig Hatschek. Cependant, leurs caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques varient non seulement d'un producteur à l'autre, mais aussi en fonction de leur utilisation finale. Le tableau 16 présente les caractéristiques des éléments de bardage en fibres-ciment produits par le groupe Etex. Ce groupe a trois marques disponibles en Belgique, à savoir : Eternit, Equitone et Cedral.

	Conditions de l'essai	Norme	Valeur	Unité
Epaisseur			9	mm
Minimum densité	Sec	EN 12467	1230	$\text{kg}/\text{m}^3$
Contrainte de flexion caractéristique	Ambiant, $\perp$	EN 12467	23,0	$\text{N}/\text{mm}^2$
	Ambiant, $\parallel$	EN 12467	17,0	$\text{N}/\text{mm}^2$
Module d'élasticité	Ambiant, $\perp$	EN 12467	9500	$\text{N}/\text{mm}^2$
	Ambiant, $\parallel$	EN 12467	7500	$\text{N}/\text{mm}^2$
Comportement hydrique sec à saturation	0-100 %		2,1	mm/m
Porosité	0-100 %		38	%
Coefficient de dilatation thermique ( $\alpha$ )			< 0,01	mm/mK
Coefficient de conductibilité thermique ( $\lambda$ )			0,25	W/mK

TAB. 16 Caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques de l'ardoise pour façade Cedral Board [42] [43].

### 2.3.5 Effets des fibres sur les propriétés des mortiers

L'ajout de fibres synthétiques dans la composition des mortiers a des effets positifs sur leur comportement. Parmi ces effets, on peut citer l'amélioration des propriétés mécaniques et la diminution du retrait. Ces deux effets seront abordés dans cette partie.

#### 2.3.5.1 Amélioration des propriétés mécaniques

Plusieurs études antérieures ont montré que l'ajout de fibres dans la composition des mortiers et des bétons améliore les propriétés mécaniques de ces derniers et modifie leurs propriétés physiques, notamment leur masse volumique. Abdellah et al. [130] ont étudié l'effet de l'ajout de 1% de fibres métalliques sur les propriétés des mortiers. Trois dispositions de fibres ont été prises en compte, ce qui permet d'effectuer les mélanges suivants :

- Mortier témoin sans fibres métalliques (temoins); ;
- Mortier avec 1 % de fibres métalliques sur tout le volume de l'éprouvette (1%VT);
- Mortier avec 1 % de fibres métalliques sur la partie supérieure de l'éprouvette (1%sup);
- Mortier avec 1 % de fibres métalliques sur la partie inférieure de l'éprouvette (1%inf).

Les essais effectués sur des mortiers révèlent les informations suivantes :

1. La masse volumique des mortiers diminue au fil du temps en raison de l'évaporation de l'eau libre et de la poursuite de la réaction exothermique d'hydratation du ciment.

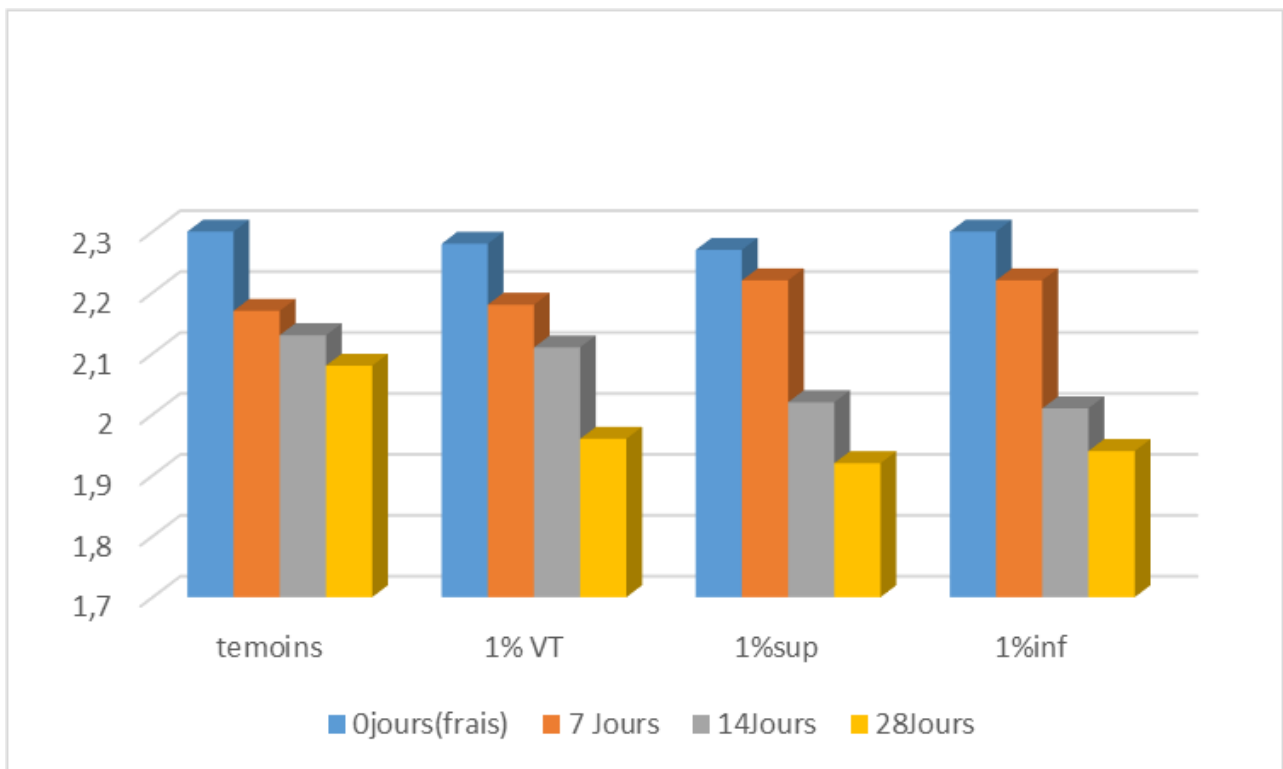


FIG. 36 Variation de la masse volumique en fonction de temps[30].

2. Tous les mortiers fibrés présentent une meilleure résistance à la traction par flexion par rapport aux mortiers témoins, en particulier lorsque les fibres sont disposées dans la partie inférieure. Cette amélioration de la résistance est probablement due au fait que les fibres métalliques s'opposent à la microfissuration de la partie inférieure des éprouvettes (voir Figure 37) ;

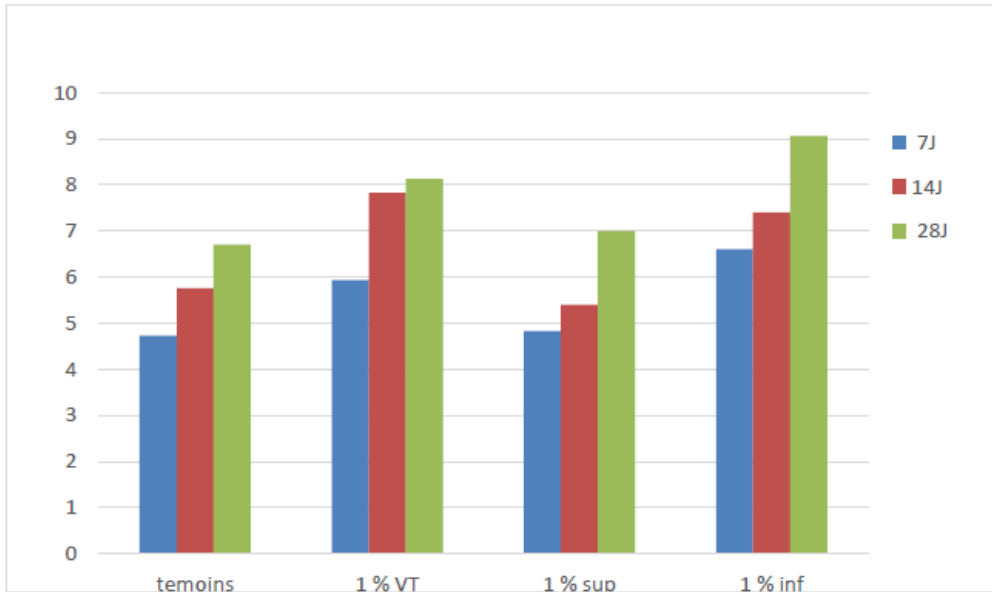


FIG. 37 La variation de la résistance à la flexion en fonction du temps [30].

3. La présence de fibres métalliques améliore la résistance à la compression des mortiers fibrés, notamment lorsque les fibres sont réparties sur tout le volume de l'éprouvette (voir Figure 38).

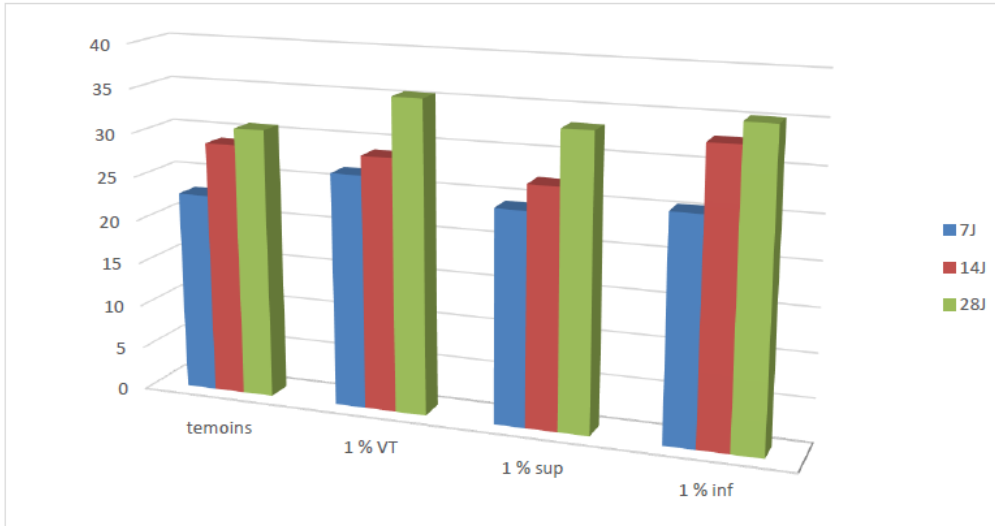


FIG. 38 La variation de la résistance à la compression en fonction du temps [30].

### 2.3.5.2 Diminution du retrait

Ferrara et al. [131] ont étudié l'effet de la nanopulpe de cellulose, des microfibrilles d'Eucalyptus, des fibres naturelles de sisal et des fibres d'acier sur le retrait autogène (causé par l'hydratation du ciment) et le retrait par dessiccation (causé par l'évaporation de l'eau libre des pores) des produits à base de ciment. Les compositions minéralogiques des fibres naturelles et les compositions des mortiers étudiés sont respectivement données dans les tableaux 17 et 18.

Types de fibres	Densité (kg/dm <sup>3</sup> )	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Nanopulp	1,40	96,50	-	-
Eucalyptus	1,68	77,10	18,90	3,80
Sisal	1,04	60,5	25,70	12,10

TAB. 17 Masse volumique et composition minéralogiques des fibres naturelles [31].

Composants	Dosage (g/dm <sup>3</sup> )				
	Mortier de référence (Sans fibres)	Nanopulp	Eucalyptus	Sisal	Steel
Cement CEM I 52,5	600	600	600	600	600
Scories	500	500	500	500	500
Sable 0-2 mm	983	983	983	983	983
Water	200	187	200	200	200
Superplastifiant	33	33	33	33	33
Nanopulp	-	14	-	-	-
Eucalyptus	-	-	0,80	-	-
Sisal	-	-	-	14	-
Acier	-	-	-	-	100

TAB. 18 Masse volumique et composition minéralogiques des fibres naturelles [31].

Les résultats de cette étude, présentés dans la figure 39, permettent de faire les constats suivants pour les pourcentages de substitution étudiés :

- L'ajout de fibres métalliques réduit légèrement le retrait autogène et le retrait total des éprouvettes de mortiers ;
- L'ajout de fibres de cellulose réduit légèrement le retrait autogène mais augmente légèrement le retrait total des éprouvettes de mortiers.

En effet, on pourrait espérer qu'une combinaison de fibres de cellulose et de fibres d'acier permette de réduire le retrait autogène sans modifier le retrait total des éprouvettes de mortier.

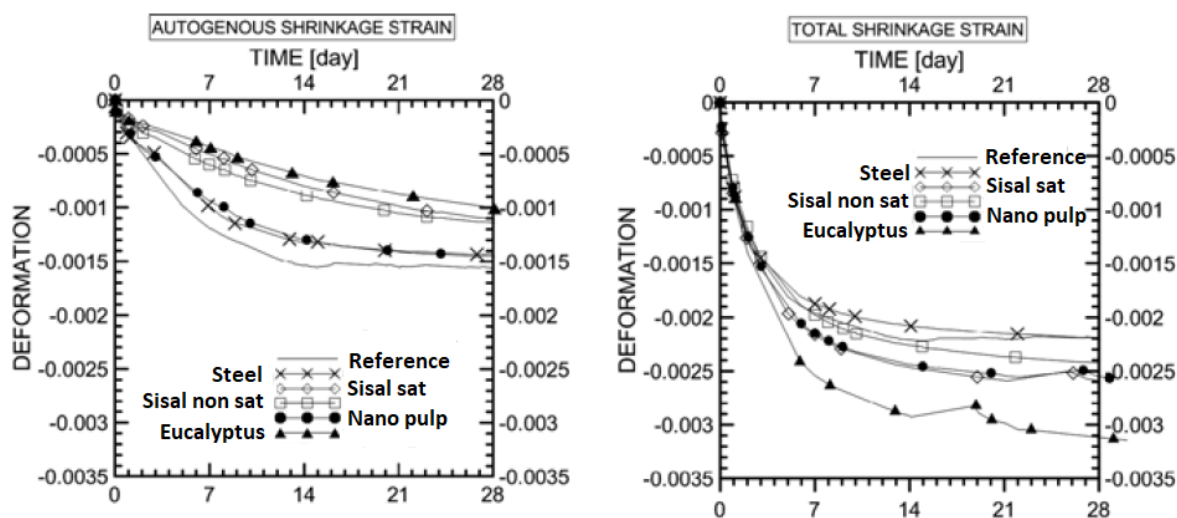


FIG. 39 Déformation de retrait pour différents renforcements de fibres naturelles et artificielles [31].

### 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Dans le chapitre précédent, l'étude bibliographique a révélé des statistiques démontrant que le secteur de la construction est l'un des secteurs les plus polluants en Belgique. Plusieurs études ont proposé des solutions pour remédier à cette situation, notamment en revalorisant, recyclant ou réutilisant les déchets de construction. Ce mémoire de fin d'études contribuera donc en étudiant la revalorisation des déchets de fines de fibres-ciment en tant que substitut partiel du ciment. Pour ce faire, cette section se concentrera sur la présentation des matériaux, des équipements et des essais de laboratoire utilisés pour mener à bien ce projet.

#### 3.1 Matériaux utilisés

##### 3.1.1 Eau de gachage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes de mortier et des pâtes de ciment ou de filler est l'eau du robinet du laboratoire du département ArGENCo de l'Université de Liège.

##### 3.1.2 Ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est le ciment Portland CEM I 52,5 N produit par la cimenterie CBR en Belgique. Il est composé de 95-100 % en masse de clinker Portland et de 0-5 % en masse de constituants secondaires. Ses caractéristiques physiques et sa composition chimique sont reprises dans les tableaux 19 et 20. Ces informations ont été fournies par le cimentier. La classe de résistance du ciment est de 52,5 MPa. Cette valeur correspond à « la résistance minimale à la compression après 28 jours d'un prisme de ciment normalisé » [67].

	Valeurs moyennes	Unité
Demande en eau	30,0	%
Début de prise	190	min
Fin de prise	235	min
Le chatelier	2,0	mm
Surface spécifique (Blaine)	4225	cm <sup>2</sup> /g
Résistance à la compression 2 jours	34,5	MPa
Résistance à la compression 28 jours	66,2	MPa
Masse volumique absolue	3110	kg/m <sup>3</sup>

TAB. 19 Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM I 52,5 N de chez CBR

	Valeurs moyennes	Unité
<i>SiO<sub>2</sub></i>	20,34	%
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4,79	%
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3,35	%
<i>CaO</i>	64,13	%
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0,22	%
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,61	%
<i>MgO</i>	2,31	%
<i>SO<sub>3</sub></i>	3,16	%
<i>Cl</i>	0,059	%
Somme des éléments	99,27	%
Equivalent alcalis	0,62	%

TAB. 20 Composition chimique du ciment CEM I 52,5 N de chez CBR

### 3.1.3 Sable

Le sable utilisé dans le cadre de cette étude est un sable normalisé produit par la Société Nouvelle du Littoral (SNL). Il est produit conformément à la norme EN 196-1 et certifié ISO 679:2009. Comme le montre la figure 40, son conditionnement en sachet de  $1350 \pm 5$  g permet de s'affranchir de la pesée du sable, car c'est la quantité de sable à utiliser pour confectionner trois éprouvettes de mortier. La composition granulométrique du sable normalisé est donnée par le tableau 21.

Dimensions des mailles carrés (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Refus cumulé sur les tamis (%)	0	$7 \pm 5$	$33 \pm 5$	$67 \pm 5$	$87 \pm 5$	$99 \pm 1$

TAB. 21 Composition granulométrique du sable normalisé [36]



FIG. 40 Sable normalisé



FIG. 41 Fines de fibres-ciment

### 3.1.4 Fines de fibres-ciment

Les fines de fibres-ciment présentées à la figure 41 sont obtenues après le broyage de déchets de tôles en fibres-ciment en particules fines d'une granulométrie allant de 0 à  $100 \mu\text{m}$ . L'opération de broyage a été confiée au Centre Terre et Pierre (CTP), un centre de recherche agréé offrant son expertise dans le traitement des gisements et la valorisation des matériaux.

L'image microscopique des fibres obtenues en tamisant les matériaux en fibres-ciment avec un tamis de  $80 \mu\text{m}$  est représentée dans la figure 42. Elle montre que la longueur des fibres varie considérablement, allant de 0 à 3 mm.

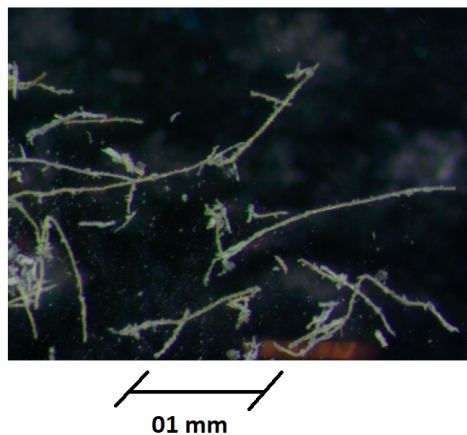


FIG. 42 Image microscopique des fibres



## 3.2 Matériels utilisés

Cette partie est consacrée à la présentation des principaux appareils utilisés pour la confection d'éprouvettes de mortier et de pâtes de ciment, à savoir : la balance, le malaxeur, le moule prismatique et l'appareil à chocs.

### 3.2.1 Balance électronique

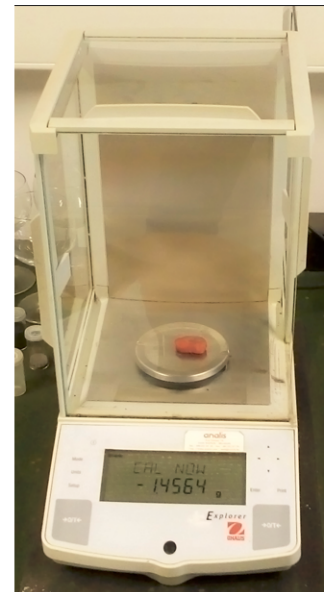
La balance d'une précision de 10 mg (figure 43-a) est utilisée pour peser les constituants des mélanges, les éprouvettes de mortier et pour le calcul des porosités. La balance d'une précision de 1 mg (figure 43-b) est utilisée pour le calcul des densités et des surfaces spécifiques des fillers. Celle d'une précision de 0,1 mg (figure 43-c) est utilisée pour l'analyse thermogravimétrique.



a)



b)



c)

FIG. 43 Balance

### 3.2.2 Malaxeur

Le malaxeur présenté à la figure 44 est constitué d'un bol et d'un batteur en acier inoxydable. Il permet d'homogénéiser les constituants d'un mélange (filler, sable et eau). Pendant le malaxage du mortier ou du liant, le batteur doit tourner aux vitesses indiquées dans le tableau 22.

	Rotation	Mouvement planétaire
	$\text{min}^{-1}$	$\text{min}^{-1}$
Petite vitesse	$140 \pm 5$	$62 \pm 5$
Grande vitesse	$285 \pm 10$	$125 \pm 10$

TAB. 22 Vitesses du batteur selon la norme EN 196-1 [36]



FIG. 44 Malaxeur

### 3.2.3 Appareil à chocs

L'appareil à chocs présenté à la figure 45 est constitué d'une table reliée à un axe de rotation par deux bras. Le moule est fixé sur la table et les deux bras peuvent le soulever et le laisser tomber librement d'une hauteur de  $15,0 \pm 0,3$  mm. Ce dispositif permet de vibrer le contenu du moule en deux couches à raison de soixante chocs par couche.



FIG. 45 Appareil à chocs

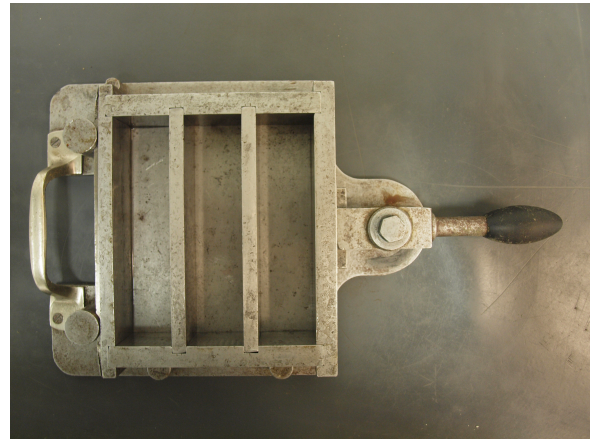


FIG. 46 Moule prismatique

### 3.2.4 Moule prismatique

Le moule prismatique est utilisé pour donner une forme aux éprouvettes de mortier. Comme le montre la figure 46, il est constitué de trois compartiments séparés. Selon la norme NBN EN 196-1 [36], les dimensions et les tolérances de chaque compartiment doivent être les suivantes : Longueur :  $160 \pm 1$  mm , Largeur :  $40,0 \pm 0,2$  mm , Profondeur :  $40,1 \pm 0,1$  mm.

### 3.3 Composition des mortiers et conditions de cure

#### 3.3.1 Conditions de cure des éprouvettes

Les trois conditions de cure retenues pour cette étude sont les suivantes :

- Le mortier est conservé dans une chambre humide à 90 % d'humidité relative et à une température de 21°C (voir figure 47) ;
- Le mortier est conservé dans une salle climatisée à une température de 21°C et une humidité relative de 60 % (voir figure 48) ;
- Le mortier est conservé dans une enceinte de carbonatation dans laquelle l'humidité relative est de 60 %, la température est de 25°C et la concentration de dioxyde de carbone est de 1 % (voir figures 49 et 50).



FIG. 47 Chambre de laboratoire humide.



FIG. 48 Salle climatisée.



FIG. 49 Dispositif de carbonatation accélérée



FIG. 50 Enceinte de carbonatation.

### 3.3.2 Composition des mortiers

La composition des mortiers est conforme aux prescriptions de norme NBN EN 196-1 [36], à savoir :  $1350 \pm 5$  g de sable,  $450 \pm 2$  g de liant (ciment + substitut) et  $225 \pm 1$  g d'eau. Cette composition et la température de cure des mortiers seront donc identiques pour tous les mélanges. Cependant, le taux de substitution du ciment par les fines carbonatées ou non carbonatées et les conditions de cure des mortiers seront différents d'un mélange à un autre. La combinaison de tous ces paramètres permet de retenir les quinze (15) compositions de mortier présentées dans le tableau 23. Le mortier M2-00 est identique au mortier M1-00, ce qui explique son absence dans la liste.

Nom	Taux de substitution du Ciment Portland par les fines carbonatées ou non carbonatées (%)	Composants					Conditions de cure
		Sable (g)	Eau (g)	Liant			
				Ciment (g)	Fines non carbonatées (g)	Fines Carbonatées (g)	
M1-00	0	$1350 \pm 5$	225	450	0	0	Chambre humide
M1-10	10	$1350 \pm 5$	225	405	45	0	Chambre humide
M1-15	15	$1350 \pm 5$	225	382,5	67,5	0	Chambre humide
M1-20	20	$1350 \pm 5$	225	360	90	0	Chambre humide
M1-25	25	$1350 \pm 5$	225	337,5	112,5	0	Chambre humide
M1-30	30	$1350 \pm 5$	225	315	135	0	Chambre humide
M1-50	50	$1350 \pm 5$	225	225	225	0	Chambre humide
M2-10	10	$1350 \pm 5$	225	405	0	45	Chambre humide
M2-15	15	$1350 \pm 5$	225	382,5	0	67,5	Chambre humide
M2-20	20	$1350 \pm 5$	225	360	0	90	Chambre humide
M3-00	0	$1350 \pm 5$	225	450	0	0	Enceinte climatique
M3-10	10	$1350 \pm 5$	225	405	45	0	Enceinte climatique
M3-15	15	$1350 \pm 5$	225	382,5	67,5	0	Enceinte climatique
M3-20	20	$1350 \pm 5$	225	360	90	0	Enceinte climatique
M4-00	0	$1350 \pm 5$	225	450	0	0	Salle climatisée
M4-10	10	$1350 \pm 5$	225	405	45	0	Salle climatisée
M4-15	15	$1350 \pm 5$	225	382,5	67,5	0	Salle climatisée
M4-20	20	$1350 \pm 5$	225	360	90	0	Salle climatisée

TAB. 23 Composition des mortiers.

### 3.3.3 Appareillage pour la composition du mortier

Les appareils nécessaires pour la composition du mortier sont les suivants :

- Une balance d'une précision de 1 g pour peser les différents constituants du mélange (ciment, eau, sable et fines de recyclage) ;
- Un malaxeur équipé d'un bol et d'une batteuse en acier inoxydable ;
- Les outils de maçonnerie (truelle, spatule).

### 3.4 Protocoles expérimentaux

Cette partie est consacrée à la présentation des protocoles expérimentaux des essais qui seront réalisés tout au long de cette étude, notamment :

- La mesure de la masse volumique ;
- L'analyse granulométrique laser ;
- La détermination de la finesse du ciment ;
- L'analyse thermogravimétrique (ATG) ;
- La détermination de la profondeur de carbonatation du mortier ;
- La détermination du temps de prise du ciment ;
- La mesure de la consistance du mortier frais ;
- La détermination de la résistance à la flexion et la résistance à la compression ;
- La mesure de la porosité accessible à l'eau.

#### 3.4.1 La mesure de la masse volumique

##### 3.4.1.1 Principe de l'essai

La détermination de la masse volumique du ciment et des fines de fibres-ciment peut être effectuée à l'aide d'un pycnomètre à gaz selon la norme NBN EN ISO 8130-2 [32]. Ce test permet de calculer le volume d'un échantillon de masse connue en mesurant la différence de pression dans un récipient lors du déplacement d'un gaz entre la chambre de référence et la chambre d'échantillon du pycnomètre à gaz (voir figure 51).

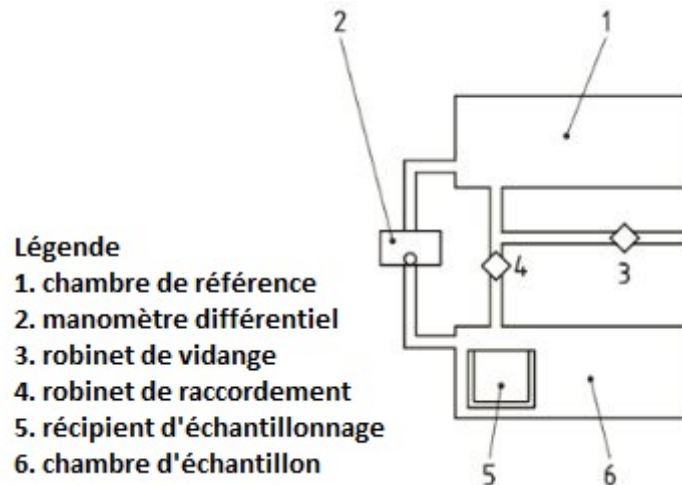


FIG. 51 Principe de mesure du pycnomètre [32]

##### 3.4.1.2 Mode opératoire et expression des résultats

Les conditions de l'essai (température et humidité relative du laboratoire) ainsi que le mode opératoire sont décrits dans la norme NBN EN ISO 8130-2 [32]. La masse volumique absolue de la poudre  $\rho_P$  est calculée selon la formule 5, où  $m$  et  $V$  représentent respectivement la masse en grammes et le volume de la prise d'essai en centimètres cubes.

$$\rho_P = \frac{m}{V} \quad (5)$$

### 3.4.1.3 Appareillage

L'appareillage de laboratoire utilisé est composé d'une balance d'une précision de 1 mg et d'un pycnomètre à gaz, qu'il soit automatique ou manuel (voir figure 52). Comme le montre la figure 51, ce dernier est constitué de deux chambres reliées par une soupape et un manomètre différentiel.



FIG. 52 Vue d'ensemble du dispositif du pycnomètre à gaz

## 3.4.2 L'analyse granulométrique laser

### 3.4.2.1 Principe de l'essai et appareillage

La distribution granulométrique des liants (ciment et fines de recyclage) sera déterminée par une analyse laser basée sur la déviation résultant de la diffraction d'un faisceau laser lorsqu'il rencontre une particule en suspension dans un liquide (voir figure 53). Cet essai est réalisé conformément à la norme ISO 13320:2020 [68]. Comme le montre la figure 54, les appareils nécessaires pour effectuer une analyse granulométrique laser sont un granulomètre à diffraction laser et un ordinateur.

Comme le montre la figure 53, les données sont enregistrées par l'unité optique et sont ensuite traitées par un logiciel commercial. Les modèles de calcul pris en compte sont généralement l'approximation de Fraunhofer et la théorie de la diffusion de Mie. D'après F. Michel et al. [33] : « l'approximation de Fraunhofer implique par contre des simplifications importantes de la théorie de Mie. Les particules sont considérées par l'algorithme comme des disques plats et opaques : seule la diffraction est prise en compte et la connaissance de la nature du matériau et de ses propriétés optiques n'est pas nécessaire ». L'approximation de Fraunhofer est donc utilisée dans cette étude, car les indices de réfraction des fillers analysés sont inconnus.

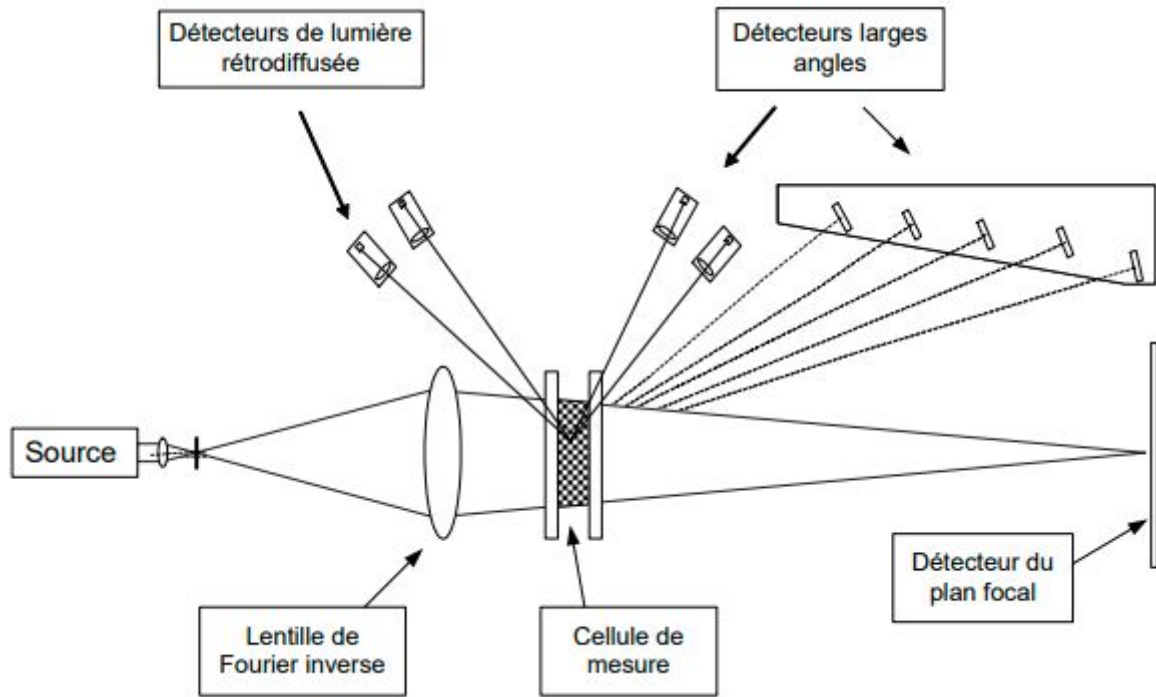


FIG. 53 Schéma simplifié de l'unité optique d'un granulomètre laser [33]

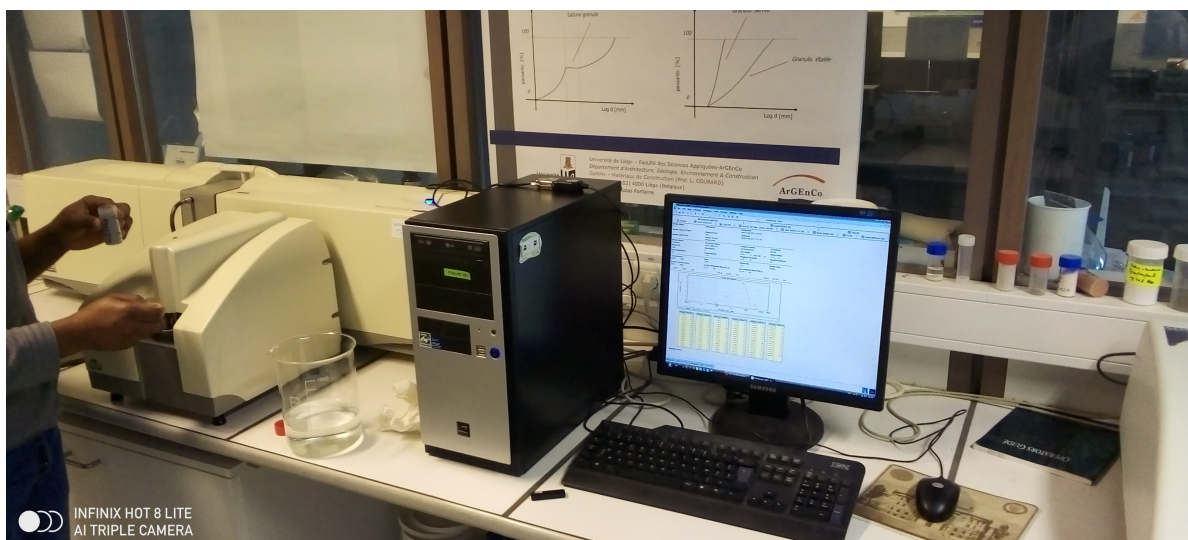


FIG. 54 Vue d'ensemble du dispositif de l'analyse granulométrique laser

### 3.4.2.2 Expression des résultats de l'analyse granulométrique laser

Les valeurs fournies par l'analyse granulométrique laser sont les suivantes.

- $d_{10}$  : 10 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur;
- $d_{50}$  : 50 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur;
- $d_{90}$  : 90 % des particules ont un diamètre inférieur à cette valeur.

### 3.4.3 La détermination de la finesse du ciment

La finesse du ciment peut être déterminée par tamisage sur des tamis normalisés, par perméabilité à l'air (méthode Blaine), par adsorption de gaz (méthode BET) et par tamisage à jet d'air. Dans le cadre de cette étude, nous allons utiliser la méthode BET.

La surface spécifique totale externe et interne d'un filler peut être déterminée par adsorption de gaz à l'aide de la méthode BET. Cet essai est réalisé selon la norme NBN EN ISO 18757 [69]. La méthode repose sur le calcul de la couverture monomoléculaire à partir de l'isotherme d'absorption d'un gaz qui est introduit dans une enceinte contenant une prise d'essai et maintenu à température constante (Voir figure 55).



FIG. 55 Vue d'ensemble du dispositif d'analyse de détermination de surface spécifique



### 3.4.4 L'analyse thermogravimétrique (ATG)

#### 3.4.4.1 Principe de l'essai

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de quantifier la perte d'éléments constitutifs d'un matériau en fonction de la température de chauffage. Selon ACHCHAQ et al. [70]: «la technique de la thermogravimétrie repose sur les variations de masse d'un matériau soumis soit à une loi de chauffe définie par des paliers de température en fonction du temps (mode isotherme), soit à une loi déterminée par une élévation constante de la vitesse de chauffe .»

#### 3.4.4.2 Appareillage

Les appareils nécessaires pour effectuer l'analyse thermogravimétrique sont : Un analyseur thermique simultané (voir figure 56) et une balance d'une précision de 0,1 mg ;

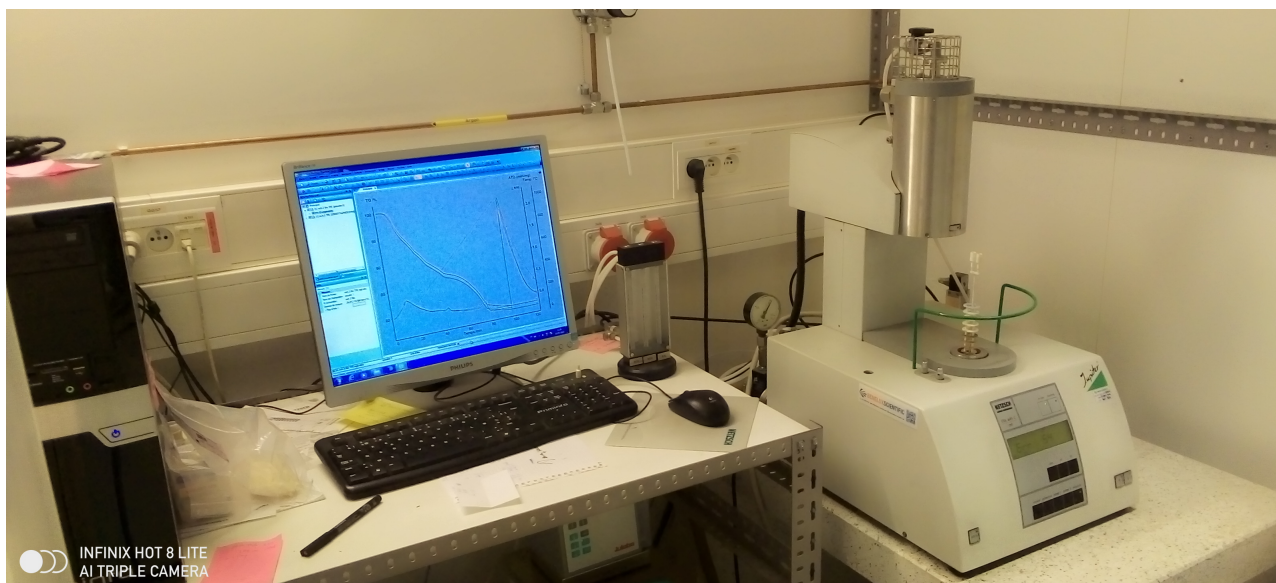


FIG. 56 Vue d'ensemble du dispositif d'analyse thermogravimétrique

#### 3.4.4.3 Expression des résultats

Les études antérieures menées sur un ciment Portland révèlent que les résultats de leur analyse thermogravimétrique (ATG) présentent trois pics qui correspondent à un changement de phase des minéraux. Selon A. Grellier [11], ces pics peuvent être interprétés comme suit : «La première phase correspond à la déshydratation des C-S-H (105-300°C), le second pic indique la déshydratation de la Portlandite (405-560°C) et la troisième phase montre la décarbonatation des carbonates  $CaCO_3$  (650-850°C)» [11].

Étant donné que le carbonate de calcium et la Portlandite sont respectivement l'un des produits et l'un des réactifs de la carbonatation des matériaux cimentaires, le troisième pic pourrait donc permettre d'apprécier l'effet de la carbonatation sur la composition minéralogique des fines de fibres-ciment.

### 3.4.5 La détermination de la profondeur de carbonatation du mortier

Le pH (Potentiel Hydrogène) d'un mortier sain a une valeur d'environ 13. La carbonatation d'un matériau cimentaire entraîne une baisse de son pH. Par conséquent, la profondeur de carbonatation des éprouvettes de mortier est mesurée par pulvérisation d'un indicateur coloré qui montre le changement de pH. L'indicateur choisi pour cette étude est la phénolphaléine. Elle devient incolore lorsque le pH est inférieur à 9 et rose lorsqu'il est supérieur à 9.

### 3.4.6 La détermination du temps de prise du ciment

#### 3.4.6.1 Principe de l'essai

L'évaluation du temps de début et de fin de prise des ciments est effectuée selon la norme NBN EN 196-3 [34]. Ces temps sont déterminés par mesure de la pénétration d'une sonde normalisée dans une pâte de ciment confectionnée avec une teneur en eau correspondant à la teneur en eau de consistance normale. La détermination de la teneur en eau de consistance normale est donc censée faire l'objet d'un essai préalable à l'essai de détermination du temps de prise. Cependant, en raison de l'indisponibilité de la sonde nécessaire pour un essai de consistance normale, tous les mélanges de liant (ciment + fines de recyclage) ont été effectués avec une teneur en eau de 30 %.

#### 3.4.6.2 Appareillage et conditions d'essai

Les principaux appareils et équipements nécessaires pour déterminer le temps de prise des ciments sont les suivants :

- Une balance d'une précision de 1 g pour peser les différents constituants du mélange (ciment, eau et fines de recyclage) ;
- Un malaxeur pour homogénéiser le mélange ;
- Un moule Vicat ;
- Une plaque de base non absorbante ;
- Un chronomètre pour mesurer la durée du malaxage ;
- Les outils de maçonnerie nécessaires à la mise en œuvre du mélange dans le moule (règle, truelle, spatule) ;
- Un appareil de Vicat (voir figures 57 et 58). La sonde de l'appareil de Vicat doit avoir une longueur effective de 45 mm et un diamètre de  $10,00 \pm 0,05$  mm pour l'essai de consistance normalisée. En revanche, pour l'essai du temps de prise, la sonde doit être une aiguille en acier d'une longueur effective d'au moins 45 mm et d'un diamètre de  $1,13 \pm 0,05$  mm. [34]

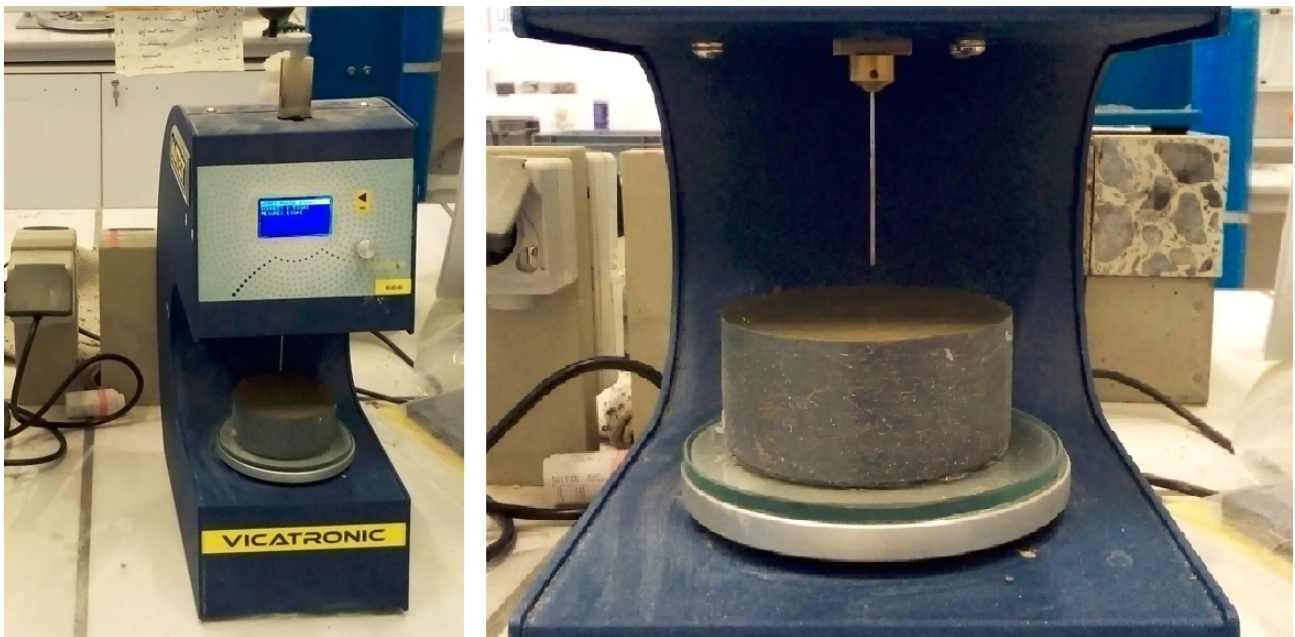
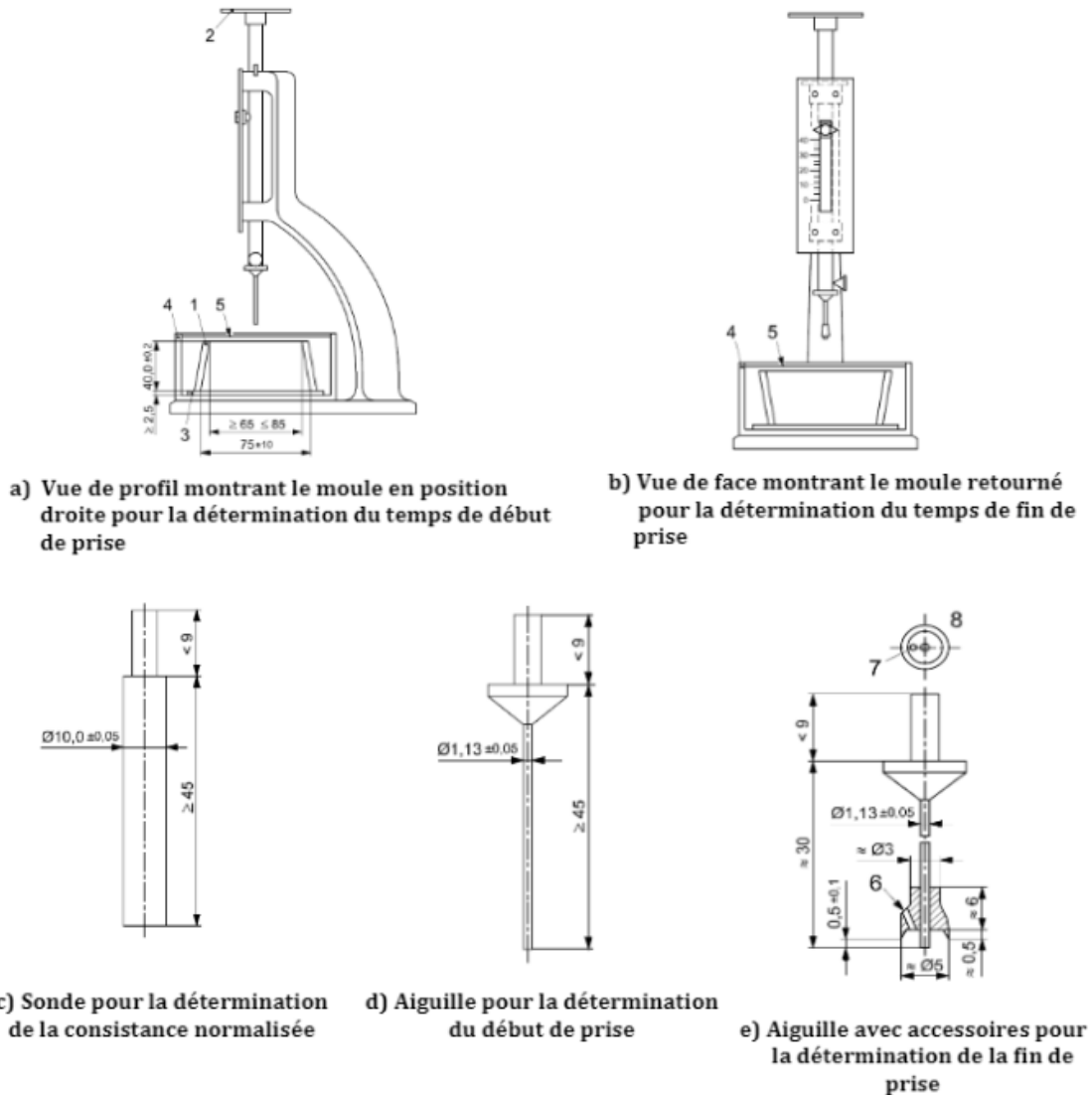


FIG. 57 Appareil de Vicat

### 3.4.6.3 Détermination des temps de prise

Le mode opératoire de malaxage de la pâte de ciment, le mode opératoire de remplissage du moule, la méthode de détermination de la consistance normalisée et des temps de prise sont décrits dans la norme NBN EN 196-3 [34]. Le temps de début correspond au « temps arrondi à la minute entre le début du malaxage et le temps auquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de  $6 \pm 3$  mm » [34]. La fin de prise est définie comme « le temps de fin de prise arrondi à la minute est le temps écoulé entre le début du malaxage et le temps au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus que de 0,5 mm dans l'éprouvette » [34].



#### Légende

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1 Moule                           | 5 Eau  |
| 2 Plateau pour poids additionnels | 6 Évent ( $\varnothing \approx 1,5$ )  |
| 3 Plaque de base                  | 7 Évent  |
| 4 Récipient                       | 8 Vue de dessous, agrandie, de l'aiguille avec l'accessoire pour déterminer le temps de fin de prise |

FIG. 58 Exemple d'appareil de Vicat pour la détermination de la consistance normalisée et du temps de prise [34]

### 3.4.7 La mesure de la consistance du mortier frais

#### 3.4.7.1 Principe de l'essai

La détermination de la consistance d'un mortier frais est effectuée conformément à la norme NBN EN 1015-3 [35]. Cette norme permet d'évaluer la déformation d'un mortier frais lorsqu'il est soumis à des contraintes. L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen d'étalement d'un mortier coulé dans un moule tronconique et soumis à un nombre normalisé de secousses.

#### 3.4.7.2 Appareillage

En plus des appareils décrits au point 3.3.3 pour la composition des mortiers, les appareils nécessaires pour déterminer la consistance du mortier frais sont les suivants :

- Une table à secousses. Comme le montrent les figures 60 et 59, elle est composée d'un socle, d'un plateau rigide, d'un axe horizontal, d'une tige de levage, d'un disque et d'une came de levage ;
- Un moule tronconique d'une hauteur de  $60 \pm 0,5$  mm, d'un diamètre intérieur de  $100 \pm 0,5$  mm à la base et de  $70 \pm 0,5$  mm au sommet ;
- Une dame constituée d'une baguette d'environ 40 mm de diamètre, de 200 mm de long et d'une masse de  $250 \pm 15$  g ;
- Un pied à coulisse avec une précision de 1 mm pour mesurer l'étalement ;
- Les outils de maçonnerie nécessaires à la mise en œuvre des mélanges dans le moule (règle, truelle).

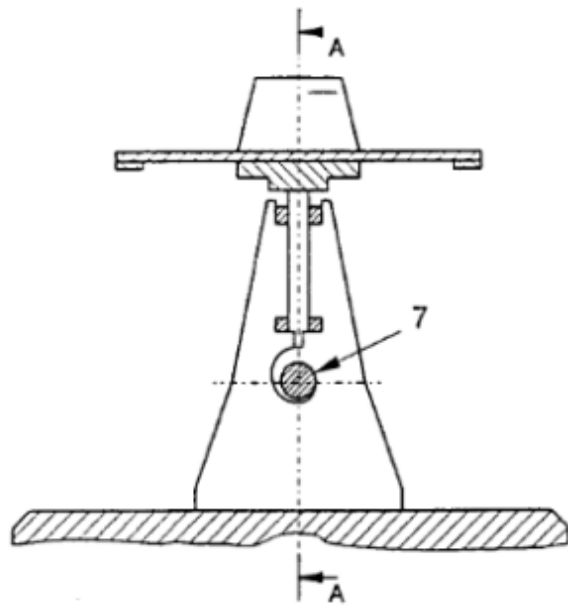
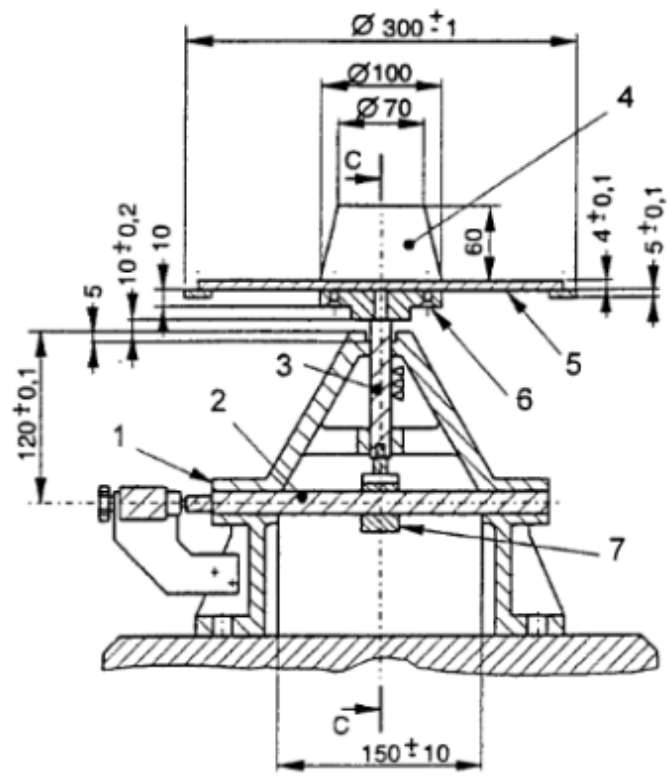


FIG. 59 Table à secousses, dame, pied à coulisse et moule tronconique

#### 3.4.7.3 Malaxage du mortier et détermination de la consistance

Le mode opératoire de malaxage du mortier est décrit dans la norme NBN EN 1015-3 [35]. Il doit être effectué en plusieurs étapes parfaitement chronométrées pendant une durée de quatre minutes. La durée de chaque étape doit être respectée à  $\pm 2$  secondes.

De même, la méthode de détermination de la consistance est également décrite dans la norme NBN EN 1015-3 [35]. L'étalement est la moyenne des diamètres mesurés dans les deux directions perpendiculaires.



Numéro :	1 Socle
	2 Axe horizontal
	3 Tige de levage
	4 Moule tronconique
	5 Disque
	6 Plateau rigide
	7 Came de levage

FIG. 60 Table à secousses [35]

### 3.4.8 La détermination de la résistance à la flexion et la résistance à la compression

#### 3.4.8.1 Principe de l'essai

La détermination de la résistance en compression et en flexion du mortier à l'état durci se fait selon la norme NBN EN 196-1 [36]. Comme le montrent les figures 61 et 62, l'éprouvette prismatique de mortier, ayant des dimensions de 40 mm × 40 mm × 160 mm, est mise en charge à trois points jusqu'à la rupture pour déterminer sa résistance à la flexion. Les demi-prismes résultants sont ensuite soumis à une charge axiale jusqu'à la rupture pour déterminer leur résistance à la compression.

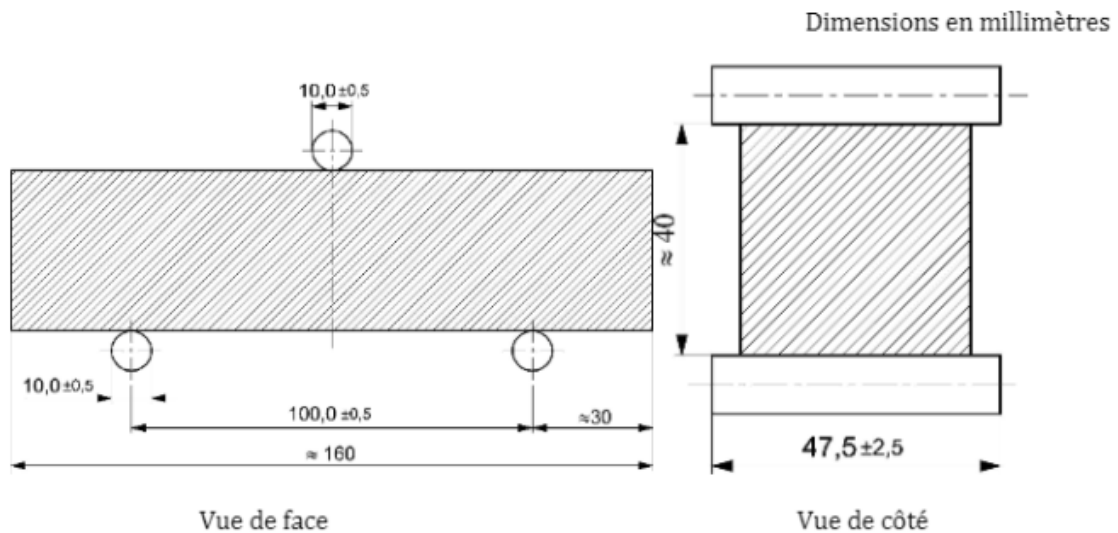
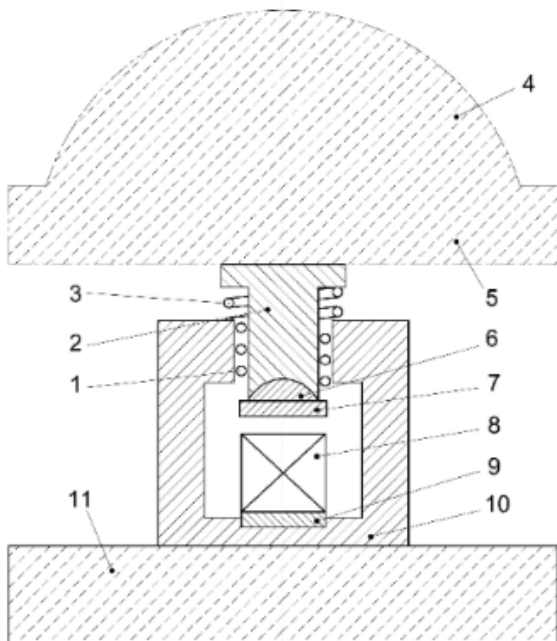


FIG. 61 Disposition de charge pour la détermination de la résistance à la flexion [36]



#### Légende

- 1 Roulements à billes
- 2 Assemblage coulissant
- 3 Ressort de rappel
- 4 Rotule sphérique de la machine
- 5 Plateau supérieur de la machine
- 6 Rotule sphérique du dispositif
- 7 Plateau supérieur du dispositif
- 8 Éprouvette
- 9 Plateau inférieur du dispositif
- 10 Dispositif de compression
- 11 Plateau inférieur de la machine

FIG. 62 Exemple de dispositif de compression [36]

### 3.4.8.2 Appareillage pour les essais de résistance

Les appareils nécessaires pour les essais de résistance du mortier sont les suivants :

- Un pied à coulisse avec une précision de 1 mm pour mesurer les dimensions de l'éprouvette durcie (hauteur, largeur et épaisseur) ;
- Une machine automatique (voir figure 65) constitué d'un dispositif pour effectuer un essai de flexion (voir figure 63) et un essai de compression (voir figure 64).



FIG. 63 Dispositif de flexion utilisé

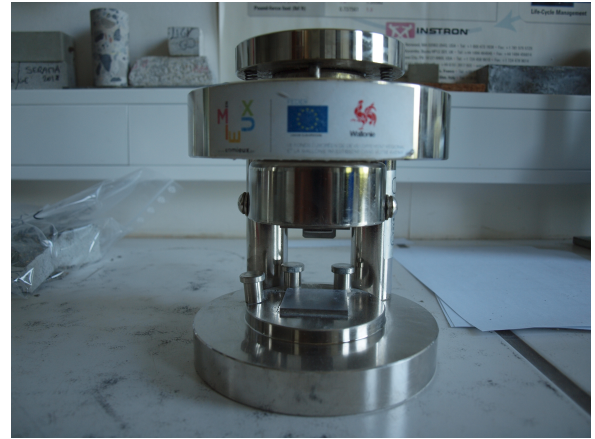


FIG. 64 Dispositif de compression utilisé



FIG. 65 Vue d'ensemble du dispositif de détermination des résistances

### 3.4.8.3 Préparation des éprouvettes et mode opératoire des essais de résistance

Les étapes de préparation du mortier, les étapes de confection des éprouvettes, les formules de calcul de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion sont décrites dans la norme NBN EN 196-1 [36].

### 3.4.9 La mesure de la porosité accessible à l'eau

#### 3.4.9.1 Principe de l'essai

La porosité accessible à l'eau est l'un des paramètres qui permet d'évaluer la durabilité d'un matériau. Elle est déterminée en pesant l'éprouvette saturée et séchée pour obtenir les trois masses suivantes (référence [71]) :

- Masse saturée dans l'eau  $M_{eau}$ ;
- Masse saturée dans l'air  $M_{air}$ ;
- Masse sèche  $M_{sec}$ .

#### 3.4.9.2 Appareillage

Les appareils nécessaires pour déterminer la porosité du mortier durci sont les suivants :

- Une balance d'une précision de 1 g ;
- Un récipient ;
- Des calles pour supporter les éprouvettes ;
- Une étuve de laboratoire.

La détermination de la porosité accessible à l'eau se fait selon les étapes suivantes :

- Immerger l'éprouvette dans un récipient rempli d'eau et peser à l'air une fois par jour pendant une durée nécessaire pour que la différence de masse entre deux pesées soit inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette (voir figures 66 et 67) ;
- Noter la masse saturée pesée à l'air  $M_{air}$  ;
- Peser l'éprouvette dans l'eau comme le montre la figure 68;
- Noter la masse saturée pesée dans l'eau  $M_{eau}$  ;
- Sécher l'éprouvette de mortier dans une étuve et peser une fois par jour pendant une durée nécessaire pour que la différence de masse entre deux pesées soit inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette (voir figures 69 et 70) ;
- Noter la masse sèche  $M_{sèche}$ .



FIG. 66 Immersion des éprouvettes de mortier



FIG. 67 Pésée à l'air de l'éprouvette humide



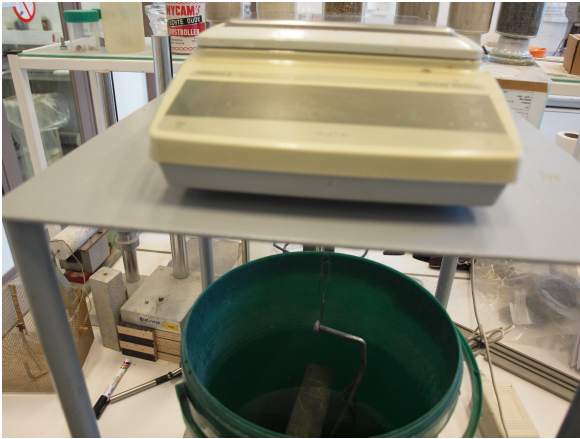


FIG. 68 Pésée hydrostatique



FIG. 69 Étuve de laboratoire



FIG. 70 Pésée à l'air de l'éprouvette sèche

### 3.4.9.3 Calcul de la porosité accessible à l'eau

Le calcul de la porosité accessible à l'eau de l'éprouvette de mortier se fait respectivement à l'aide de la formule 6.

$$\text{Porosité accessible à l'eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (6)$$

Les études menées par Cem Galle [72] démontrent qu'un séchage des matériaux à base de ciment à une température de 60°C permet une estimation plus réaliste de la porosité accessible à l'eau. Par contre, un séchage à une température de 105°C conduit à une surestimation de la porosité, car à cette température, certains hydrates (C-S-H) perdent une quantité d'eau non évaporable [72].

Dans le cadre de cette étude, les éprouvettes de mortier seront séchées à une température de 105°C.

## 4 ANALYSE DES RESULTATS

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats des essais effectués en laboratoire. Ces essais ont pour but la caractérisation des matériaux utilisés (ciment et fines de recyclage), la détermination de la consistance du mortier frais, ainsi que des propriétés mécaniques du mortier durci telles que la résistance à la flexion et à la traction.

### 4.1 Caractérisation des matériaux

Cette partie est consacrée à l'analyse des caractéristiques physiques et chimiques du ciment, ainsi que des fines de fibres-ciment carbonatées et non carbonatées utilisées dans le cadre de cette étude. L'effet de la carbonatation sera particulièrement analysé sur ces fines de fibres-ciment.

Avant d'effectuer ces essais, les fines de fibres-ciment carbonatées et non carbonatées ont été tamisées à travers un tamis de 80  $\mu\text{m}$ , puis séchées jusqu'à obtenir une masse constante. Le résidu du tamis a été analysé au microscope, et la détermination des caractéristiques physico-chimiques a été effectuée sur le tamisat.

#### 4.1.1 Caractéristiques physiques et géométriques

##### 4.1.1.1 Densité

Les fines de fibres-ciment ont été carbonatées pendant huit jours dans une enceinte de carbonatation, avec une teneur en dioxyde de carbone de 1 %, température de 25°C, et une humidité relative de 60 % (humidité optimale mise en évidence dans la partie 2.2.3.2). Le tableau 24 présente les résultats de la détermination des masses volumiques effectuée à l'aide d'un pycnomètre à gaz selon la norme NBN EN ISO 8130-2 [32]. L'évolution de la masse des fines fibres-ciment après la carbonatation est due à la fixation du  $\text{CO}_2$  par la matrice cimentaire.

Poudre	masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	surface spécifique BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
Ciment Portland CEM I 52,5 N	3,19	0,68
Fines de fibres-ciment non carbonatées	2,31	7,24
Fines de fibres-ciment carbonatées	2,68	26,27

TAB. 24 Masses volumiques

##### 4.1.1.2 Finesse

La valeur de la surface spécifique a été déterminée par adsorption de l'azote à l'aide de la méthode BET, conformément à la norme NBN EN ISO 18757 [69]. En se basant sur les résultats des tests présentés dans le tableau 24, on constate une augmentation de la surface spécifique totale des fines de fibres-ciment après carbonatation et, par conséquent, une redistribution du réseau poreux, ce qui est dû à l'augmentation du volume solide. En effet, selon le tableau 11, les volumes molaires des polymorphes du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) produits par la réaction de carbonatation sont plus élevés que celui de l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

##### 4.1.1.3 Granulométrie

La distribution granulométrique du ciment, des fines de fibres-ciment carbonatées et non carbonatées, a été déterminée par analyse granulométrique laser conformément à la norme ISO 13320:2020 [68]. D'après les résultats de ces tests, repris dans le tableau 25 et la figure 71, voici quelques observations qui peuvent être relevées :

- La réaction de carbonatation ne modifie pas la distribution granulométrique des fines de fibres-ciment ;
- Les fines de fibres-ciment ont été broyées à une granulométrie allant de 0 à 100  $\mu\text{m}$ .

Poudre	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{20}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Ciment Portland CEM I 52,5 N	1,8	3,7	11,6	24,2	32,4
Fines non carbonatées	2,5	5,6	23,5	55,3	76,2
Fines carbonatées	4,0	7,7	22,8	53,0	72,5

TAB. 25 Diamètres des particules( $\mu\text{m}$ )

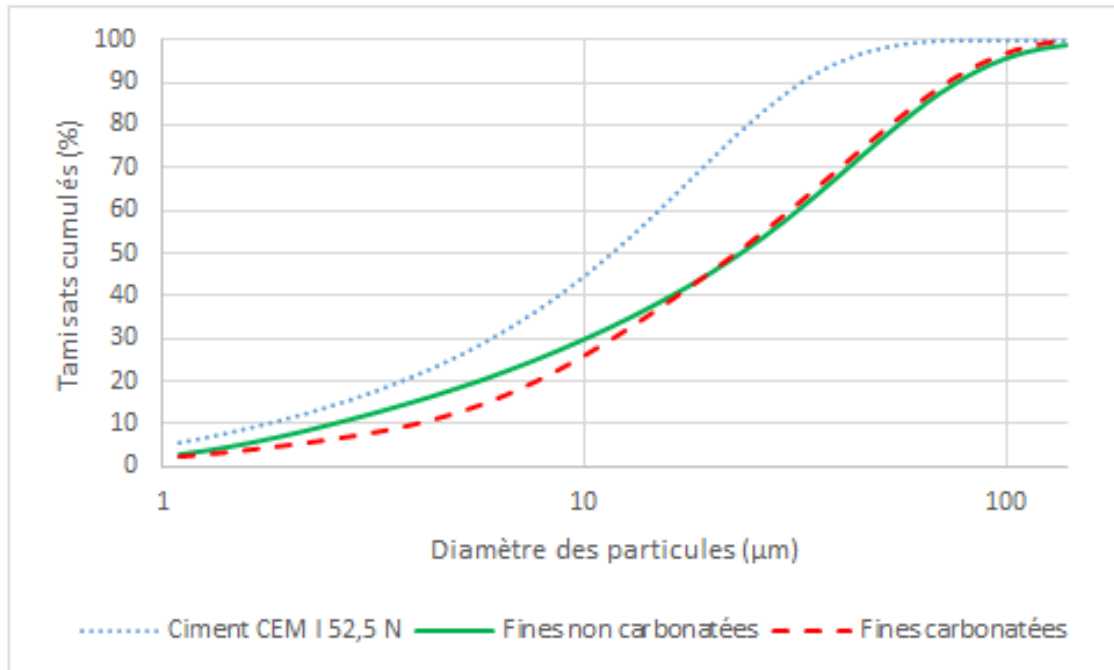


FIG. 71 Courbes granulométriques cumulatives

#### 4.1.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les figures 72, 73, 74 et 75 présentent les résultats des analyses thermogravimétriques (ATG) et des analyses thermiques différentielles (ATD) réalisées sur les fines de fibres-ciment carbonatées et non carbonatées. Chaque type de fines a été testé deux fois afin de vérifier la cohérence des résultats. Les pics observés sur les courbes de l'ATG et de l'ATD permettent d'identifier les changements de phase des composants minéraux présents dans les échantillons. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Entre 30°C et 350°C, plusieurs pics sont observés sur les courbes des fines de fibres-ciment carbonatées et non carbonatées. Ces pics correspondent à la déshydratation des C-S-H (silicate de calcium hydraté) ainsi que d'autres composés chimiques qui sont difficiles à identifier précisément en raison de l'utilisation de déchets de fibres-ciment dont les constituants sont inconnus.
- Entre 450°C et 490°C, un pic est observé sur les courbes ATG et ATD des fines de fibres-ciment non carbonatées. Ce pic correspond à la déshydratation de l'hydroxyde de calcium. Il est moins visible sur les courbes des fines carbonatées. Cette observation confirme la consommation d'une partie de la portlandite par la réaction de carbonatation ;
- Entre 750°C et 805°C, un pic est observé sur les courbes ATG et ATD des fines de fibres-ciment non carbonatées. Ce pic correspond à la décarbonatation des polymorphes des carbonates, ce qui suggère que le matériau a probablement été naturellement carbonaté pendant ses années de service. Ce pic est encore plus prononcé sur les courbes des fines de fibres-ciment carbonatées, ce qui indique une augmentation de la quantité de fines présentes dans le matériau après la carbonatation.

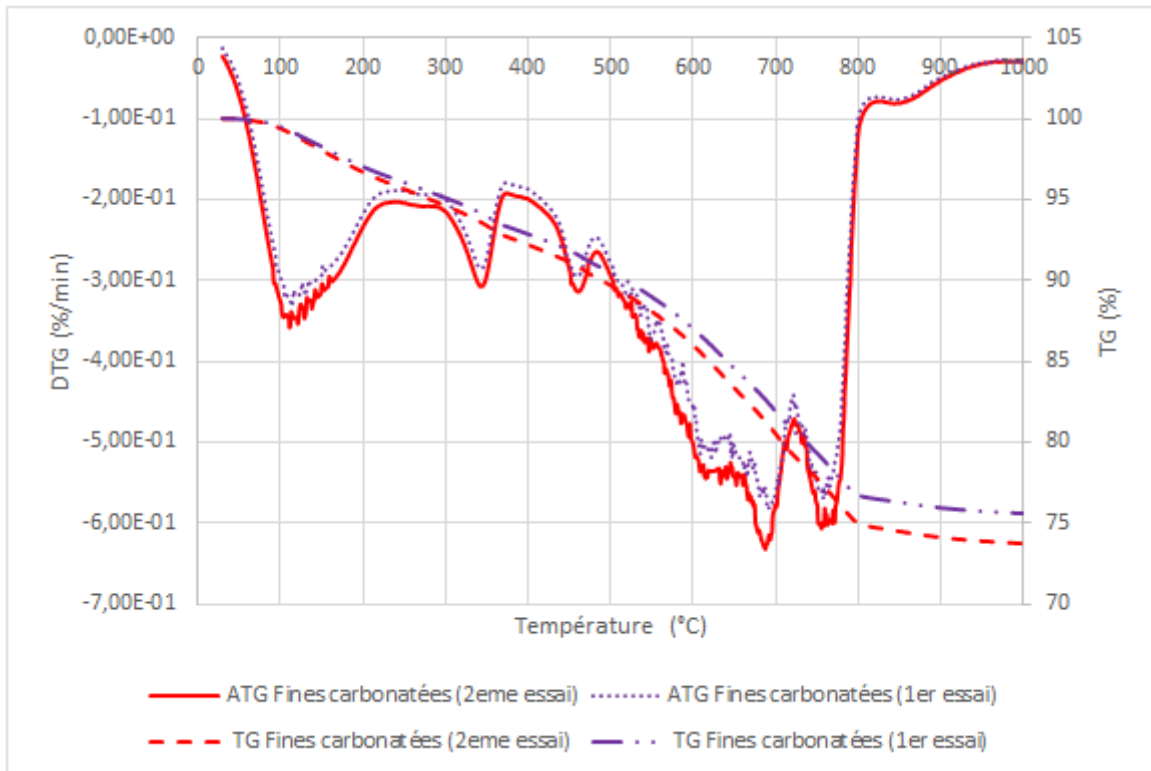


FIG. 72 Analyses thermogravimétriques des fines carbonatées

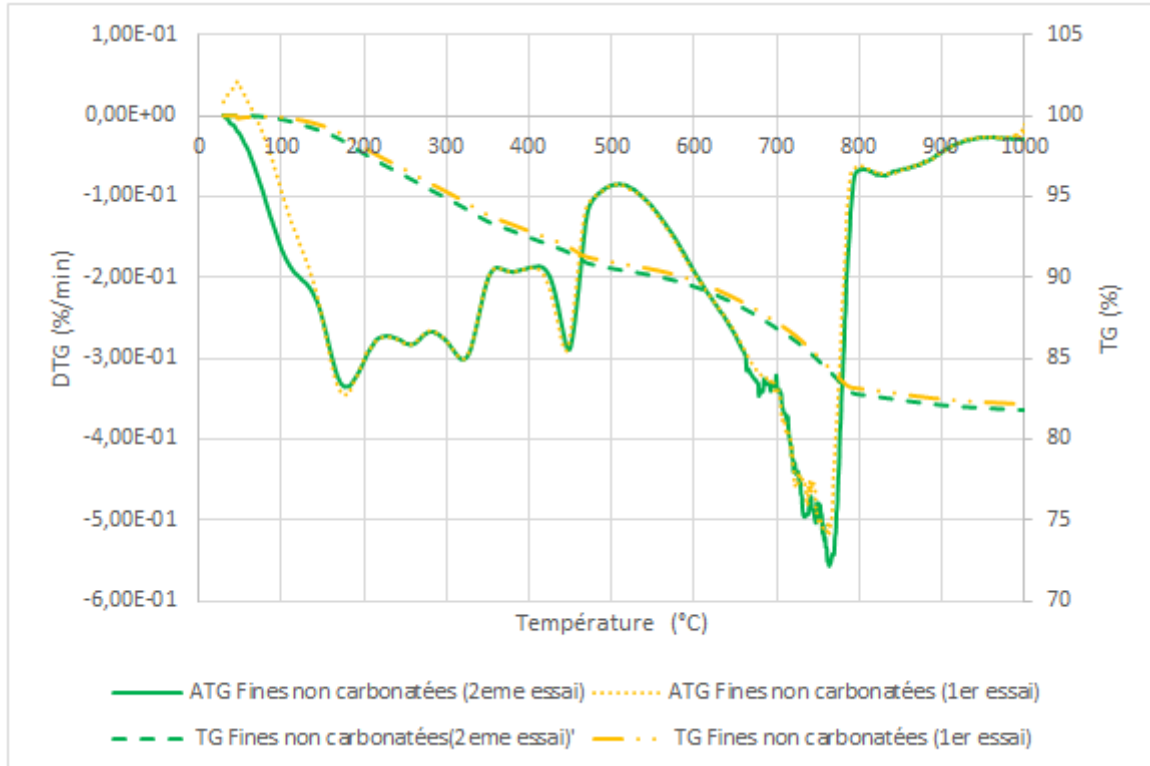


FIG. 73 Analyses thermogravimétriques des fines non carbonatées

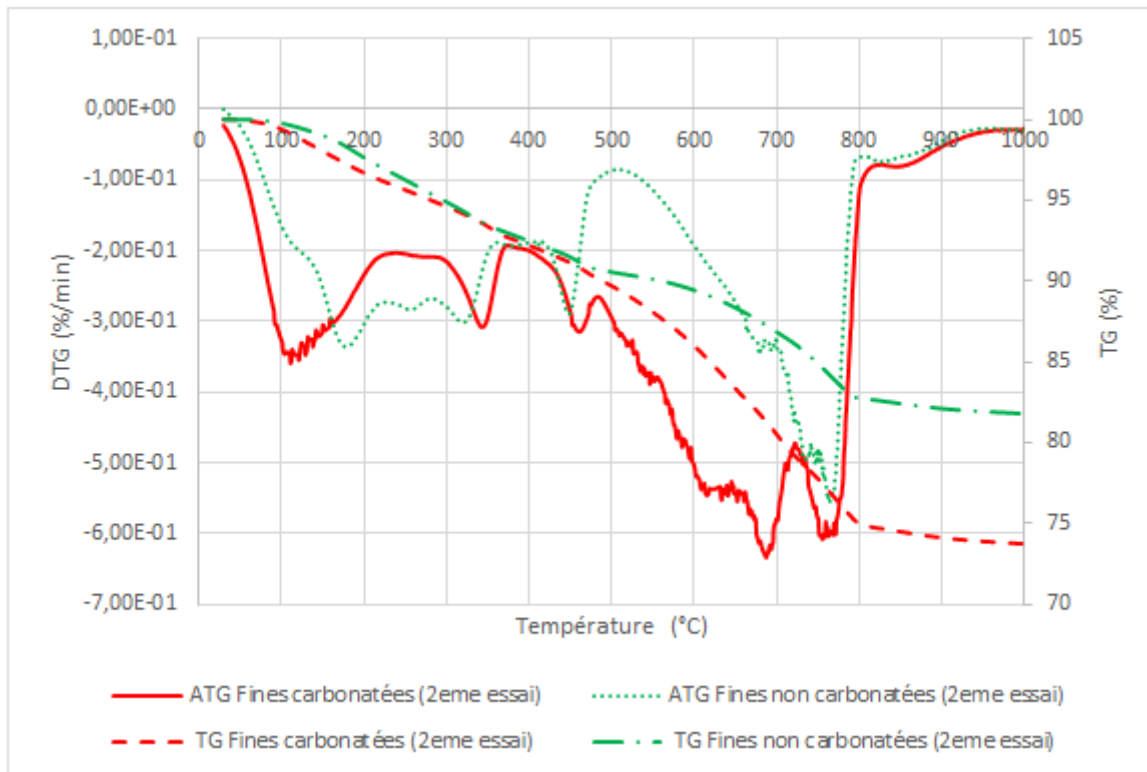


FIG. 74 Comparaison des résultats des analyses thermogravimétriques

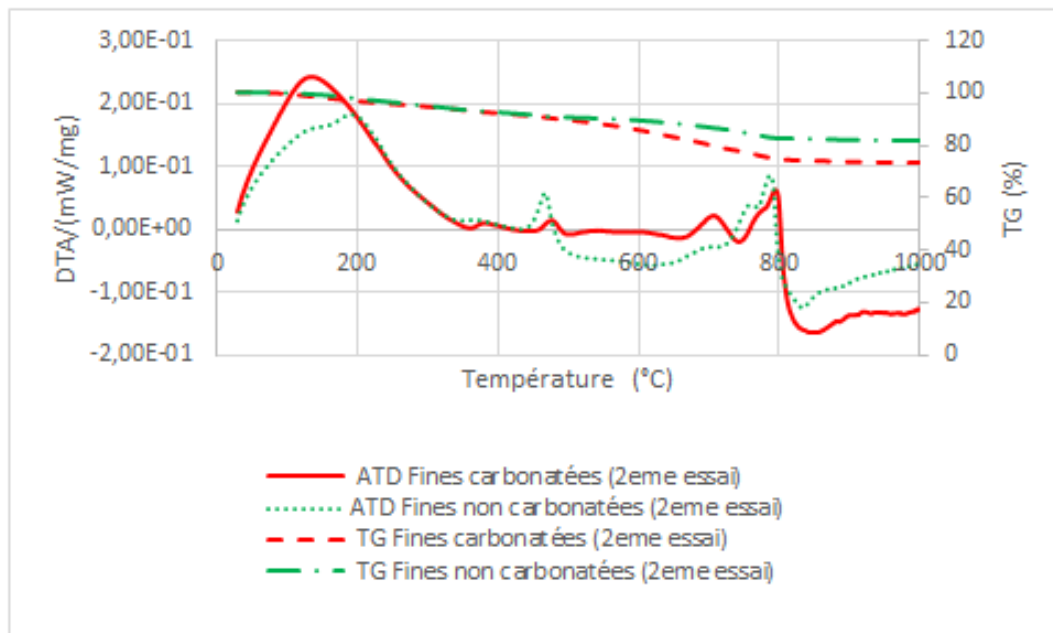


FIG. 75 Comparaison des résultats des analyses thermiques différentielles

## 4.2 Comportement à l'état frais

### 4.2.1 Consistance du mortier

La consistance des mortiers frais est déterminée selon les exigences de la norme NBN EN 1015-3 [35]. Ces mortiers sont composés de sable normalisé, de ciment Portland substitué par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées. Pour rappel, le rapport eau/ciment affecte la maniabilité des mortiers, car l'eau permet non seulement de déclencher la réaction d'hydratation, mais aussi d'assurer la fluidité du mélange. Les résultats de l'étude présentés à la figure 76 peuvent être interprétés comme suit :

- La maniabilité du mortier composé avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment non carbonatées diminue avec l'augmentation de la substitution, car ces fines de fibres-ciment sont plus poreuses que le ciment. Elles absorbent donc une grande partie de l'eau de gâchage pour combler les vides de leurs pores ;
- Pour un même taux de substitution, les mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment carbonatées sont plus maniables que les mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment non carbonatées. En effet, la réaction de carbonatation diminue le volume des pores des matériaux cimentaires. Par conséquent, lors du malaxage des composants du mortier, les fibres-ciment carbonatées absorbent moins d'eau de gâchage que les fibres-ciment non carbonatées ;
- Pour un taux de substitution inférieur à 15 %, la substitution du mortier par les fines de fibres-ciment carbonatées augmente très légèrement la maniabilité du mortier. Pour un taux de substitution égal à 15 %, elle est similaire à celle du mortier de référence (mortier composé avec un ciment non substitué). En effet, la substitution du ciment par un filler d'une granulométrie supérieure réduit la quantité d'eau nécessaire pour la lubrification du mélange et, par conséquent, augmente la maniabilité du mortier. En revanche, la substitution du ciment par un filler plus poreux augmente la quantité d'eau de gâchage absorbée et, par conséquent, diminue la maniabilité du mortier. En conclusion, un taux de substitution de 15 % semble être le taux idéal pour compenser les effets favorables liés à l'augmentation de la granulométrie et les effets défavorables liés à l'augmentation de la porosité du substitut du ciment, tout en maintenant une bonne maniabilité du mortier.

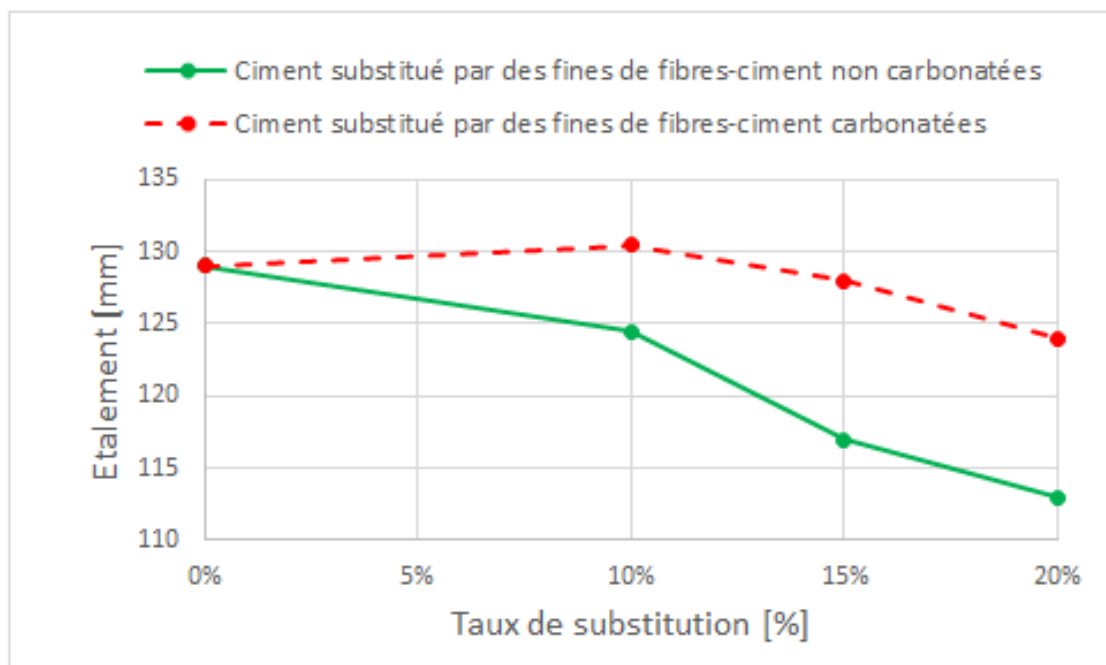


FIG. 76 Etalement des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution

#### 4.2.2 Temps de prise du ciment

Les temps de début et de fin de prise ont été déterminés à l'aide de l'appareil de Vicat automatique. La première étape pour déterminer le temps de prise d'une pâte de ciment consiste à évaluer sa consistance normalisée. Cependant, nous ne disposons pas de la sonde nécessaire pour effectuer l'essai de consistance normalisée. Par conséquent, l'exécution de l'essai n'est pas conforme à la norme NBN EN 196-3 [34].

Compte tenu de l'indisponibilité de l'appareil de Vicat et du fait que le cimentier nous a transmis une fiche technique de ce lot de ciment mentionnant une valeur moyenne de la demande en eau de 30%, nous avons décidé d'effectuer tous les mélanges de pâte de ciment avec une teneur en eau de 30%, quel que soit le type de fines et le taux de substitution.

Étant donné que la carbonatation réduit la porosité des fines de fibres-ciment, on pourrait supposer qu'avec un taux de substitution similaire, la teneur en eau requise pour obtenir une consistance normalisée dans une pâte composée de fines de fibres-ciment non carbonatées serait plus élevée que celle d'une pâte de ciment composée de fines carbonatées, car une partie de l'eau est absorbée par les fines pendant le malaxage. Toutefois, sous réserve de la validité de cette hypothèse et en se basant sur les résultats du calcul des temps de début et de fin de prise présentés à la figure 77, les constatations suivantes peuvent être faites pour des taux de substitution inférieurs à 20% :

- La substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées retarde le début de la prise de la pâte de ciment ;
- La substitution du ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées retarde la fin de la prise de la pâte de ciment ;
- La substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées a peu d'effet sur la fin de la prise de la pâte, quel que soit le taux de substitution ;
- Pour un taux de substitution donné, la pâte composée en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées présente un temps de début et de fin de prise plus long que celle composée en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées.

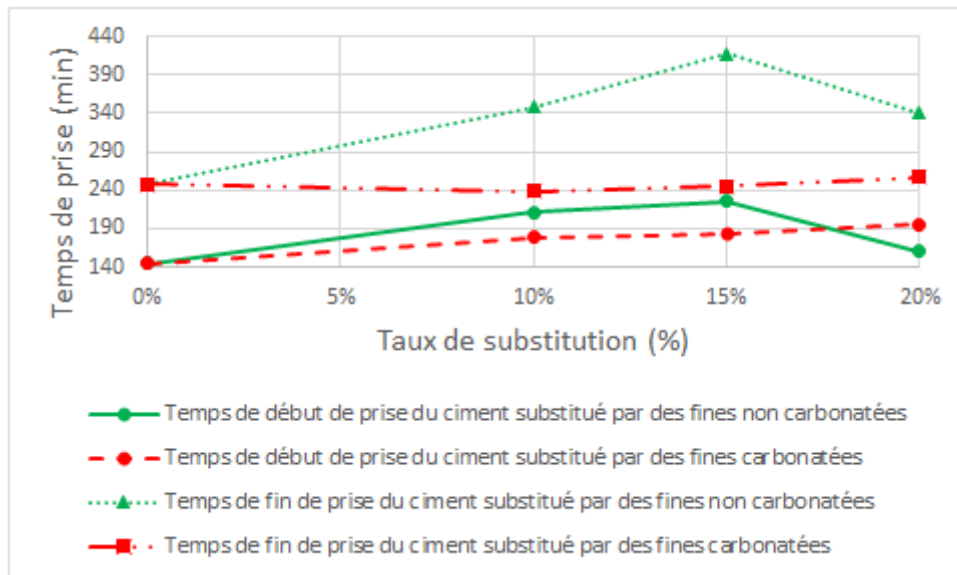


FIG. 77 Temps de prise des ciment substitués par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution

## 4.3 Comportement à l'état durci

### 4.3.1 Porosité accessible à l'eau

Après 28 jours de cure, la porosité totale accessible à l'eau a été mesurée sur des éprouvettes de mortier composées en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées. Les observations suivantes peuvent être notées d'après les résultats présentés à la figure 78 :

- Pour une même condition de cure, l'augmentation du taux de substitution du ciment par les fines de fibres-ciment non carbonatées conduit à une augmentation de la porosité des éprouvettes de mortier. Cette augmentation de la porosité est donc due non seulement à la porosité interne des fines de fibres-ciment, qui est supérieure à celle du ciment, mais également à la modification de la fluidité du mélange, qui diminue avec l'augmentation du taux de substitution ;
- Pour une même condition de cure et un même taux de substitution, les mortiers composés avec des fines de fibres-ciment carbonatées sont très légèrement moins poreux que ceux composés avec des fines de fibres-ciment non carbonatées. En effet, la carbonatation des matériaux cimentaires permet de réduire leur porosité. Par conséquent, cette diminution de la porosité est due non seulement à la réduction de la porosité intragranulaire du mortier durci, mais aussi à l'amélioration de la consistance du mortier frais, car les fines carbonatées absorbent moins d'eau de gâchage que les fines non carbonatées ;
- La conservation des mortiers dans une enceinte de carbonatation est la condition de cure la plus efficace pour réduire la porosité des mortiers durcis. Cela est dû au colmatage des pores du mortier par le carbonate de calcium produit lors de la réaction de carbonatation du ciment et des fines de fibres-ciment. Pour rappel, la réaction de carbonatation transforme l'hydroxyde de calcium en carbonate de calcium et tous les polymorphes du carbonate de calcium ont un volume molaire plus élevé que celui de l'hydroxyde de calcium ;

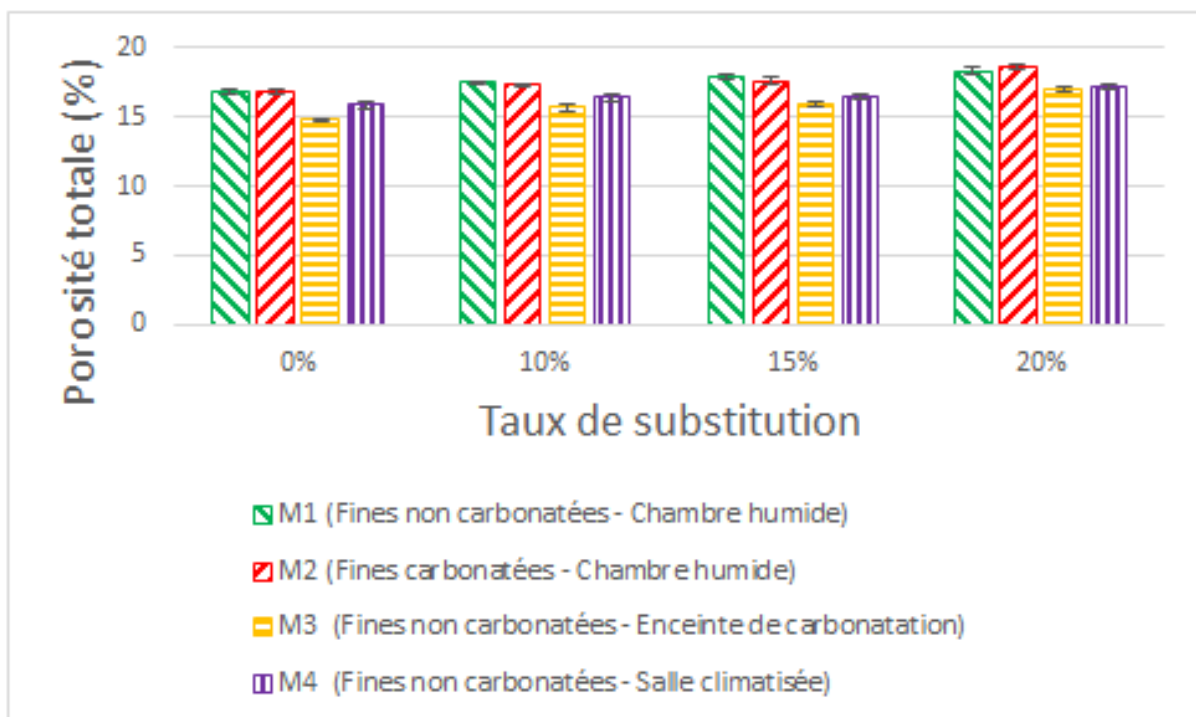


FIG. 78 Porosité des mortiers âgés de 28 jours et composés avec du ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure



### 4.3.2 Profondeur de carbonatation du mortier

Les essais de pulvérisation à la phénolphthaléine sont effectués sur des éprouvettes de mortier âgées de 28 jours. Les résultats de ces essais en fonction du taux de substitution du ciment par les fines de fibres-ciment et des conditions de cure sont présentés dans les figures 79 et 80. Il en ressort que la profondeur de carbonatation des éprouvettes de mortier curées dans l'enceinte de carbonatation augmente avec l'augmentation du taux de substitution. En effet, l'augmentation du taux de substitution induit une augmentation de la porosité, ce qui favorise la diffusion et la dissolution du dioxyde de carbone à travers les pores de la matrice cimentaire.

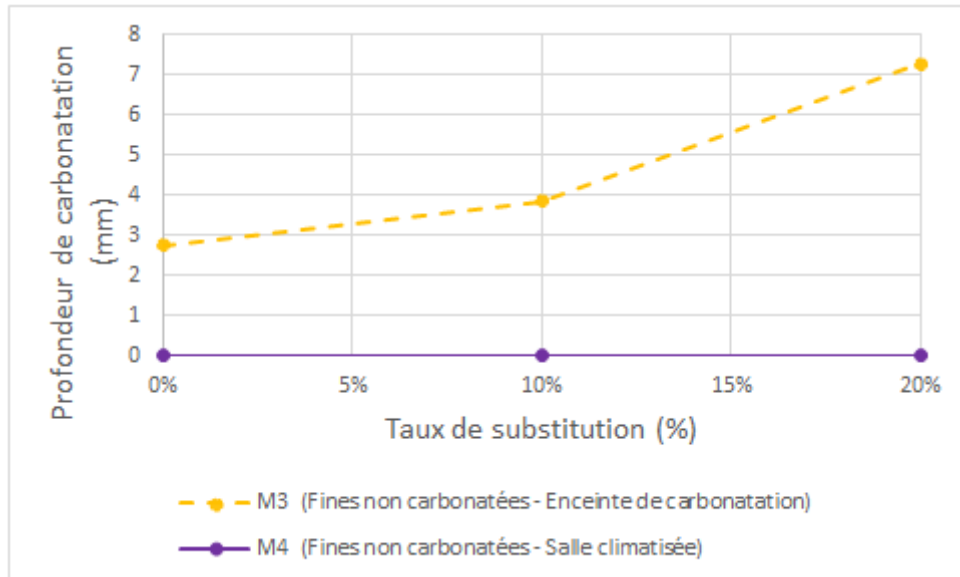


FIG. 79 Evolution de la profondeur maximum de carbonatation des éprouvettes de mortier curées dans l'enceinte de carbonatation (M3) en fonction du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées

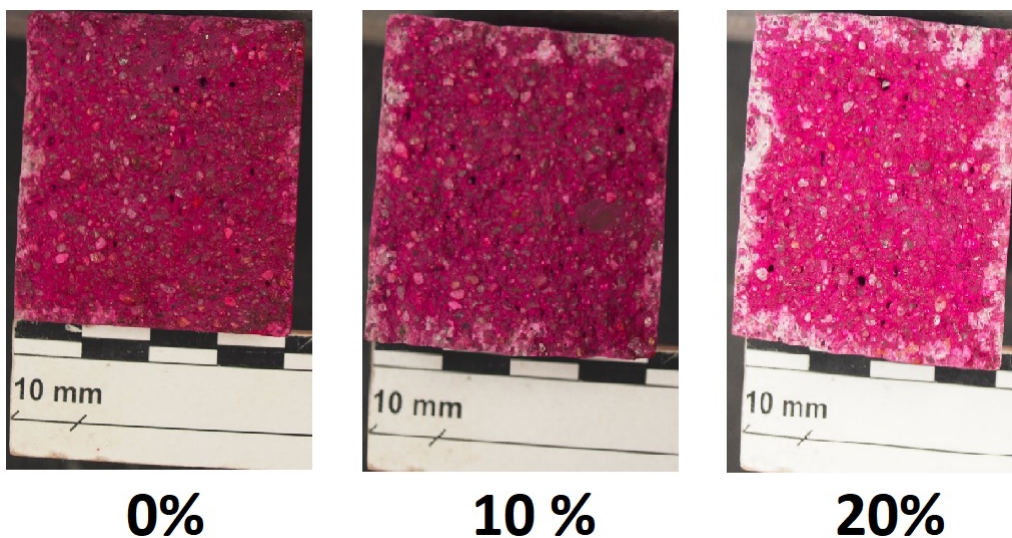


FIG. 80 Coloration des éprouvettes de mortier curées dans l'enceinte de carbonatation en fonction du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées

### 4.3.3 Résistance à court terme

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats des essais de détermination des propriétés mécaniques du mortier durci à court terme, notamment la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

#### 4.3.3.1 Résistance à la compression à court terme

Selon les résultats de la résistance à la compression à court terme des éprouvettes de mortier, présentés par la figure 81, les observations suivantes peuvent être notées :

- Après 7 jours de cure, pour un même taux de substitution, les éprouvettes de mortier M1 et M4 ont des résistances à la compression approximativement égales. Pour rappel, la cure dans la salle climatisée assèche les éprouvettes, réduisant ainsi la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment. Cependant, le fait d'obtenir la même résistance indique qu'après 7 jours de cure dans ces deux conditions, la teneur en eau du mortier est encore suffisante pour assurer l'hydratation du ciment ;
- Après 7 jours de cure, pour un même taux de substitution, les éprouvettes de mortier M3 atteignent de meilleures résistances à la compression que les éprouvettes de mortier M1 et M4. En plus d'avoir une teneur en eau suffisante pour assurer l'hydratation du ciment, les éprouvettes curées dans l'enceinte de carbonatation subissent une transformation de la portlandite en carbonate de calcium. Ce dernier augmente légèrement la résistance à la compression du mortier durci ;
- Après 7 jours de cure, pour un même taux de substitution, les éprouvettes de mortier M2 et M3 présentent des résistances à la compression similaires. Cependant, ces résistances sont nettement supérieures à celles des éprouvettes de mortier M1 et M4. En effet, la cure dans une enceinte de carbonatation et la carbonatation des fines réduisent la porosité des éprouvettes de mortier ;

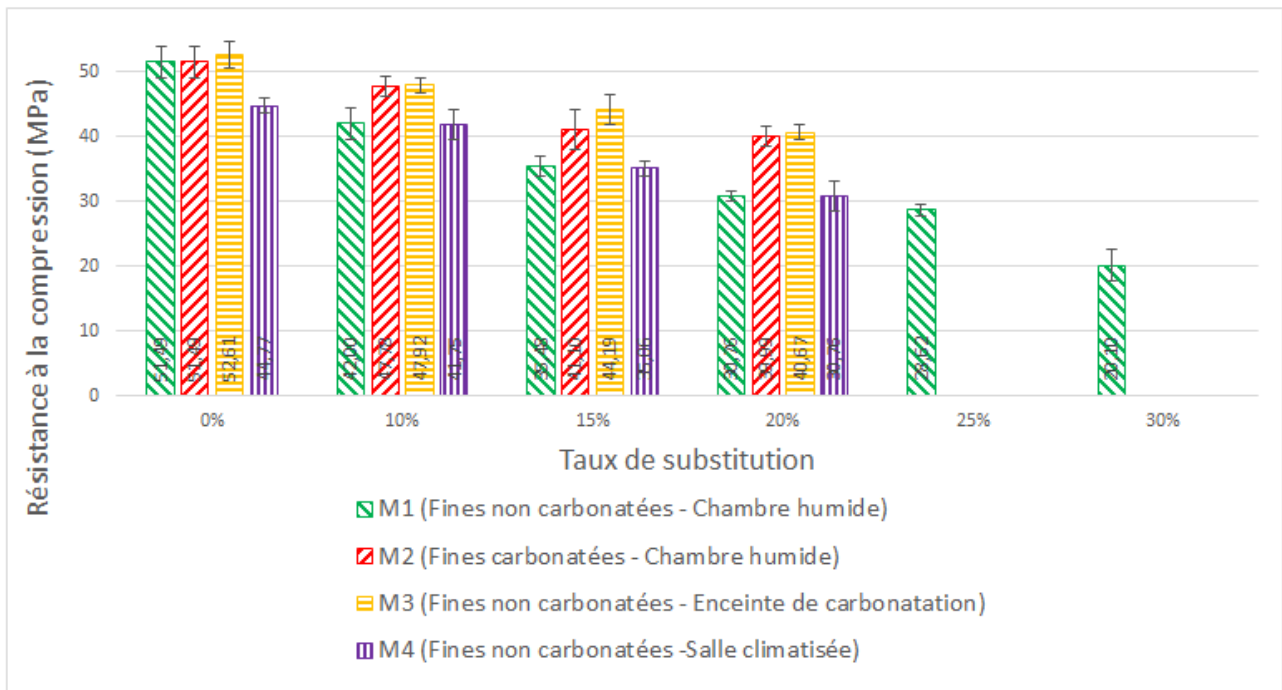


FIG. 81 Résistance à la compression après sept jours des mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

#### 4.3.3.2 Résistance à la flexion à court terme

L'essai de flexion est moins reproductible que l'essai de compression car il est plus sensible à la qualité de confection des éprouvettes et aux défauts de l'échantillon durci, tels que les fissures. Cette analyse prendra donc davantage en compte les barres d'erreurs. Selon les résultats de la résistance à la flexion à court terme des éprouvettes de mortier présentés dans la figure 82, les observations suivantes peuvent être notées :

- Après 7 jours de cure et pour un taux de substitution inférieur à 15 %, la résistance à la flexion des éprouvettes de mortier M2 est supérieure ou égale à celle du mortier de référence et à toutes les autres éprouvettes de mortier. En effet, comme nous l'avons mentionné dans la partie 4.2.1, pour un taux de substitution inférieur à 15 %, les mortiers composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées sont plus fluides que le mortier de référence. Cela permet de diminuer la porosité et donc d'améliorer les propriétés mécaniques du mortier ;
- Après 7 jours de cure, la résistance à la flexion des éprouvettes de mortier M1, M2 et M4 diminue avec l'augmentation du taux de substitution. En effet, l'augmentation du taux de substitution induit une augmentation de la porosité, ce qui a uniquement un effet défavorable sur les propriétés mécaniques du mortier lors d'une cure dans la salle climatisée et d'une cure dans la chambre humide ;
- Après 7 jours de cure et pour un taux de substitution inférieur à 20%, les éprouvettes de mortier M3 ont approximativement la même résistance à la flexion, quel que soit le taux de substitution. En effet, l'augmentation du taux de substitution entraîne une augmentation du volume des pores de l'échantillon, mais ces pores sont colmatés par les polymorphes de carbonate de calcium produits par la réaction de carbonatation. De plus, la profondeur de carbonatation est plus grande dans les éprouvettes les plus poreuses.

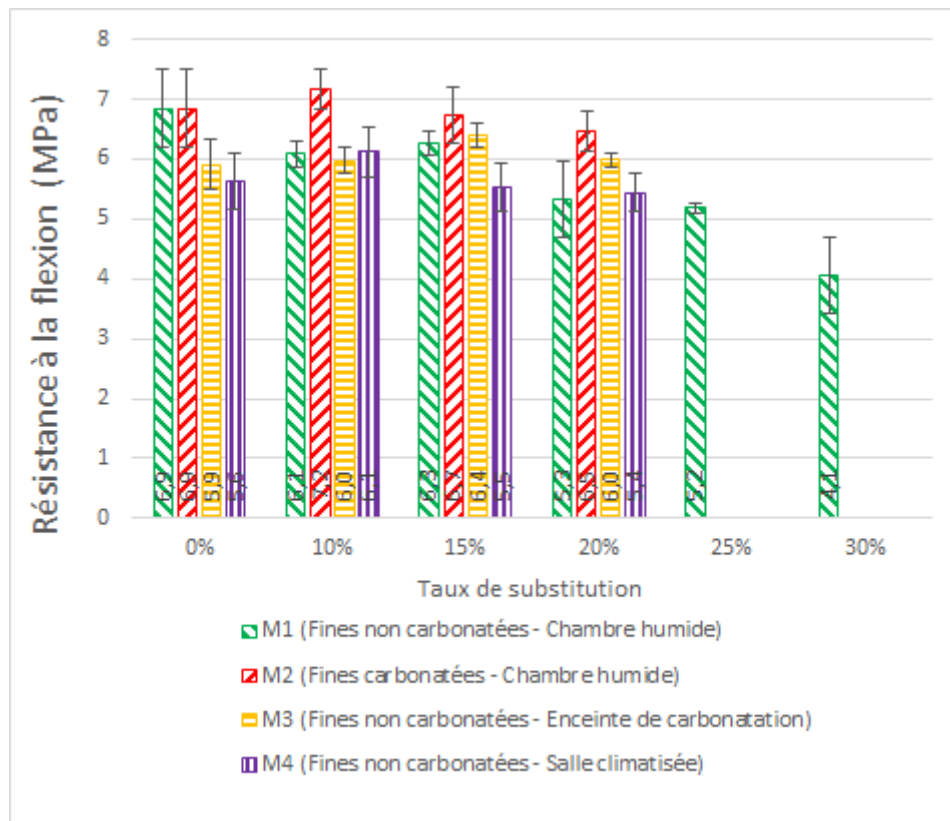


FIG. 82 Résistance à la flexion après sept jours des mortiers composés avec un ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

#### 4.3.4 Résistance après 28 jours

Selon les résultats de la résistance à la compression à court terme des éprouvettes de mortier présentés par les figures 83, 84, 84, 85 et 86, les observations suivantes peuvent être notées :

- Pour un même taux de substitution, les éprouvettes de mortier M1 atteignent des résistances mécaniques (flexion et compression) nettement supérieures aux éprouvettes de mortier M4. En effet, la cure dans la salle climatisée induit un séchage des éprouvettes, ce qui diminue la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment et favorise le retrait par séchage ;
- Pour une même condition de cure, les résistances mécaniques (flexion et compression) de toutes les éprouvettes de mortier diminuent avec l'augmentation du taux de substitution. Cette diminution de la résistance mécanique est due à l'augmentation de la porosité du mortier induite par l'augmentation du taux de substitution et à la diminution de la réactivité des fines de recyclage ;
- Pour un même taux de substitution, les éprouvettes de mortier M3 atteignent de meilleures performances à la flexion que toutes les autres éprouvettes de mortier (M1, M2 et M4), car elles sont moins poreuses et donc plus résistantes à la propagation des fissures ;
- Pour un taux de substitution inférieur ou égal à 15 %, les éprouvettes de mortier M1 et M2 atteignent des résistances à la compression similaires à celles des éprouvettes de mortier M3. En effet, la cure dans l'enceinte de carbonatation a à la fois un effet positif et un effet négatif sur la résistance à la compression. D'une part, elle réduit la porosité, ce qui limite la propagation des fissures. D'autre part, elle diminue la teneur en eau du mortier, ce qui est défavorable pour l'hydratation du ciment. En revanche, la cure dans une chambre humide est favorable pour l'hydratation complète du ciment, même si elle n'est pas la solution idéale pour réduire la porosité des éprouvettes de mortier ;
- Pour un taux de substitution inférieur ou égal à 15 %, les mortiers composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées ont un indice d'activité supérieur à 75 %, qu'ils soient curés dans une chambre humide ou dans une enceinte de carbonatation (voir figure 85).

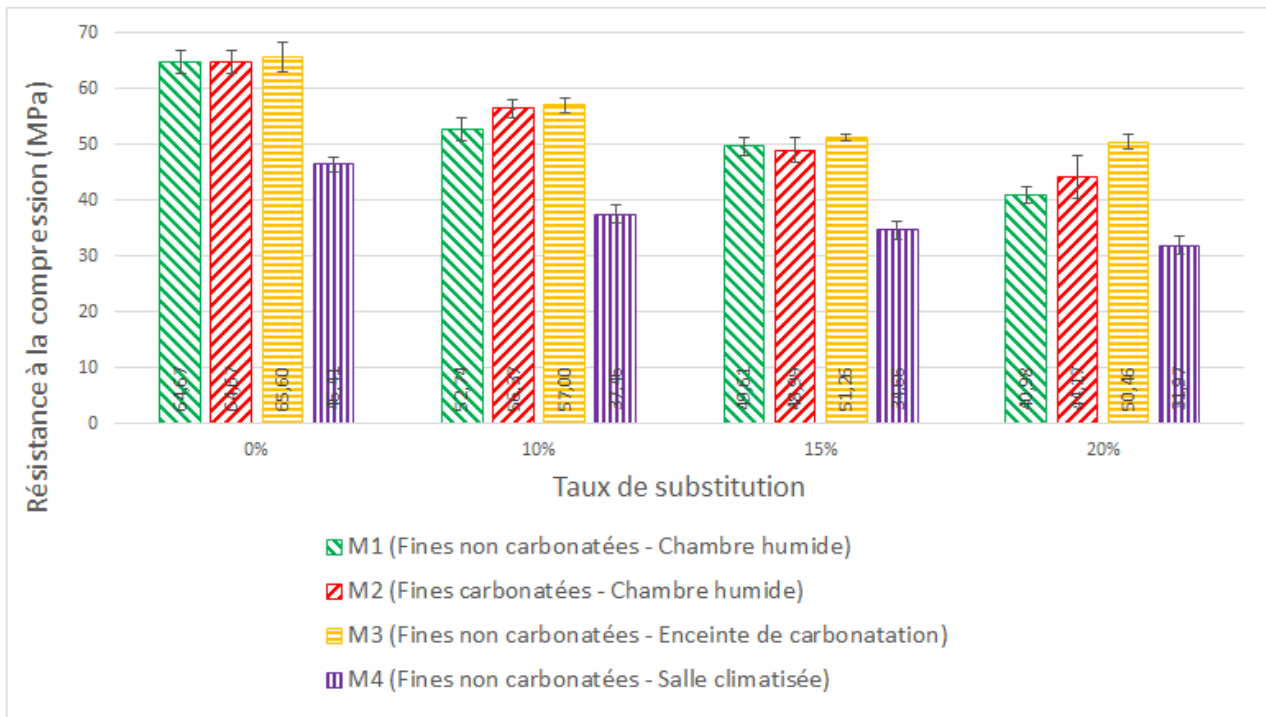


FIG. 83 Résistance à la compression après 28 jours des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

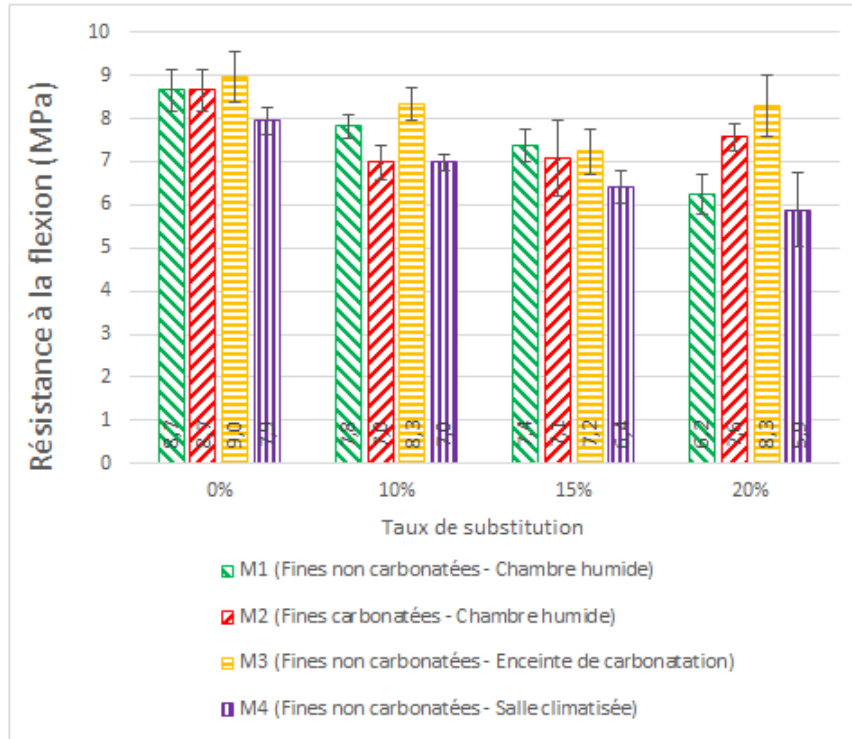


FIG. 84 Résistance à la flexion après 28 jours des ciment substitués par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

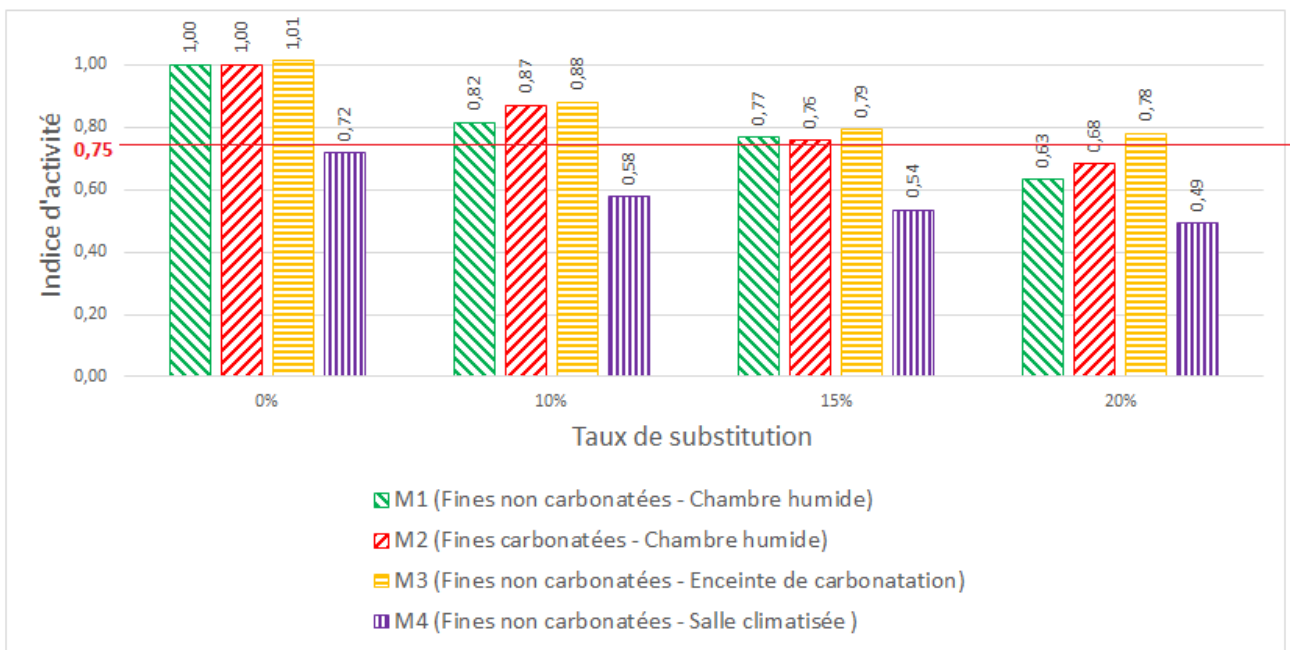


FIG. 85 Indice d'activité après 28 jours des mortiers à base de ciment substitué par des fines de fibres-ciment en fonction du taux de substitution et des conditions de cure

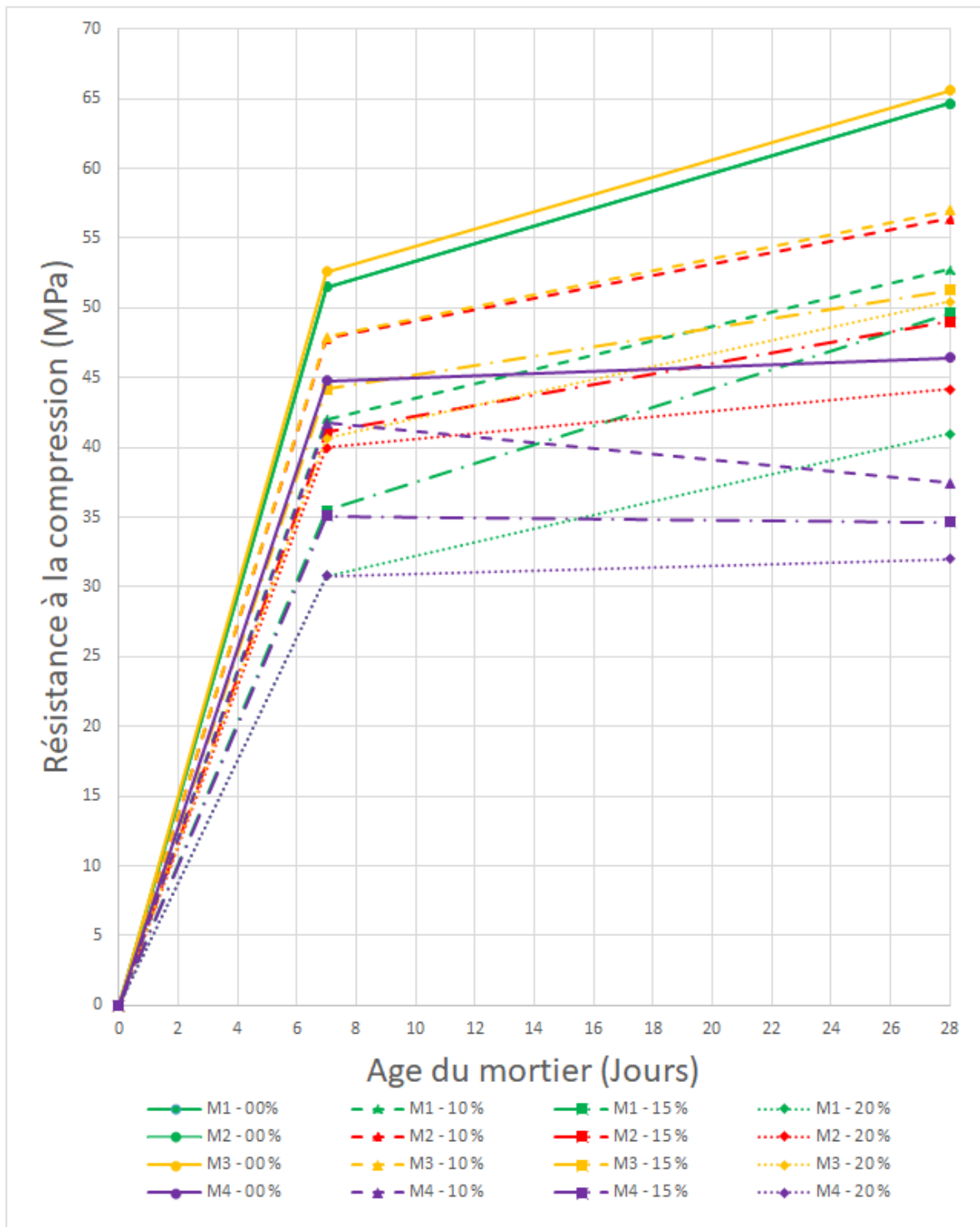


FIG. 86 Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes de mortier en fonction du temps, des conditions de cure et du taux de substitution du ciment par les fines de fibres-ciment (M1: Fines non carbonatées & cure dans la chambre humide ; M2: Fines carbonatées & cure dans la chambre humide ; M3: Fines non carbonatées & cure dans l'enceinte de carbonatation ; M4: Fines non carbonatées & cure dans la salle climatisée)

## 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 5.1 Conclusions

L'objet de ce travail de fin d'études était d'apporter une valeur ajoutée aux déchets de matériaux en fibres-ciment. Pour ce faire, ces matériaux ont été broyés jusqu'à obtenir une granulométrie allant de 0 à 100  $\mu\text{m}$ . Les fines de fibres-ciment ainsi obtenues ont ensuite été soumises à un processus de carbonatation afin de les utiliser comme substitut partiel du ciment dans la composition des mortiers.

Les objectifs principaux de cette étude étaient donc, d'une part, d'évaluer l'effet de la carbonatation sur les propriétés géométriques, physiques et la composition minéralogique des fines de fibres-ciment. D'autre part, il s'agissait d'évaluer l'impact de la substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées sur les caractéristiques du mortier à l'état frais et durci.

Les essais de caractérisation des matériaux utilisés ont montré que les fines de fibres-ciment ont une granulométrie supérieure à celle du ciment, mais une surface spécifique totale (interne et externe) largement supérieure à celle du ciment. Cela permet de conclure qu'elles sont beaucoup plus poreuses que le ciment. De plus, la transformation par réaction de carbonatation augmente leur surface spécifique totale (interne et externe) ainsi que leur masse volumique. Ces modifications de la structure des fines de fibres-ciment après carbonatation sont dues à la consommation de la portlandite et à la production du carbonate de calcium lors de la réaction de carbonatation.

Les essais réalisés sur les mortiers frais montrent que la consistance du mortier frais diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées ou non carbonatées. Cependant, les effets de cette substitution sur les temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment ne seront pas interprétés, car la teneur en eau à consistance normalisée n'a pas pu être évaluée.

Les essais porosimétriques réalisés sur le mortier durci ont montré que la condition de cure la plus favorable pour réduire la porosité du mortier est la cure dans l'enceinte de carbonatation. De plus, pour une même condition de cure, les mortiers composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment carbonatées sont moins poreux que les mortiers composés en substituant le ciment par des fines de fibres-ciment non carbonatées.

Les essais de détermination de résistance sur le mortier durci ont montré que, à court terme, la carbonatation des fines de fibres-ciment ou des éprouvettes de mortier permet d'augmenter les résistances du mortier (flexion et compression). Cependant, à long terme, pour un taux de substitution du ciment par les fines de fibres-ciment inférieur à 15 %, la carbonatation des fines ainsi que la carbonatation des éprouvettes ont peu d'incidence sur les résistances des éprouvettes de mortier.

En conclusion, la carbonatation des fines de fibres-ciment permet d'améliorer la durabilité et la maniabilité des mortiers lorsqu'on les substitue au ciment. De plus, cette substitution réduit les résistances mécaniques du mortier durci, mais l'indice d'activité reste supérieur à 75 % pour un taux de substitution inférieur à 15 % et une cure des mortiers dans la chambre humide ou dans l'enceinte de carbonatation.

### 5.2 Perspectives

Pour compléter ce travail, plusieurs études supplémentaires pourraient être envisagées, notamment :

- Étudier l'impact de la carbonatation sur la demande en eau et la distribution des tailles de pores des fines de fibres-ciment. Cela nous permettra de mieux comprendre comment cette carbonatation influence l'augmentation de la fluidité des mortiers composés lorsque le ciment est partiellement substitué par des fines de fibres-ciment carbonatées.
- Étudier les effets de la substitution du ciment par des fines de fibres-ciment sur les temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment ;
- Étudier l'impact environnemental non seulement du processus de broyage et de séchage des déchets de fibres-ciment, mais également du transport de ces déchets depuis les sites de démolition vers les installations de transformation par réaction de carbonatation.

## Références bibliographiques

- [1] K. Humphreys and M. Mahasanen. Towards a sustainable cement industry. substudy 8: climate change. 2002.
- [2] R. Rehan and M. Nehdi. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2):105–114, 2005.
- [3] Directive 2008/98/ce du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.
- [4] Gouvernement wallon. Plan wallon des déchets-ressources (pwd-r). 22 mars 2018.
- [5] A. Collignon and H. J. Gathon. Les déchets en belgique. 2010.
- [6] Y. Hou. Contribution au développement de la valorisation des déchets inertes du btp : Étude de la carbonatation des granulats recyclés compactés. 2021.
- [7] S. K. Kirthika and S. K. Singh. Durability studies on recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 250:118850, 2020.
- [8] M. Buyck. Gestion des déchets plastiques et détection de micro-déchets plastiques en station d'épuration en wallonie. 2018.
- [9] B. Pereira A. Vandeuren and P. Sonnet. Cartographie de l'aptitude des sols à recevoir l'épandage de boues de step selon les normes en etm. 2014.
- [10] S. Julien M. Cyr, G. Klysz and P. Clastres. Les cendres d'incinération de boues de stations de traitement des eaux polluées sont-elles utilisables dans les matrices cimentaires? *Déchets Sciences et Techniques*, 29:22–29, 2003.
- [11] A. Grellier. Des fines de brique de terre cuite comme liants de substitution dans les ciments et les matériaux alcali-activés. 2020.
- [12] N. Bourmatte and H. Houari. Caractérisation expérimentale des bétons et mortiers à base de granulats recyclés: béton de démolition et déchets de briques. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, pages 25–31, 2013.
- [13] M. Thiery. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires: prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. *Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées-série ouvrages d'art*, (OA 52), 2006.
- [14] M. Auroy. Impact de la carbonatation sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires. 2014.
- [15] H. Ranaivomanana. Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés: application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation. 2010.
- [16] D. Xuan X. Fang and C. S. Poon. Empirical modelling of  $CO_2$  uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions. *Materials and Structures*, 50:1–13, 2017.
- [17] R. Artoni J. M. Torrenti C. S. Hoffmann G. S. Dos Reis, B. Cazacliu and E. C. Lima. Coupling of attrition and accelerated carbonation for  $CO_2$  sequestration in recycled concrete aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*, 3:100106, 2021.
- [18] B. Capra V. Baroghel-Bouny and S. Laurens. La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. *La durabilité des bétons*, 2008.
- [19] Q. Liu S. Kou B. Zhan, C. S. Poon and C. Shi. Experimental study on  $CO_2$  curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 67:3–7, 2014.
- [20] Y. Masuda K. Yanagi H. Tanaka M. Abe, F. Tomosawa and I. Izumi. Experimental study on the prediction of carbonating rate of concrete: Part v. evaluation of accelerated carbonation test results. 1989.



- [21] K. Hirai J. John and H. Mihashi. Influence of environmental moisture and temperature on carbonation of mortar. *Concrete Research and Technology*, 1(1):85–94, 1990.
- [22] M. G. Richardson. Fundamentals of durable reinforced concrete. 2002.
- [23] J. M. Torrenti. Résultats du projet national fastcarb: stockage de  $CO_2$  par carbonatation accélérée du béton recyclé. 2022.
- [24] M. Carcasses F. Cassagnabere F. Cussigh J. Mai-Nhu L. Linger, P. E. Denis and P. Rougeau. Influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons—investigations menées dans le cadre de la construction de la nouvelle route du littoral sur l’île de la réunion.
- [25] V. Baroghel-Bouny. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. 1994.
- [26] A. Younsi P. Turcry, L. Oksri-Nelfia and A. Aït-Mokhtar. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. *Cement and Concrete Research*, 57:70–78, 2014.
- [27] N. Hyvert. Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton. 2009.
- [28] O. Amiri F. Kaddah, H. Ranaivomanana and E. Roziere. Evolution of the microstructure and shrinkage of recycled aggregates during accelerated carbonation. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(1):13–16, 2022.
- [29] P. Eloy E. M. Gaigneux K. Buysser-I. Van Driessche J. Schoon, L. Van der Heyden and N. De Belie. Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable portland clinker production. *Construction and Building Materials*, 36:391–403, 2012.
- [30] A. Izemmour and A. Korichi. Effet des fibres sur les propriétés des mortiers. 2021.
- [31] S. R. Torre V. Krelani F. de Silva L. Ferrara, S. R. Ferreira and R. D. T. Filho. Effect of cellulose nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement based composites. pages 325–330, 2015.
- [32] NBN EN ISO 8130-2: Poudres pour revêtement - partie 2: Détermination de la masse volumique à l’aide d’un pycnomètre à gaz. 2021.
- [33] F. Michel and L. Courard. Apport de la granulométrie laser dans la caractérisation physique des fillers calcaires. 2006.
- [34] NBN EN 196-3, Méthodes d’essai des ciments - partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité. 2016.
- [35] NBN EN 1015-3, Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - partie 3: Détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses). 1999.
- [36] NBN EN 196-1 , Méthodes d’essai des ciments - partie 1 : Détermination des résistances. 2016.
- [37] <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/dechets-et-pollution/production-de-dechets>. Consulté le 09 juin 2023.
- [38] L. O. Nelfia. Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques. (2015LAROS006), July 2015.
- [39] Y. F. Houst and F. H. Wittmann. Difusion de gaz et durabilité du béton armé. 1989.
- [40] W. Jaafar. Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons. *DEA Géomatériaux. Division Bétons et Composites Cimentaires. Section Microstructure et Durabilité du Béton, LCPC*, 2003.
- [41] M. M. Khenfer and P. Morlier. Caractérisation et microstructure des ciments renforcés de fibres de cellulose. *Bulletin-laboratoires des ponts et chaussées*, pages 49–58, 2000.
- [42] <https://www.cedral.world/-/dam/cedral-board-fiche-information-produit/pd21208/original/fiche-dinformation-produit—cedral-board.pdf?v=311923451>. Consulté le 09 juin 2023.

- [43] <https://www.cedral.world/fr-be/>. Consulté le 09 juin 2023.
- [44] N. Magalhães. Accumuler de la matière, laisser des traces. *Terrestres*, 2019.
- [45] K. Schenk et A. Schippers. Absorption revendiquée de co2 par le béton incorrecte.
- [46] N. Martin C. Hendriks E. Worrell, L. Price and L. O. Meida. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1):303–329, 2001.
- [47] E. Halleux. Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à madagascar. 2013.
- [48] <https://www.dekringwinkel.be/>. Consulté le 09 juin 2023.
- [49] S. De Brouwer J. P. Gérard and T. Bréchet. ” le recyclage en wallonie: pourquoi et comment développer le recyclage des déchets issus du secteur de la construction?
- [50] E. Gobbo. Déchets de construction, matières à conception : Analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en région de bruxelles-capitale. 2016.
- [51] Ministère de la Transition écologique et solidaire Commissariat général au développement durable. Le recyclage des déchets produits par l’activité de btp en 2014. 2018.
- [52] O. B. Isgor A. G. Razaqpur B. Fournier A. Abbas, G. Fathifazl and S. Foo. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and concrete composites*, 31(8):555–563, 2009.
- [53] J. M. V Gómez-Soberón. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and concrete research*, 32(8):1301–1311, 2002.
- [54] L. Evangelista and J. de Brito. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1):9–14, 2010.
- [55] T.C. Hansen and H. Narud. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete international*, 5(1):79–83, 1983.
- [56] M. Kawamura S. Hasaba and K. Torik. Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregates,(translation of the japan concrete institute), 3. 1981.
- [57] Bcsj. building contractors society of japan, study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete, committee on disposal and reuse of concrete construction waste. summary in concrete journal, 16(7):18–31, 1978.
- [58] Y. H. Loo R. S. Ravindrarajah and C. T. Tam. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of concrete research*, 39(141):214–220, 1987.
- [59] D. Tegguer. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*, 27(1):112–116, 2012.
- [60] C.S Poon S.C. Kou and M. Etxeberria. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(2):286–291, 2011.
- [61] <https://www.aquiris.be/fr/la-station-depuration-de-bruxelles-nord>. Consulté le 09 Juin 2023.
- [62] F. Gendron. Carbonatation des matériaux cimentaires: étude de la diffusion du  $CO_2$ . 2019.
- [63] T. C. Powers. A hypothesis on carbonation shrinkage. 1962.
- [64] C. M. Hunt and L. A. Tomes. Reaction of hardened portland cement paste with carbon dioxide. *J. Res. Natl. Bur. Stand. A*, 66:473–481, 1962.
- [65] [https://en.wikipedia.org/wiki/ludwig\\_hatschek](https://en.wikipedia.org/wiki/ludwig_hatschek). Consulté le 09 juin 2023.

- [66] A. Finet and R. Giuliano. Le groupe cimentier eternit et le scandale de l'amiante: essai d'explication par la gouvernance. *La Revue des Sciences de Gestion*, (5):33–42, 2012.
- [67] <https://www.cbr.be/fr/telechargements>. Consulté le 09 juin 2023.
- [68] ISO 13320 Particle size analysis — Laser diffraction methods. 2020.
- [69] NBN EN ISO 18757: Céramiques techniques - Détermination de la surface spécifique (aire massique) des poudres céramiques par adsorption de gaz à l'aide de la méthode bet. 2006.
- [70] L. Marmoret F. Achchaq, K. Djellab and H. Beji. Analyse thermogravimétrique appliquée aux matériaux isolants fibreux. *Laboratoire Des Technologies Innovantes, Amiens*, pages 1–6, 2014.
- [71] B. Larbi. Caractérisation du transport diffusif dans les matériaux cimentaires: influence de la microstructure dans les mortiers. 2013.
- [72] C. Galle. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and concrete research*, 31(10):1467–1477, 2001.

## 6 ANNEXES

### 6.1 ANNEXE A : Fiche technique échantillon Ciment Portland CEM I 52,5 N Juillet 2021

Parametre	Result	Unit
Analyseur	1	
Demande en eau	30.0	%
Début de prise	190	min
Fin de prise	235	min
Le Chatelier	2.0	mm
Date prép. Rilem	26-07-2021 1...	
RC 2j	34.5	N/mm <sup>2</sup>
RC 28j	66.2	N/mm <sup>2</sup>
Perte au feu	1.92	%
SiO <sub>2</sub>	20.34	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.79	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.35	%
CaO	64.13	%
Na <sub>2</sub> O	0.22	%
K <sub>2</sub> O	0.61	%
MgO	2.31	%
SO <sub>3</sub>	3.16	%
Cl	0.059	%
Somme des elements	99.27	%
Equivalent alcalis	0.62	%

## 6.2 ANNEXE B : Fiche technique du Ciment Portland CEM I 52,5 N

### Fiche Produit

Selon le Référentiel de Certification NF002 - Liants hydrauliques



Usine de Lixhe

CEM I

CEM I 52,5 N CE NF

Février 2022

Ciment Portland

#### Normes et certificats

Désignation	Certificat N°	Marque	Norme
CEM I 52,5 N CE	0965-CPR-C0019	CE	NBN EN 197-1
CEM I 52,5 N CE BENOR	22/02/019	BENOR	NBN B12, PTV 603
CEM I 52,5 N CE	1118-1020-21.1	KOMO	BRL 2601
CEM I 52,5 N CE NF	11.25	NF	NF 002

#### Composition déclarée

##### Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences		Origine
				Min	Max	
Clinker (K)	%	-	K97	95	100	Lixhe
Laitier (S)	%	-	-	-	-	-
Cendres volantes (V)	%	-	-	-	-	-
Calcaire (L,LL)	%	-	-	-	-	-
Filler	%	-	3	0	5	-

##### Ajouts en % du ciment fini

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences		Origine
				Min	Max	
Régulateur de prise 1	%	-	5	-	-	-
Régulateur de prise 2	%	-	-	-	-	-
Régulateur de prise 3	%	-	-	-	-	-
Régulateur de prise	%	-	5	-	-	-
Agent de mouture	%	-	0,06	-	-	BASF - GA1122
Agent réducteur *	%	-	0,5	-	-	Sulfate de fer

\* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), un agent réducteur est ajouté à certains ciments afin de limiter la teneur en chrome (VI) soluble à 0,0002% maximum.

#### Caractéristiques chimiques et minéralogiques

##### Ciment

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Résidu insoluble	%	EN 196-2	0,8	-	≤ 5,0
Perte au feu	%	EN 196-2	1,9	-	≤ 5,0
Chlorures	%	EN 196-2	0,07	-	≤ 0,10
SO <sub>3</sub>	%	EN 196-2	2,9	-	≤ 4,0
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	%	EN 196-2	0,71	-	≤ 0,83
Chrome (VI) *	%	EN 196-10	< 0,0002	-	≤ 0,0002
Sulfures	%	EN 196-2	-	-	-

\* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), la teneur en chrome (VI) soluble est limitée à 0,0002 % maximum.

##### Clinker

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
SiO <sub>2</sub>	%	EN 196-2	20,7	-	-
CaO	%	EN 196-2	64,8	-	-
MgO	%	EN 196-2	1,9	-	≤ 5,0
C <sub>2</sub> A	%	Bogue	7,4	-	-
C <sub>3</sub> S	%	Bogue	67,3	-	-
C <sub>2</sub> S	%	Bogue	8,6	-	-
C <sub>4</sub> AF	%	Bogue	10,5	-	-



BENOR



CBR

Assistance Technique

Parc de l'Alliance

Boulevard de France 3-5

B-1420 Braine-l'Alleud - Belgique

Tel : + 32 2 678 35 10

Fax : + 32 2 675 23 91

ta@cbr.be

www.cbr.be