



UNIVERSITÉ DE LIÈGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Durabilité des liants fabriqués à partir de fines provenant du recyclage de brique

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE MASTER
INGÉNIEUR CIVIL DES CONSTRUCTIONS PAR MARTIN WINTGENS

Promoteur : L. COURARD

Année académique 2018-2019

Jury : F.MICHEL
B.MIHAYLOV
H.BREQUEL

Résumé

La production de déchets de construction et de démolition est considérable. Des solutions doivent être pensées pour limiter leur quantité. Il faut également essayer de valoriser ces déchets en leur donnant une seconde vie afin de diminuer leur volume mais également de restreindre la consommation des matières premières. Ce mémoire traite donc de la valorisation de déchets de brique recyclée issus de la construction ou de la démolition.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'évaluer l'influence des fines et des sables de brique recyclée sur la durabilité de mortier/béton auto-compactant. Il fait suite au travail de Mr. Enrico Tabarelli qui évaluait l'influence des fines et sables de brique recyclée sur le comportement à l'état frais et les résistances mécaniques à l'état durci de béton/mortier auto-compactant.

Pour évaluer cette influence sur la durabilité, différents essais ont été réalisés sur des mortiers auto-compactants composés de fines et de sable de brique recyclée. Différents pourcentages de substitution seront utilisés avec au total : 4 mélanges composés de sable de brique + 1 mélange de référence et 4 mélanges composés de fines de brique + 1 mélange de référence.

Les essais réalisés lors de ce travail sont les suivants :

- Carbonatation
- Diffusion d'ions chlorure en régime stationnaire
- Diffusion d'ions chlorure forcée
- Attaque des sulfates
- Retrait
- Absorption d'eau

Les observations et les analyses réalisées sur les résultats des différents essais montrent que l'influence des fines et des sables de brique sur la durabilité est positive sur certains critères et négative pour d'autres.

Effectivement, l'augmentation du pourcentage de brique dans les mortiers diminue leur porosité aux ions chlorure mais diminue également leur résistance à la carbonatation.

Plus particulièrement, les sables de brique ont une influence négative sur l'absorption d'eau des mortiers tandis que les fines de brique n'ont aucune influence sur ce paramètre.

Le retrait quant à lui n'est pas influencé par l'augmentation de sable de brique mais a tendance à diminuer lorsque des fines de brique sont utilisées.

En général, les fines de brique ont une influence plus positive que les sables de brique sur les indicateurs de durabilité des mortiers auto-compactant.

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier Monsieur Luc Courard, promoteur de ce mémoire, pour le suivi et l'aide qu'il m'a apportés durant toute la durée de mon travail de fin d'études. Merci pour ses conseils et son soutien précieux.

Ensuite, je voudrais également remercier Monsieur Frédéric Michel qui m'a été d'une grande aide pour analyser, comprendre et interpréter mes résultats afin de les présenter de la meilleure manière possible dans ce mémoire. Merci également pour la lecture finale du travail.

Je tiens aussi particulièrement à remercier l'ensemble des membres du laboratoire des matériaux de construction pour leur aide et leur disponibilité tout au long du quadrimestre. Un grand merci à Amaury Daras, Véronique Szepetiuk et tout particulièrement à Monique Denotte et Fabienne Libioulle qui m'ont plus spécifiquement suivi et guidé durant la réalisation de mes essais.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Mihaylov et Monsieur Brequel pour la lecture de ce travail.

Enfin, je remercie mes parents qui m'ont soutenu tout le long de mes études et également ma tante Maryline qui a corrigé, à plusieurs reprises, l'orthographe de ce mémoire.

Table des matières

1	Introduction générale	1
I	État de l'art	3
2	Déchets de construction et de démolition	4
2.1	Classification des déchets de construction et de démolition	4
2.2	Contexte global	5
2.3	Recyclage des C&DW	8
2.4	Recyclage des C&DW dans les mortiers auto-compactants	13
2.5	Impact des matériaux recyclés sur la durabilité des bétons et des mortiers	17
3	Béton auto-compactant	21
3.1	Introduction	21
3.2	Matériaux utilisés dans les bétons auto-compactants	22
3.3	Composition du mélange	24
3.4	Avantages et désavantages	25
3.4.1	Avantages	25
3.4.2	Désavantages	25
3.5	Applications	26
4	Durabilité des matières à base de ciment	28
4.1	Retrait	28
4.2	Carbonatation	29
4.3	Diffusion d'ions chlorure	31
4.4	Attaque des sulfates	33
5	Indicateurs de durabilité	36
5.1	Barrière physique	37
5.1.1	Porosité accessible à l'eau	37
5.1.2	Structure et taille des pores	37
5.1.3	La perméabilité à l'eau et au gaz	38
5.1.4	Diffusion des ions	39
5.2	Barrière chimique	40
5.2.1	Teneur en portlandite	40
II	Programme de recherches expérimentales	41
6	Matériaux utilisés dans la composition des mortiers étudiés	42

6.1	Ciment Portland CEM I 52.5 N	42
6.2	Fines de calcaire	42
6.3	Sable de calcaire	43
6.4	Sable normalisé [EN 196-1]	44
6.5	Matériaux recyclés : Brique	44
6.5.1	Préparation des matériaux	44
6.5.2	Composition chimique de la brique	46
6.5.3	Sable de brique 0/4 mm	46
6.5.4	Poudre de brique 0/1000 μm	47
7	Composition et réalisation des mortiers	49
7.1	Fines de brique	49
7.2	Sable de brique	51
8	Description des tests réalisés	53
8.1	Carbonatation	53
8.2	Diffusion d'ions chlore en régime stationnaire	56
8.3	Diffusion d'ions chlorure forcée	61
8.4	Attaque des sulfates	64
8.5	Retrait	66
8.6	Absorption d'eau par immersion	66
III	Analyse des résultats	68
9	Carbonatation : Présentation et analyse des résultats	70
10	Diffusion d'ions chlorure forcée : Présentation et analyse des résultats	77
11	Diffusion d'ions chlorure en régime stationnaire : Présentation et analyse des résultats	81
12	Attaque des Sulfates : Présentation et analyse des résultats	86
13	Retrait : Présentation et analyse des résultats	88
14	Absorption d'eau : Présentation et analyse des résultats	91
15	Conclusion et recommandations	94
A	Durabilité : Classe d'exposition [43]	96
B	Fiche technique : Ciment Portland [CEM I 52.5 N]	97
C	Fiche technique : Sable normalisé [EN 196-1]	99
D	Fiche technique Filler calcaire	100
E	Fiche technique : Briques	101
F	Diffusion forcée : Essai de l'appareil à 60V	102

G	Résultats de la carbonatation après 28 jours	103
H	Carbonatation des échantillons après 56 jours	104
I	Diffusion d'ions chlorure forcée : Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°1 et n°2)	106
J	Résultats des prélèvements pour la diffusion stationnaire	108
K	Paramètres pour le calcul des coefficients de diffusions pour tous les échantillons (Diffusion stationnaire)	109
L	Résultats Attaque des Sulfates	110
M	Mesures du Retrait	112
N	Retrait : Résultats d'une étude réalisée à l'université de Médéa, Algérie	113

Table des figures

2.1	Rapport de production de déchets dans l'Union européenne [19]	6
2.2	Consommation de matières premières aux États-Unis entre 1900 et 1995 [28]	6
2.3	Développement de la consommation en matières premières en Chine [31]	7
2.4	Gestion des déchets minéraux dans l'Union européenne (+Norvège et Islande) [39] .	8
2.5	Comparaison entre une économie linéaire et une économie circulaire [1]	9
2.6	Apparence des granulats recyclés [52]	10
2.7	Résistance en compression de cubes (à gauche) et de cylindres (à droite) par rapport au temps de cure [40]	11
2.8	Mode opératoire pour l'obtention de granulats recyclés [52]	12
2.9	Transformation des matériaux après leur recyclage [9]	13
2.10	Composition des éprouvettes [5]	14
2.11	Résistance en compression des éprouvettes contenant de la brique recyclée [5] . . .	14
2.12	Absorption d'eau des mortiers auto-compactants (13 mélanges différents) [5]	15
2.13	Résistance à la flexion (gauche) et à la compression (droite) de mortiers auto-compactants avec substitution de poudre de brique [50]	16
2.14	Résistance à la flexion (gauche) et à la compression (droite) de mortiers auto-compactants avec substitution de sable de brique [50]	16
2.15	Profondeurs de carbonatation (à gauche) et évolution du coefficient de diffusion "apparent" en fonction du pourcentage de substitution (à droite) [26]	17
2.16	Variation de longueur due au retrait (à gauche) et expansion causée par des cycles gel-dégel (à droite) [6]	18
2.17	Evolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps (à gauche) et coefficient de diffusion "apparent" après 28 et 91 jours (à droite) [51]	19
3.1	Comparaison entre un béton ordinaire et un béton auto-compactant [7]	22
3.2	Loi de comportement de Bingham [24]	24
3.3	Exemple de coffrages complexes pour la réalisation de pièces en béton armé [37] [41]	27
4.1	Fissures induites par du retrait [14]	29
4.2	Processus de carbonatation [18]	30
4.3	Exemple de dégâts provoqués par la carbonatation [22]	31
4.4	Corrosion des armatures provoquées par les ions chlorure [18]	32
4.5	Dégâts engendrés par la corrosion des armatures par les ions chlorure [18]	33
4.6	Dégâts engendrés par l'attaque des sulfates sur le béton [36]	34
5.1	Etapes qui mènent à la dégradation d'un béton provoqué par son environnement extérieur [23]	36
5.2	Schématisation d'un matériau poreux [23]	37
5.3	Coupe de ciment hydraté [38]	38
5.4	Loi Darcy permettant de définir la perméabilité [44]	39

6.1	Courbe granulométrique des fines de calcaire [50]	43
6.2	Courbe granulométrique du sable de calcaire [50]	43
6.3	Briques recyclées et cassées en morceaux de tailles inférieures à 200mm [50]	44
6.4	Concasseur à mâchoires [10]	45
6.5	Matériaux obtenus après le passage dans les concasseurs à mâchoires D220 et D120 [50]	45
6.6	Courbe granulométrique du sable de brique [50]	47
6.7	Courbe de porosimétrie mercure de la brique	47
6.8	Courbe granulométrique des fines de brique et des fines de calcaire [50]	48
7.1	Malaxeur utilisé pour réaliser les mortiers (Capacité Max : 2.5 kg)	51
7.2	Malaxeur utilisé pour réaliser les mortiers (Capacité Max : 5 kg)	51
8.1	Échantillons réalisés pour les essais de carbonatation	54
8.2	Fendeuse	54
8.3	Première mesure de carbonatation au jour "0"	55
8.4	Caisson de stockage des éprouvettes pour l'essai de carbonatation (Concentration $CO_2 = 1 \%$, Température = $23^\circ C \pm 1^\circ C$, Humidité = $65 \% \pm 5 \%$)	55
8.5	Exemple de marquage des surfaces d'un échantillon de carbonatation	56
8.6	Cellules de diffusion d'ions chlore	56
8.7	Moulage des échantillons destinés aux essais de diffusion des ions chlore	57
8.8	Carottage et sciage des échantillons	58
8.9	Échantillons réalisés pour les essais de diffusion d'ions chlore (Diffusion en régime stationnaire et Diffusion forcée	58
8.10	Saturation en eau de chaux des échantillons destinés à l'essai de diffusion d'ions chlore en régime stationnaire	59
8.11	Échantillon cylindrique pour le test de diffusion d'ions chlore forcée recouvert d'une résine époxy	61
8.12	Saturation en eau des échantillons destinés à l'essai de diffusion d'ions chlore forcée	62
8.13	Dispositif expérimental pour l'essai de diffusion d'ion chlore forcée [17]	62
8.14	Classe de perméabilité des bétons en fonction du courant total ayant traversé l'éprouvette durant l'essai [12]	63
8.15	Échantillons réalisés pour les essais d'attaque sulfate	65
8.16	Rétractomètre mesurant la variation de longueurs des barrettes de mortier en microns	65
8.17	Échantillons récupérés et modifiés pour réaliser l'essai d'absorption d'eau par immersion	67
9.1	Carbonatation après 56 jours pour les 5 mélanges avec du sable de brique	71
9.2	Carbonatation par surface après 56 jours pour les 5 mélanges avec du sable de brique	71
9.3	Profondeur de carbonatation après 56 jours pour les 5 mélanges avec des fines de brique	72
9.4	Profondeur de carbonatation par surface après 56 jours pour les 5 mélanges avec des fines de brique	72
9.5	Évolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps : Sable de brique	73
9.6	Évolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps : Poudre de brique	74
10.1	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°3) : Sable de brique	78
10.2	Quantité totale de courant (en coulombs) ayant traversé les échantillons (maximum et minimum) : sable de brique	78
10.3	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°3) : poudre de brique	79

10.4	Quantité totale de courant (en coulombs) ayant traversé les échantillons (maximum et minimum) : poudre de brique	79
11.1	Évolution de la concentration en ions chlorure des mortiers contenant du sable de brique	82
11.2	Coefficient de diffusion effectif des mortiers contenant du sable de brique	82
11.3	Évolution de la concentration en ions chlorure des mortiers contenant de la poudre de brique	83
11.4	Coefficient de diffusion effectif des mortiers contenant de la poudre de brique	83
12.1	Variation de la dimension longitudinale des mortiers au cours du temps : mortier SB-25	87
12.2	Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps : mortier PBNAE-100	87
13.1	Variation de la dimension longitudinale au cours du temps : sable de brique	88
13.2	Variation de la dimension longitudinale après 28 jours : sables de brique	89
13.3	Variation de la dimension longitudinale au cours du temps : poudre de brique	89
13.4	Variation de la dimension longitudinale après 28 jours : poudre de brique	89
14.1	Coefficient d'absorption d'eau : sable de brique	92
14.2	Coefficient d'absorption d'eau : poudre de brique	92
F.1	Essai sur mortier de référence : SB-0 n°3	102
F.2	Essai sur un béton test	102
G.1	Carbonatation après 28 jours des mortiers auto-compactants avec du sable de brique	103
G.2	Carbonatation après 28 jours des mortiers auto-compactants avec de la poudre de brique	103
H.1	Carbonatation après 56 jours (Sable de brique). Mélange correspondant de gauche à droite et de haut en bas : SB-0, SB-5, SB-10, SB-25, SB-50	104
H.2	Carbonatation après 56 jours (Poudre de brique). Mélange correspondant de gauche à droite et de haut en bas : PB-0, PBNAE-50, PBNAE-100, PBAE-50, PBAE-100	105
I.1	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°1 : Sable de brique	106
I.2	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°2 : Sable de brique	106
I.3	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°1 : Poudre de brique	107
I.4	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°2 : Poudre de brique	107
J.1	Concentration des prélèvements dans les cellules de diffusions des mortiers contenant du sable de brique	108
J.2	Concentration des prélèvements dans les cellules de diffusions des mortiers contenant de la poudre de brique	108
K.1	Calcul du coefficient de diffusion effectif pour les mortiers contenant du sable de brique	109
K.2	Calcul du coefficient de diffusion effectif pour les mortiers contenant de la poudre de brique	109
L.1	Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Sable de brique	110
L.2	Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Poudre de brique	110
L.3	Variation de la largeur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Sable de brique	111

L.4	Variation de la largeur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Poudre de brique	111
M.1	Mesures complètes du retrait : Sable de brique	112
M.2	Mesures complètes du retrait : Poudre de brique	112
N.1	Retrait pour des bétons avec Fines de brique (=FB) : C0/0 = 0% de FB, C0/25 = 25% de FB, C0/50 = 50% de FB, C0/75 = 75% de FB et C0/100 = 100% de FB [20]	113
N.2	Retrait pour des bétons avec Sable de brique (=SB) : C0/0 = 0% de FB, C 25/0 = 25% de SB, C 50/0 = 50% de SB, C 75/0 = 75% de SB et C 100/0 = 100% de SB, [20]	113

Liste des tableaux

2.1	Degré de facilité de recyclage pour différents C&DW	5
2.2	Composition des C&DW [39]	9
2.3	Identifications des mélanges avec différentes proportions de granulats recyclés [40]	10
2.4	Coefficient d'absorption d'eau par immersion	17
3.1	Pourcentage de béton auto-compactant dans la consommation totale de béton en 2000 [24]	26
5.1	Classes associées aux indicateurs de durabilité généraux [18]	40
6.1	Caractéristiques du ciment	42
6.2	Caractéristiques des fines de calcaire	42
6.3	Caractéristiques du sable de calcaire	43
6.4	Caractéristiques du sable normalisé [EN 196-1]	44
6.5	Composition chimique d'une brique rouge [50]	46
6.6	Caractéristiques du sable de brique	46
6.7	Caractéristiques des fines de brique	47
7.1	Masses des constituants des mortiers contenant de la poudre de brique (Quantité nécessaire pour les échantillons des tests de carbonatation et d'attaque des sulfates)	50
7.2	Masses des constituants des mortiers contenant de la poudre de brique (Quantité nécessaire pour les essais de diffusion d'ions chlore)	50
7.3	Masses des constituants des mortiers contenant du sable de brique (Quantité nécessaire pour les échantillons des tests de carbonatation et d'attaque des sulfates) . . .	52
7.4	Masses des constituants des mortiers contenant du sable de brique (Quantité nécessaire pour les essais de diffusion d'ions chlore)	52
9.1	Évolution de la pente de carbonatation [mm/jours] pour les 10 mortiers différents .	73
14.1	Valeur moyenne du coefficient d'absorption d'eau pour les 10 compositions de mortier différentes	91
15.1	Récapitulatif des résultats des différents essais. Légende : +++ = Très très positif, ++ = Très positif, + = Positif, 0 = Sans effet, - = Négatif, - - = Très négatif et - - - = Très très négatif	94

Chapitre 1

Introduction générale

La population mondiale est en constante augmentation. Alors que le nombre de personnes à loger ne cesse d'augmenter, les ressources disponibles sur la terre ne cessent de diminuer. L'homme utilise les matières premières que la terre lui fournit pour subvenir à ses besoins, mais que fera-t'il lorsque la planète sera "vidée" de ses ressources ?

La production mondiale de déchets est pharaonique, de 3.5 à 4 milliards de tonnes de déchets sont produits par an [45]. Le secteur de la construction n'est pas innocent bien au contraire. En effet, ce dernier serait responsable de 34.7% de la production de déchets en Europe , ce qui n'est pas négligeable. En ce qui concerne l'utilisation des matières premières, le domaine de la construction est certainement le mauvais élève, celui-ci consomme 40 à 50% des matières premières utilisées [19].

Les chiffres présentés ci-dessus sont la preuve qu'il est désormais temps de réagir et de trouver des solutions pour consommer moins de matières premières et également diminuer la production de déchets. Comment traiter ces deux problèmes en même temps ? Le recyclage. Effectivement, recycler les déchets consiste à leur donner une nouvelle vie, cela permet à la fois de diminuer la quantité de déchets tout en économisant des matières premières.

Ce travail de fin d'études concerne le recyclage d'un matériau issu des déchets de construction et bien connu : la brique. La brique est un matériau inerte (qui ne brûle pas, ne se décompose pas,...). Celle-ci est très présente dans les déchets de construction étant donné qu'elle représente 12 à 40% des déchets provenant des chantiers de construction ou de démolition. Uniquement les déchets de béton sont présents en plus grande quantité (40 à 84%)[39].

Dans ce mémoire, la brique sera utilisée pour composer des mortiers auto-compactants qui sont des liants permettant de lier les granulats d'un béton ensemble pour former un matériau cohésif. Ce mémoire sera la suite d'un travail de fin d'études réalisé en 2018 par Mr.Enrico Tbarelli, étudiant à l'université de Liège. Celui-ci a créé des mortiers auto-compactants contenant des déchets de briques recyclés et a évalué leur comportement à l'état frais (étalement, air content,...) et l'état durci (résistances mécaniques à la compression et à la flexion). Les résultats obtenus par Mr.Tabarelli étaient satisfaisants, d'où l'intérêt de poursuivre l'étude de ces mortiers.

Ce mémoire se penchera sur les mêmes mortiers mais visera à caractériser la durabilité de ceux-ci. L'objectif est donc d'évaluer l'influence de la brique recyclée sur la durabilité des mortiers auto-compactants en comparant les mélanges contenant la brique à des mortiers de référence, dépourvu de brique.

Le première partie du travail est appelée "Etat de l'art" et a pour but de résumer et rappeler certaines connaissances théoriques. Elle aborde tout d'abord la problématique des déchets de construction et de démolition. Ensuite, la notion de béton auto-compactant est abordée, suivie par l'explication des différents phénomènes nuisibles à la durabilité des bétons. Enfin, les indicateurs de durabilité sont passés en revue et décrits.

La deuxième partie est nommée "Programme des recherches expérimentales". Elle présente les différents matériaux utilisés pour la composition des mortiers étudiés. Après cela, elle explique la composition et la réalisation des différents mélanges. Finalement, elle décrit les différents tests réalisés sur les mortiers créés pour tenter de caractériser leur durabilité.

La troisième et dernière partie s'intitule "Analyse des résultats". Dans cette partie, tous les résultats des différents tests effectués dans le programme de recherches expérimentales seront présentés et analysés. Il faudra tenter de trouver des explications crédibles aux résultats qui découlent des essais.

La conclusion de ce travail de fin d'études tentera d'apporter une réponse quant à l'influence de l'utilisation de brique recyclée dans des liants. Cette influence est-elle positive ou négative ? Le but ultime de ce mémoire est de tenter de répondre à cette question et également de recommander de nouvelles études pour permettre à un autre chercheur d'approfondir le sujet par la suite.

Première partie

État de l'art

Chapitre 2

Déchets de construction et de démolition

2.1 Classification des déchets de construction et de démolition

Il y a 3 natures différentes de déchets de construction et de démolition (C&DW = Construction and demolition waste) : Les déchets inertes, les déchets non dangereux et non inertes et les déchets dangereux [16].

Les déchets inertes sont des déchets qui ne brûlent pas, qui ne se décomposent pas et qui ne produisent aucune autre réaction physique, chimique ou biologique qui pourrait mettre en danger la santé humaine. Quelques exemples de déchets inertes : béton, verre et pierre,... Sans oublier, évidemment, la brique qui fait partie de cette catégorie et qui constitue le matériau recyclé utilisé dans ce travail de fin d'études.

Les déchets non inertes et non dangereux sont comme précisé dans leur nom, non dangereux pour la santé de l'homme. Par exemple : métaux et leur alliage, bois, plastique, papiers et cartons,...

Les déchets dangereux sont, naturellement, nocifs et dangereux pour la santé humaine ainsi que pour l'environnement. Ces déchets doivent être tracés rigoureusement à l'aide d'un bordereau de suivi. Quelques exemples de déchets considérés comme dangereux : aérosols, produits contenant du goudron, lampes à économies d'énergie, bois traité avec des substances dangereuses,...

D'autres critères pourraient être utilisés pour classer les C&DW comme par exemple, un degré de facilité à recycler ces déchets. Le tableau 2.1 donne un degré, allant de 1 à 5, concernant la facilité de recyclage d'un type de C&DW. Plus le degré est élevé, plus il est simple de recycler le déchet en question [48].

C&DW	Note
Béton	4
Bois	3
Métal ferreux	5
Métal non-ferreux	5
Maçonnerie (Briques + Mortier)	3
Plastique	3
Verre	4
Carreaux en céramique	4
Laine minérale	2
Polystyrène	2
Papier	5

TABLE 2.1 – Degré de facilité de recyclage pour différents C&DW
[48]

Le matériau traité dans ce travail (la brique) n'est pas spécialement facile à recycler comme en témoigne sa note de 3, qui est également la note du plastique, un matériau plus qu'au centre des conversations actuellement pour la protection de l'environnement. Des matériaux comme le verre et le métal sont quant à eux aisés à recycler étant donné qu'il suffit simplement de les trier et de les faire fondre pour ensuite leur donner une nouvelle forme et donc une nouvelle vie.

2.2 Contexte global

L'activité humaine est source d'une énorme production de déchets. Cette production est un sujet d'actualité souvent évoqué et relié au problème, très souvent pointé, de la surconsommation de la population. Des chiffres stratosphériques de production de déchets peuvent être cités [45] :

- 3.4 à 4 milliards de tonnes de déchets sont produits tous les ans.
- 80 à 126 tonnes de déchets sont produits par seconde !
- 2.5 milliards de tonnes de déchets produits, chaque année, par l'Union européenne.

Le domaine de la construction n'est pas innocent dans cette production et contribue fortement aux chiffres présentés ci-dessus. Effectivement, le graphique de la figure 2.1 souligne l'impact de la construction dans la génération des déchets dans le monde. Pas moins de 34.7 % de déchets sont issus du domaine de la construction en Europe [19].

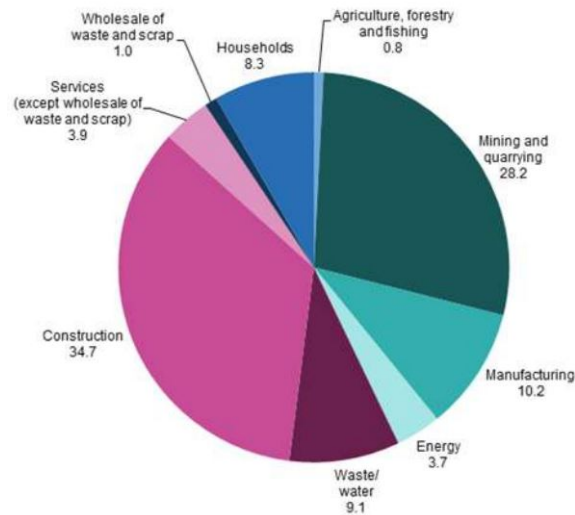


FIGURE 2.1 – Rapport de production de déchets dans l'Union européenne [19]

Le domaine de la construction est responsable de plus ou moins 40 % des émissions de CO_2 , il utilise également 40 à 50 % des matières premières. Un dernier chiffre, peut-être le plus marquant, le domaine de la construction utilise 40 % de l'énergie produite [19]. Dans le contexte actuel, où la lutte contre le réchauffement climatique devient, petit à petit, une priorité pour sauvegarder l'humanité, ces chiffres impressionnent et doivent absolument être limités afin de diminuer au maximum l'empreinte du domaine de la construction sur la dégradation de l'environnement.

Il est important de se rappeler que la terre ne possède pas des ressources illimitées. Les matières premières sont actuellement utilisées "sans limite" étant donné qu'il est moins onéreux d'aller chercher les matériaux à la source que de payer le traitement pour recycler des matériaux jetés afin de leur donner une nouvelle vie.

Le graphique de la figure 2.2 montre l'évolution de la consommation en matières premières aux États-Unis. Celui-ci montre l'augmentation de cette consommation mais également l'effet d'événements importants (1ère et 2ème guerre mondiale, récession...) qui ont, à chaque fois, eu tendance à faire chuter la consommation en matières premières. Au début du 20ème siècle, chaque américain consommait environ 2 tonnes de matériaux par an. Arrivé en 1995, cette valeur était multipliée par 5, 10 tonnes par an par personne ! [28]

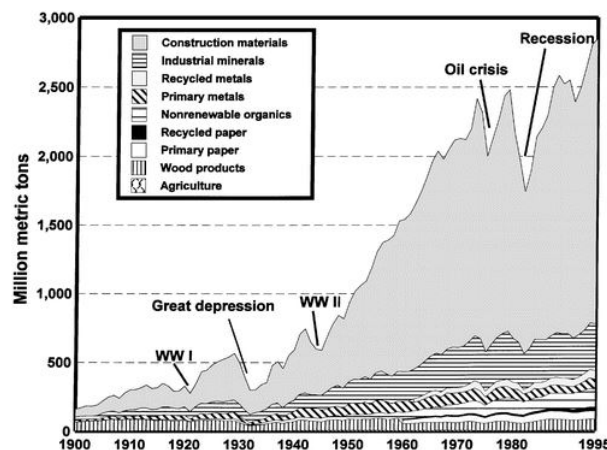


FIGURE 2.2 – Consommation de matières premières aux États-Unis entre 1900 et 1995 [28]

L'augmentation de la consommation des matières premières peut être le fruit de différentes causes, mais la principale est un développement économique important. Le meilleur exemple est le cas de la Chine. Effectivement, ce pays est en plein développement économique ces dernières années. Il a pour seul but de grandir, de se développer, et pour cela, il faut des matières premières. Cette demande croissante est représentée sur le graphique 2.3. Entre 1997 et 2007, la consommation en matières premières de la Chine a augmenté de 71.6 %, ce qui correspond à une augmentation de 5.5 % par an ! [31]

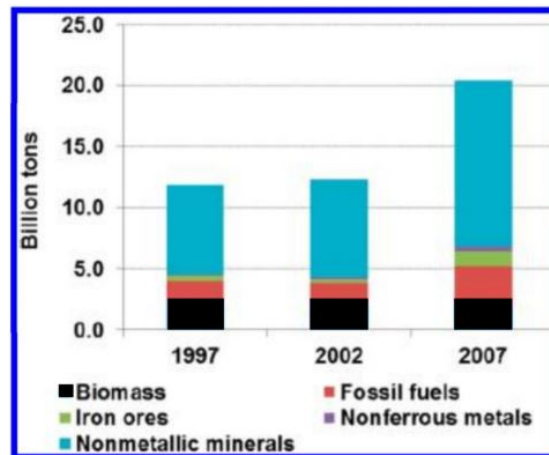


FIGURE 2.3 – Développement de la consommation en matières premières en Chine [31]

Le graphique de la figure 2.3 montre également que les matières dont la consommation augmente le plus entre 1997 et 2007 en Chine sont les minéraux non-métalliques (argile, sable et gravier, pierre calcaire et gypse,...) qui sont des matériaux utilisés essentiellement pour la production d'infrastructures tels que les routes, les logements, les écoles, [25]... En général, toutes les infrastructures dont la Chine a besoin pour se développer.

Ces quelques exemples prouvent la nécessité de diminuer notre consommation en matières premières étant donné que la terre n'est pas une source inépuisable. La question à laquelle il faut répondre est donc la suivante : comment diminuer la consommation des matières premières tout en poursuivant le développement des villes ? La réponse la plus intelligente : le recyclage.

Où en est le recyclage à l'heure actuelle dans l'Union européenne ? Il y a différentes manières de gérer les CD&W. Ils peuvent soit : être stockés (décharge) ou brûlés, cette solution n'est clairement pas idéale d'un point de vue environnemental et pour l'économie des matières premières. Soit, les utiliser dans le remblayage. Soit, les recycler pour leur donner une nouvelle vie. Le graphique de la figure 2.4 présente la gestion des déchets minéraux des 28 pays de l'Union européenne (+Norvège et Islande)[39].

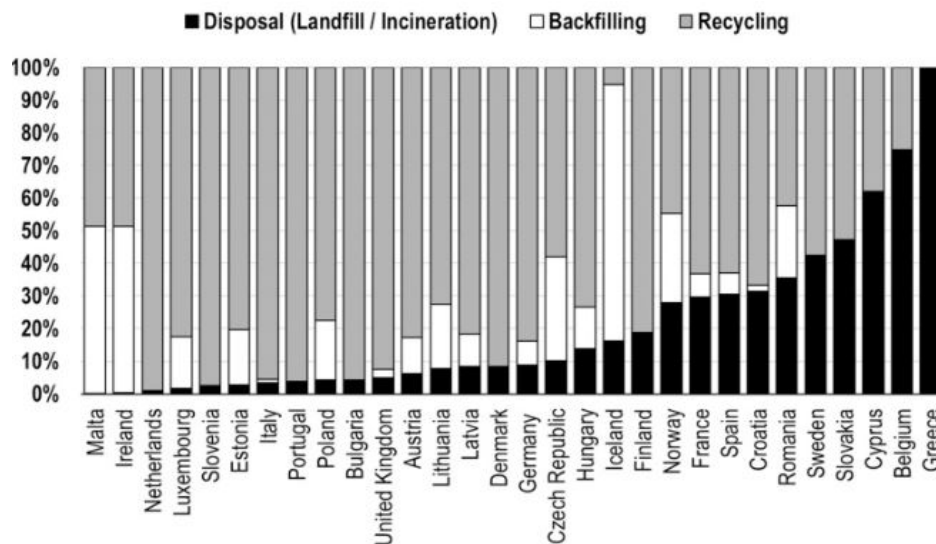


FIGURE 2.4 – Gestion des déchets minéraux dans l'Union européenne (+Norvège et Islande) [39]

La Belgique est un mauvais élève en terme de recyclage de déchets minéraux (béton, briques ou encore revêtement routier) étant donné qu'elle n'en recycle que $\pm 25\%$ contrairement à des pays comme l'Espagne ($\pm 60\%$) ou encore un exemple à suivre : les Pays-Bas ($\pm 98\%$)

2.3 Recyclage des C&DW

Le recyclage devient une nécessité aujourd'hui. Les hommes politiques en ont pris conscience et ont d'ailleurs fixé des objectifs chiffrés précis pour les années à venir. Ainsi, la directive n°2008/98/CE imposée par l'Union européenne fixe deux objectifs principaux aux Etats membres d'ici 2020 [21] :

- 50 % du poids des déchets ménagers (papier, métal, plastique et verre) devront être recyclés.
- 70 % du poids des matières devront être recyclés (comprend les opérations de remblayage qui utilisent des déchets et non des matières premières, les déchets non-dangereux de construction et de démolition)

Comme montré au-dessus (figure 2.4), des pays comme la Belgique ou encore la Grèce sont très loin de cet objectif et vont devoir rapidement appliquer des mesures. D'autres pays sont, quant à eux, déjà au-dessus des objectifs comme la Slovénie ou le Portugal et ont donc intérêt à continuer sur la même voie.

La réalisation de ces objectifs permettrait de diminuer considérablement la consommation des matières premières. Il faut maintenant déterminer des moyens pour les atteindre. L'idée serait de modifier le modèle économique pour passer d'une économie linéaire à une économie circulaire (figure 2.5).

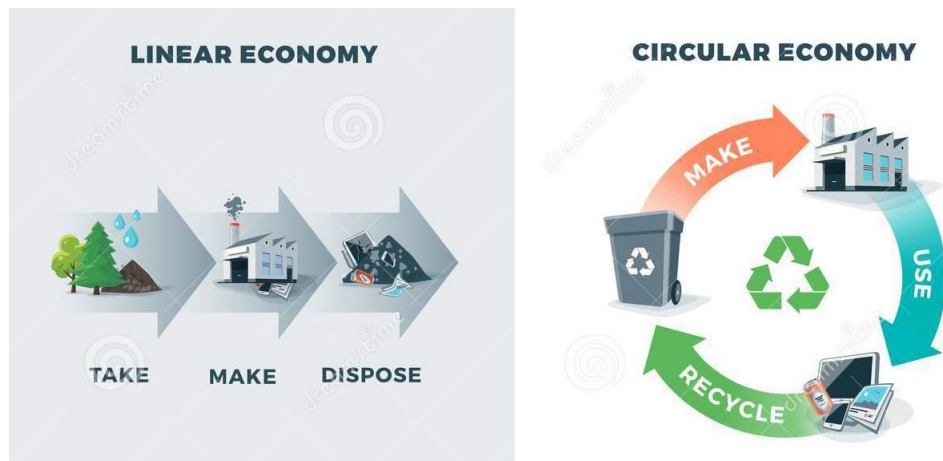


FIGURE 2.5 – Comparaison entre une économie linéaire et une économie circulaire [1]

Une économie circulaire prend en compte une gestion des déchets bien mieux organisée et durable. Une stratégie de gestion des déchets appelée "3 R" [19] pourrait assurer un développement durable et une réutilisation quasiment systématique des déchets de construction et de démolition. La stratégie des "3 R" correspond aux étapes suivantes :

- Réduction : concerne la réduction des déchets en règle générale.
- Réutilisation : concerne le processus pour donner un nouvel usage aux déchets.
- Recyclage : concerne le traitement nécessaire des déchets avant de pouvoir leur donner une nouvelle vie.

Cependant, la gestion des déchets dans le domaine de la construction est loin d'être aisée. Effectivement, il y a beaucoup de matériaux de natures différentes et cette hétérogénéité ne facilite évidemment pas le traitement de ceux-ci. Le tableau 2.2 présente un aperçu de la composition des CD&W [39].

Catégorie de déchets	% (min-max)
Béton et maçonnerie	40-84
Béton	12-40
Maçonnerie	8-54
Asphalte	4-26
Autres (minéraux)	2-9
Bois	2-4
Métal	0.2-4
Gypse	0.2-0.4
Plastique	0.1-2
Divers	2-36

TABLE 2.2 – Composition des C&DW [39]

Le béton et la maçonnerie (déchets inertes) sont clairement les déchets de construction les plus souvent rencontrés. Ce ne sont pas les matériaux les plus aisés à recycler comme le précisait la table 2.1, tandis qu'un matériau comme l'acier, qui est très facilement recyclable, est présent en petite quantité

dans les C&DW.

En ce qui concerne les déchets de béton, ceux-ci sont très souvent broyés en agrégats grossiers (5 à 25mm) pour être ensuite utilisés comme granulats dans des nouveaux bétons, en substitution des granulats naturels. Il s'agit très clairement de recyclage étant donné que ces déchets vont avoir une seconde vie et vont remplacer de la matière première qui sera économisée. L'apparence des granulats grossiers est trompeuse étant donné qu'un granulats recyclé est en fait constitué de granulats originaux du béton recyclé ainsi que du mortier original de ce même béton (figure 2.6) [52]

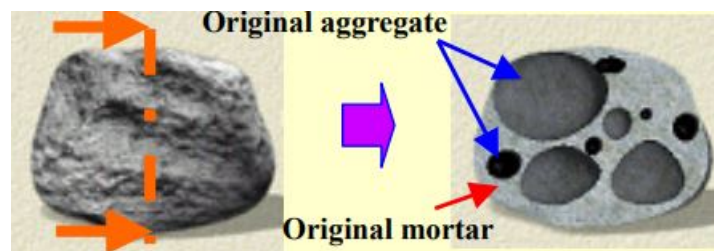


FIGURE 2.6 – Apparence des granulats recyclés [52]

Cette différence entre les granulats naturels et les granulats recyclés n'est pas sans importance étant donné que la masse volumique du béton va être modifiée. Effectivement, les granulats recyclés ont une densité inférieure car ils contiennent du mortier plus poreux [27].

Ce gain de porosité va entraîner également une détérioration de la qualité du béton. Les caractéristiques mécaniques (résistance en compression, en flexion,...) vont diminuer significativement plus le pourcentage de granulats recyclés (GR) utilisés dans un béton est grand.

Une étude réalisée par l'université SOA située à Bhubaneswar, Odisha, en Inde, démontre cette conclusion. L'étude concerne l'utilisation de granulats recyclés en substitution à des granulats naturels (GN) dans des bétons auto-compactants. Ces granulats recyclés sont issus d'une tour vieille de 25 ans. Cette dernière a été démolie et ses débris ont été récupérés et broyés pour produire des granulats recyclés. Uniquement les résultats des tests de compression et de flexion seront présentés ici. Les différents mélanges réalisés lors de cette étude sont disponibles dans le tableau 2.3[40] :

Légende du mélange	Proportion des GN et GR
NCARR 0	Béton vibré avec 100 % de GN
SCARR 0	Béton auto-compactant avec 100 % de GN
SCARR0.10	Béton auto-compactant avec 90 % de GN et 10 % de GR
SCARR0.20	Béton auto-compactant avec 80 % de GN et 20 % de GR
SCARR0.30	Béton auto-compactant avec 70 % de GN et 30 % de GR
SCARR0.40	Béton auto-compactant avec 60 % de GN et 40 % de GR

TABLE 2.3 – Identifications des mélanges avec différentes proportions de granulats recyclés [40]

L'étude consiste à mesurer la résistance en compression et en flexion des bétons de différentes compositions après différentes périodes. Les résistances ont été testées après 7, 28 et 90 jours. Les tableaux de la figure 2.7 présentent une partie des résultats de cette étude : les résistances en compression sur des cubes et des cylindres des différents mélanges identifiés au tableau n°2.3.

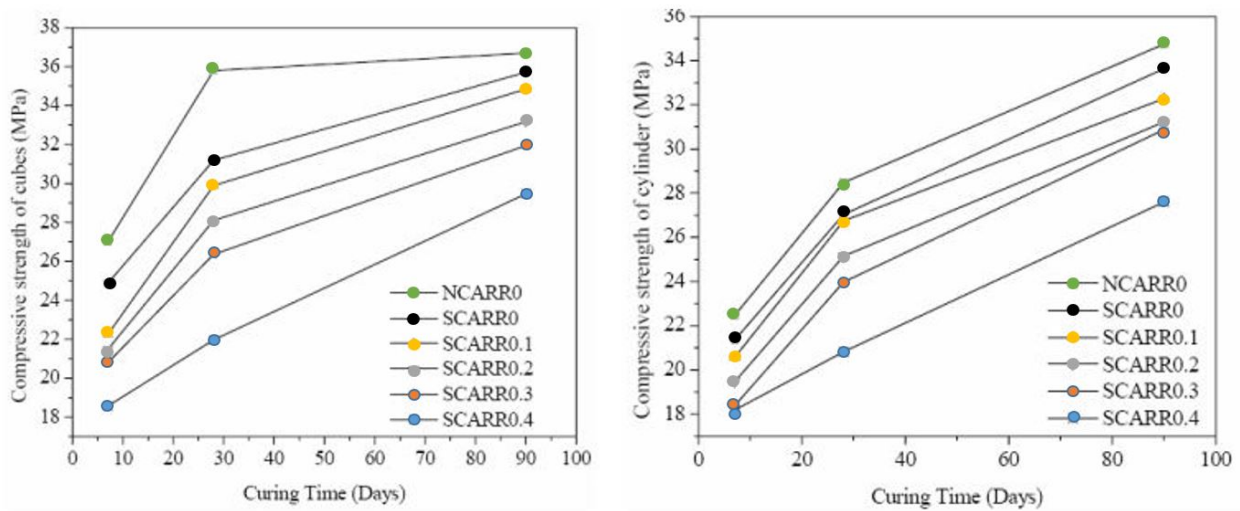


FIGURE 2.7 – Résistance en compression de cubes (à gauche) et de cylindres (à droite) par rapport au temps de cure [40]

La figure 2.7 confirme que l'utilisation de granulats recyclés a un effet dégradant sur la résistance des bétons. Il est évident que la résistance en compression des bétons diminue plus le pourcentage de GR augmente.

Comment recycler des déchets de béton ? Pour passer d'un béton à des granulats et des fines recyclées, un mode opératoire de broyage, développé par TEPSCO, est suivi (figure 2.8 [52]). Les déchets de béton sont d'abord passés sur un tamis vibrant. Ensuite, ils sont broyés par un concasseur à mâchoires. Les morceaux supérieurs sont évacués pour ne garder au final que des granulats de dimensions entre 5 à 25mm et également des fins agrégats et de la poudre allant de 0 à 5mm de diamètre. Dans la matière récupérée, 55 à 73 % sont des granulats recyclés (5 à 25mm de diamètre) et le reste (27 à 45 %) sont des fins agrégats et de la poudre recyclée (0 à 5mm de diamètre).

Il est important de préciser que la poudre recyclée provenant de déchets de béton n'est pas très valorisante étant donné qu'il y a des problèmes de qualité. Ces problèmes sont dus au fait que la poudre recyclée est constituée uniquement de mortier broyé, ce qui n'est pas gage de qualité. Différents processus de recyclage de la poudre de béton dans des ciments existent mais il est très difficile d'estimer la qualité de cette poudre ou encore d'estimer la rentabilité d'un éventuel traitement pour améliorer la qualité de la poudre.

En ce qui concerne le recyclage de la maçonnerie, un mode opératoire relativement similaire à celui suivi pour le recyclage du béton est utilisé. Les briques sont placées dans un concasseur à mâchoires qui va les broyer jusqu'à atteindre les dimensions souhaitées (utilisation de tamis). Mr. Tabarelli a réalisé ces différentes étapes pour obtenir le sable de brique et la poudre de brique utilisés pour réaliser les éprouvettes nécessaires à ce TFE. Les caractéristiques de ces matériaux seront présentées un peu plus loin dans le rapport [50].

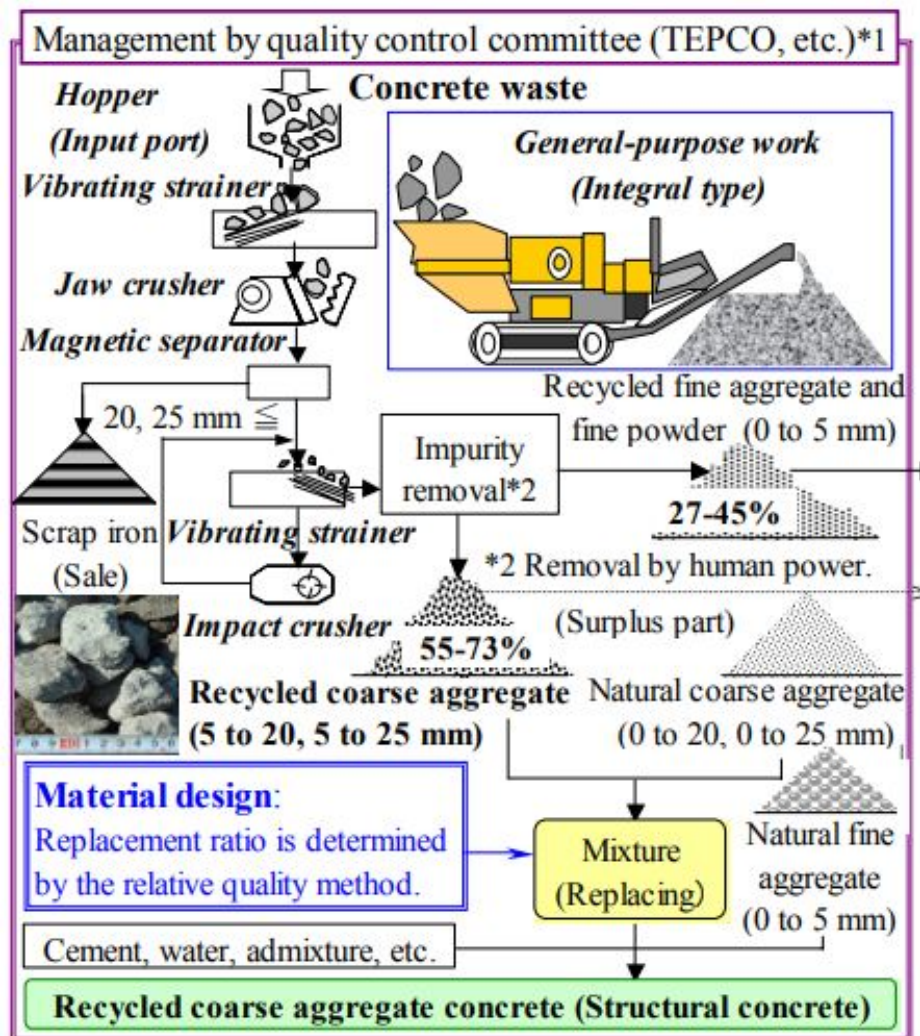


FIGURE 2.8 – Mode opératoire pour l'obtention de granulats recyclés [52]

Les paragraphes précédents concernent le recyclage des CD&W le plus souvent rencontré (béton et maçonnerie). Evidemment, il existe différents types de recyclage pour différents types de CD&W. En voici quelques exemples :

- Recyclage des déchets de bois : ceux-ci sont traités en deux catégories différentes : classe A et classe B. La classe A concerne les bois non traités comme par exemple les palettes, bois brut, bois sec,... Tandis que la classe B contient les bois faiblement traités avec les panneaux, les bois d'ameublement, les bois de démolition exempts de gravats (=CD&W),... Généralement, les bois recyclés de classe A sont utilisés en tant qu'énergie pour produire de l'électricité par combustion. Les bois de la classe B sont quant à eux, broyés et utilisés dans la production de panneaux de bois aggloméré [35].
- Recyclage des enrobés bitumineux présents dans l'asphalte : ces enrobés bitumineux (aussi appelés granulats bitumineux = GB) proviennent de revêtements de routes principalement (=CD&W). Ils sont composés de 5 % de bitume et 95 % de granulats. Les routes sont démolies et les GB sont récupérés grâce à des opérations "planage" (qui s'apparentent à du fraisage), "microplanage" ou encore "décohésionnement" de la matière pour la transformer en matériaux granulaires (=GB). Les GB sont ensuite réutilisés dans la construction de nouvelles routes avec l'avantage de présenter les mêmes fonctions que lors de leur première utilisation. Ils sont donc

« réutilisables » et permettent une nette économie de matière première[47].

- Recyclage des métaux de construction : les métaux sont, pour rappel, des matériaux très simples à recycler étant donné qu'il suffit simplement de les récolter, de les trier (ferreux, non ferreux,...) et enfin de les fondre pour les mouler à nouveau et obtenir ainsi la pièce désirée. Le métal dispose du même avantage que l'asphalte, sa qualité ne s'altère pas lors de son recyclage car les liaisons métalliques se rétablissent lors de la resolidification. Aujourd'hui, plus de 95 % des produits métalliques sont recyclés dans le domaine de la construction. Cela permet, entre autre, de préserver les matières premières mais également de réaliser des économies d'énergie allant de 60 à 95 % par rapport à la production de métal issu de la production primaire (avec extraction du minerai) [9].

L'image de la figure 2.9 illustre en quelque sorte les 3 modes de recyclage différents pour le béton (matériaux ne pouvant être refondus), le bois (matériaux fibreux) et les métaux. Elle résume bien l'utilisation des matériaux recyclés pour le béton (les granulats dans des nouveaux bétons), le bois (les fibres dans des panneaux de bois aggloméré) et les métaux (toute la matière est réutilisée et peut revenir à une forme identique à son origine) [9].

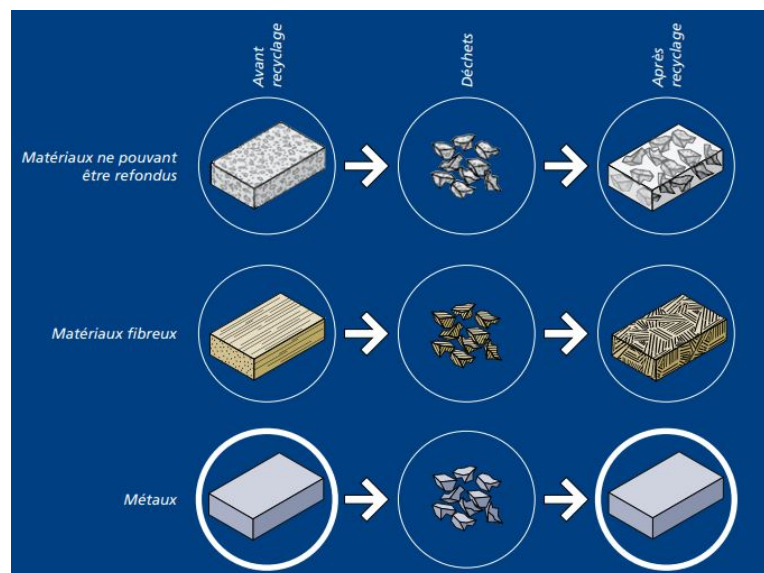


FIGURE 2.9 – Transformation des matériaux après leur recyclage [9]

2.4 Recyclage des C&DW dans les mortiers auto-compactants

Dans la section précédente de ce rapport (section 2.3), une étude sur l'utilisation de granulats recyclés, provenant de pièces de béton broyées, dans des bétons auto-compactants a été présentée. Qu'en est-il du recyclage des CD&W dans les mortiers ?

Différentes études ont déjà été réalisées sur l'utilisation de matériaux recyclés dans des mortiers. J'en évoque deux d'entre elles dans le présent paragraphe. La revue européenne de génie civil et environnemental a mené une étude sur l'impact de l'utilisation de CD&W tels que les briques, la céramique, le béton ou encore le carrelage dans des nouveaux mortiers. Cette étude se base sur la substitution massive du ciment par des matériaux recyclés. Au total, 13 différents mortiers auto-compactants

ont été créés avec différents pourcentages de substitution et différents matériaux recyclés. Ces 13 compositions sont disponibles à la figure 2.10 [5].

Sample ID	Cement (kg/m ³)	Micro-silica (kg/m ³)	Recycled materials (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Super plasticizer (kg/m ³)
Control	630	70	0	290	1260	11
5%RB	525	70	35	290	1231	13
10%RB	490	70	70	290	1237	13
15%RB	455	70	105	290	1241	13
5%RC	525	70	35	290	1236	13
10%RC	490	70	70	290	1240	13
15%RC	455	70	105	290	1242	13
5%RR	525	70	35	290	1230	13
10%RR	490	70	70	290	1235	13
15%RR	455	70	105	290	1242	13
5%RT	525	70	35	290	1220	13
10%RT	490	70	70	290	1235	13
15%RT	455	70	105	290	1240	13

FIGURE 2.10 – Composition des éprouvettes [5]

Les indices "B", "C", "R" et "T" du tableau de la figure 2.10 signifie en anglais : "Bricks", "Concrete", "Ceramic" et "Tile". L'étude concernant les bétons auto-compactants (section 2.3) montrait que plus le pourcentage de granulats recyclés augmentait, plus la résistance à la compression diminuait. En est-il de même pour le mortier auto-compactant ? La figure 2.11 représente les résistances en compression des éprouvettes constituées avec de la brique recyclée. Plus le pourcentage de brique augmente, moins la résistance en compression est élevée. Cependant, plus l'échantillon est vieux, plus la résistance des mélanges contenant plus de brique recyclée augmente et plus l'avantage du mélange de référence diminue.

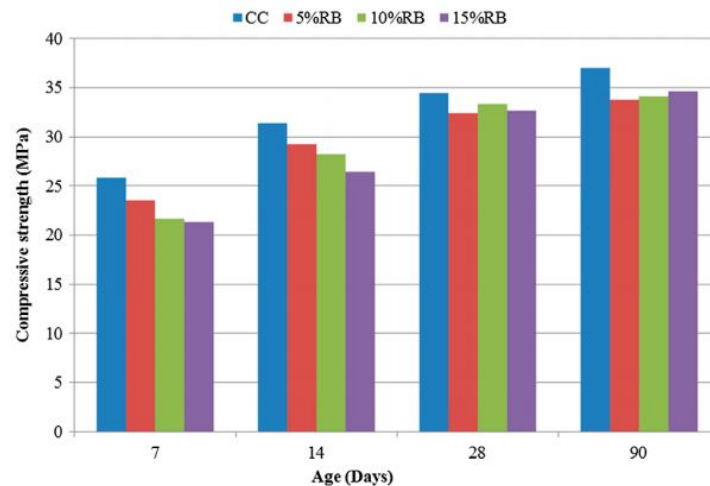


FIGURE 2.11 – Résistance en compression des éprouvettes contenant de la brique recyclée [5]

Cette étude ne concernait pas la durabilité de ces mortiers mais elle contenait quand même une étude d'absorption d'eau, liée à la porosité des matériaux, sur les 13 mortiers à l'état durci. Or, la porosité est, comme expliqué plus loin dans ce mémoire (chapitre 5), un indicateur de durabilité très révélateur.

La figure 2.12 illustre les porosités des 13 mortiers durcis. Certains résultats sont relativement étonnants. Concernant la brique, la porosité augmente lorsque le pourcentage de brique augmente ce qui

est logique étant donné que la brique est composée principalement d'argile qui est un matériau qui est très poreux.

La même conclusion est observée pour les échantillons contenant du béton et du carrelage recyclés. Par contre, les mortiers composés de céramique présentent des résultats intéressants avec une absorption d'eau proche de celle du mortier de référence pour des substitutions de 5% et 10% [5].

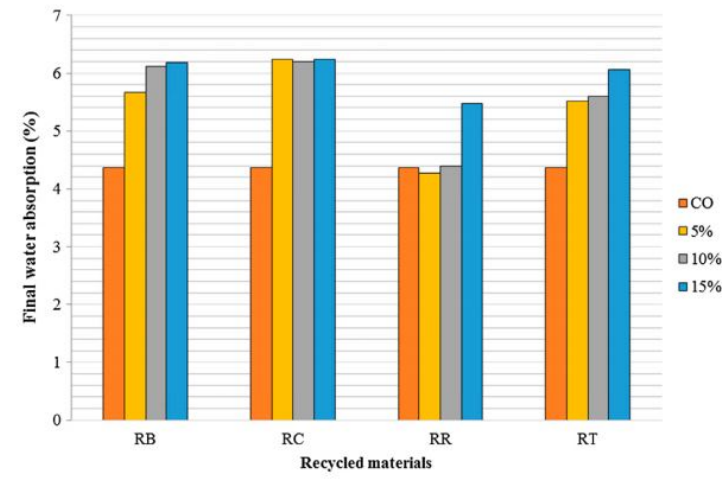


FIGURE 2.12 – Absorption d'eau des mortiers auto-compactants (13 mélanges différents) [5]

Finalement, cette étude montre que l'utilisation de matériaux recyclés dans des mortiers auto-compactants diminue légèrement les capacités mécaniques ainsi que certains indicateurs de durabilité, mais pas de manière extrême.

En ce qui concerne plus particulièrement le recyclage des briques de construction, Mr. Enrico Tabarelli a réalisé son travail de fin d'études sur la réutilisation de matériaux recyclés dans des mortiers auto-compactants. Son travail concernait le comportement de mortiers composés de sable et de fines de brique recyclée à l'état frais ainsi que leurs caractéristiques mécaniques à l'état durci.

Les résultats des tests de résistances mécaniques des mortiers testés par M. Enrico Tabarelli sont relativement intéressants. Les graphiques des figures 2.13 et 2.14 illustrent respectivement les résistances à la compression des mortiers composés de fines de brique et des mortiers composés de sable de brique. Les différentes substitutions de fines et de sable de brique sont les suivantes :

- Les mortiers PB sont ceux composés de poudre de brique (PB) en substitution de poudre de calcaire (PC). PB-0 contient 0% de PB et 100% de PC, PBNAE-50 et PBAE-50 contiennent 50% de PB et 50% de PC, PBNAE-100 et PBAE-100 contiennent 100% de PB et 0% de PC. La différence entre les mortiers PBNAE et PBAE est la quantité d'eau. Les mortiers PBAE contiennent plus d'eau pour compenser l'absorption d'eau par les fines de brique. Le volume d'eau ajouté est donc proportionnel à la masse de poudre de brique (Cette nuance sera détaillée plus loin dans le rapport).
- Les mortiers SB sont ceux composés de sable de brique (SB) en substitution du sable de calcaire (SC). SB-0 contient 0% de SB et 100% de SC, SB-25 contient 25% de SB et 75% de SC, SB-50 contient 50% de SB et 50% de SC.



FIGURE 2.13 – Résistance à la flexion (gauche) et à la compression (droite) de mortiers auto-compactants avec substitution de poudre de brique [50]

Les graphiques de la figure 2.13 montrent que la résistance en flexion et en compression après 7 jours diminue lorsque le pourcentage de fines de brique augmente. Après 28 jours, la donne change. Les résistances en flexion et en compression sont quasiment similaires pour tous les mélanges. Le mélange PBAE-100 dispose même de caractéristiques mécaniques supérieures au mélange de référence.

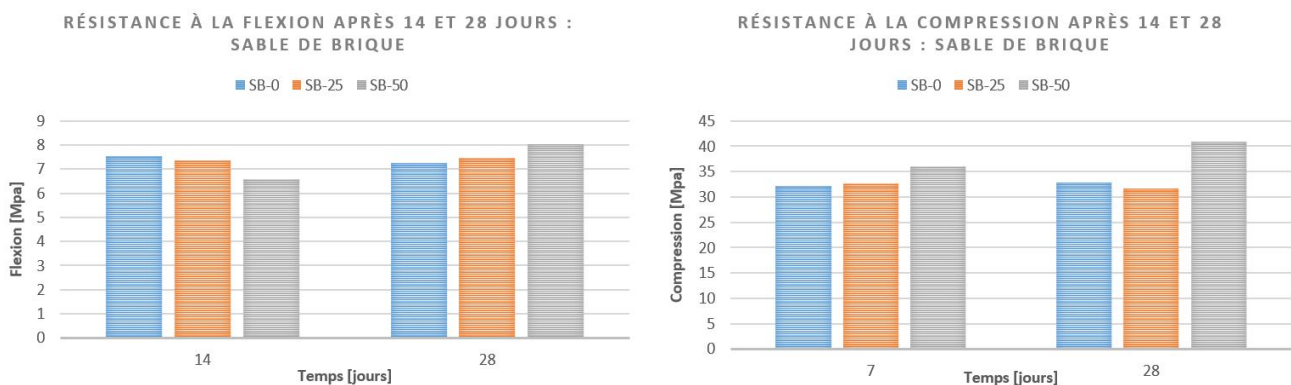


FIGURE 2.14 – Résistance à la flexion (gauche) et à la compression (droite) de mortiers auto-compactants avec substitution de sable de brique [50]

Les graphiques de la figure 2.14 illustrent à nouveau des résultats très intéressants. En ce qui concerne la flexion, la résistance du mortier diminue lorsque le pourcentage de sable augmente après 7 jours, tandis qu'après 28 jours, l'observation est complètement inversée et les mortiers avec plus de sable de brique recyclée sont plus résistants. Par rapport à la compression, l'observation est la même peu importe le temps de vieillissement des éprouvettes : les mortiers sont plus résistants lorsqu'ils contiennent plus de sable de brique recyclée.

Les différentes analyses citées ci-dessus sont, en règle générale, toutes très positives par rapport à l'utilisation de briques recyclées dans des mortiers auto-compactants. Le TFE de Mr. Enrico Tabarelli a mis en évidence l'influence positive de la brique sur les résistances mécaniques des mortiers. Il est temps maintenant d'évaluer l'influence de ce matériau sur la durabilité des mortiers afin de s'assurer qu'ils restent durables malgré la présence de matériaux recyclés. Ceci est le principal objectif de ce travail de fin d'études.

2.5 Impact des matériaux recyclés sur la durabilité des bétons et des mortiers

Cette section a pour but de présenter différentes études réalisées ces dernières années dont l'objectif était de déterminer l'impact des matériaux recyclés sur la durabilité des bétons et mortiers. Les différents phénomènes cités dans cette section (carbonatation, diffusion d'ions chlorure,...) sont quasiment tous des phénomènes également étudiés dans ce rapport.

La première étude concerne l'étude de la durabilité de béton composé de fines de béton recyclé. Cette étude a été réalisée à l'Institut supérieur technique de Lisbonne, au Portugal. Plusieurs tests ont été réalisés pour essayer de caractériser cette durabilité : absorption d'eau par immersion, carbonatation, diffusion d'ions chlorure,... 3 mélanges différents ont été étudiés avec des substitutions de fines naturelles par des fines recyclées de respectivement 0% (noté RC), 30% (noté C30R) et 100% (noté C100R). Les coefficients d'absorption d'eau par immersion (notés μ) sont présentés dans le tableau 2.4. La figure 2.15 présente les profondeurs de carbonatation mesurées sur le graphique de gauche et les coefficients de diffusion "apparent" sur le graphique de droite [26].

Mélange	μ [%]
RC	11.3
C30R	13.2
C100R	16.5

TABLE 2.4 – Coefficient d'absorption d'eau par immersion

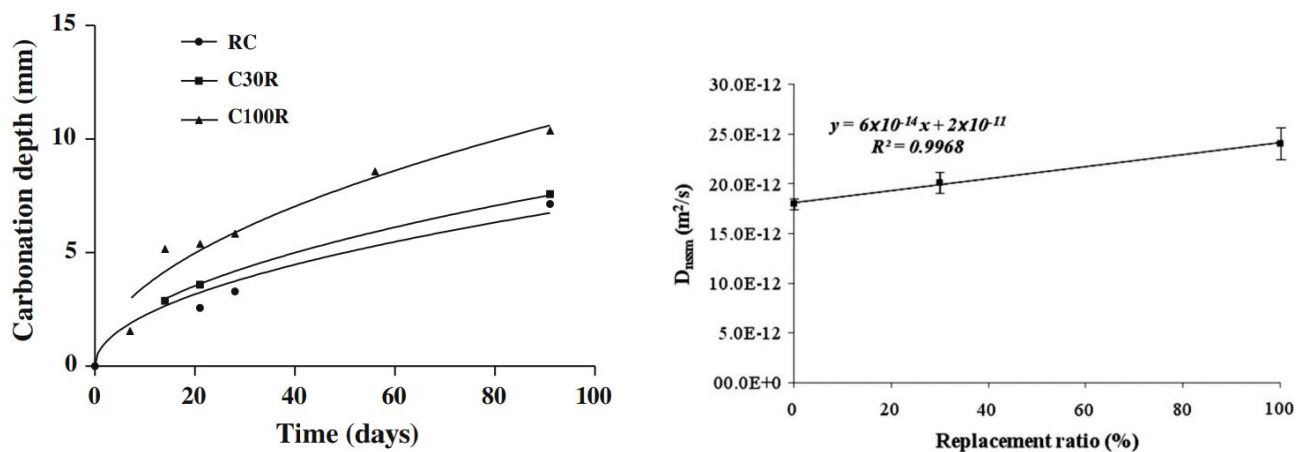


FIGURE 2.15 – Profondeurs de carbonatation (à gauche) et évolution du coefficient de diffusion "apparent" en fonction du pourcentage de substitution (à droite) [26]

Tous les résultats présentés ci-dessus montrent que l'utilisation de fines de béton recyclé est néfaste à la durabilité des bétons créés. Effectivement, le tableau 2.4 montre une augmentation de l'absorption d'eau lorsque le % de fines recyclées augmente. Ceci est dû au fait que les fines recyclées sont plus poreuses que les fines naturelles. L'eau est néfaste pour le béton étant donné qu'elle participe aux phénomènes de carbonatation, diffusion, cycle gel-dégel,... (cfr chapitre 4). Ensuite, la figure 2.15 illustre que la carbonatation ainsi que la diffusion ont tendance à augmenter lorsque les fines recyclées augmentent, ceci, de nouveau, principalement dû à la porosité accrue des fines recyclées [26].

La seconde étude présentée aborde l'influence de la brique d'argile concassée dans la durabilité des mortiers. Cette étude analyse la réutilisation du même matériau que celui étudié dans ce travail de fin d'études : la brique. Elle peut donc fournir des informations intéressantes. Elle a été réalisée à l'université de l'état de l'Iowa, aux États-Unis. Elle traite une multitude d'essais, uniquement les résultats des essais de retrait et de gel-dégel sont présentés dans ce mémoire [6].

Les mortiers étudiés dans les essais de retrait et de cycle gel-dégel sont des mortiers avec des % de substitution de fines naturelles par des fines de brique broyée de respectivement : 0% (noté B0), 10% (noté B10) et 20% (noté B20). La figure 2.16 présente la variation de longueur des barres de mortier due au retrait (à gauche) et l'expansion causée par différents nombres de cycles gel-dégel.

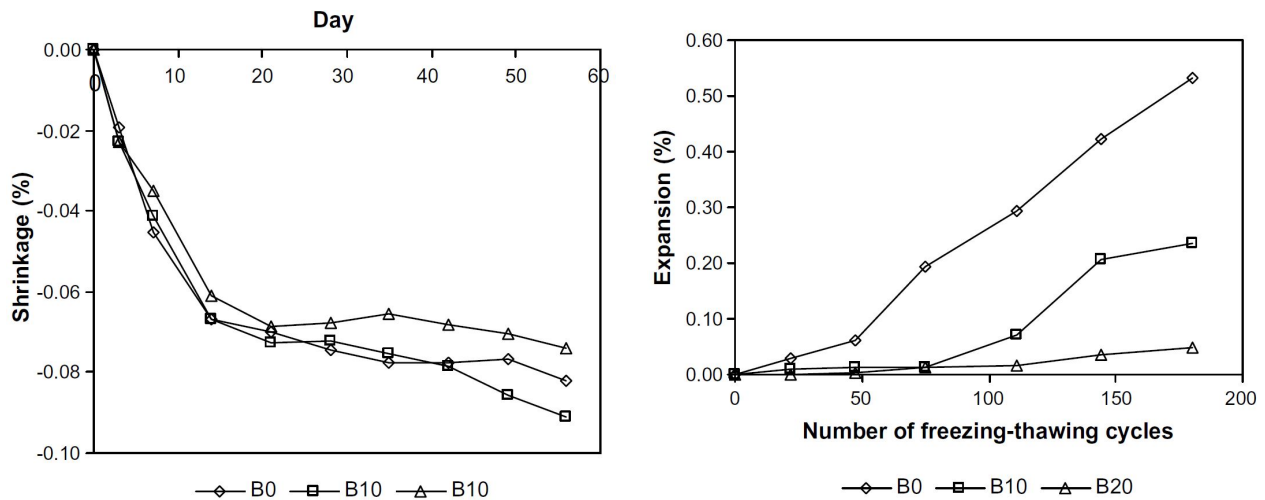


FIGURE 2.16 – Variation de longueur due au retrait (à gauche) et expansion causée par des cycles gel-dégel (à droite) [6]

Les résultats de la figure 2.16 sont relativement positifs quant à l'utilisation de la brique. Effectivement, en ce qui concerne le retrait, celui-ci est minimum lorsque le % de fines de brique recyclée utilisées est le plus grand. Plusieurs sources citées dans l'étude confirment ce résultat et une hypothèse est citée pour l'expliquer : il serait possible que la brique absorbe l'eau de mélange dans ses pores pendant de plus longues périodes, et la relâche plus lentement au cours du temps. Cependant les auteurs précisent que le phénomène de retrait de mortiers composés avec des fines de brique méritent des études supplémentaires dans des environnements plus contrôlés [6].

Par rapport à l'essai de gel-dégel, les fines de brique ont, de nouveau, une influence positive. De fait, l'expansion diminue lorsque le % de fines de brique augmente (figure 2.16). Ceci peut s'expliquer par la porosité accrue de la brique par rapport aux fines naturelles. Les pores de la brique constituent des espaces libres pour l'augmentation de volume de l'eau qui gèle. Ceci permet alors de diminuer l'expansion totale de l'échantillon de mortier [6] étant donné que des espaces, initialement vides, sont remplis de glace.

La troisième et dernière étude présentée dans ce rapport concernant l'influence des matériaux recyclés sur la durabilité des bétons et des mortiers utilise de nouveau le même matériau recyclé que ce mémoire : la brique. Cette étude a été réalisée à l'université de Lisbonne, au Portugal et concerne la durabilité de bétons contenant des fines de brique recyclée ainsi que des fines provenant de céramique (issus de sanitaires). Une attention particulière sera portée aux résultats des essais de carbonatation et de diffusion d'ions chlorure et ce, particulièrement sur les bétons contenant des

fines de brique [51].

Les mélanges réalisés pour cette étude consiste à une substitution volumique des fines naturelles par des fines de brique recyclée. 4 mélanges composés d'une substitution de fines de brique ont été réalisés avec des % de substitution de respectivement 0% (noté CC), 20% (noté C20CB), 50% (noté C50CB) et 100% (noté C100CB). La quantité de ciment reste identique (350g) et la quantité d'eau du mélange varie selon le mélange avec pour but de conserver la même classe d'étalement S3 (compris entre $125\text{mm} \pm 10\text{mm}$).

Les quantités d'eau (en g) respectives des mélanges CC, C20CB, C50CB et C100CB sont 186g ($E/C = 0.53$), 196g ($E/C = 0.56$), 214g ($E/C = 0.61$) et 224g ($E/C = 0.64$). La figure 2.17 illustre les résultats des profondeurs de carbonatation mesurées en fonction du temps (à gauche) et le coefficient de diffusion des bétons après 28 et 91 jours (à droite) [51]. A noter que le graphique de droite présente également les résultats pour les mélanges composés de céramique, ils ne seront pas analysés dans ce travail.

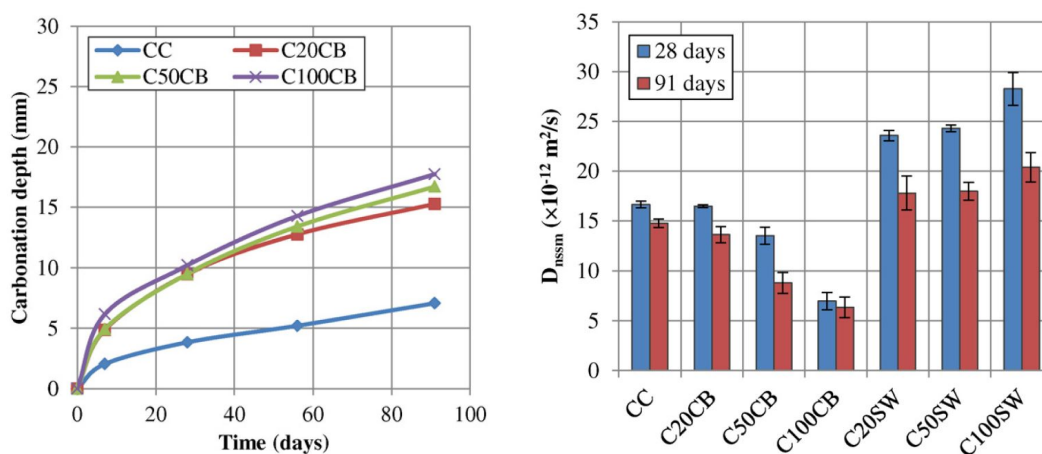


FIGURE 2.17 – Evolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps (à gauche) et coefficient de diffusion "apparent" après 28 et 91 jours (à droite) [51]

Les résultats concernant la carbonatation sont relativement similaires à ceux présentés dans la première étude abordée dans cette section [26]. Plus la brique est présente en grande quantité, plus le béton a tendance à carbonater. Les auteurs expliquent cela d'une part par la porosité accrue des fines de brique par rapport aux fines naturelles, en effet, la brique est plus poreuse et possède plus de porosité ouverte que les granulats naturels.

D'autre part, les auteurs expliquent également que la réaction pouzzolanique entre la brique (constituée principalement de silicate, d'alumine et d'oxyde de fer, cfr 6.5.2) et la chaux (explication du phénomène de carbonatation à la section 4.2) diminue la quantité de chaux disponible pour la carbonatation. Le CO_2 doit alors pénétrer plus loin dans le béton avant de rencontrer de la chaux pour carbonater et ceci augmente la profondeur de carbonatation. En résumé, plus y a de la chaux disponible, plus il faudra du temps pour carbonater en profondeur tandis que moins il y a de chaux, plus la profondeur de carbonatation augmentera rapidement [51].

En ce qui concerne les coefficients de diffusion d'ions chlorure, deux informations intéressantes en ressortent [51] :

- Plus le % de fines de brique augmente, plus le coefficient de diffusion apparent est petit. Ceci est relativement inattendu étant donné que la grande porosité de la brique pourrait provoquer

une diffusion plus importante au sein des bétons. La réaction pouzzolanique entre la brique et la chaux est encore en cause d'après les chercheurs. En effet, la réaction entre les silicates (SiO_2) et les aluminates (Al_2O_3) présents dans la brique avec la chaux ($Ca(OH)_2$) qui résulte de la réaction d'hydratation du ciment pour former entre autre du gel de tobermorite (C-S-H) reconnu pour stopper les ions chlorure en les fixant et pour densifier la matrice cimentaire .

- Plus les échantillons sont vieux, plus le coefficient de diffusion apparent diminue. Aucune explication n'a été fournie par les auteurs mais une explication peut être avancée : Plus l'échantillon est vieux, plus sa micro-structure est dense et donc moins perméable aux ions chlorure.

Ce chapitre concernait principalement les C&DW et leur recyclage. La brique est très clairement un des matériaux le plus présent dans les C&DW, il serait donc très intéressant de pouvoir la revaloriser pour lui donner une nouvelle vie et ainsi sauvegarder des matières premières. Le chapitre suivant va décrire les bétons/mortiers auto-compactants car pour rappel, les études réalisées dans ce travail de fin d'études concernent des mortiers auto-compactants constitués de briques recyclées.

Chapitre 3

Béton auto-compactant

Ce chapitre est dédié aux bétons auto-compactants et non uniquement aux mortiers auto-compactants pour plus de facilité. Le mortier est en réalité le liant entre les granulats. Ce TFE est basé sur l'étude de ce liant. Au niveau de l'expérimentation, des mortiers vont être réalisés et non du béton par soucis d'économie de matière. Effectivement, il n'est pas nécessaire de gaspiller des granulats si c'est en réalité le mortier lui-même qui est au centre de l'étude.

3.1 Introduction

Le béton est un mélange de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Lorsqu'il est mis en place, il est nécessaire de le vibrer à l'aide d'une aiguille vibrante par exemple pour s'assurer que le mélange soit bien homogène et que le béton se glisse bien dans tous les coins et recoins du coffrage dans lequel il est mis en place. Certains coffrages ont des formes très tortueuses et/ou contiennent beaucoup d'armatures de renforcements. Ces deux facteurs peuvent réellement compliquer la mise en place du béton.

Pour remédier à cela, une technologie est née au Japon dans les années 80, celle du béton auto-compactant. Ces bétons peuvent être mis en place sans aucune vibration, par seul effet de gravité et ce, même pour des coffrages avec une forte densité d'armatures ou une forme complexe. Cette nouvelle technologie a eu un succès important, et ce, relativement rapidement pour deux intérêts technico-économiques [24]

:

- Une importante réduction des coûts de la main d'œuvre dû à l'absence de compactage et donc l'économie de temps pour la mise en place du béton.
- Une augmentation de la qualité du béton mis en place étant donné que celle-ci devient plus indépendante de la qualité du travail des ouvriers et est donc régularisée. La durabilité du béton va être améliorée.

Cette technologie est maintenant, évidemment, utilisée dans beaucoup d'autres pays pour ces raisons et d'autres. Il y a aussi des inconvénients au béton auto-compactant. Ils seront abordés plus loin dans ce chapitre. Une comparaison schématique entre les bétons ordinaires et les bétons auto-compactants (aussi appelé auto-plaçant) est présentée à la figure 3.1. Les modifications apportées au béton pour le rendre auto-compactant seront expliquées en détail dans ce chapitre.

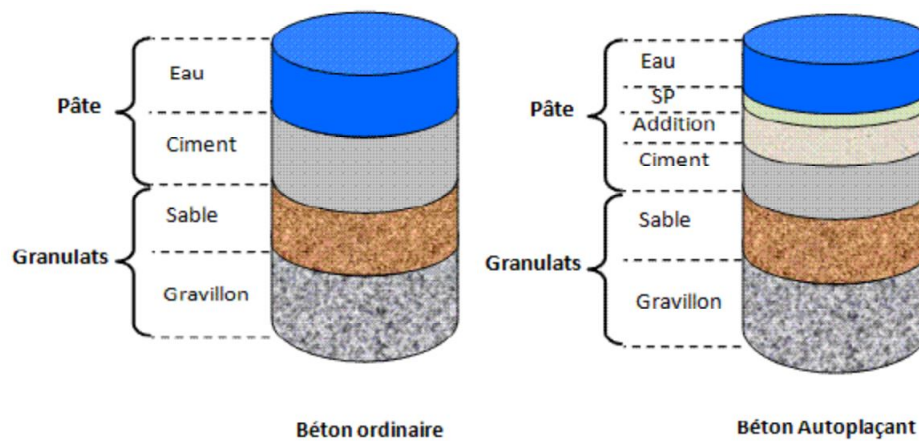


FIGURE 3.1 – Comparaison entre un béton ordinaire et un béton auto-compactant [7]

3.2 Matériaux utilisés dans les bétons auto-compactants

Cette section détaille les matériaux principaux utilisés dans la réalisation d'un béton auto-compactant.

Ciment

Pour le choix du ciment, tous les ciments qui sont conformes à la norme EN 197-1 peuvent être utilisés. En général, le choix du ciment pour un mortier auto-compactant est souvent dépendant du type d'applications réalisées ou simplement reste le même que celui utilisé habituellement par le consommateur [29].

Granulats "gros"iers"

Les granulats grossiers n'ont pas beaucoup de restrictions pour la composition d'un béton auto-compactant. Le critère principal est qu'ils doivent être capables de passer entre les armatures métalliques, leur diamètre maximum doit donc être limité. Évidemment, l'ouvrabilité du béton sera améliorée si le diamètre max des granulats est minimisé et si leurs irrégularités de formes sont diminuées.

Fines/Sables

Les fines ont une influence bien plus importante sur le comportement du béton auto-compactant à l'état frais que les agrégats "gros"iers". Effectivement, la quantité de sable doit être limitée pour diminuer au maximum les frictions entre les grains de sable. Pour cela, il est idéal d'avoir une grande quantité de pâte de ciment (= mélange ciment + eau) pour aider à diminuer les frictions inter-granulaires. Il est également possible d'utiliser du sable broyé (appelé fines) pour optimiser la courbe granulométrique du sable et ne pas devoir augmenter de manière abusive la quantité de pâte de ciment [29].

Additions

Les bétons auto-compactants requièrent une grande ouvrabilité à l'état frais. Cependant, un béton trop liquide peut manquer de cohésion et présenter des risques de ségrégation (terme expliqué dans la section 3.3). Cette cohésion peut également être atteinte par une quantité plus importante de

ciment mais une trop grosse augmentation de ciment amènerait une chaleur d'hydratation trop importante et des potentiels problèmes de retrait. Les additions sont donc préférées [29].

Il existe différents types d'additions qui réagissent ou non avec l'eau. Elles sont passées en revue ci-dessous [29]

:

- **Les fillers minérales** sont très souvent utilisées comme additions dans les bétons auto-compactants car elles leur donnent de très bonnes propriétés rhéologiques et une belle finition. Seulement, elles présentent un inconvénient : leur coefficient d'absorption d'eau, leur granulométrie ainsi que leur forme peuvent influencer la quantité d'eau nécessaire dans le mélange.
- **Les cendres volantes** permettent d'augmenter la cohésion ainsi que de diminuer la sensibilité aux changements de teneur en eau. Cependant, ces cendres peuvent créer des morceaux de pâte trop cohésifs qui vont compliquer l'écoulement, ce qu'il faut justement éviter pour un béton auto-plaçant.
- **La fumée de silice** est très fine et ses particules sont de formes sphériques ce qui permet d'améliorer la cohésion et d'apporter une meilleure résistance à la ségrégation. Cependant, l'utilisation de fumée de silice peut provoquer une formation de croûte rapide en surface.
- **Le laitier de hauts fourneaux** fournit des fines qui disposent d'une faible chaleur d'hydratation. Certains ciments contiennent déjà du laitier de hauts fourneaux mais il est également utilisé comme addition dans certains pays. Son défaut principal est qu'il peut diminuer la stabilité et provoquer donc des problèmes de ségrégation lorsqu'il est présent en trop grande proportion.

Adjuvants

Les adjuvants sont essentiels dans la composition d'un béton auto-compactant, ils modifient le comportement du béton à l'état frais pour lui procurer une ouvrabilité bien plus importante. Généralement, ce sont eux qui différencient un béton auto-plaçant d'un béton traditionnel. Il y a 3 sortes différentes d'adjuvants, ceux-ci vont être cités et expliqués ci-dessous [29] :

- **Les super plastifiants** sont les adjuvants qui permettent d'augmenter la fluidité du mélange tout en limitant l'eau.
- **Les "agents de viscosité"** permettent d'augmenter la cohésion du mélange sans pour autant altérer sa fluidité. Ils permettent également de minimiser les risques de ségrégations.
- **L'entraînement d'air** est un adjuvant qui est essentiellement utilisé pour améliorer la durabilité des bétons auto-plaçants en leur procurant une meilleure résistance au cycle gel/dégel.

Eau

L'eau a bien évidemment un rôle déterminant. Celle-ci doit être de bonne qualité et ne pas présenter trop de particules en suspension qui pourraient nuire à la qualité du béton. Si des substances comme des polluants organiques, des huiles ou encore des substances acides sont présentes (même en faible

quantité) dans l'eau, cela peut conduire à un retard de la réaction d'hydratation, un entraînement d'air excessif, un ralentissement des propriétés mécaniques ou encore une réduction d'adhérence entre la pâte et les granulats.

3.3 Composition du mélange

Pour augmenter la fluidité du béton et faciliter sa mise en place, il faut augmenter la quantité de pâte dans la composition finale. Cette augmentation va permettre de diminuer le frottement entre les granulats étant donné que ceux-ci seront entourés de plus de pâte [8]. Deux solutions différentes sont disponibles pour arriver à ce résultat :

- Une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange mais cela au détriment de la qualité du béton (porosité plus grande, augmentation du retrait,...)
- L'utilisation de super-plastifiant permettant de diminuer la viscosité du béton frais.

Augmenter l'ouvrabilité d'un béton revient à modifier son comportement rhéologique. Pour les bétons, le comportement rhéologique peut être caractérisé par la loi de Bingham, représentée à la figure 3.2. Celle-ci est définie par deux grandeurs : le seuil de cisaillement qui représente la difficulté pour mettre le béton frais en mouvement et la viscosité plastique qui désigne la vitesse d'écoulement du mélange. Plus le seuil de cisaillement est faible, plus le béton se met en mouvement facilement et plus la viscosité plastique du béton est faible, plus ce dernier s'écoulera rapidement [24]. Les deux solutions citées au-dessus permettent de diminuer ces deux paramètres.

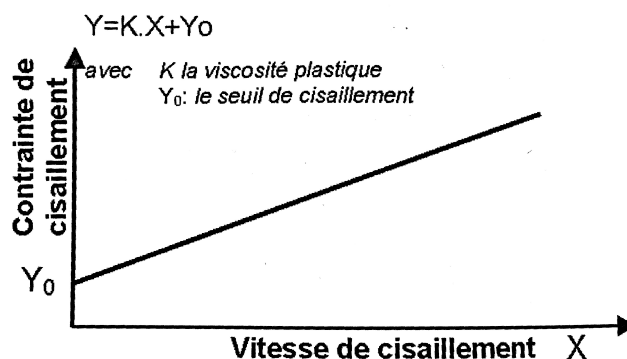


FIGURE 3.2 – Loi de comportement de Bingham [24]

Attention, modifier le comportement rhéologique du béton n'est pas sans risque. Une diminution importante de la viscosité pourrait entraîner une ségrégation des granulats, ce qui correspond à une mauvaise répartition des granulats. Effectivement, les granulats de plus grands diamètres ont tendance à couler dans le fond (dû au caractère très "liquide" du béton) et les plus petits granulats remontent à la surface [34].

Pour empêcher cette ségrégation, il faut apporter de la "stabilité" au béton soit en diminuant le rapport eau/fines en ajoutant du ciment ou des additifs minéraux (fillers calcaire par exemple) pour diminuer la quantité d'eau libre dans le mélange. Soit en ajoutant un "agent de viscosité" qui va, justement, permettre de conserver une viscosité suffisante (exemple : gomme naturelle soluble) [24].

Finalement, il existe trois types de compositions principales pour concevoir un béton auto-plaçant de qualité et qui répond à toutes les remarques citées ci-dessus [24] :

- La première composition dispose d'un super-plastifiant pour augmenter sa fluidité et d'un agent de viscosité pour améliorer sa cohésion et empêcher la ségrégation (2 Adjuvants).
- La seconde utilise également un super-plastifiant mais pas d'agent de viscosité. Pour augmenter sa cohésion, il y a une augmentation de la teneur en fines. Au lieu d'augmenter la teneur en fines, il y aurait pu avoir une augmentation de la quantité de ciment mais pour rappel, ceci peut être néfaste pour le béton dû à une production de chaleur trop élevée (1 Adjuvant + 1 addition).
- La troisième composition est une combinaison des deux précédentes afin de limiter la sensibilité aux variations de la teneur en eau d'un mélange qui contiendrait beaucoup de fines (2 Adjuvants + 1 Addition).

3.4 Avantages et désavantages

3.4.1 Avantages

D'un point de vue **économique**, le béton auto-compactant n'a aucune faiblesse. Effectivement, des bénéfices économiques considérables sont réalisés avec l'utilisation de cette technologie. Ces bénéfices viennent principalement d'un aspect général : une diminution notable du temps de construction et par la même occasion de la main d'oeuvre (Ex : 20% de temps économisé lors de la construction du pont "Akashi-Kaikyo" [42]) étant donné que le béton ne doit plus être "vibré". Ce qui équivaut évidemment à un gain d'argent. [50].

D'un point de vue **technique**, le béton auto-plaçant a également quelques avantages par rapport au béton traditionnel. Il est de meilleure qualité et il permet également d'avoir une finition plus lisse, plus propre. Il se compacte tout seul et il n'y a donc pas d'intervention d'ouvriers dans sa mise en place ce qui permet d'avoir moins d'incertitude sur la qualité du travail et donc une fiabilité plus élevée. Sa fluidité permet aussi de concevoir des pièces de béton de formes complexes relativement facilement [42].

D'un point de vue **environnemental**, le béton auto-compactant présente également certains avantages. L'absence de vibration diminue la pollution sonore sur et autour du chantier. De plus, la vibration du béton rejetait beaucoup de poussière dans l'air avoisinant, l'absence de cette dernière permet donc d'avoir un environnement de travail plus agréable pour les ouvriers. Au niveau écologique, l'utilisation de cendres volantes, fillers calcaire,... en substitution du ciment permet de diminuer l'empreinte carbone tout en gardant des gammes de résistances mécaniques similaires [42].

3.4.2 Désavantages

D'un point de vue **économique**, le béton auto-compactant demande des matériaux généralement plus onéreux qu'un béton traditionnel. L'ajout de cendres volantes ou de ciment amène un coût supplémentaire. Idem pour les super-plastifiants, ce sont des matières premières relativement coûteuses. Il y a également une augmentation du prix des coffrages. Lorsqu'un béton est plus fluide, la

pression hydrostatique avec laquelle il va pousser sur le coffrage augmente, ce coffrage doit donc être suffisamment résistant que pour supporter ces surpressions [42].

D'un point de vue **technique**, le béton auto-plaçant peut disposer d'un rapport eau/ciment plus important ainsi que d'une plus grande teneur en fines, ces deux éléments augmentent la sensibilité du béton aux effets du retrait. De plus, un béton auto-compactant est sensible à la variation des granulats.

3.5 Applications

De nombreuses applications du béton auto-compactant ont été réalisées dans différents pays du monde tels que la France, la Suède, le Japon ou encore le Canada. Cette technologie possède un potentiel économique, technique et environnemental puissant. Les bétons peuvent être aussi bien coulés sur place que préfabriqués [24].

Le béton auto-plaçant peut être utilisé dans la réalisation de maisons, d'immeubles d'appartements, de salles de sport,... pour concevoir des fondations, des dalles, des voiles, des poutres, des colonnes,... Les constructeurs sont motivés par des aspects positifs du béton auto-compactant cités dans la section 3.4.1 et rappelés ici : facilité de mise en œuvre, coffrage complexe, grande densité d'armatures, gains économiques,...

Cependant, il ne fait pas encore l'unanimité et certains pays sont plus réticents à s'en servir que d'autres comme le montre le tableau 3.1 :

	Béton prêt à l'emploi (%)	Préfabrication (%)
Japon	0.1	0.5
Pays-Bas	0.1	4.0
Suède	5.0	5.0
Taiwan	0.3	0.0

TABLE 3.1 – Pourcentage de béton auto-compactant dans la consommation totale de béton en 2000 [24]

La figure n°3.3 illustre différents coffrages complexes, soit par leur forme, soit par leur densité d'armatures métalliques, pour lesquels, l'utilisation de béton auto-compactant est quasiment indispensable ou du moins, bénéfique. La photo du haut représente un coffrage pour la réalisation d'un tunnel tandis que la photo du dessous illustre l'armaturage complexe d'une fondation.

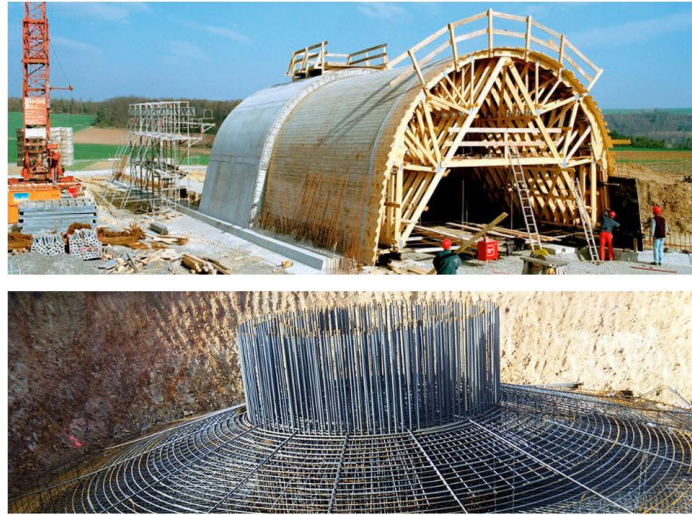


FIGURE 3.3 – Exemple de coffrages complexes pour la réalisation de pièces en béton armé [37] [41]

Voici ce qui conclut le chapitre dédié aux bétons auto-compactants. Les deux premiers chapitres du mémoire donnaient des informations sur les mortiers auto-compactants et sur la brique. La suite concerne donc la durabilité des mortiers étant donné que ce travail de fin d'études a pour but de caractériser la durabilité des mortiers auto-compactants composés de briques recyclées.

Chapitre 4

Durabilité des matières à base de ciment

Les bétons sont tout d'abord caractérisés par leurs résistances mécaniques. Évidemment, il est important de s'assurer d'avoir un mélange de béton qui va acquérir une résistance suffisante que pour résister aux charges qui vont être imposées à la structure, mais une notion plus particulière ne doit pas être négligée : la durabilité. Le béton peut être soumis à un environnement agressif qui pourra détériorer sa qualité au fil du temps et donc diminuer sa résistance mécanique dangereusement.

Dans ce chapitre, différents phénomènes de dégradation du béton vont être présentés. Ensuite, les indicateurs qui permettent de caractériser la durabilité des bétons seront abordés.

4.1 Retrait

Le retrait dans le béton est un facteur qui peut diminuer significativement la durabilité d'un élément de béton. Effectivement, un retrait correspond à des variations dimensionnelles qui vont provoquer l'apparition de fissures dans notre élément. Ces fissures vont donc faciliter l'infiltration d'agents agressifs comme les sulfates, les chlorures ou encore le CO_2 . Il existe plusieurs types de retrait [14] [33] :

- **Le retrait plastique** est un retrait causé par des déformations par tassement lors de la mise en plus du béton frais. Il se produit généralement au droit d'obstacles telles que les barres d'armatures du béton armé.
- **Le retrait de dessiccation** qui est dû au séchage du béton. L'eau contenue dans le mélange et qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation du ciment va s'échapper du béton et créer des dépressions capillaires. Ce séchage se produit avant, pendant et après la période de prise du béton et est dû à un échange d'humidité avec le milieu extérieur.
- **Le retrait thermique** est causé par une variation de température de la pièce de béton. La réaction d'hydratation eau/ciment va amener de la chaleur qui va dilater l'ensemble. Lorsque celle-ci se termine, la pièce va se refroidir et se contracter, ce qui aura pour cause l'apparition de fissures. C'est un retrait qui se produit sans échange d'eau avec le milieu environnant.
- **Le retrait d'auto-dessiccation** qui est un retrait interne au béton et ne présente donc aucun échange d'humidité avec le milieu environnant. Il est dû à la réaction chimique dans laquelle les anhydres produits auront un volume inférieur à l'eau et les anhydres initiaux avant la réaction. La variation de volume amène des contraintes supplémentaires qui vont, par la suite, créer des fissures dans le béton.

Tous ces types de retrait sont additionnés pour obtenir, au final, un retrait total. Les fissures induites par le retrait créeront des passages où les agents agressifs pourront s'infiltrer. La figure 4.1 donne un exemple de fissures qui apparaissent lorsque le phénomène de retrait est important. [14]

Comment lutter contre le retrait ? Différentes mesures existent en fonction du type de retrait que l'on veut limiter. Par exemple pour le retrait de dessiccation, si les conditions sont optimales pour une grande évaporation d'eau (température élevée, beaucoup de vent) alors il faudra mettre en place "une cure du béton" comme par exemple, assurer une humidification constante de la paroi extérieure ou encore utiliser des adjuvants réducteurs d'eau.

En ce qui concerne la limitation du retrait thermique, l'utilisation d'un ciment doté d'une faible chaleur d'hydratation peut être une solution viable afin de limiter la différence de température entre l'air ambiant et la pièce de béton.

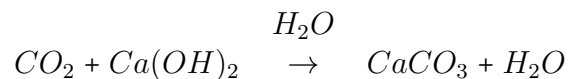
Enfin, pour contrer le retrait d'auto-dessiccation, il faut prendre en compte dans le calcul les contraintes supplémentaires induites et y résister à l'aide, par exemple, d'armatures passives ou encore de précontrainte. [14]



FIGURE 4.1 – Fissures induites par du retrait [14]

4.2 Carbonatation

La carbonatation est un autre phénomène de détérioration du béton. Il est causé par le CO_2 présent dans l'air qui pénètre facilement dans le béton pour réagir avec de la chaux hydratée (hydroxyde de calcium) présente dans le béton et de l'eau. Chimiquement, la réaction qui se produit est la suivante [18] :



L'utilisation de la chaux hydratée dans la réaction va provoquer une diminution significative du pH. Ainsi, ce dernier va passer d'une valeur de 13 (basique) à une valeur inférieure à 9 (presque acide). En plus de la modification du pH, il va y avoir une diminution de porosité étant donné que un des produits crée par la réaction ($CaCO_3$ = calcaire) est plus volumineux que la chaux hydratée présente au départ. Les schémas de la figure 4.2 schématisent les explications citées [18]. Le front de carbonatation se propage de moins en moins vite étant donné que plus la carbonatation est profonde, plus le CO_2 doit pénétrer loin dans le béton pour trouver les autres composants de la réaction (chaux et eau).

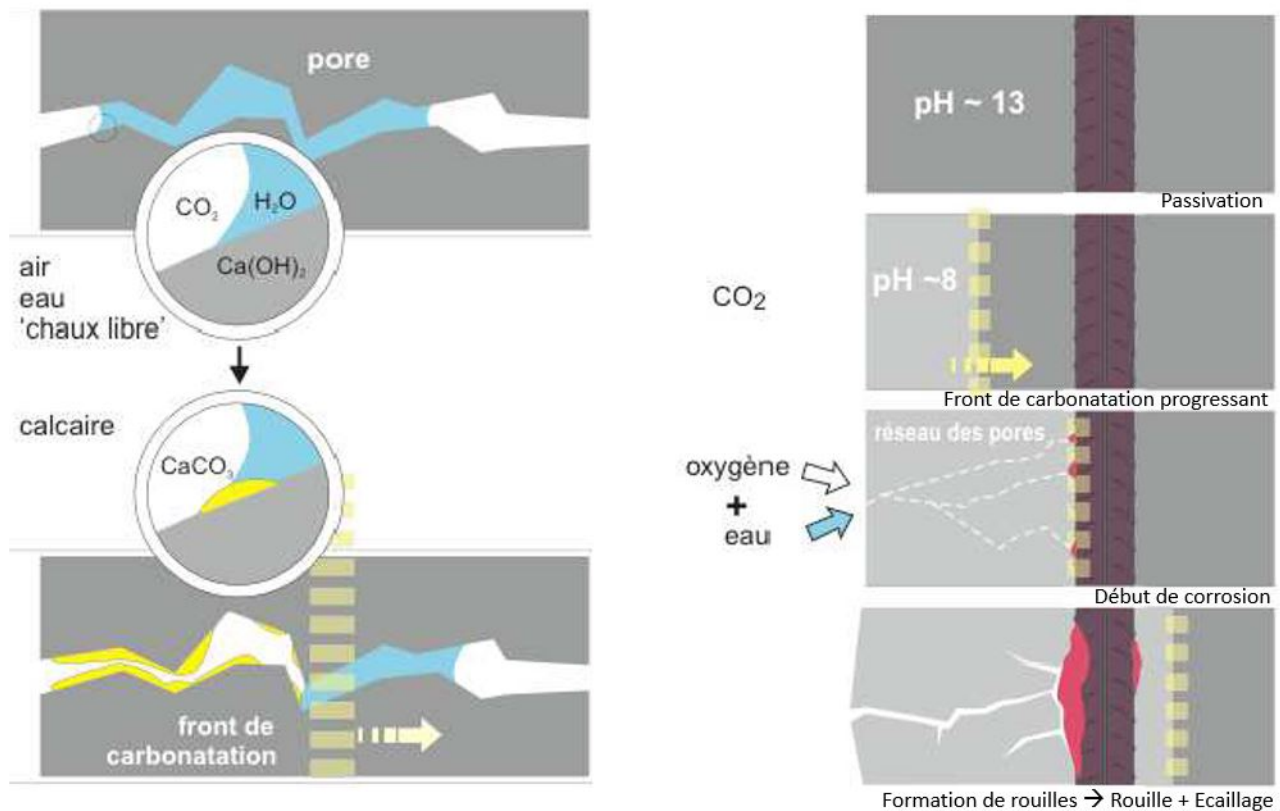


FIGURE 4.2 – Processus de carbonatation [18]

Il est important de préciser que le phénomène de carbonatation est maximal quand l'humidité relative de l'air est comprise entre 40 et 80 % [18]. Effectivement, dans le cas d'un environnement très sec, il n'y a pas assez d'eau dans les pores que pour dissoudre le CO_2 . Tandis que dans le cas contraire, où l'humidité est très importante (supérieure à 80 %), les pores sont remplis d'eau et l'eau ralentit drastiquement la propagation du dioxyde de carbone étant donné que la diffusion de celui-ci dans l'eau est 10 000 fois plus faible que dans l'air [13].

Les bétons situés sous l'eau ne seront donc pas sujets à la carbonatation. Les bétons placés en extérieur et soumis aux intempéries n'auront pas trop à se soucier de problème de carbonatation étant donné que leurs pores seront généralement remplis d'eau, surtout dans les pays humides ou il pleut beaucoup.

Les bétons intérieurs et donc placés dans des environnements secs ne seront également pas menacés par la carbonatation. Par contre, les bétons extérieurs mais non soumis aux intempéries (couverts) seront, eux, particulièrement susceptibles de carbonater [15].

En quoi la carbonatation est-elle néfaste au béton ? Pour des bétons non-armés, la carbonatation peut avoir un effet positif. Effectivement, si le béton est poreux, la réaction chimique qui va produire du calcaire, plus volumineux que la chaux, va remplir les pores et diminuer la porosité. Pour des bétons très peu poreux, il y a un risque de gonflement et d'éclatement si jamais la carbonatation est trop importante.

Pour des bétons armés, la carbonatation est très néfaste. Comme dit précédemment, celle-ci va provoquer une diminution du PH. Si le front de propagation de carbonatation atteint les armatures, elles vont se retrouver dans un milieu plus acide et se corroder. Cette corrosion va produire un gonflement

dû à la production d'oxydes et d'hydroxydes de fer. Ce gonflement va finalement amener l'éclatement du béton d'enrobage. En plus de la désintégration du béton, les armatures, qui rouillent, vont diminuer de section et voir leurs capacités résistantes diminuer dangereusement jusqu'à la rupture de celles-ci. [13]. Différentes photos présentent les dégâts que la carbonatation peut engendrer à la figure 4.3.



FIGURE 4.3 – Exemple de dégâts provoqués par la carbonatation [22]

Comment lutter contre la carbonatation ? Celle-ci est liée à la fois à l'environnement dans lequel le béton va se trouver et à la porosité du béton en question. La résistance d'un béton est étroitement liée à sa porosité.

Il existe une norme européenne (EN 206-1) qui donne des classes d'exposition (allant de l'environnement le moins agressif à celui le plus agressif) qui dépendent essentiellement de l'humidité ainsi que des cycles humidification/séchage.

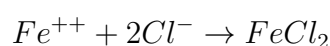
Pour conclure, plus l'environnement est agressif, plus il sera conseillé d'utiliser un béton peu poreux, et donc plus résistant, pour protéger les armatures métalliques de la carbonatation [13].

4.3 Diffusion d'ions chlorure

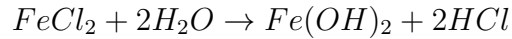
La diffusion d'ions chlorure est néfaste pour les bétons. Les ions chlorure peuvent provenir de deux sources différentes. La première est intérieure, les ions chlorure sont introduits dans le mélange directement par l'utilisation d'eau saline, de granulats marins ou encore d'adjuvants à base de chlore. La seconde source est extérieure et concerne les ions chlore amenés par l'air (air marin), l'eau (eau saline) ou encore du sel de déverglaçage utilisé sur la plupart des routes.

Pour pénétrer dans le béton, les chlorures passent soit par capillarité (béton sec) soit par diffusion (béton saturé). La pénétration par capillarité est bien plus rapide que la pénétration par diffusion. [46].

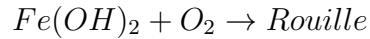
En quoi la diffusion d'ions chlorure est-elle néfaste pour le béton ? Les ions chlorure additionnés à de l'eau et de l'oxygène corrodent les armatures. Effectivement, les ions chlorure Cl^- réagissent avec les ions Fe^{++} pour former du chlorure de fer [15].



Ensuite, les chlorures de fer vont se dissoudre pour former de l'hydroxyde de fer.



Enfin, les $Fe(OH)_2$ migrent vers les parois du béton, s'oxydent dû à l'oxygène présent dans l'air extérieur et forment finalement de la rouille visible sur les parois du béton, ce qui est une aide visuelle pour anticiper et résoudre les problèmes de corrosion d'armatures par les chlorures.



Les ions chlorure vont "piquer" les armatures et les "grignoter" peu à peu provoquant une diminution dangereuse de leur section. Celle-ci va diminuer jusqu'à finalement rompre et potentiellement provoquer des conséquences désastreuses sur la structure [46]. L'image de la figure 4.4 schématise les explications présentées ci-dessus. Tandis que la figure 4.5 montre des exemples de dégâts engendrés par la corrosion des armatures par les ions chlorure.

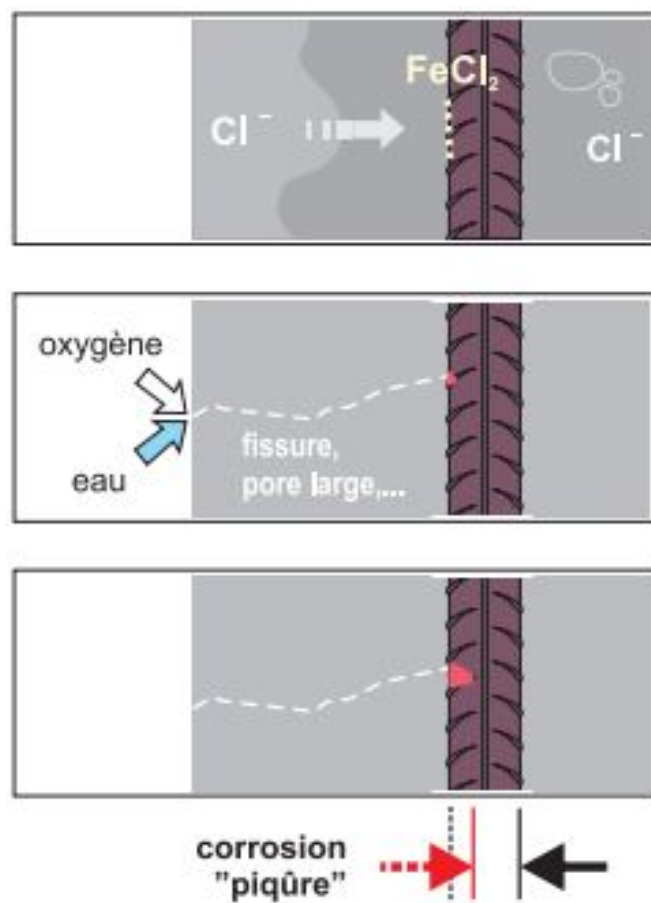


FIGURE 4.4 – Corrosion des armatures provoquées par les ions chlorure [18]

Il est intéressant de préciser qu'il existe deux types de chlorures différents et qu'ils ne sont pas aussi dangereux les uns que les autres. En déterminant le type d'ions chlorure le plus dangereux, il sera plus aisé de trouver des solutions pour protéger les bétons de leurs effets négatifs [15] :

- **Les chlorures libres**, qui proviennent d'agents agressifs extérieurs (sels marin, sels de déverglaçage,...), sont ceux qui pénètrent dans le béton soit par capillarité, soit par diffusion et qui reste sous forme ionique dans la solution interstitielle du béton. Ce sont ces chlorures qui

sont néfastes pour le béton et qui risquent de corroder les armatures. Ce sont donc particulièrement ces types de chlorures contre lesquels il faut protéger le béton armé.

- **Les chlorures totaux** sont la combinaison entre des chlorures libres et des chlorures chimiquement fixés sur les parois solides des pores. Ils concernent les chlorures introduits dans le mélange initial du béton (amenés par des granulats marins, des adjuvants chlorés,...). La proportion de chlorures libres est faible par rapport à celle des chlorures fixés, qui eux, ne risquent pas de corroder les armatures. Ces chlorures sont donc moins dangereux.



FIGURE 4.5 – Dégâts engendrés par la corrosion des armatures par les ions chlorure [18]

Comment lutter contre la diffusion d'ions chlorure? Une première solution concerne la porosité. Plus le béton est poreux, plus il contiendra de l'eau et l'eau est évidemment un des acteurs principal dans la réaction des ions chlorure pour corroder les armatures. En diminuer le rapport E/C, la porosité diminue également et la présence d'eau diminue par la même occasion.

Une seconde solution consiste à protéger les armatures en augmentant simplement l'enrobage des armatures. En d'autres mots, l'épaisseur de la "concrete cover" est augmentée pour que les armatures soient plus profondément ancrées dans le béton et que les ions chlorure aient donc plus de mal à les atteindre[18].

4.4 Attaque des sulfates

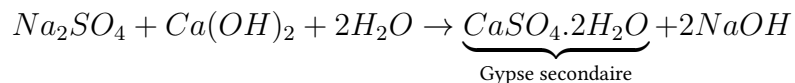
L'attaque des sulfates sera le dernier phénomène de dégradation des bétons abordé dans ce travail. Il existe deux sources différentes de sulfates : la première est externe, les ions proviennent d'agents extérieurs agressifs tels que l'eau de mer, eaux souterraines sulfatées, sols,... La seconde est interne, les ions sulfate sont déjà présents, avant même l'hydratation du ciment, ils peuvent provenir de granulats, de gypse ou encore de déchets sulfatés [30].

D'autres composants interviennent dans le phénomène de l'attaque des sulfates. Ces éléments sont essentiellement du calcium, de l'aluminium ou encore du soufre et composent un minéral appelé "Ettringite", ce minéral a pour caractéristique d'être volumineux.

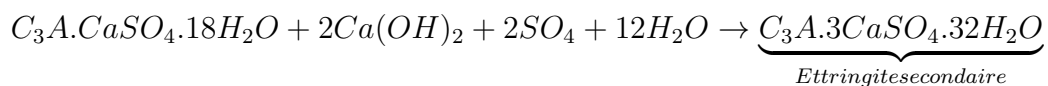
Lorsque la température au cœur du béton est très élevée supérieure à 65°C, le béton refroidit très lentement et la formation d'éttringite sera alors retardée. Les composants (aluminium, calcium,...) resteront alors en solution dans le béton. Les ions sulfate qui pénétreront dans le béton vont réagir avec ces composants pour former de "l'éttringite secondaire" comme expliqué ci-dessous [36].

En quoi les sulfates peuvent-ils être néfastes au béton ? L'attaque par les sulfates externes (ceux qui proviennent des agents agressifs extérieurs) se produit en trois phases distinctes. La première consiste en l'infiltration des sulfates par les pores du béton. Les bétons à forte porosité sont donc plus sensibles.

La deuxième concerne la réaction de ces sulfates avec les hydroxydes de calcium ($Ca(OH)_2$ qui est un des composants de la pâte de ciment) et de l'eau pour former du gypse "secondaire". Pourquoi secondaire ? Uniquement parce que celui-ci est formé après la période de durcissement du béton, cette réaction a lieu dans le béton durci. [15] [30]



La troisième et dernière étape concerne la réaction de ce gypse secondaire avec les aluminates de calcium hydratés pour former de l'éttringite secondaire. C'est justement cette éttringite secondaire qui détériore notre béton étant donné qu'elle est volumineuse. En gonflant au milieu du béton durci, elle va amener des contraintes de tractions importantes et créer des fissures ou même un éclatement du béton.



L'attaque par les sulfates peut provoquer l'apparition d'un réseau de fissures dans les bétons voire même l'éclatement de celui-ci. La figure 4.6 illustre les effets dévastateurs de cette réaction chimique dans le béton.



FIGURE 4.6 – Dégâts engendrés par l'attaque des sulfates sur le béton [36]

Comment lutter contre l'attaque des sulfates ? Tout d'abord, essayer de limiter l'absorption d'ions sulfate. Pour cela, un béton avec une porosité limitée limitera l'absorption d'ions sulfate et

un béton peu exposé aux sulfates sera plus résistant même si celui-ci est poreux.

Ensuite, il faut limiter la température interne du béton durant sa prise pour empêcher le retard de la formation d'étringite et donc diminuer la quantité de composants (aluminium, calcium) qui pourraient réagir avec les ions sulfate qui y ont pénétré. Pour limiter cette température, l'utilisation de bétons ayant des réactions exothermiques plus faibles ou encore l'utilisation (pour des ouvrages de grandes tailles) de coffrages refroidissants sont deux solutions envisageables.

Enfin, une autre solution pour diminuer la température et qui ne demande pas de matériel supplémentaire ou de modification du mélange est simplement un choix judicieux du moment auquel couler le béton. Il est donc préférable de ne pas le couler en plein été lorsque les températures extérieures sont très élevées [36].

Tous les phénomènes expliqués précédemment sont néfastes pour le béton. Mais comment caractériser la résistance d'un béton à ces différents phénomènes? Le chapitre suivant répond à cette question en abordant les indices de durabilité des bétons.

Chapitre 5

Indicateurs de durabilité

Pour rappel, un béton est, dans un premier temps, composé pour résister à des charges particulières et assurer un rôle structural. Pour conserver sa résistance durant une grande période de temps, celui-ci devra être durable. La durabilité d'un béton concerne sa capacité à résister aux agents agressifs extérieurs qui pourraient venir les dégrader et par la même occasion diminuer ses capacités mécaniques. Le schéma de la figure 5.1 résume les étapes qui mènent à une dégradation d'un béton provoquée par son environnement extérieur et qui doivent donc être étudiées pour tenter de maximiser la durabilité des bétons.

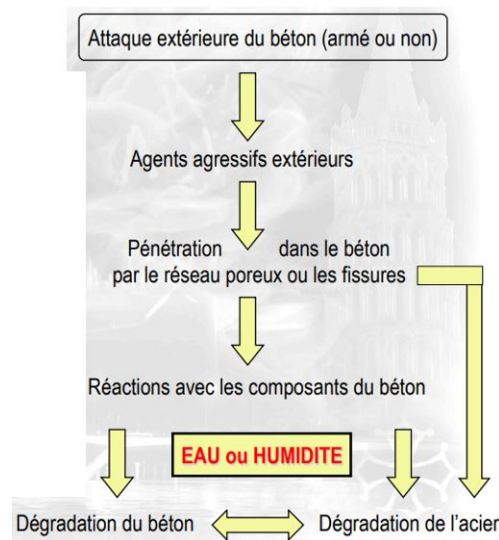


FIGURE 5.1 – Etapes qui mènent à la dégradation d'un béton provoqué par son environnement extérieur [23]

Les indicateurs de durabilité généraux peuvent être séparés en deux catégories : les barrières physiques et les barrières chimiques. La "qualité" de ces barrières déterminera la durabilité d'un béton soumis à un environnement extérieur agressif [23].

Des classes d'exposition existent pour caractériser les risques encourus par le béton (carbonatation, diffusion d'ions chlorure,...). Ces classes sont définies par la norme européenne NBN EN 206-1 :2001. La première lettre est la même pour toutes les classes : "X" pour "exposure" en Anglais. Ensuite, la seconde lettre concerne le mécanisme de dégradation susceptible d'endommager le béton [38] :

- C pour carbonatation
- D pour "Deicing salt" (=sel de déverglaçage)

- S pour "Seawater" (= eau de mer)
- F pour "Frost" (= gel)
- A pour "environnement agressif"

Finalement, des numéros sont rajoutés pour caractériser un élément capable d'influencer la dégradation. Au total, il y a 18 classes d'exposition. Elles sont disponibles dans les annexes (annexe n°A).

5.1 Barrière physique

5.1.1 Porosité accessible à l'eau

L'eau est l'ennemi numéro 1 pour la durabilité d'un béton. Comme le montre la figure 5.1, l'eau peut provoquer des dégradations du béton ainsi que des armatures. Un béton poreux, qui dispose de beaucoup de pores dans lesquels l'eau pourrait s'infiltrer risque logiquement d'avoir des soucis de durabilité.

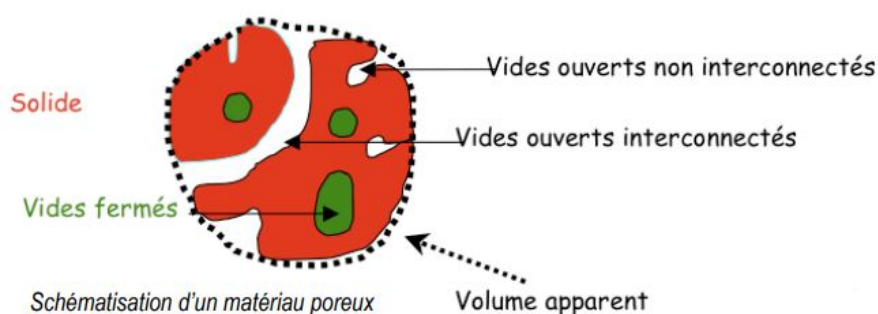


FIGURE 5.2 – Schématisation d'un matériau poreux [23]

La figure 5.2 schématise un matériau poreux avec ses différents vides. Certains sont fermés (en vert) et sont donc inaccessibles à l'eau. D'autres sont ouverts (en blanc) interconnectés ou non et sont susceptibles d'accueillir de l'eau.

Le pourcentage de pores ouverts correspond simplement au rapport entre le volume des pores ouverts et le volume apparent du solide. Ce pourcentage peut s'obtenir à l'aide d'un protocole particulier (NFP 459) qui ne sera pas détaillé dans ce rapport [23].

Dans ce travail de fin d'études, un essai d'absorption d'eau par immersion sera réalisé pour tenter de caractériser la porosité des mortiers avec et sans particules de briques recyclées.

5.1.2 Structure et taille des pores

Le réseau de pores d'un béton joue évidemment un rôle crucial dans sa porosité et dans sa durabilité. Il existe différents types de pores de différentes origines et de tailles différentes. Deux types de pores sont situés dans la matrice même du ciment, entre les fibres de ciment hydraté. Ce sont les pores de gel et les pores capillaires.

Les pores de gel sont situés entre les petites fibres, les fibres qui sont formées par l'accumulation des plaquettes de ciment hydraté qui elles, sont produites lorsqu'un contact est établi entre le ciment et l'eau de gâchage (= Hydratation du ciment). Ils ont un diamètre d'environ 10nm. Ces pores remplis d'eau fortement liée appelée eau de gel (Les cercles sur la figure 5.3).

Les pores capillaires se présentent lorsque les fibres ont créés un réseau moins dense. Ces pores ont des diamètres compris entre 100 et 1000 nm et jouent un rôle crucial dans la perméabilité et la durabilité [38].

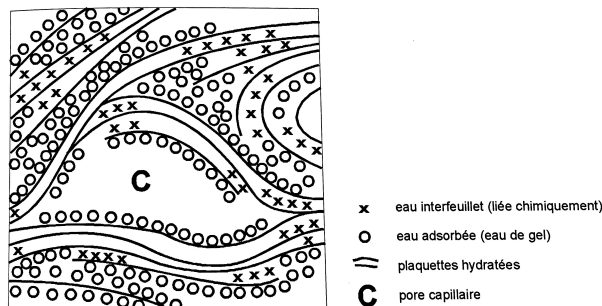


FIGURE 5.3 – Coupe de ciment hydraté [38]

Il existe évidemment d'autres types de vides qui font également partie de la structure pores. Comme par exemple [38] :

- Les fissures internes et externes qui sont souvent dues à des phénomènes de retrait, de fluage ou encore de gel. Ces vides créés après le durcissement du béton peuvent augmenter la porosité du béton.
- Les volumes occupés par de l'air "occlus" qui se créent lors de la vibration du béton ou l'air entraîné lorsqu'un entraîneur d'air est ajouté.
- Des vides causés par un mauvais compactage. Cela arrive évidemment plus souvent à des bétons qui ont une ouvrabilité limitée à l'état frais.

La structure des pores ne sera pas étudiée dans ce mémoire.

5.1.3 La perméabilité à l'eau et au gaz

La perméabilité d'un béton est définie comme "son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression" [44]. Il s'agit donc d'un transfert sous un gradient de pression. Un béton durable est un béton peu perméable car il ne se laisse pas facilement pénétrer par des agents agressifs extérieurs. La perméabilité d'un béton concerne aussi bien sa perméabilité aux liquides que celle aux gaz. La loi de Darcy est utilisée pour mesurer la perméabilité des bétons :

$$Q = \frac{k}{\mu} \cdot A \cdot \frac{dp}{dx}$$

Dans laquelle "Q" représente le débit volumique d'un liquide [m^3/s], " μ " la viscosité du liquide en question [$kg/(m.s)$], "A" l'air de la section apparente du matériau [m^2], "dp" la différence de pression [$kg/(m.s^2)$], "dx" l'épaisseur du matériau [m] et enfin, k la perméabilité exprimée en [m^2] dans le système international. La figure 5.4 schématise l'équation exprimée ci-dessus [44]. Différents essais permettent de mesurer la perméabilité d'un matériau, ceux-ci ne seront pas détaillés dans ce travail.

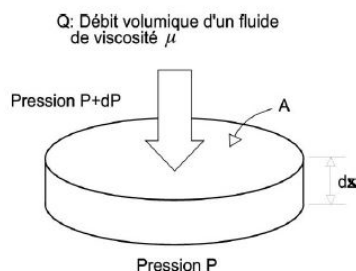


FIGURE 5.4 – Loi Darcy permettant de définir la perméabilité [44]

La perméabilité est évidemment étroitement liée à la porosité. Si il n'y a pas de pores dans un béton, les liquides ne pourront, en aucun cas, traverser ce béton. Les vides fermés 5.2 n'influencent pas la perméabilité étant donné qu'ils ne constituent pas un endroit de passage pour les liquides, ces derniers traversent le matériau par les vides ouverts. Cependant, deux matériaux présentant le même nombre de vides ouverts n'auront pas pour autant une perméabilité similaire. Il existe d'autres facteurs qui influencent la perméabilité [38] :

- **Le diamètre des pores.** Si celui-ci est inférieur celui des molécules, le transfert sera alors impossible.
- **La forme des pores.** Si l'accès aux pores est restreint, il sera plus compliqué pour le fluide de les traverser.
- **La longueur et les caractères tortueux des pores** qui peuvent compliquer l'écoulement du fluide.
- **L'humidité présente dans les pores** qui risque de les boucher et bloquer l'écoulement.
- **L'air dans les pores** qui pourrait empêcher l'eau de s'écouler.
- **La nature du fluide** qui transperce le matériau et son éventuelle réaction avec les composants du béton.

La perméabilité dépend de tous ces facteurs. Évidemment, elle peut être limitée. En diminuant le rapport E/C, le nombre de pores capillaires ainsi que la perméabilité diminuera et permettra alors au béton d'avoir une durabilité plus intéressante [38].

Aucun essai sur la perméabilité des mortiers n'a été réalisé dans ce travail. Au vu de la limite du temps disponible pour réaliser ce mémoire, l'intérêt a été porté sur d'autres tests caractérisant la durabilité d'un mortier.

5.1.4 Diffusion des ions

La diffusion d'ions est un autre type de transport observé dans le béton. Il fonctionne sous le principe d'une différence de concentration. Un transport d'une espèce (ions chlorure, ions sulfate,...) se produit, à l'échelle macroscopique, si il existe un gradient de concentration de cette espèce. C'est-à-dire, pour les ions chlorure par exemple, qu'ils vont être transportés des régions à plus forte concentration vers les régions à plus faible concentration [23].

Evidemment, un béton avec des grands coefficients de diffusion sera moins durable étant donné que les ions (chlorure, sulfate,...) se déplaceront plus facilement et nuiront au béton en provoquant les différents phénomènes expliqués dans la section 4. Pour augmenter la résistance à la diffusion, il faut diminuer le rapport E/C. La nature du ciment peut également jouer un rôle sur les coefficients de diffusion. Par exemple, les ciments de hauts fourneaux (ciments constitués principalement de clinker

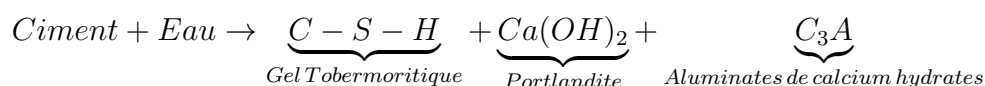
et de laitier) ont une résistance améliorée à la diffusion [38].

Deux tests différents ont été réalisés pour mesurer la diffusion d'ions chlorure au sein des mortiers auto-compactants étudiés dans ce travail.

5.2 Barrière chimique

5.2.1 Teneur en portlandite

Lors de la réaction d'hydratation du béton, la poudre de ciment réagit avec de l'eau pour former des hydrates de par l'équation suivante [23] :



Différents moyens existent pour mesurer la teneur en Portlandite dans un béton expérimental et par calculs). Cette teneur est un indicateur de durabilité étant donné que la Portlandite présente dans le béton a tendance à réagir avec des composants extérieurs et à détériorer le béton. Par exemple, comme expliqué dans la section 4.4, le $Ca(OH)_2$ réagit avec des ions sulfate pour créer, au final, de l'étringite secondaire qui a la particularité de gonfler, d'amener des contraintes supplémentaires internes au béton et causer des fissurations.

La teneur en Portlandite des mortiers étudiés dans ce mémoire ne sera pas mesurée mais un essai de carbonatation sera réalisé, cet essai est directement relié à la teneur en chaux étant donné que la carbonatation est le fruit de la réaction entre la chaux et le dioxyde de carbone.

Pour conclure ce chapitre, le tableau 5.1 est présenté ci-dessous et classe les différents indicateurs de durabilité. Il donne les différentes valeurs possibles pour les indicateurs de durabilité (Porosité, Perméabilité, Diffusion,...) et les classe en fonction de la durabilité potentielle qu'ils peuvent assurer ou pas à un béton armé [18]. Les indicateurs de durabilité présentés dans le tableau ne seront pas tous évalués lors de ce travail de fin d'études (cfr section 8).

Durabilité Potentielle → Indicateur général ↓	Très Faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée
Porosité accessible à l'eau (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion "effectif" des Cl^- ($10^{-12}m^2/s$)	> 8	2 à 8	1 à 2	0.1 à 1	< 0.1
Coefficient de diffusion "apparent" des Cl^- (Essai de migration) ($10^{-12}m^2/s$)	>50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	<1
Coefficient de diffusion "apparent" des Cl^- (Essai de diffusion) ($10^{-12}m^2/s$)	>50	10 à 50	5 à 10	<5	<5
Perméabilité "apparente" aux gaz ($10^{-18}m^2$) à S=0	>1000	300 à 1000	100 à 300	30 à 100	<30
Perméabilité intrinsèque à l'eau liquide ($10^{-18}m^2$) à S=1	>10	1 à 10	0.1 à 1	0.01 à 0.1	<0.01
Teneur en $Ca(OH)_2$ (% par rapport à la masse de ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	>25

TABLE 5.1 – Classes associées aux indicateurs de durabilité généraux [18]

Deuxième partie

Programme de recherches expérimentales

Chapitre 6

Matériaux utilisés dans la composition des mortiers étudiés

Les matériaux utilisés pour réaliser les différents mortiers sont identiques à ceux utilisés par Enrico Tabarelli dans son travail de fin d'études intitulé "The Recycling Of Crushed Waste Bricks In The Self-Compacting Mortar". Ces matériaux ont été réutilisés dans le but de poursuivre l'étude de Mr. Tabarelli sur l'utilisation de fines (aussi appelés "poudre") et de sable de brique dans des mortiers auto-compactant avec ici, la durabilité de ces types de mortier au centre des attentions.

La description des différents matériaux utilisés dans la composition des mortiers étudiés dans ce travail est présentée ci-dessous. Aussi bien les matériaux non-recyclés (ciment, sable de calcaire,...) que les matériaux recyclés (fines et sable de brique).

6.1 Ciment Portland CEM I 52.5 N

Le ciment utilisé pour la composition des mortiers est un ciment Portland CEM I 52.5 N qui est un ciment composé de 97 % de Clinker et de 3 % de fillers (Annexe B). Différentes caractéristiques intéressantes de ce ciment sont présentées dans le tableau 6.1 [50] :

Masse volumique absolue [kg/m^3]	3100
Compacité [-]	0.49

TABLE 6.1 – Caractéristiques du ciment

6.2 Fines de calcaire

Les fines calcaires sont utilisées dans tous les mortiers conçus dans ce travail de fin d'études. Ce sont des CALCITEC 2001S, la fiche technique est disponible dans les annexes (Annexe n°D. Mr. Tabarelli a, lui-même, vérifié différentes propriétés du matériau pour s'assurer de leur véracité et augmenter la précision. Le tableau 6.2 donne la valeur de la masse volumique ainsi que de la surface spécifique calculée par Mr. Tabarelli tandis que la figure 6.1 présente la courbe granulométrique du matériau [50].

Masse volumique absolue [kg/m^3]	2734
Surface spécifique [cm^2/g]	3174.88

TABLE 6.2 – Caractéristiques des fines de calcaire

La masse volumique des fines de calcaire est particulièrement importante étant donné qu'il s'agit d'une **substitution volumique** des fines de calcaire par des fines de brique recyclée.

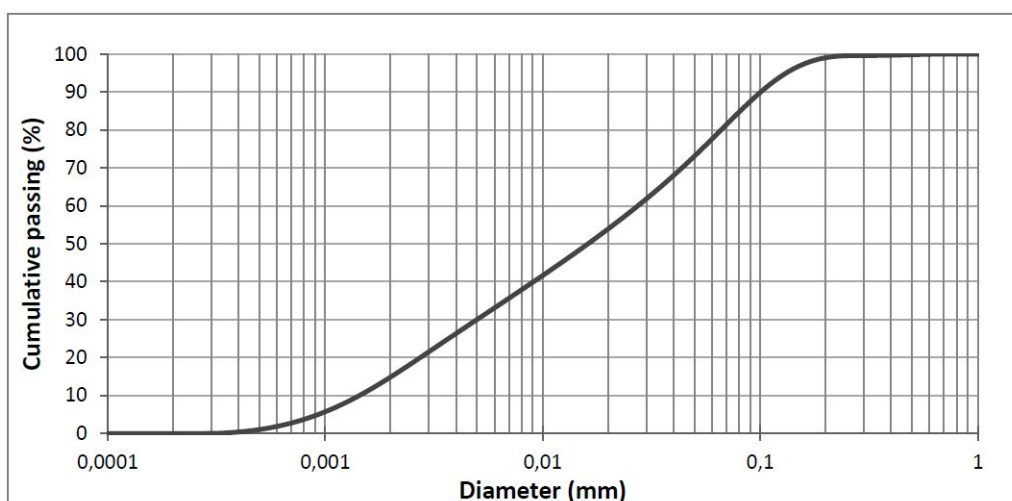


FIGURE 6.1 – Courbe granulométrique des fines de calcaire [50]

6.3 Sable de calcaire

Du sable de calcaire 0/4 mm a été utilisé dans la composition de certains mortiers auto-compactants. Il a été fourni par Carmeuse, situé à Engis. La masse volumique considérée dans les calculs de substitution volumique est disponible au tableau 6.3 ainsi que le coefficient d'absorption d'eau qui sera important dans le calcul de la quantité d'eau totale nécessaire au mélange. La courbe granulométrique est fournie à la figure 6.2 [50].

Masse volumique absolue [kg/m^3]	2700
Coefficient d'absorption d'eau [%]	0.84

TABLE 6.3 – Caractéristiques du sable de calcaire

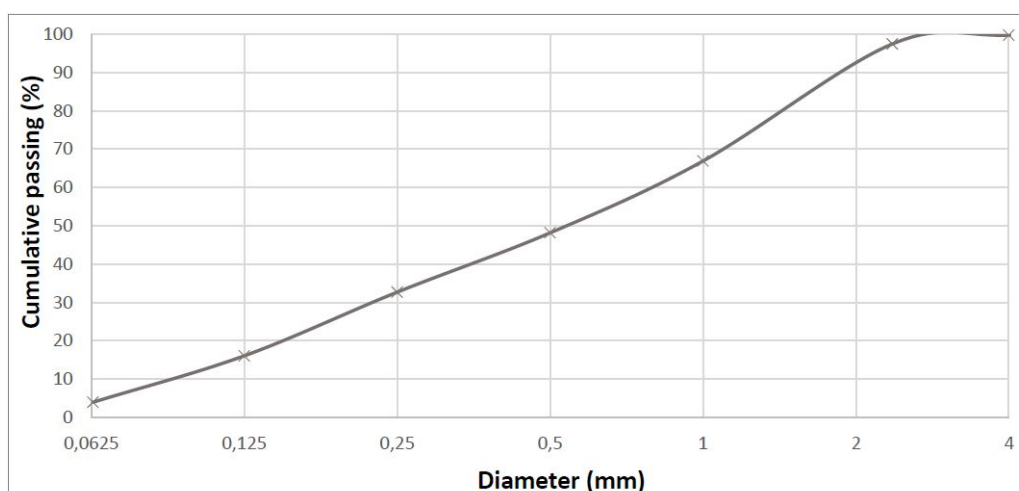


FIGURE 6.2 – Courbe granulométrique du sable de calcaire [50]

6.4 Sable normalisé [EN 196-1]

Le sable normalisé a été utilisé dans les mortiers auto-compactants composés de fines de calcaire partiellement substituées par des fines de brique. Il provient de la société Nouvelle du Littoral située à Leucate, en France. Toutes ces caractéristiques ont été déterminées grâce à différents tests. Les caractéristiques les plus importantes pour ce travail sont situées dans le tableau 6.4. L'annexe C fournit la fiche technique du matériau.

Masse volumique absolue [kg/m^3]	2640
Coefficient d'absorption d'eau [%]	0.2

TABLE 6.4 – Caractéristiques du sable normalisé [EN 196-1]

Son coefficient d'absorption d'eau étant très faible, le sable normalisé n'interagit pas avec l'eau du mélange. Le comportement de la pâte est donc uniquement relié à l'interaction entre l'eau du mélange, les fines (calcaire et brique) et le ciment. Ceci est la raison principale de son utilisation [50].

6.5 Matériaux recyclés : Brique

Cette section est un résumé du travail réalisé par Mr.Tabarelli dans son travail de fin d'études. Effectivement, Mr.Tabarelli a produit et étudié des sables et des fines de brique. Cette partie du travail va expliquer la préparation des matériaux, la composition chimique d'une brique ainsi que les caractéristiques finales des sables et des fines de brique.

6.5.1 Préparation des matériaux

Les briques récoltées proviennent de la destruction d'un site de la société Ploegstreet, situé à Tournai. La fiche technique disposant des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau est disponible à l'annexe E. Ces briques sont tout d'abord passées par l'INISMA (L'institut Interuniversitaire des Silicates, Sols et Matériaux). Cet institut a réalisé des essais sur les briques pour interpréter leurs réactions à l'attaque de composés chimiques. Pour cette raison, avant leur utilisation, les briques ont été nettoyées à l'aide d'outils à air comprimé et de brosses afin de s'assurer de l'absence de composants parasites qui pourraient modifier les caractéristiques mécaniques et chimiques de la brique. Au total, 177kg de briques ont été broyées.



FIGURE 6.3 – Briques recyclées et cassées en morceaux de tailles inférieures à 200mm [50]

Le broyage des briques recyclées était composé de plusieurs étapes distinctes. La première consistait à casser les briques visibles sur la figure 6.3 (photo de gauche) en morceaux ne dépassant pas 200m

de longueur (figure 6.3, photo de droite) afin de pouvoir réaliser l'étape suivante.

La deuxième étape était l'utilisation de concasseurs à mâchoires. Deux concasseurs à mâchoires différents ont été utilisés pour augmenter la précision des matériaux récoltés, un D220 et un D120. Un schéma de ces concasseurs est disponible à la figure 6.4. En résumé, la mâchoire mobile comprime les matériaux contre la mâchoire immobile jusqu'au broyage de ceux-ci.

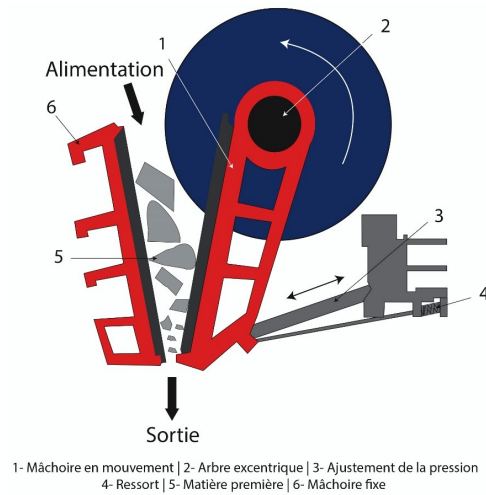


FIGURE 6.4 – Concasseur à mâchoires [10]

Les morceaux de briques cassées ont d'abord été introduits dans le concasseur à mâchoires D220 pour obtenir, en sortie, des morceaux de briques avec des dimensions inférieures à 30mm. Ensuite, ces mêmes morceaux ont été introduits dans le concasseur à mâchoires D120. Ceci a permis de diminuer la granulométrie maximale de 30mm à 10mm. La figure 6.5 montre les matériaux extraits des concasseurs D220 (à gauche) et D120 (à droite).



FIGURE 6.5 – Matériaux obtenus après le passage dans les concasseurs à mâchoires D220 et D120 [50]

Au total, 171kg de matière est sortie des concasseurs à mâchoires D120. Toute cette matière a été placée sur un tamis vibrant disposant d'ouvertures de 4mm de diamètre. Les grains ayant traversé le tamis ont constitué le sable de brique utilisé dans la production des mortiers auto-compactant nécessaires à cette thèse. Ce sable avait donc une granulométrie maximale de 4mm. Au final, 25kg sur les 137kg initial ont été récupérés et utilisés comme "sable de brique".

La matière n'ayant pas traversé le tamis allait être utilisée pour produire les fines de brique nécessaires à la production d'autres mélanges de mortiers nécessaires pour ce TFE. Les granulats de brique ont été placés dans un broyeur à boules. Le but était d'obtenir des fines avec une granulométrie la plus proche possible de celle des fillers calcaires. Deux paramètres sont à fixer lors de l'utilisation

d'un broyeur à boules : la taille des boules et le temps de broyage. Pour produire les fillers de brique, des boules de 25mm de diamètre ont été utilisées et les granulats étaient broyés 20 minutes au total. Le broyeur pouvait broyer 15kg de matière à la fois. Une interruption était prévue toutes les 10 minutes afin de vérifier que la répartition de la granulométrie soit régulière et si elle est proche de celle des fillers de calcaire[50].

6.5.2 Composition chimique de la brique

La composition chimique d'une brique est disponible au tableau 6.5.2. Celle-ci est principalement composée de silicate (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Les briques rouges de construction ont donc des bases argileuses et peuvent avoir des compositions chimiques légèrement différentes en fonction de leurs lieux d'extraction.

Éléments	Brique (%)
SiO_2	63.44
Al_2O_3	10.11
Na_2O	0.13
K_2O	2.11
MgO	2.32
Fe_2O_3	16.6
Cr_2O_3	0.13
TiO_2	2.48
ZrO_2	0.13
P_2O_5	0.06
Mn_2O_3	0.22
Fire Loss (1050°)	0.525

TABLE 6.5 – Composition chimique d'une brique rouge [50]

6.5.3 Sable de brique 0/4 mm

Le sable de brique est utilisé dans différents mortiers étudiés dans ce travail. Il remplace volumiquement, avec différents pourcentages de substitution, le sable de calcaire. Sa masse volumique et son coefficient d'absorption d'eau sont disponibles dans le tableau 6.5.3. Ils ont été obtenus grâce à différentes études menées par Mr.Tabarelli lors de son mémoire [50].

Masse volumique absolue [kg/m^3]	2673
Coefficient d'absorption d'eau [%]	11.3

TABLE 6.6 – Caractéristiques du sable de brique

Le coefficient d'absorption de la brique est bien plus élevé que celui du sable normalisé ou encore du sable de calcaire. La courbe granulométrique du sable de brique 0/4 mm est disponible à la figure 6.6. Trois échantillons ont été testés et les résultats sont relativement similaires.

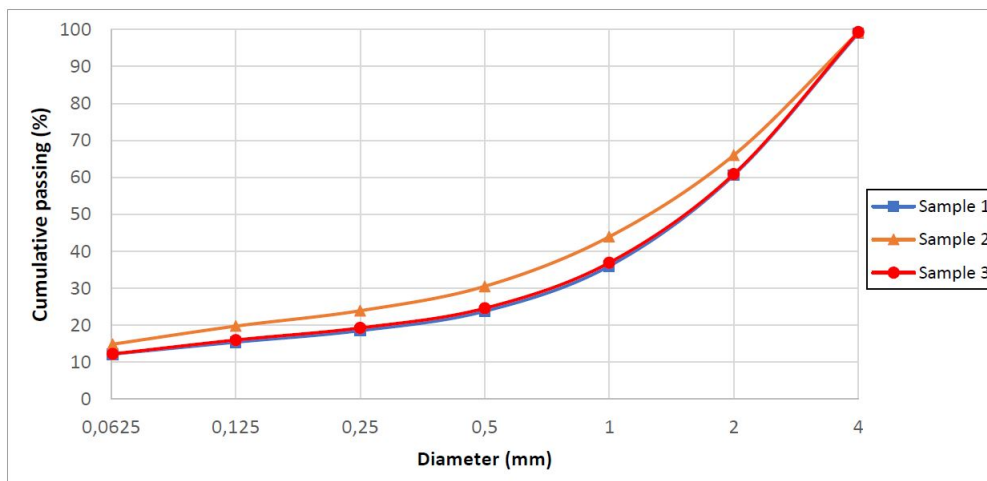


FIGURE 6.6 – Courbe granulométrique du sable de brique [50]

6.5.4 Poudre de brique 0/1000 μm

La poudre de brique va être utilisée en substitution de la poudre de calcaire dans des mortiers auto-compactants. Mr. Tabarelli a également étudié les caractéristiques des fines de brique. Le coefficient d'absorption d'eau utilisé est le même que celui utilisé pour le sable de brique mais la masse volumique des fines est différente (tableau 6.5.4).

Masse volumique absolue [kg/m^3]	3074
Coefficient d'absorption d'eau [%]	11.3

TABLE 6.7 – Caractéristiques des fines de brique

Utiliser le même coefficient d'absorption d'eau pour les fines que pour les briques consiste en une hypothèse. Effectivement, ce coefficient a été calculé pour le sable mais pas pour les fines étant donné la petite taille des particules. Le graphique 6.7 présente la répartition de la taille des pores d'une brique. Ce graphique montre que la brique est constituée presque uniquement de pores de $3\mu\text{m}$ de diamètre.

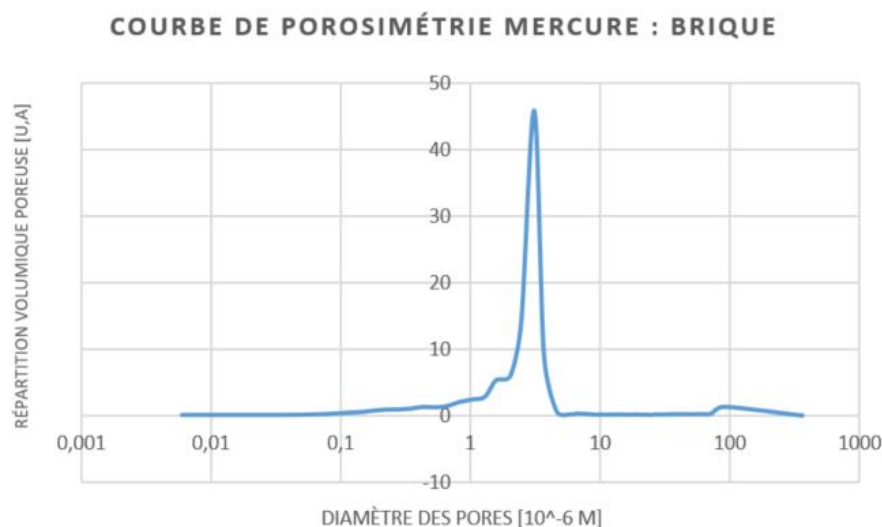


FIGURE 6.7 – Courbe de porosimétrie mercure de la brique

Mr. Tabarelli a également réalisé des essais pour mesurer la surface spécifique des fines de brique. Celle-ci était de $1835 \text{ cm}^2/\text{g}$ comparé à $3174 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour les fines de calcaire (Essai Blaine). Ceci signifie que la surface interne des pores de la brique est faible. Mais un essai appelé " β -P", qui caractérise la demande en eau des fines, a été également réalisé. Ce résultat a montré que les fines de brique demandaient plus d'eau que les fines de calcaire [50]. Il est donc nécessaire de rester prudent quant à l'absorption d'eau de la poudre de brique, mais le coefficient d'absorption d'eau utilisé est identique à celui du sable dans ce travail.

Pour rappel, l'objectif était d'avoir une répartition granulométrique la plus similaire possible à celle des fines de calcaire. La figure 6.8 compare les courbes granulométriques des deux matériaux. Le résultat est relativement de bonne qualité, les deux courbes sont proches.

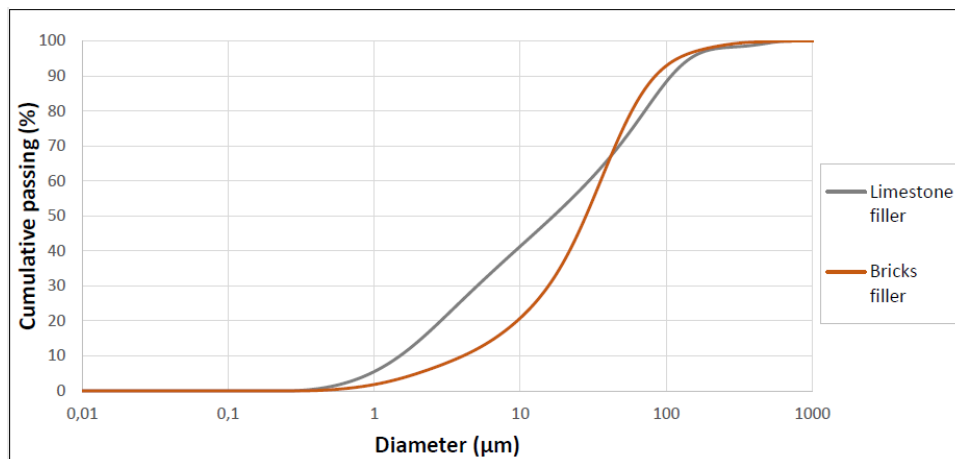


FIGURE 6.8 – Courbe granulométrique des fines de brique et des fines de calcaire [50]

Les matériaux qui vont composer les mortiers auto-compactants étudiés dans ce mémoire sont désormais tous définis. Il est désormais nécessaire de prendre connaissance des compositions précises des différents mortiers testés.

Chapitre 7

Composition et réalisation des mortiers

Les mélanges réalisés sont identiques à ceux réalisés par Mr.Tabarelli [50] afin, de nouveau, de poursuivre son étude sur l'utilisation de déchets de briques dans des nouveaux mortiers. L'étudiant s'est basé sur un béton auto-compactant de référence et a utilisé la méthode appelée "Concrete equivalent mortar method" pour passer d'un béton à un mortier. A noter que dans le béton de référence, des super-plastifiants étaient utilisés. Aucun super-plastifiant n'a été utilisé pour améliorer le comportement des fines de brique. Le rapport E/C sera augmenté pour obtenir un béton auto-compactant.

Deux "types" de mortier ont été réalisés. Dans le premier type de mortier, les fines de calcaire sont remplacées avec certaines proportions par des fines de déchets de brique. Le second type de mortier voit sa quantité de sable de calcaire être remplacée avec certaines proportions par du sable de brique recyclées.

7.1 Fines de brique

5 mélanges différents ont été réalisés avec des fines de brique avec, chaque fois, un pourcentage de substitution. Le premier mélange est un mélange référence sans fines de brique. Ensuite, deux mélanges sont composés de 50 % de fines de brique et 2 autres mélanges de 100 % de fines de brique. Les mélanges identiques se distinguent par l'ajout d'eau que la poudre de brique pourrait absorber. Effectivement, la section 6.5 explique les incertitudes concernant l'absorption d'eau des fines de brique, pour cela 2 types de mélanges sont réalisés : avec et sans absorption d'eau des fines de brique pour vérifier la présence ou non de micro-porosité. La quantité d'eau ajoutée aux mélanges équivaut au poids de la poudre de brique (en gramme) multiplié par le coefficient d'absorption d'eau considéré pour la poudre de brique (11.3%).

Le tableau 7.1 montre les quantités de matériaux (en gramme) utilisé pour réaliser les 5 différents mortiers et ce, pour un poids total d'environ 2.5 kg. Le rapport E/C effectif (sans considérer l'eau absorbée) est relativement élevé (0.8) afin d'amener une grande ouvrabilité.

A noter que le sable normalisé était fourni dans des sachets de 1350 kg, il fallait utiliser l'entièreté du sachet pour ne pas perturber la distribution. Les masses des autres constituants dépendaient donc de cette donnée fixe mais le volume final était plus grand que celui nécessaire à la réalisation de 3 échantillons de dimensions 4x4x16.

Il y avait, pour chaque mélange, une certaine quantité de mortier inutilisée. PBNAE correspond à un mélange de poudre de brique sans absorption d'eau tandis que PBAE correspond à un mélange ou une absorption d'eau par les fines de brique est considérée.

Poudre de Brique [g]									
Echantillon	Remplacement [%]	Ciment [g]	Poudre calcaire [g]	Poudre brique [g]	Eau [g]	Eau absorbée [g]	Sable Normal [g]	Total water [g]	Masse Totale [g]
<i>PB-0</i>	0,00	448,00	298,33	0,00	358,40	0,00	1350,00	358,40	2454,73
<i>PBNAE-50</i>	50,00		149,17	167,72		0,00		358,40	2473,28
<i>PBNAE-100</i>	100,00		0,00	335,43		0,00		358,40	2491,83
<i>PBAE-50</i>	50,00		149,17	167,72		18,95		377,35	2492,23
<i>PBAE-100</i>	100,00		0,00	335,43		37,90		396,30	2529,73

TABLE 7.1 – Masses des constituants des mortiers contenant de la poudre de brique (Quantité nécessaire pour les échantillons des tests de carbonatation et d'attaque des sulfates)

Cette composition a été utilisée pour produire les échantillons des tests de carbonatation et d'attaque des sulfates (3 barrettes 4x4x16 par mélange pour un volume total de 768 cm³ de mortier). Pour les tests relatifs à la diffusion d'ions chlore, une quantité supérieure était nécessaire pour remplir les moules. Les compositions du tableau 7.1 ont alors été multipliées par un facteur 2 afin de garder les mêmes proportions. Le tableau 7.2 reprend ces compositions.

Poudre de Brique [g]									
Echantillon	Remplacement [%]	Ciment [g]	Poudre calcaire [g]	Poudre brique [g]	Eau [g]	Eau absorbée [g]	Sable Normalisé [g]	Total water [g]	Masse Totale [g]
<i>PB-0</i>	0,00	896,00	596,66	0,00	716,80	0,00	2700,00	716,80	4909,46
<i>PBNAE-50</i>	50,00		298,33	335,43		0,00		716,80	4946,56
<i>PBNAE-100</i>	100,00		0,00	670,86		0,00		716,80	4983,66
<i>PBAE-50</i>	50,00		298,33	335,43		37,90		754,70	4984,46
<i>PBAE-100</i>	100,00		0,00	670,86		75,81		792,61	5059,47

TABLE 7.2 – Masses des constituants des mortiers contenant de la poudre de brique (Quantité nécessaire pour les essais de diffusion d'ions chlore)

Une fois les matériaux pesés, les mortiers pouvaient être réalisés. Les premiers (carbonatation et attaque des sulfates) ont été conçus à l'aide du malaxeur visible sur la figure 7.1. Ce malaxeur était limité à un mélange de 2.5 kg. Pour les autres échantillons (ions chlore), ou la quantité de matière atteignait les 5 kg, le malaxeur montré sur la figure 7.2 a été utilisé. La même procédure a été suivie pour tous les mortiers composés de poudre de brique peu importe le type de malaxeur. Cette procédure est la suivante :

1. Humidifier les parois du malaxeur
2. Introduire tous les matériaux secs dans le mixer (ciment, fines, sable)
3. Démarrer le malaxeur pendant 30 secondes à la vitesse n°1 (faible)
4. Ajouter l'eau nécessaire pour le mélange
5. Mélanger pendant 90 secondes à la vitesse n°1 (faible)
6. Arrêter le malaxeur et laisser reposer pendant 60 secondes
7. Redémarrer le malaxeur pendant 30 secondes à la vitesse n°1 (faible)
8. Augmenter la vitesse au niveau 2 (grande) et mélanger pendant 60 secondes



FIGURE 7.1 – Malaxeur utilisé pour réaliser les mortiers (Capacité Max : 2.5 kg)



FIGURE 7.2 – Malaxeur utilisé pour réaliser les mortiers (Capacité Max : 5 kg)

7.2 Sable de brique

5 autres mélanges ont été réalisés avec une substitution partielle du sable de calcaire par du sable de brique. Du sable de calcaire est utilisé à la place du sable normalisé afin d'avoir des courbes granulométriques similaires. Il y avait donc 5 pourcentages de substitution différents : 0, 5, 10, 25 et 50 %.

Il est important de préciser que le sable de brique devait être saturé en eau 24h avant de procéder à la réalisation des mélanges pour améliorer l'ouvrabilité, il a donc été placé dans l'eau nécessaire au mélange (Exemple tableau 7.3 : Mélange SB-10 ; 97.44g de sable de brique ont été placés dans 313.93g d'eau) 24h avant la réalisation du mortier.

Le tableau 7.3 contient les quantités de matériaux (en gramme) pour les 5 différents mélanges et ce, pour une masse totale inférieure à 1.9 kg. Le rapport E/C équivaut à 0.9. Contrairement au mélange avec poudre de brique, le volume exact nécessaire était produit et il n'y avait donc aucun déchet. Pour exemple, le mélange SB-5 est un mélange où 5 % du sable calcaire a été remplacé par du sable de brique recyclé.

Sable de brique [g]		Ciment [g]	Poudre calcaire [g]	Eau [g]	Eau absorbée [g]	Sable calcaire [g]	Sable brique [g]	Total water [g]	Masse Totale [g]
Echantillon	Remplacement [%]								
SB-0	0,00	391,98	261,03	352,79	11,81	1181,20	0,00	364,60	2198,81
SB-5	5,00				17,83	1122,14	58,47	370,61	2204,24
SB-10	10,00				23,84	1063,08	116,94	376,63	2209,66
SB-25	25,00				41,89	885,90	292,35	394,68	2225,94
SB-50	50,00				71,98	590,60	584,69	424,76	2253,07

TABLE 7.3 – Masses des constituants des mortiers contenant du sable de brique (Quantité nécessaire pour les échantillons des tests de carbonatation et d'attaque des sulfates)

Tout comme pour les mélanges avec la poudre de brique, il fallait une quantité de matière plus importante pour remplir les moules des échantillons destinés à l'essai de diffusion des ions chlore. Les mêmes proportions ont été conservées mais le volume total de matière a été multiplié par un facteur supérieur à 2. Le tableau 7.4 reprend ces compositions.

Sable de brique [g]		Ciment [g]	Poudre calcaire [g]	Eau [g]	Eau absorbée [g]	Sable calcaire [g]	Sable brique [g]	Total water [g]	Masse Totale [g]
Echantillon	Remplacement [%]								
SB-0	0,00	886,53	590,35	797,87	26,71	2671,45	0,00	824,59	4972,92
SB-5	5,00				40,32	2537,88	132,24	838,20	4985,19
SB-10	10,00				53,93	2404,31	264,47	851,80	4997,47
SB-25	25,00				94,75	2003,59	661,18	892,62	5034,28
SB-50	50,00				162,79	1335,73	1322,37	960,66	5095,64

TABLE 7.4 – Masses des constituants des mortiers contenant du sable de brique (Quantité nécessaire pour les essais de diffusion d'ions chlore)

La procédure de mélange était légèrement différente à celle suivie pour les mortiers avec poudre de brique due au fait que les sables de briques étaient déjà mouillés car placés dans l'eau du mélange 24h avant la réalisation des mortiers. Celle-ci est précisée ci-dessous :

1. Humidifier les parois du malaxeur
2. Introduire tous les matériaux dans le mixer (ciment, fines, sable de brique, eau, sable de calcaire)
3. Démarrer le malaxeur pendant 120 secondes à la vitesse n°1 (faible)
4. Arrêter le malaxeur et laisser reposer pendant 60 secondes
5. Redémarrer le malaxeur pendant 30 secondes à la vitesse n°1 (faible)
6. Augmenter la vitesse au niveau 2 (grande) et mélanger pendant 60 secondes

Les mortiers sont désormais composés et identifiés. Ces derniers vont subir différents essais pour tenter de caractériser leur durabilité. Les différents essais réalisés lors de ce travail de fin d'études sont définis et expliqués dans le chapitre suivant.

Chapitre 8

Description des tests réalisés

8.1 Carbonatation

But de l'essai

Le but de cet essai consiste à déterminer la profondeur de carbonatation au moyen d'un indicateur. Plus cette profondeur sera grande pour un type de mortier, moins celui-ci sera considéré comme durable. La norme utilisée est CPC-18 "Measurement of hardened concrete carbonatation depth" [4].

Réalisation et traitement des échantillons

3 échantillons de dimension 4x4x16cm ont été réalisés pour chaque mélange (30 barrettes au total). Elles ont été démoulées après 24h et sont ensuite restées immergées dans l'eau pendant 42 jours. Elles ont ensuite séché pendant 14 jours à une température de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et avec une humidité de $60\% \pm 5\%$.

Cependant, après 14 jours toutes les éprouvettes n'étaient pas complètement sèches étant donné que la différence de masse entre les pesées du jour J et les pesées du jour (J-1) était supérieure à 0.1 % de la masse de l'éprouvette au jour (J-1). Des pesées ont donc été réalisées jusqu'à ce que la différence de masse soit inférieure à 0.1 %. Après 27 jours, les éprouvettes étaient toutes sèches.

Cette grande durée de séchage peut s'expliquer par un manque d'aération. Effectivement, les éprouvettes étaient stockées sur une étagère sous un meuble et n'était donc pas directement exposées à une bonne aération. La photo de la figure 8.1 montre les moules utilisés pour la réalisation des barrettes ainsi que le résultat final après traitement.

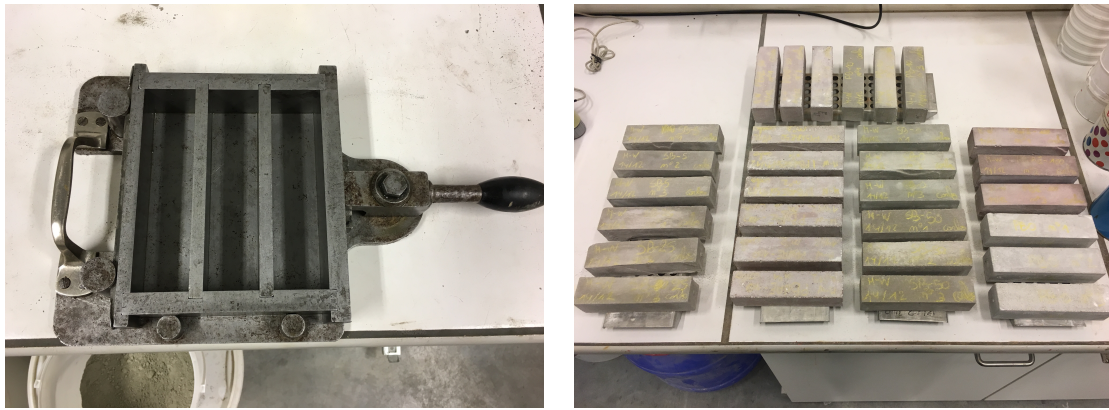


FIGURE 8.1 – Échantillons réalisés pour les essais de carbonatation

Mode opératoire

Une fois les échantillons séchés, une première mesure de carbonatation devait être réalisée au jour "0". Pour cela, ils ont été fendus à l'aide d'une presse hydraulique manuelle montrée à la figure 8.2. Les morceaux fendus mesuraient environ 3cm de long.



FIGURE 8.2 – Fendeuse

Ces morceaux ont ensuite été aspergés d'une solution de phénolphthaléine. Cette solution joue le rôle d'indicateur. Le mortier non carbonaté vire au rose après l'application du produit tandis que le mortier victime de carbonatation va rester incolore après l'application de l'indicateur. Ceci s'explique par une variation du PH. La phénolphthaléine color lorsque le PH est supérieur à 9 et reste incolore lorsque le PH est inférieur à 9. Il est recommandé de mesurer la profondeur de carbonatation 24h après l'application de la phénolphthaléine. La photo de la figure 8.4 montre les échantillons après application du produit au jour "0".



FIGURE 8.3 – Première mesure de carbonatation au jour "0"

Les barrettes (amputées d'un morceau de 3cm de long) ont été placées dans un caisson (figure 8.4) qui instaure une concentration de 1 % de CO_2 , une température de $23^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ et une humidité entre 60 et 70 %. La concentration en CO_2 est grande (0.03 % en temps normal à l'extérieur) afin d'accélérer le processus de carbonatation. Les barrettes ont été placées verticalement dans le caisson pour minimiser la surface appuyée sur les grilles.

FIGURE 8.4 – Caisson de stockage des éprouvettes pour l'essai de carbonatation (Concentration CO_2 = 1 %, Température = $23^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$, Humidité = $65 \% \pm 5 \%$)

La mesure de la profondeur de carbonatation doit être réalisée précisément avec, au total, 8 mesures de profondeur. Comme montré sur la figure 8.5, les 4 faces de l'éprouvette doivent être dissociées. La surface numéro 1 est la surface qui était à l'air libre dans le moule lors de la production des mortiers tandis que la surface n°3 était la surface située dans le fond du moule lors du durcissement du mortier.

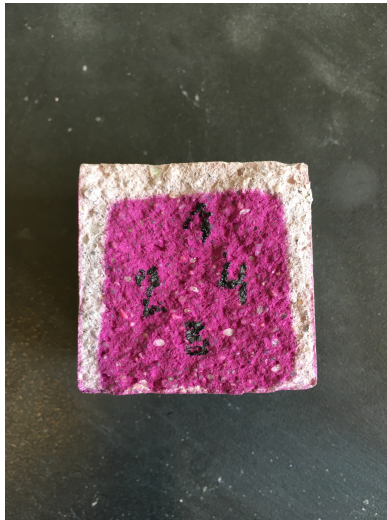


FIGURE 8.5 – Exemple de marquage des surfaces d'un échantillon de carbonatation

Les 8 mesures à réaliser consistent en 2 mesures par surface en mm : 1 profondeur maximale et 1 profondeur minimale. Finalement, la profondeur de carbonatation finale sera égale à la moyenne des différentes mesures et exprimée en mm.

8.2 Diffusion d'ions chlore en régime stationnaire

But de l'essai

Cet essai consiste à mesurer un coefficient de diffusion effectif D_e grâce à l'utilisation de cellules de diffusion (figure 8.6). Cet essai a été en réalisé en se basant sur le travail de fin d'études de mademoiselle Casasanta [15].

Composition des cellules de diffusion

Celles-ci sont constituées de deux compartiments distincts. L'un d'entre eux contient une solution saturée à la chaux $Ca(OH)_2$ de concentration 3g/l. Le second compartiment est également composé d'une solution saturée en chaux à laquelle est additionnée une solution aqueuse de chlorure de sodium $NaCl$ de concentration 3 moles.

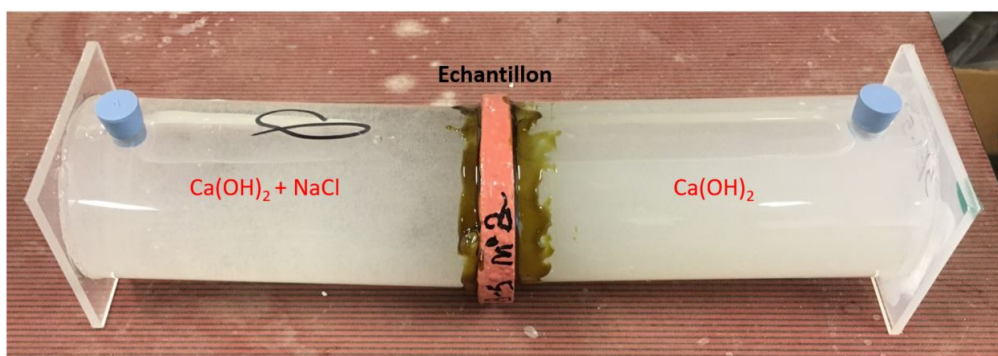


FIGURE 8.6 – Cellules de diffusion d'ions chlore

Les compartiments sont des tubes en plexiglas de diamètres intérieurs de $5.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ cm}$. Ceux-ci sont collés de part et d'autre de l'échantillon de mortier à l'aide d'une colle bi-composant de type époxy. Les tubes en plexiglas comportent une ouverture par laquelle les solutions pourront être insérées et récoltées. Le diamètre de l'éprouvette de mortier étant plus large que celui du tube, la partie dépassante est recouverte d'une résine d'époxy qui va permettre d'assurer l'étanchéité.

Le coefficient de diffusion effectif D_e est déterminé en mesurant l'évolution de concentration en chlore du 1er compartiment qui était initialement dépourvu de chlore.

Réalisation et traitement des échantillons

Les mortiers frais (10 mélanges différents) ont été coulés dans 1 pot en plastique de diamètre 100mm et 150mm de hauteur (le pot le plus haut sur la figure 8.10).



FIGURE 8.7 – Moulage des échantillons destinés aux essais de diffusion des ions chlore

Une fois le béton durci (24h après la réalisation des mortiers), les cylindres ont été démoulés et placés dans l'eau durant 40 jours. Ils ont ensuite été carottés pour obtenir des échantillons de 80mm de diamètre. Les faces inférieures et extérieures ont été sciées, le cylindre de mortier résultant a ensuite été scié en deux pour obtenir finalement 2 éprouvettes d'environ 10mm d'épaisseur. L'épaisseur de chaque éprouvette rentre dans le calcul du coefficient de diffusion effectif. Elles ont été précisément mesurées (moyenne de trois épaisseurs mesurées à des endroits différents de l'éprouvette).



FIGURE 8.8 – Carottage et sciage des échantillons

Deux échantillons de chaque mélange (20 au total) ont été réalisés. Ils sont exposés sur la figure 8.9 aux côtés des carottes utilisées pour l'essai de diffusion forcée qui sera décrit plus loin dans le rapport.



FIGURE 8.9 – Échantillons réalisés pour les essais de diffusion d'ions chlore (Diffusion en régime stationnaire et Diffusion forcée)

Ensuite, les échantillons ont été recouverts de la couche de résine époxy sur les bords afin d'assurer l'étanchéité durant toute la durée de l'essai. Après l'application de la résine, elles ont séché une dizaine de jours afin que toute l'eau soit bien sortie des éprouvettes pour l'étape suivante.

Effectivement, les éprouvettes devaient ensuite être saturées en eau de chaux (et donc pas en eau) pour éviter que le transport d'ions chlore se fasse par succion capillaire ou par humidité. Les échantillons ont été saturés sous vide pour plus d'efficacité. Les étapes suivantes ont été réalisées (A noter qu'elles ont été saturées 4 à la fois pour cause de manque de place dans la cloche utilisée) :

1. Mise sous vide de la cloche et des échantillons à l'intérieur sans eau de chaux (Durée : 2h)
2. Remplissage de la cloche pour baigner le premier niveau d'éprouvettes pour favoriser l'absorption capillaire (Durée : 2h).
3. Remplissage de la cloche pour baigner le second niveau d'éprouvettes pour favoriser l'absorption capillaire et donc submersion du premier niveau d'échantillons (Durée : 2h).
4. Submersion du second niveau d'éprouvettes (Durée : $\pm 20h$)

Ces différentes étapes sont illustrées à la figure 8.10.

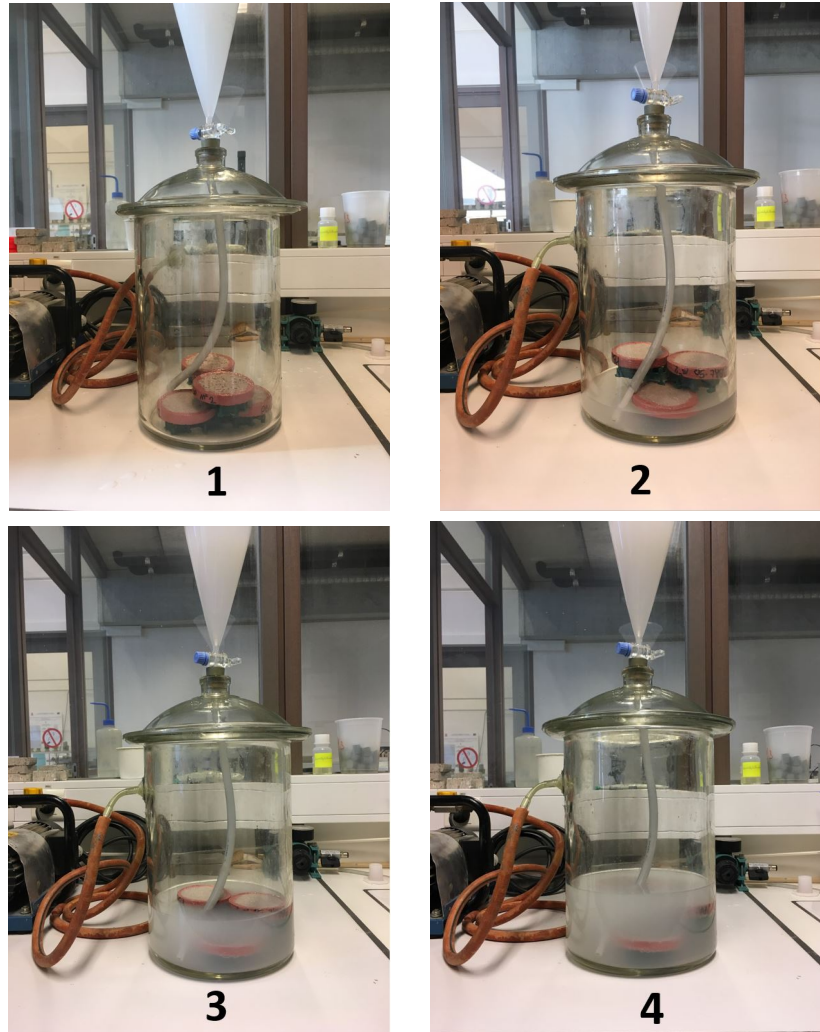


FIGURE 8.10 – Saturation en eau de chaux des échantillons destinés à l'essai de diffusion d'ions chlore en régime stationnaire

Enfin, Les cellules ont été assemblées en collant nos éprouvettes de mortier aux deux tubes de plexi-glas à l'aide d'une colle "Araldite" (Combinaison entre un "Durcisseur HY 850 (CIBA-GEIGY)" et un composant "Araldite PY 340 (CIBA-GEIGY)"). Il était important de veiller à ce que les faces des échantillons ne sèchent pas pendant le temps de prise de la colle. Celles-ci étaient donc en permanence humidifiées (à l'aide de papier gorgé d'eau de chaux) et l'assemblage a été réalisé rapidement ! Les cellules de diffusion ont été stockées sur une étagère dans un local du laboratoire où la température est conditionnée à 20°C pendant toute la durée du test.

Mode opératoire

Le mode opératoire suivi est similaire à celui utilisé par mademoiselle Casasanta lors de son travail de fin d'études [15] mis à part quelques détails. Tout d'abord, un prélèvement de 10 ml était réalisé dans chaque cellule de diffusion (dans le compartiment qui ne contenait, au départ, que de l'eau de chaux et appelé compartiment aval) toutes les deux semaines. Ensuite, il fallait déterminer la concentration (en mg/l) en ions chlorure dans le prélèvement à l'aide d'un titrage. Enfin, à l'aide de la concentration mesurée, il était possible de déterminer la quantité de chlorures ayant traversé l'échantillon. Il faut préciser que les prélèvements ont été réalisés toutes les deux semaines et non toutes les semaines pour ne pas avoir un nombre de titrage trop important à réaliser (gain de temps). Les cellules ont été réalisées tôt, ce qui a permis, malgré la période de prélèvement, d'avoir suffisamment de données.

A chaque prélèvement, 10 ml de solution était retiré à un compartiment. Il fallait donc s'assurer que le niveau de solution dans ce compartiment ne diminue pas trop fort pour ne pas laisser une partie de l'échantillon cylindrique s'assécher. Après le 4ème prélèvement, de la solution a été rajoutée dans tous les tubes avals. Attention, la solution rajoutée devait être saturée en eau de chaux ET avoir la même concentration en ions chlorure que celle mesurée lors du dernier prélèvement réalisé avant le remplissage pour chaque cellule différente.

Calcul pour la détermination du coefficient de diffusion effectif

Pour calculer le coefficient de diffusion effectif [15], il faut utiliser différentes expressions du flux ionique. Premièrement, ce flux ionique, dont l'unité est $[\frac{kg}{m^2s}]$ peut être représenté par la première loi de Fick :

$$J = \frac{D_{eff}}{e} \cdot (C_{amont} - C_{aval})$$

ou :

- D_{eff} correspond au coefficient de diffusion effectif $[m^2/s]$
- e correspond à l'épaisseur de l'échantillon cylindrique $[m]$
- C_{amont} correspond à la concentration en ions chlorure du compartiment amont $[kg/m^3]$
- C_{aval} correspond à la concentration en ions chlorure du compartiment aval $[kg/m^3]$

La seconde expression du flux ionique est la suivante :

$$J = \frac{V_{aval}}{\pi r^2} \cdot \frac{dC_{aval}}{dt}$$

dans laquelle :

- V_{aval} correspond au volume du compartiment aval $[m^3]$
- r correspond au rayon intérieur du tube aval $[m]$ et $r^2 \cdot \pi = A [m^2]$

En égalant ces deux équations et en intégrant l'équation résultante entre les temps t_0 , qui correspond au moment auquel apparaissent les premiers chlorures dans le compartiment aval, et t correspondant à la durée de diffusion (dernière mesure de l'essai), il advient :

$$\ln\left(1 + \frac{C_{aval}}{C_{amont} - C_{aval}}\right) = \frac{D_{eff} \cdot A}{e \cdot V_{aval}} \cdot (t - t_0)$$

Le coefficient de diffusion effectif peut alors être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$D_{eff} = \ln\left(1 + \frac{C_{aval}}{C_{amont} - C_{aval}}\right) \cdot \frac{e \cdot V_{aval}}{A \cdot (t - t_0)}$$

Dans le cas où la concentration dans le compartiment amont (C_{amont}) est largement supérieure à celle dans le compartiment aval (C_{aval}) ce qui signifie : $C_{amont} \gg C_{aval}$ alors l'équation du coefficient de diffusion effectif, pour rappel exprimé en m^2/s , devient :

$$D_{eff} = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \cdot \frac{e \cdot V_{aval}}{A \cdot (t - t_0)}$$

8.3 Diffusion d'ions chlorure forcée

But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la quantité totale de courant électrique traversant un échantillon et d'en déterminer une charge totale de pénétration. Celle-ci permettra de caractériser la perméabilité des différentes éprouvettes aux ions chlore. La norme utilisée pour la réalisation de cet essai est : ASTM C 1202-05 "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" [12].

Les résultats de cet essai pourront être comparés aux coefficients de diffusion déterminés au point précédent.

Réalisation et traitement des échantillons

Le traitement initial des échantillons est identique à celui expliqué au point 8.2 mis à part les dimensions des éprouvettes qui varient : les mortiers frais ont été coulés dans 3 pots de 110mm de diamètre et 70mm de hauteur (les 3 pots les moins hauts de la figure 8.10). Démoulage après 24h, 40 jours immergés dans l'eau, carottage des cylindres pour obtenir des diamètres de 100mm, sciage des faces externes des éprouvettes pour obtenir une épaisseur finale de 50mm. Ils ont ensuite été de nouveau placés dans l'eau pendant 16 jours pour un total de 56 jours d'immersion comme prescrit dans la norme ASTM C 1202-05 [12].

Les échantillons obtenus sont visibles à la figure 8.9. Une couche de résine époxy a été appliquée sur leur surface pour assurer l'étanchéité durant l'essai (figure 8.11).



FIGURE 8.11 – Échantillon cylindrique pour le test de diffusion d'ions chlore forcée recouvert d'une résine époxy

Finalement, les échantillons ont été saturés en eau sous vide à l'aide du bassin montré à la figure 8.12, dans lequel il n'y a aucune visibilité une fois le bassin fermé. Une méthode similaire à celle expliquée au point 8.2 a été réalisée. L'utilisation de celui-ci et non de la cloche a permis de saturer plus d'échantillons à la fois. Ces derniers étant relativement épais (50mm), il était aisé d'amener l'eau à \pm mi-hauteur sans risque de submerger les échantillons, malgré la non visibilité de l'intérieur du bassin, pour la première phase.



FIGURE 8.12 – Saturation en eau des échantillons destinés à l'essai de diffusion d'ions chlore forcée

Mode opératoire

L'essai consiste à placer les échantillons entre deux cellules contenant chacune un réservoir afin de placer une face de l'éprouvette en contact avec une solution NaCl (3 %) et l'autre en contact avec une solution NaOH (0.3N). La partie qui dispose de la solution de chlorure de sodium (NaCl) est reliée à la borne négative (cathode) tandis que celle disposant de la solution de soude caustique (NaOH) est reliée à la borne positive (anode). Ces bornes sont, quant à elles, connectées à un générateur qui engendre un courant à l'aide d'une différence de potentiel de 60V comme cité dans la norme ASTM C 1202-05 [12] et ce, pendant une durée totale de 6h. Le schéma présent à la figure 8.13 illustre les explications ci-dessus.

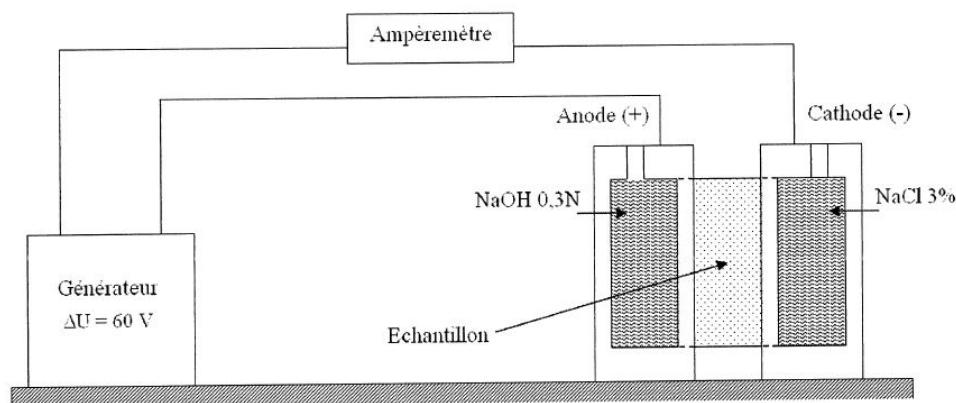


FIGURE 8.13 – Dispositif expérimental pour l'essai de diffusion d'ion chlore forcée [17]

Lorsque le champ électrique va être appliqué, les ions Cl^- vont tenter de migrer vers la borne positive. Plus le nombre d'ions traversant l'éprouvette est grand, plus le mortier pourra être considéré comme perméable et sensible à la pénétration d'ions chlore [17].

Pour "estimer" cette perméabilité aux ions chlore, il est nécessaire de mesurer le courant (en ampères) traversant l'éprouvette au minimum toutes les 30 minutes. Ces mesures pourront ensuite être utilisées dans un graphique représentant l'évolution de l'intensité du courant au cours du temps. L'estimation de la perméabilité s'obtient alors soit, en intégrant la courbe obtenue, soit, en mesurant la quantité totale de courant en coulombs ayant traversé l'échantillon à l'aide de la formule suivante fournie dans la norme [12] :

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

où :

- Q = Charge passée en coulomb
- I_0 = Courant (en ampère) mesuré directement après l'application du voltage
- I_t = Courant (en ampère) mesuré après le t minutes

Les éprouvettes confectionnées ont, pour rappel, un diamètre de 100mm. La norme précise que la formule ci-dessus concerne les échantillons avec un diamètre de 95mm. Il faut donc légèrement corriger le résultat à l'aide de la formule ci-dessous :

$$Q_s = Q_x \left(\frac{95}{x} \right)^2$$

où :

- Q_s = Courant passé dans une éprouvette de diamètre 95mm
- Q_x = Courant passé dans les éprouvettes confectionnées (avec un diamètre de 100mm)
- x = Diamètre des éprouvettes réalisée (100mm)

Le tableau présenté à la figure 8.14 donne une échelle de référence pour les bétons. Il n'est donc pas représentatif pour les résultats présentés ultérieurement dans ce travail étant donné que les essais ont été réalisés sur des mortiers et non sur des bétons. Les ions chlore pénètrent le béton en passant par le mortier et non par les granulats. Les résultats risquent donc d'être supérieurs aux valeurs présentées dans le tableau de la figure 8.14.

<i>Coulomb</i>	<i>Classe de perméabilité</i>
> 4000	Grande
4000 – 2000	Modérée
2000 – 1000	Petite
1000 – 100	Très petite
< 100	Négligeable

FIGURE 8.14 – Classe de perméabilité des bétons en fonction du courant total ayant traversé l'éprouvette durant l'essai [12]

Cependant, la norme concerne les échantillons de bétons et utilise également un appareillage bien précis. Dans le cas présent, les éprouvettes étudiées dans ce rapport sont du mortier et l'appareillage utilisé dans le laboratoire de l'université de Liège ne dispose pas d'instrument de mesure de la température et il n'y a donc aucun moyen de surveiller son évolution. Des tests ont été réalisés sur des éprouvettes des mélanges de références (PB-0 et SB-0). Ces tests ont permis de mettre en avant la

problématique du voltage. Effectivement, le mortier est bien plus susceptible à la pénétration d'ions chlore que ne l'est un béton classique, plus poreux et donc meilleur conducteur. Un voltage de 60v va donc engendrer un courant énorme, une surchauffe de l'appareillage durant l'essai et des résultats bancals comme présentés dans l'annexe F.

Pour s'assurer du bien-fondé des conclusions précisées plus haut et que l'appareil utilisé fonctionnait bien correctement, un essai de diffusion forcée avec un voltage de 60v a été réalisé sur une éprouvette de béton traité (saturée en eau et recouverte d'une couche d'époxy). Les résultats disponibles dans l'annexe F sont bien plus logiques. Le béton testé rentre dans la classe de perméabilité "Très petite".

Finalement, les essais de diffusion d'ion chlore forcée ont été réalisés avec un voltage inférieur pour éviter toutes surchauffes néfastes aux mesures. Afin de concorder avec le travail de fin d'études de mademoiselle Casasanta [15], dans lequel un voltage de 30v était employé, le même voltage de 30v a été utilisé pour l'essai de diffusion forcée des ions chlore dans ce TFE.

8.4 Attaque des sulfates

But de l'essai

Le but de cet essai est d'analyser la modification de longueur de barres de mortier déposées dans des solutions de sulfate. Cette variation de longueur indiquera la perméabilité des mortiers au sulfate. La norme utilisée est : ASTM C 1012-04 "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution" [11].

Réalisation et traitement des échantillons

Les éprouvettes produites pour cet essai ont subi un traitement identique à celles utilisées pour le test de carbonatation expliqué au point 8.1. 30 barrettes de dimensions 4x4x16cm ont été réalisées et coulées dans des moules identiques à celui de la figure 8.1. Elles ont ensuite été démoulées après 24h et placées dans l'eau pendant 35 jours. Enfin, elles ont séché 27 jours avant d'être placées dans la solution de sulfate.

Afin de mesurer la variation de longueur de ces barrettes, nous avons placé des plots métalliques dans les moules avant d'y couler le mortier aux extrémités des barrettes. Ils sont donc à l'intérieur des barrettes de mortier et permettront la mesure de ceux-ci à l'aide de l'appareil appelé rétractomètre exposé à la figure 8.16. Ces plots métalliques ainsi que les échantillons après séchage sont montrés à la figure 8.15.

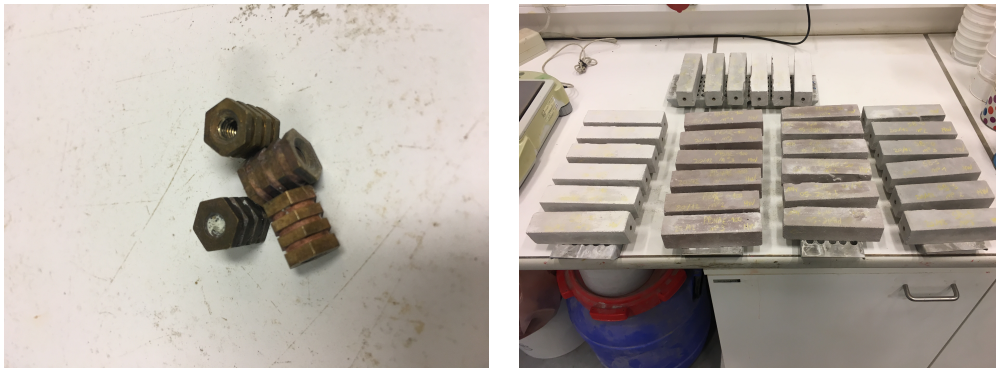


FIGURE 8.15 – Échantillons réalisés pour les essais d'attaque sulfate



FIGURE 8.16 – Rétractomètre mesurant la variation de longueurs des barrettes de mortier en microns

Mode opératoire

Pour mesurer le potentiel gonflement des barrettes, des mesures devaient être réalisées régulièrement (toutes les semaines par exemple).

Pour la déformation longitudinale, la première mesure a été réalisée juste avant de plonger les échantillons dans les bacs remplis de solution de sulfate, c'était une mesure étalon pour avoir un point de départ. Ensuite des mesures étaient réalisées toutes les semaines à l'aide du rétractomètre. Avant de mesurer les éprouvettes, celles-ci étaient essuyées à l'aide d'un drap légèrement humidifié et les plots étaient correctement essuyés avec du papier pour ne pas laisser du liquide ou des résidus corrompre les mesures. Les variations de longueurs mesurées étaient finalement traduites en pourcentage à l'aide de la formule suivante :

$$Deformation\ longitudinale\ [\%] = \frac{L_x - L_i}{L_g} \cdot 100$$

dans laquelle L_x est la mesure affichée par le rétractomètre après x jours, L_i la mesure étalon (réalisée juste avant l'immersion dans la solution de sulfate) et L_g la longueur initiale des barrettes moins la longueur des plots (10mm) $160 - 20 = 140\text{mm}$.

Pour aller plus loin, une mesure supplémentaire était réalisée pour vérifier que la section des barrettes (4x4cm au départ) ne gonflait pas. Cette mesure était réalisée à l'aide d'un pied à coulisse

juste après avoir mesuré l'allongement longitudinal des échantillons. A noter que pour bien mesurer à chaque fois la même largeur de l'éprouvette, une marque verticale, sur une des surfaces de l'éprouvette, à l'indélébile était tracée.

8.5 Retrait

But de l'essai

L'objectif de l'essai du retrait est d'analyser la variation de longueurs de barres de mortier laissées à l'air libre. Cette variation de longueurs pourra caractériser l'influence, ou non, de la brique sur le retrait du béton qui, pour rappel, peut créer des fissures importantes et donc affaiblir la durabilité. La norme utilisée est : NBN B14-217 Essais des mortiers, retrait et gonflement [2].

Réalisation et traitement des échantillons

La réalisation des éprouvettes est semblable à celle présentée pour le test "Attaque des sulfates" de la section 8.4. Au total, 30 barrettes 4x4x16 (3 par mélange) ont été réalisées dans des moules semblables à la figure 8.1. Des plots (figure 8.16) ont été placés dans ses barrettes pour pouvoir mesurer leurs variations de longueurs à l'aide du rétractomètre (figure 8.16).

La différence par rapport au test "Attaque des sulfates" concerne le traitement des échantillons après leur réalisation. Effectivement, ceux-ci ont été démoulés et ensuite directement placés à l'air libre, dans le laboratoire (Température $\pm 21^\circ\text{C}$ et Humidité relative $\pm 60\%$) et ce pendant toute la durée de l'essai (28 jours au total).

Mode opératoire

Le mode opératoire est très semblable à celui expliqué dans la sous-section 8.4 si ce n'est les périodes de mesure. Au total, 5 mesures ont été réalisées à l'aide du rétractomètre. La première directement après le démoulage et était considérée comme la mesure étalon. Les suivantes après 3, 7, 14 et 28 jours. Le retrait était finalement converti en % à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Retrait } [\%] = \frac{L_x - L_i}{L_g} \cdot 100$$

ou L_x correspond à la mesure affichée par le réfectomètre après x jours, L_i à la mesure initiale affichée par l'appareil (après le démoulage) et L_g la longueur des barrettes moins la longueur des plots métalliques (10mm) qui vaut donc $160 - 20 = 140\text{mm}$.

8.6 Absorption d'eau par immersion

But de l'essai

Le but du test d'absorption d'eau par immersion est, comme son nom l'indique, de déterminer l'absorption d'eau d'un mortier ou d'un béton. Ça consiste donc à comparer la masse des échantillons à l'état saturé à celle à l'état sec pour donner une petite information sur la porosité des mortiers. Pour réaliser cet essai la norme suivante a été utilisée : NBN B15-215 : Absorption d'eau par immersion [3].

Réalisation et traitement des échantillons

Les échantillons produits pour cet essai sont un peu particuliers étant donné que des échantillons d'un essai déjà réalisés ont été récupérés, modifiés et utilisés pour économiser de la matière et du temps. Effectivement, les cylindres utilisés pour le test de diffusion d'ions chlorure forcée (Section 8.3) ont été récupérés à la fin de l'essai. La couche de résine époxy devait être retirée pour réaliser le test d'absorption d'eau par immersion, les échantillons ont alors été carrotés passant d'un diamètre de 100mm à un diamètre de 80mm (figure 8.17) et une hauteur restée identique (pour rappel, 50mm).



FIGURE 8.17 – Échantillons récupérés et modifiés pour réaliser l'essai d'absorption d'eau par immersion

Mode opératoire

Après avoir été carrotés, les échantillons ont été immergés dans des bacs remplis d'eau dans le laboratoire. Ils ont ensuite été pesés chaque jour jusqu'au jour où le rapport de masse entre deux pesées (24h d'intervalle) ne dépasse pas 0.1 %, ils sont alors considérés comme saturés en eau. Ensuite, les échantillons saturés ont été pesés sous-eau afin de pouvoir, par la suite, déterminer leurs masses volumiques respectives si nécessaire. Enfin, ils ont été placés dans une étuve à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ et ont de nouveau été pesé tous les jours jusqu'à ce que le rapport de masse descende en dessous de 0.1 %. L'absorption d'eau, exprimée en %, se calculait à l'aide de l'équation ci-dessous, dans laquelle M_1 égale la masse de l'échantillon saturé en eau et M_2 , la masse de l'échantillon sec.

$$\text{Absorption} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100$$

Troisième partie

Analyse des résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus à tous les différents tests expliqués dans le chapitre précédent. En plus de présenter ces résultats, ce chapitre contient également la description des phénomènes et tendances observés. Finalement, une tentative d'explications de ces différents phénomènes sera également réalisée dans cette partie du mémoire.

Chaque essai sera abordé séparément (un chapitre par essai) et d'éventuels liens seront réalisés entre eux. Le chapitre sera "divisé" en trois parties : la première contiendra la présentation des résultats pour les mortiers composés de sable et de fines de brique, la seconde sera composée des observations effectuées sur ces mêmes résultats et la dernière consistera à l'interprétation de ces observations afin de tenter de trouver des explications concrètes des phénomènes observés.

En général, deux "types" de graphiques sont utilisés pour représenter les résultats le plus clairement possible. Le premier est un graphique ordinaire avec un axe représentant les abscisses et l'autre les ordonnées. Il est utilisé pour illustrer l'évolution de variables au cours du temps.

Le second type de graphique est un histogramme en forme de bâtonnets, il remplace les simples tableaux remplis de valeurs afin de mieux visualiser l'écart entre différents résultats. Un troisième type de graphique est utilisé uniquement pour représenter les résultats de carbonatation et est appelé "radar". Il a pour but de différencier les profondeurs de carbonatation entre les différentes surfaces d'un échantillon.

La légende utilisée pour identifier les différentes compositions de mortier a été établie au chapitre 7.1, celle-ci est rappelée dans le tableau ci-dessous :

Légende du mélange	Proportion de sable et de fines de brique
SB-0	0% de sable de brique et 100% de sable calcaire
SB-5	5% de sable de brique et 95% de sable calcaire
SB-10	10% de sable de brique et 90% de sable calcaire
SB-25	25% de sable de brique et 75% de sable calcaire
SB-50	50% de sable de brique et 50% de sable calcaire
PB-0	0% de fines de brique et 100% de fines calcaire
PBNAE-50	50% de fines de brique et 50% de fines calcaire
PBNAE-100	100% de fines de brique et 0% de fines calcaire
PBAE-50	50% de fines de brique et 50% de fines calcaire + Eau absorption
PBAE-100	100% de fines de brique et 0% de fines calcaire + Eau absorption

Chapitre 9

Carbonatation : Présentation et analyse des résultats

Le phénomène de carbonatation est expliqué dans la section 4.2 de ce travail. Pour rappel, la carbonatation des bétons est étroitement liée à sa porosité et à sa perméabilité. Plus un béton est poreux et perméable, plus il sera sensible à la carbonatation. La teneur en chaux du matériau joue également un rôle important.

Résultats

Comme expliqué dans la section 8.1, trois mesures ont été réalisées durant l'essai : à 0 jour, à 28 jours et à 56 jours enfermés dans la chambre de carbonatation. Les résultats après 0 jour n'étaient, logiquement, pas très intéressants étant donné que tous les échantillons n'avaient pas, ou presque pas, carbonaté. En ce qui concerne les résultats après 28 jours, ceux-ci sont présentés dans l'annexe G afin de ne pas surcharger inutilement le rapport étant donné que la tendance observée est identique à celle observée après 58 jours (qui sera présentée ici).

Le graphique de la figure 9.1 représente la moyenne des profondeurs de carbonatation de 24 mesures, au total, réalisée sur chaque mélange. Il y a 24 mesures pour un mélange étant donné qu'il y a 8 mesures sur chaque échantillon (4 surfaces, une profondeur maximale et une minimale par surface) et 3 échantillons pour chaque mélange.

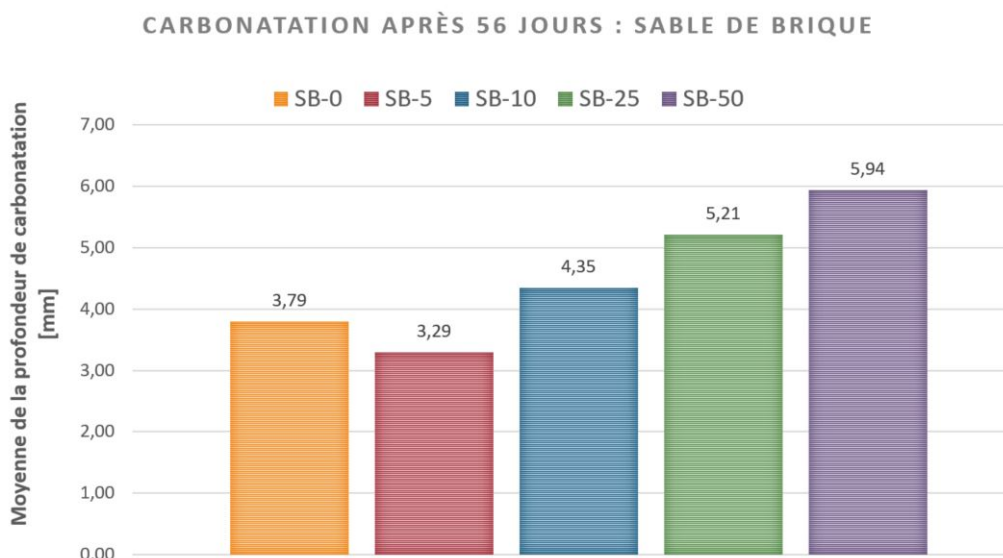


FIGURE 9.1 – Carbonatation après 56 jours pour les 5 mélanges avec du sable de brique

Afin de s'assurer que les résultats présentés à la figure 9.1 représentent la réalité malgré une moyenne très importante, un autre graphique a été réalisé à la figure 9.2. Celui-ci représente la profondeur de carbonatation sur chaque surface. Dans ce cas-ci, une moyenne sur uniquement 6 valeurs est réalisée : 1 profondeur maximale et minimale sur 3 échantillons par mélange. Ce graphique permet également d'observer sur quelle surface la profondeur de carbonatation est la plus importante. Les numéros en rouge correspondent aux numéros des surfaces comme décrits dans la section 8.1 sur la figure 8.5.

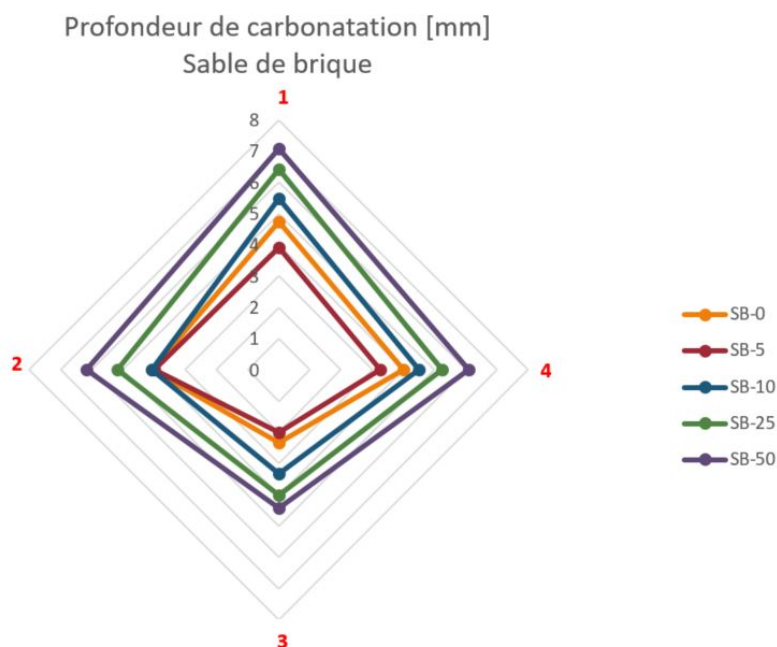


FIGURE 9.2 – Carbonatation par surface après 56 jours pour les 5 mélanges avec du sable de brique

Les résultats concernant l'essai de carbonatation sur le mélange contenant une substitution des fines calcaire par des fines de brique ont été traités de la même façon que ceux contenant du sable de brique. Les deux graphiques obtenus sont disponibles aux figures 9.3 et 9.4.

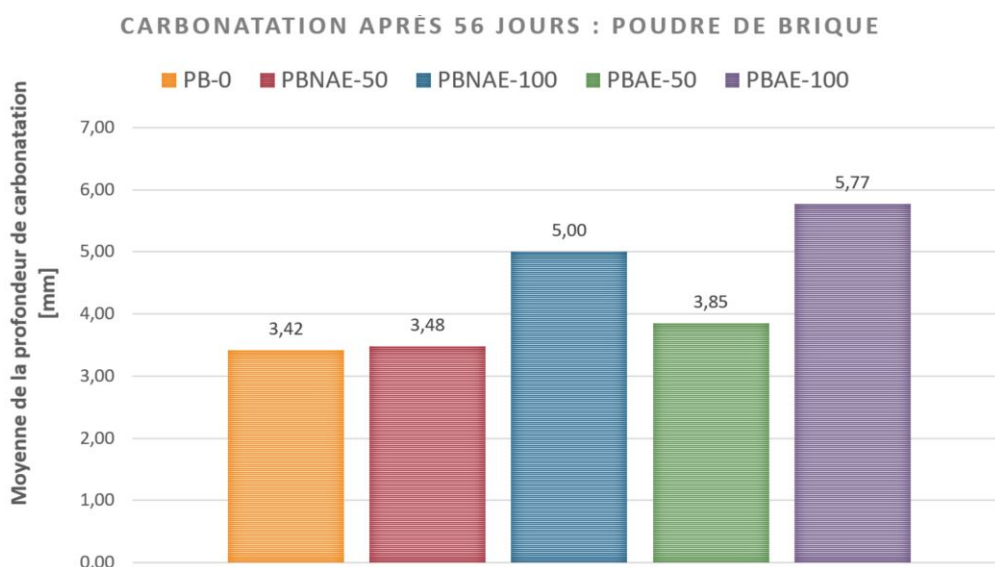


FIGURE 9.3 – Profondeur de carbonatation après 56 jours pour les 5 mélanges avec des fines de brique

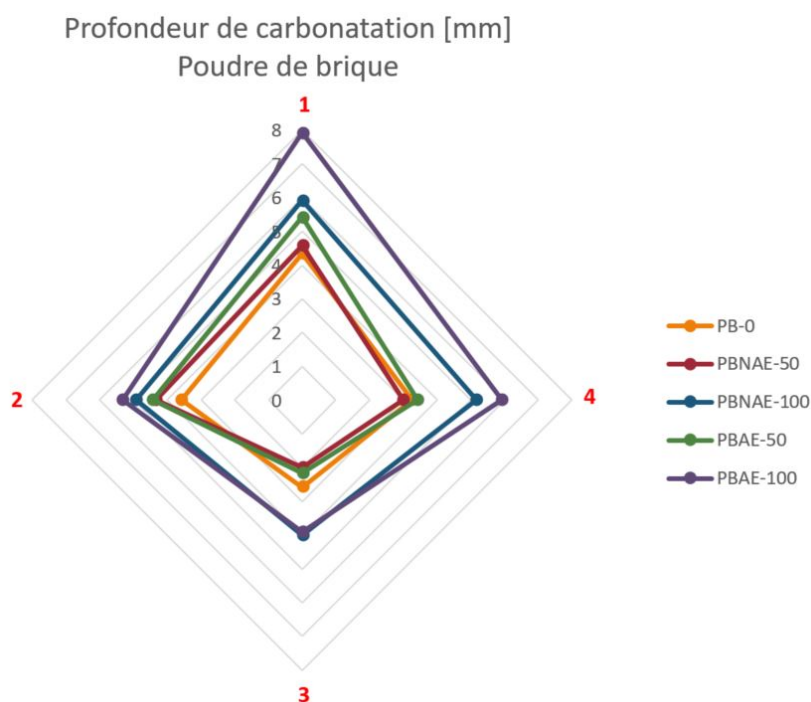


FIGURE 9.4 – Profondeur de carbonatation par surface après 56 jours pour les 5 mélanges avec des fines de brique

L'évolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps est un paramètre important étant donné qu'il peut donner une indication sur l'épaisseur d'enrobage des armatures ("Concrete cover" en anglais) nécessaire pour empêcher qu'elles soient dans la zone carbonatée après x années. Avec uniquement trois points mesurés (dont l'origine, 0mm après 0 jour), il était difficile d'estimer l'évolution de la carbonatation sur le long terme.

Cependant, l'évolution au cours du temps de la profondeur de carbonatation a tout de même été représentée sur les figures 9.5 et 9.6. Chaque courbe (une par mortier différent) est composée de

deux droites avec des pentes différentes. Ces pentes ont été calculées et sont présentées dans le tableau 9.1 ci dessous :

Mortier	Pente entre 0 et 28 jours [mm/jours]	Pente entre 28 et 56 jours [mm/jours]
SB-0	0.09	0.05
SB-5	0.07	0.04
SB-10	0.10	0.05
SB-25	0.11	0.08
SB-50	0.14	0.08

Mortier	Pente entre 0 et 28 jours [mm/jours]	Pente entre 28 et 56 jours [mm/jours]
PB-0	0.07	0.05
PBNAE-50	0.09	0.04
PBNAE-100	0.12	0.06
PBAE-50	0.09	0.05
PBAE-100	0.14	0.07

TABLE 9.1 – Évolution de la pente de carbonatation [mm/jours] pour les 10 mortiers différents

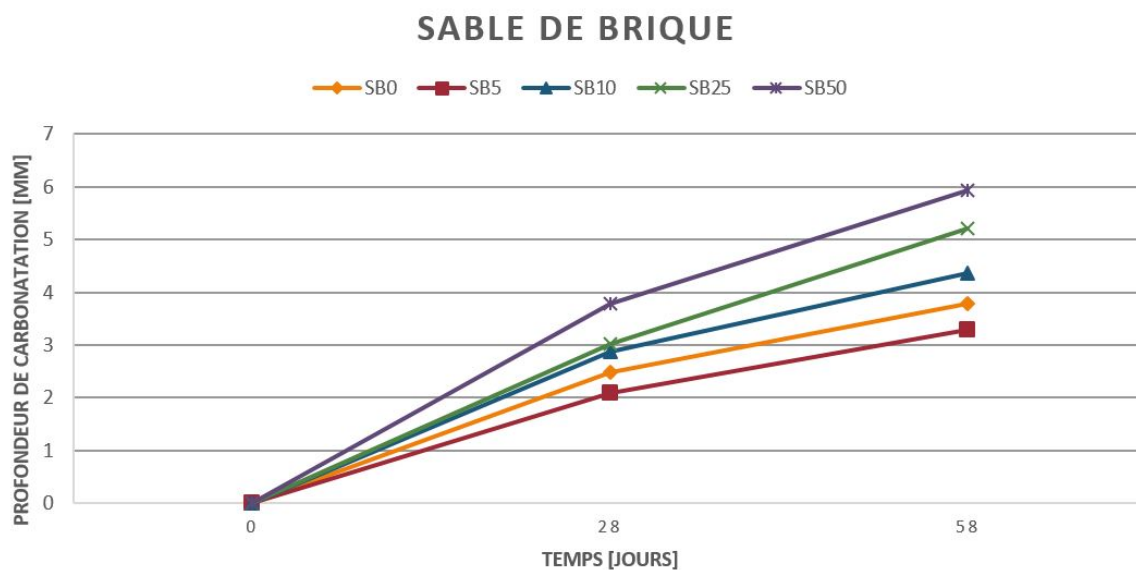


FIGURE 9.5 – Évolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps : Sable de brique

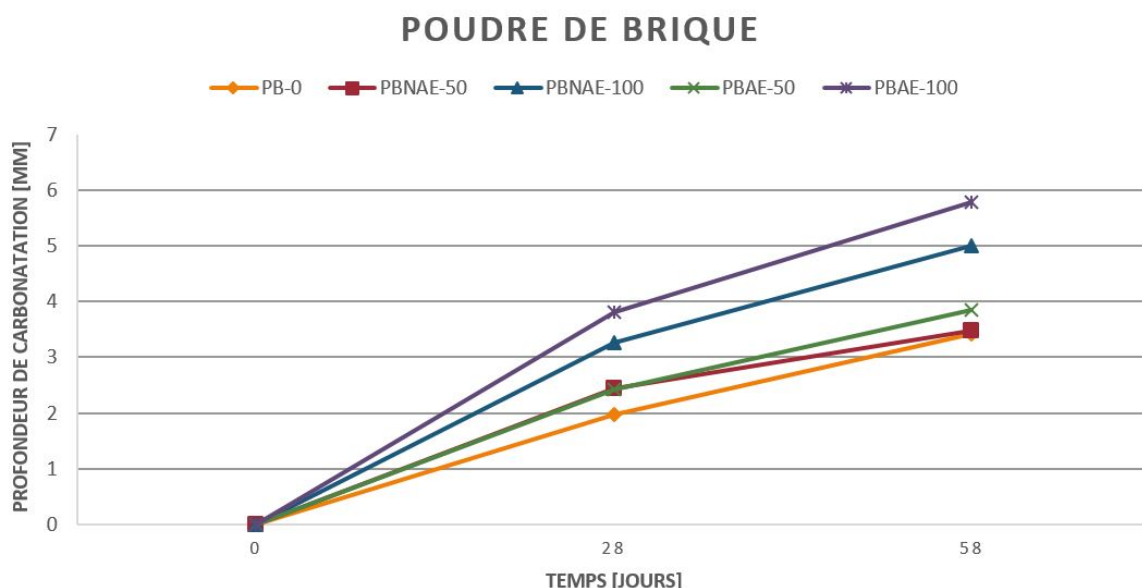


FIGURE 9.6 – Évolution de la profondeur de carbonatation au cours du temps : Poudre de brique

Observations

Différentes observations peuvent ressortir des différents graphiques présentés ci-dessus. Celles-ci sont listées ci-dessous :

- **Observation n°1 :** Pour les mortiers constitués de sable de brique, plus le pourcentage de substitution du sable de brique augmente plus la profondeur de carbonatation tend à augmenter mis à part pour le mortier SB-5 qui a la plus petite moyenne de profondeur de carbonatation.
- **Observation n°2 :** Les tendances citées dans l'observation n°1 sont les mêmes sur les deux graphiques différents. C'est-à-dire que les graphiques 9.1 et 9.2 expriment les mêmes résultats pour les mélanges de sable de brique. Il en est de même pour les graphiques 9.3 et 9.4. Ceci permet de confirmer que les résultats présentés expriment bien la réalité malgré les moyennes réalisées sur les profondeurs de carbonatation mesurées.
- **Observation n°3 :** Que ce soit pour les mélange de sable de brique ou les mélanges de poudre de brique, la surface n°1 (qui était à l'air libre dans le moule, cfr section 8.1) possède, en général, la profondeur de carbonatation la plus importante tandis que la surface n°3 (qui était située dans le fond du moule, cfr section 8.1) est, presque toujours, la moins carbonatée. Les profondeurs de carbonatation des surfaces n°2 et n°4 ont des valeurs situées entre les profondeurs des surfaces n°1 et n°3.
- **Observation n°4 :** Pour les mélanges avec de la poudre de brique, la profondeur de carbonatation augmente chaque fois par rapport au mortier de référence. Plus la poudre de brique augmente, plus la carbonatation augmente étant donné que la profondeur est supérieure pour les mélanges PBNAE-100 et PBAE-100. A noter également que les mélanges type PBAE (Eau rajoutée pour considérer une absorption d'eau par les fines) carbonatent plus que les mélanges PBNAE.
- **Observation n°5 :** Le tableau 9.1 et les graphiques des figures 9.5 et 9.6 permettent de remar-

quer que les pentes des 28 premiers jours sont très espacées. En effet, pour les mortiers de sable de brique, l'écart entre les différentes pentes va jusqu'à 0.07 mm/jours. Idem pour les mortiers de poudre de brique.

Ces pentes diminuent fortement entre les jours 28 et 56. Les pentes les plus fortes (SB-50, PBAE-100,...) sont divisées par deux tandis que les pentes plus faibles (SB-5, Pb-0,...) diminuent moins fort. Il y a donc une diminution des écarts entre les différentes pentes des différents mélanges. Les écarts maximum entre les pentes des mortiers de sable et de poudre de brique descendent respectivement à 0.04 et 0.03 mm/jours.

Interprétations

D'après l'observation n°1, la brique est néfaste pour la carbonatation du mortier. Effectivement, la carbonatation est supérieure lorsque de le sable de brique est introduit dans le mélange. Ceci peut dans un premier temps s'expliquer par la porosité du matériau en question. Un matériau plus poreux sera en général plus perméable à l'eau ou encore au gaz. Le CO_2 a plus de facilité pour pénétrer le matériau et ainsi se carbonater en réagissant avec la chaux hydratée présente sur les parois des pores.

Ensuite, comme l'expliquait l'étude réalisée par l'université de Lisbonne [51], une réaction pouzzolanique s'effectue potentiellement entre les silicates et les aluminés de la brique et la chaux. Cette réaction diminue la quantité de chaux sur les parois et oblige ainsi le CO_2 à aller plus en profondeur dans le mortier pour carbonater.

Les résultats obtenus dans l'étude précédemment citée à la section 2.5 [51] présentent la même tendance que ceux présentés dans ce travail. A noter que les profondeurs de carbonatation observées à la figure 2.17 sont nettement plus importantes que celles présentées sur les figures ci-dessus car l'université de Lisbonne a réalisé le test de carbonatation sur des cylindre de 100mm de diamètre et 50mm d'épaisseur et ce dans des caissons avec une concentration en CO_2 de 5% au lieu de 1%.

Toujours concernant l'observation n°1, le mortier SB-5 carbonate moins que le mortier de référence SB-0. Ceci peut peut-être s'expliquer dû au fait que les 5% de sable de brique ont augmenté la porosité mais qu'il n'y en avait pas assez pour provoquer une réaction pouzzolanique importante. Cependant, les résultats restent très proches étant donné que les mortiers sont très ressemblants.

L'observation n°3 permet de remarquer que la surface située à l'air libre lors du moulage est à chaque fois plus carbonatée que celle située au fond du moule. Ceci peut s'expliquer pour plusieurs raisons : L'huile de coffrage, qui est nettement plus présente dans le fond du moule que sur les côtés dû à la gravité, crée "un film protecteur" sur la surface du fond. La gravité peut également créer un échantillon plus compact dans le fond que en surface.

Après cela, l'observation n°4 peut s'expliquer de la même manière que l'observation n°1 étant donné que la même tendance est observée (plus les fines de brique augmentent, plus la profondeur de carbonatation augmente). Il y a donc potentiellement une réaction pouzzolanique qui se produit entre les fines de brique et la chaux qui oblige alors le dioxyde de carbone à aller plus en profondeur dans le mortier pour se carbonater.

Cette observation met aussi en avant la carbonatation plus élevée pour les mélanges PBAE que pour les mélanges PBNAE. Ceci est certainement causé par une porosité plus élevée du côté des mélanges

PBAE qui, pour rappel, sont identiques aux mélanges PBNAE mis à part une addition d'eau supplémentaire pour considérer l'absorption d'eau des fines de brique (PBAE = Poudre de brique avec absorption d'eau et PBNAE = Poudre de brique NON absorption d'eau, cfr section 7.1). Cette addition en eau augmente le rapport E/C final. Or, l'augmentation du rapport E/C a tendance à augmenter la porosité du mortier.

Enfin, l'observation n°5 laisse penser que la différence de profondeur de carbonatation entre les différents mortiers se produit principalement au début de l'exposition au CO_2 . Effectivement, cette forte diminution de pente laisse imaginer que, sur le long terme, les pentes s'égaleront et tendront vers 0. Il aurait été intéressant d'allonger le temps de l'essai de carbonatation mais pour cela, il aurait fallu des échantillons plus grands que des barrettes de dimensions 4x4x16cm afin de pouvoir fendre plus de morceaux.

Chapitre 10

Diffusion d'ions chlorure forcée : Présentation et analyse des résultats

La diffusion d'ions chlorure dans le béton est un phénomène très nocif pour le béton, en particulier pour ses armatures comme expliqué dans la section 4.3. Le premier essai de diffusion était le test de diffusion d'ions chlorure forcée. L'essai est expliqué dans la section 8.3.

Il y avait au total trois échantillons par mélange (30 échantillons au total). L'âge de l'échantillon a une influence sur sa porosité aux ions chlorure étant donné que plus un échantillon est vieux, plus sa micro-structure est dense [49]. Pour cela, les 30 échantillons ont été séparés en 3 séries de 10. Evidemment, chaque série contenant 1 échantillon de chaque mélange. Il n'y avait que deux cellules de diffusion forcées utilisables. 1 série était donc testée en plus ou moins 1 semaine pour essayer de diminuer le plus possible les différences de temps de cure entre les différents échantillons d'une même série. Les éprouvettes en attente d'expérimentation étaient conservées dans l'eau, dans une chambre humide. Dans la section ci-dessous, uniquement l'évolution de l'intensité du courant au cours du temps pour la série d'échantillons n°3 sera présentée.

Résultats

Les séries n°1 et n°2 sont présentées à l'annexe I. A noter que les échantillons SB-0 n°1 et PB-0 n°1 ont été utilisés pour tester la programmation idéale de l'appareil et ne fournissent pas des résultats pertinents, ils n'ont donc pas été utilisés.

Le graphique de la figure 10.1 représente l'évolution de l'intensité du courant qui traverse chaque échantillon composé de sable de brique au cours du temps pour la série d'échantillons n°3. Pour rappel, l'essai a une durée de 6h et une mesure de l'intensité (en mA) était réalisée toutes les 30 minutes.

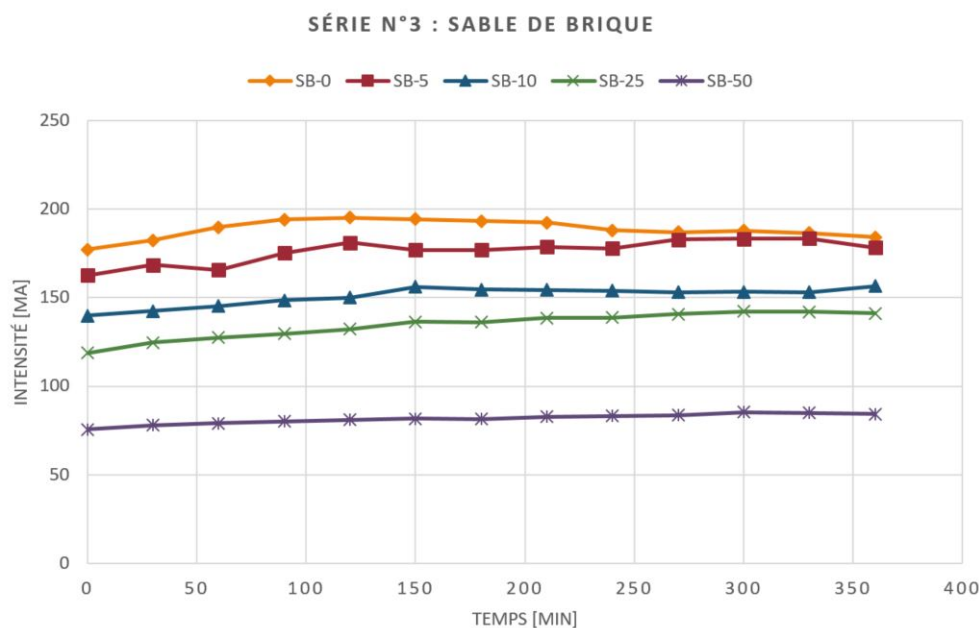


FIGURE 10.1 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°3) : Sable de brique

Une deuxième méthode était précisée dans la section 8.3 pour interpréter les résultats de diffusion forcée. La quantité totale de courant (en Coulomb) a été calculée pour les 30 échantillons. Le graphique de la figure 10.2 présente le "Q" maximal et minimal pour les 5 mélanges contenant un pourcentage de substitution en sable de brique.

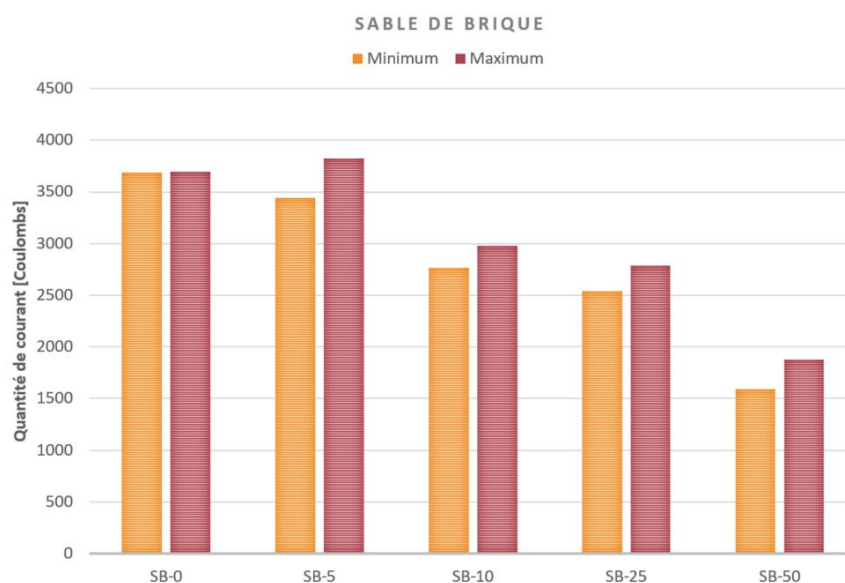


FIGURE 10.2 – Quantité totale de courant (en coulombs) ayant traversé les échantillons (maximum et minimum) : sable de brique

Les résultats concernant les mélanges réalisés avec de la poudre de brique ont été représentés de la même manière que précédemment. Le graphique 10.3 représente donc l'évolution de l'intensité du courant au cours du temps et le graphique 10.4 la quantité totale de courant ayant traversé pour les 5 mélanges constitués de poudre de brique.

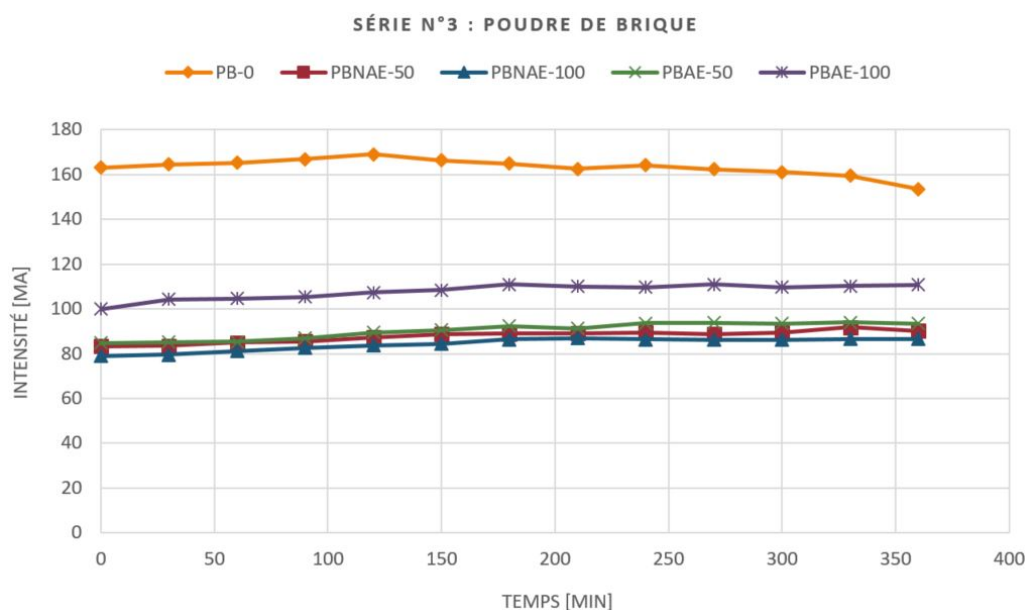


FIGURE 10.3 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°3) : poudre de brique

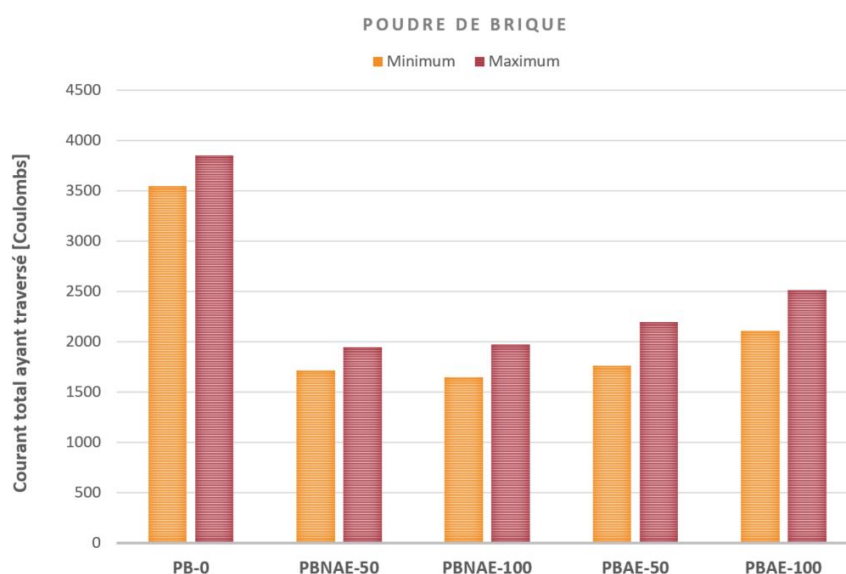


FIGURE 10.4 – Quantité totale de courant (en coulombs) ayant traversé les échantillons (maximum et minimum) : poudre de brique

Observations

Différentes observations peuvent ressortir des différents graphiques présentés ci-dessus. Celles-ci sont listées ci-dessous :

- **Observation n°1** : Pour les mélanges constitués de sable de brique, plus le % de substitution de sable de brique augmente, moins les ions chlorure traversent l'échantillon. Cette observation est valable autant pour la série n°3 (figure 10.1) que pour les séries n°1 et n°2 présentées en annexes (Annexe I). Cette même observation est identique sur le graphique 10.2, la quantité totale de courant ayant traversé pour le mélange SB-0 (sans sable de brique) est 2 fois plus

grande que celle pour le mélange SB-50 (50% de substitution de sable de brique).

- **Observation n°2** : Le mélange PB-0 est très poreux aux ions chlorure par rapport aux autres mélanges disposant de poudre de brique (figures 10.3 et 10.4) tandis que les 4 autres mélanges composés de poudre de brique sont relativement identiques même si le mélange PBAE-100 se détache légèrement.

Interprétations

L'observation n°1 est étonnante étant donné qu'elle va dans le sens opposé des conclusions décrites dans les résultats du test de carbonatation (chapitre 9). Effectivement, si la porosité et la perméabilité augmente proportionnellement avec le % de briques utilisées, le raisonnement logique laisserait penser que les ions chlorure pénétreront plus facilement lorsque le matériau contient plus de sable de brique. Or, l'effet inverse est observé ici.

Ceci peut de nouveau s'expliquer par une éventuelle réaction pouzzolanique entre la brique et la chaux. Pour rappel, une réaction pouzzolanique amène la formation de C-S-H aussi appelé tobermorite qui est un produit dense et reconnu pour fixer (et donc stopper) les ions chlorure [51].

En ce qui concerne l'observation n°2, la tendance est la même, le mortier PB-0, qui ne contient pas de brique, est beaucoup plus perméable aux ions chlorure. La même explication que pour l'observation n°1 peut être utilisée : une possible réaction pouzzolanique entre les fines de brique et la Portlandite $Ca(OH)_2$ qui créent "un filet" qui intercepte les ions chlorure.

Le mortier PBNAE-100 est le moins poreux aux ions chlorure tandis que le mortier PBAE-100 est le plus perméable des quatre mortiers contenant de la brique. Pourquoi ? Cela peut s'expliquer par l'excès d'eau rajoutée dans les mélanges PBAE. Effectivement, si les fines de brique n'absorbent pas totalement l'eau rajoutée dans le mélange, cela rend certainement le mortier plus poreux et donc plus sensible à la pénétration des ions chlorure. Les mortiers PBAE sont donc potentiellement plus perméables à la pénétration d'ions chlorure due à une porosité supérieure aux mortiers PBNAE causée par l'eau ajoutée d'absorption considérée pour les fines de brique.

Chapitre 11

Diffusion d'ions chlorure en régime stationnaire : Présentation et analyse des résultats

L'autre test de diffusion réalisé était le test en régime stationnaire qui utilisait des cellules de diffusion comme expliqué dans la section 8.2. Comme précisé dans cette dernière, des mesures ont été effectuées toutes les deux semaines. Au total, 6 prélèvements ont été réalisés avant la remise de cette thèse. L'essai a donc duré 12 semaines.

Résultats

Le graphique de la figure 11.1 représente l'évolution de la concentration en ions chlorure dans le comportement de la cellule de diffusion qui était, au départ dépourvu de chlore. Il y avait 2 échantillons par mélange, une simple moyenne a été réalisée entre les concentrations mesurées lors de chaque mesure. Les résultats de tous les échantillons ainsi que les écarts types sont présentés dans les tableaux de l'annexe J. La concentration est exprimée en $[mg/l]$ sur l'axe des ordonnées et la durée en jours sur l'axe des abscisses.

Attention, l'évolution de la quantité de chlorures au cours du temps doit être analysée avec prudence. Effectivement, cette évolution dépend bien évidemment du mortier mais également de la largeur des éprouvettes et de l'air de diffusion qui peuvent varier légèrement selon les différentes cellules (cfr annexe K).

La section 8.2 explique également le développement pour calculer les coefficients de diffusion des différents mortiers auto-compactants étudiés. La valeur de ces coefficients correspond à la valeur calculée à l'aide de la dernière concentration mesurée de l'essai (Mesure n°6, après 12 semaines). Deux coefficients de diffusion étaient calculés par mélange, le graphique de la figure 11.2 représente les deux coefficients en identifiant le maximum et le minimum, ces derniers sont exprimés en $[m^2/s]$.

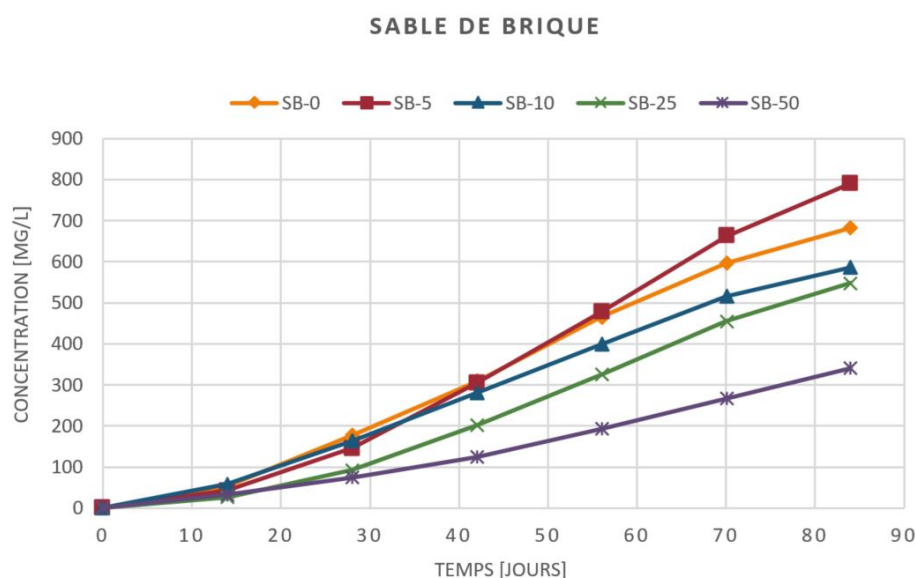


FIGURE 11.1 – Évolution de la concentration en ions chlorure des mortiers contenant du sable de brique

Les tableaux de l'annexe K contiennent les diamètres, les concentrations aval/amont, les aires des surfaces de diffusion (cfr section 8.2), les volumes des cellules pour tous les échantillons, ainsi que les écarts-types des moyennes de chaque mélange. A noter que les unités présentes dans ces tableaux sont les mêmes que celles utilisées dans le développement expliqué à la section 8.2 (mis à part le temps qui était transformé en seconde dans le calcul). Il faut également préciser que les cellules des mortiers SB-10 et PBAE-50 étaient légèrement différentes. Un des deux tubes de plexiglas qui les composait avait un diamètre plus faible, donc une aire de diffusion plus petite.

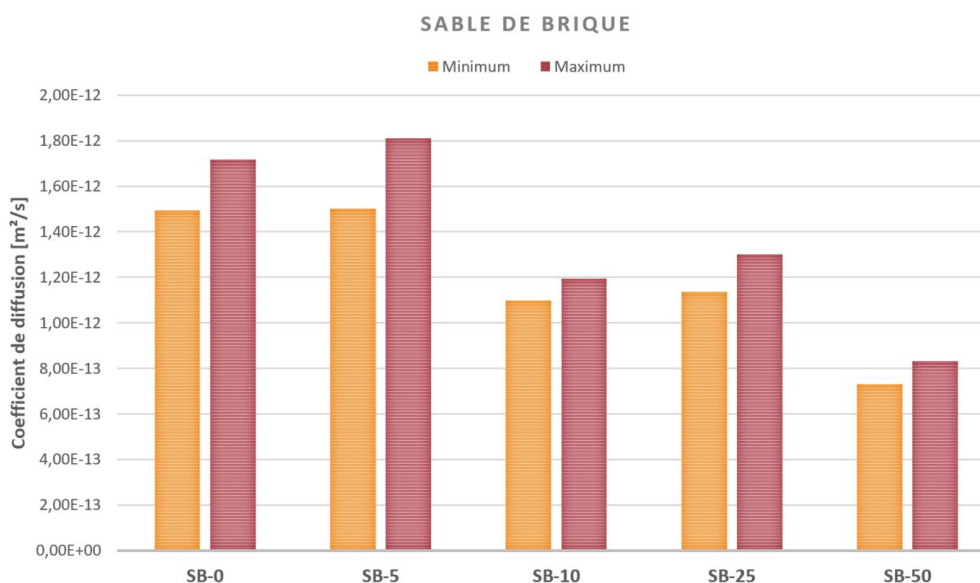


FIGURE 11.2 – Coefficient de diffusion effectif des mortiers contenant du sable de brique

Les résultats concernant la diffusion d'ions chlorure en régime stationnaire dans les mortiers contenant de la poudre de brique sont exprimés de la même manière que ceux avec du sable de brique. L'évolution de la concentration en ions chlorure est disponible à la figure 11.3 et les différents coefficients de diffusion sont disponibles à la figure 11.4.

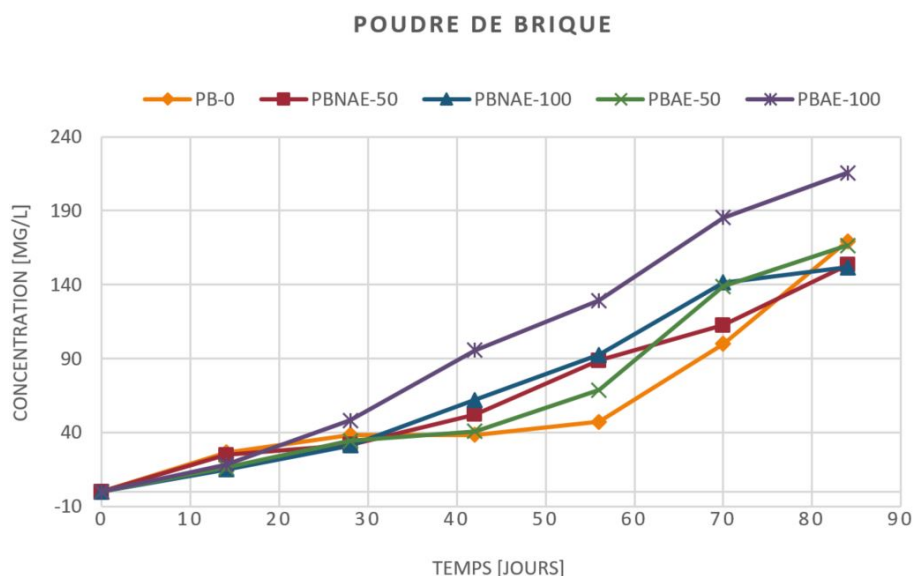


FIGURE 11.3 – Évolution de la concentration en ions chlorure des mortiers contenant de la poudre de brique

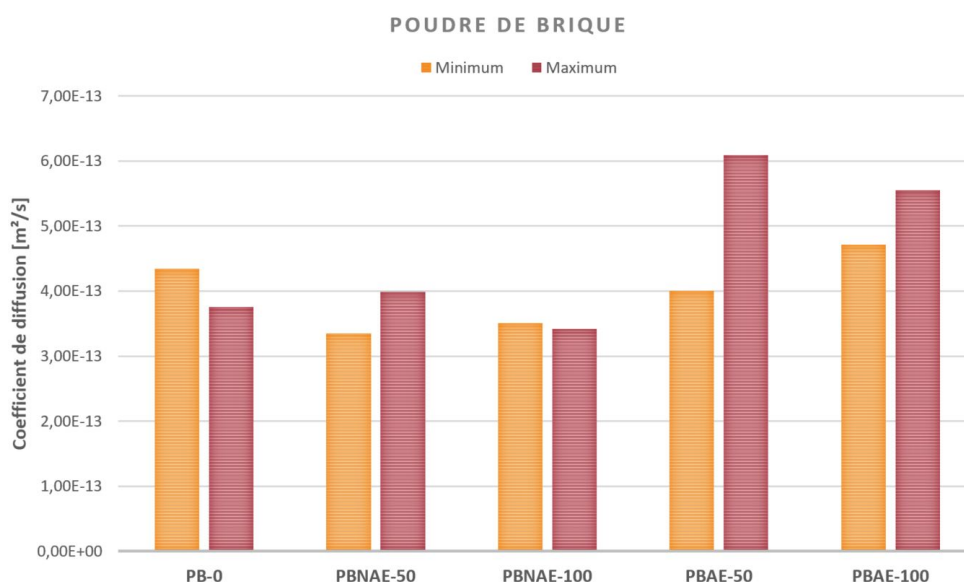


FIGURE 11.4 – Coefficient de diffusion effectif des mortiers contenant de la poudre de brique

Observations

Différentes observations peuvent être ressorties des différents graphes présentés dans cette section. Pour rappel, la section 10 concerne également la diffusion d'ions chlorure dans les mortiers. Les observations listées ci-dessous seront alors confrontées à celles présentées de la section 10.

- Observation n°1 :** Les résultats concernant les mortiers composés de poudre de brique suivent en général la même tendance que celle résultant de l'essai de diffusion d'ions chlorure forcée (observée dans le chapitre précédent). En effet, plus le pourcentage de sable de brique augmente, moins les ions chlorure traversent l'échantillon. Pour preuve, le coefficient de diffusion effectif du mélange SB-0 est 2x plus grand que celui du mélange SB-50 (figure 11.2), le

même facteur est observé au chapitre 10 !

A noter que, comme dans le chapitre précédent, le mélange SB-5 diffuse plus que le mélange SB-0 et les coefficients de diffusion effectifs SB-10 et SB-25 sont étonnamment proches.

- **Observation n°2** Les résultats présentés pour les mortiers contenant de la poudre de brique sont plus brouillons. En effet, en ce qui concerne le graphique 11.3, la quantité d'ions chlorure traversée est identique après 4 semaines pour tous les mortiers mis à part le mortier PBAE-100 qui laisse passer plus d'ions.

Il est intéressant de noter que, en dehors du mélange PB-0, la tendance est relativement similaire à celle observée au chapitre 10. Effectivement, les mortiers PBAE ont des coefficients de diffusion effectifs plus grands que les mortiers PBNAE. Il est également visible que le mortier PBNAE-100 a le coefficient de diffusion le plus faible.

Par contre, contrairement au chapitre 10, les mortiers PBAE-50 et PBAE-100 ont l'air d'avoir une perméabilité aux ions chlorure similaire en observant leur coefficient de diffusion effectif (figure 11.4) et le mortier PB-0 diffuse autant que les mortiers PBNAE alors que dans les résultats de la diffusion forcée, la diffusion du mortier PB-0 était largement supérieure aux 4 autres.

- **Observation n°3** Sur le graphique représentant l'évolution de la concentration des ions chlorure au cours du temps des mortiers de poudre de brique (figure 11.3), il est intéressant de se pencher sur la courbe du mortier PB-0. Effectivement, l'observation n°2 a mis en avant la faible diffusion du mortier PB-0 par rapport à celle observée dans le chapitre 10, mais sur le graphique 11.3, il est remarquable que la concentration en ions chlorure du mortier PB-0 a très fortement augmenté sur les 4 dernières semaines. Pendant ces 4 semaines, le mortier PB-0 est passé de la dernière position (celui qui diffuse le moins) à la 2ème position. La pente de sa droite est très forte par rapport aux autres.

Interprétations

Par rapport à l'observation n°1, les mêmes explications que celles citées au chapitre 10 peuvent évidemment être utilisées. L'éventualité d'une réaction pouzzolanique entre la brique et la chaux créant des minéraux C-S-H qui stoppent les ions chlorure semble encore plus évidente. Surtout lorsqu'on remarque que la diffusion du mortier SB-0 est 2x supérieur à celle du mélange SB-50 et ce, dans les deux essais de diffusion d'ions chlorure (forcée et stationnaire).

En ce qui concerne le faible écart entre les coefficients de diffusion effectifs des mortiers SB-10 et SB-25, il est difficile de l'expliquer. Les cellules SB-10 sont bien différentes des autres cellules étant donné qu'elles disposent, tout d'abord, d'un tube de plexiglas plus petit que celui des autres cellules et donc une surface de diffusion plus faible (comme expliqué au début de ce chapitre) mais également que les épaisseurs des échantillons SB-10 sont plus petites que celles des autres échantillons ($\pm 8\text{mm}$ par rapport à $\pm 11.5\text{mm}$). Cette différence d'épaisseur joue une influence dans la diffusion mais également dans le calcul du coefficient. La plus petite épaisseur des échantillons SB-10 est due à une mauvaise découpe.

L'observation n°2 est similaire à l'observation n°2 du chapitre précédent sans considérer le mortier PB-0. Les mortiers PBAE sont donc plus perméables aux ions chlorure et il est possible que ce soit dû à une porosité plus élevée causée par l'ajout d'eau dans le mélange qui n'est peut être pas ab-

sorbée par les fines de brique. Le mortier PBAE-100 a une concentration en moyenne (sur les deux échantillons) plus élevée après 84 jours, c'est également le mortier qui contient le plus d'eau.

La différence par rapport à l'essai de diffusion forcée concerne la diffusion du mortier PB-0. Effectivement, celui-ci diffuse, après 12 semaines, de la même manière que les mortiers PBNAE alors qu'il diffusait largement plus dans l'essai de diffusion forcée. Il est difficile d'expliquer un tel phénomène mais deux hypothèses peuvent être émises :

- L'observation n°3 met en avant une très forte augmentation de la concentration en ions chlorure du mortier PB-0 les 28 derniers jours d'essai. Pour rappel, l'essai de diffusion d'ions chlorure en régime stationnaire est un essai très long. Il est donc possible que si l'essai perdure, la concentration en ions chlorure du mortier PB-0 va continuer à grimper de la sorte et dépasser toutes les autres pour, finalement, avoir la même conclusion que celle du chapitre 10.
- L'autre hypothèse concerne la fabrication des mortiers. Le premier mélange réalisé dans le grand malaxeur (cfr figure 7.2) était le mortier PB-0. Un technicien du laboratoire a remarqué que le fond du bol n'était pas très bien mélangé à cause d'une erreur manuelle. Le dernier pot moulé était celui destiné à réaliser les échantillons de diffusion stationnaire. Il est donc possible que la matière coulée dans le dernier pot était un peu plus compacte. Cette augmentation de compacité peut expliquer une diminution de la diffusion d'ions chlorure. Il s'agit uniquement d'une hypothèse !

Afin de vérifier la première hypothèse, les prélèvements seront poursuivis après la remise de ce mémoire.

Chapitre 12

Attaque des Sulfates : Présentation et analyse des résultats

L'attaque des sulfates est un phénomène néfaste pour les bétons. Effectivement, ces ions peuvent provoquer des gonflements au sein du béton. Ces gonflements risquent ensuite de créer un réseau de fissures dans lequel des agents agressifs pourront librement circuler et endommager le béton et ses armatures par la suite (cfr section 4.4). L'essai réalisé pour caractériser la vulnérabilité des mortiers aux ions sulfate est expliqué dans la section 8.4.

Pour rappel, les échantillons étaient placés dans une solution de sulfate. Au début de l'essai, des mesures étaient réalisées chaque semaine. Cependant, après 6 semaines, aucun allongement (mesure de la longueur des barrettes), ni gonflement (mesure de la largeur des barrettes) n'étaient visible, et ce, sur tous les mélanges. La période de mesures a donc été rallongée.

Résultats

Les résultats présentés ci-dessous sont des exemples et ne concernent que certains mélanges. Les variations des dimensions des différents mélanges n'ont pas été comparées entre elles sur un même graphique étant donné qu'il n'y pas de variation causée par les ions sulfate après 11 semaines d'essai. Les graphiques représentés aux figures 12.1 et 12.2 représentent la variation de longueurs en % (comme expliqué dans la section 8.4) des trois échantillons des mélanges SB-25 et PBNAE-100. Ils ont été choisis au hasard pour illustrer le fait que les variations longitudinales sont quasi nulles au cours du temps. Il n'y a donc pas réellement de conclusion à tirer de cet essai pour le moment. Les mesures doivent se poursuivre pour pouvoir, finalement, observer une variation notable de la longueur des échantillons.

A noter que la pente initiale (entre la mesure étalon et la 1ère mesure réalisée une semaine après l'immersion des échantillons dans la solution de sulfate) est très certainement due à l'absorption d'eau des mortiers qui ont alors légèrement "gonflés" en s'imbibant d'eau.

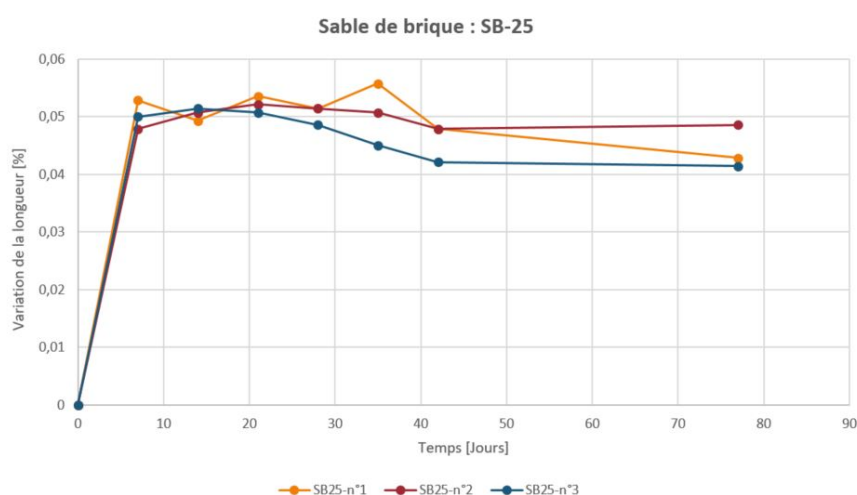


FIGURE 12.1 – Variation de la dimension longitudinale des mortiers au cours du temps : mortier SB-25

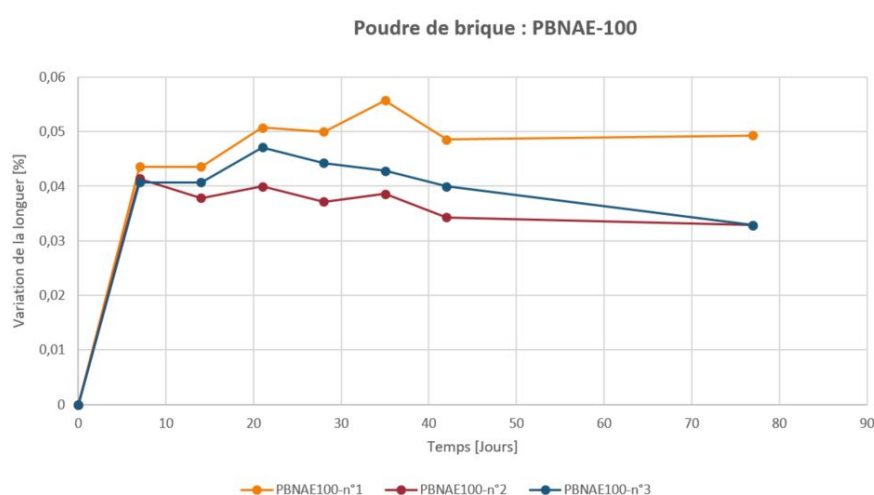


FIGURE 12.2 – Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps : mortier PBNAE-100

Les mesures de variations de longueurs de tous les autres mortiers sont présentés dans les tableaux de l'annexe L. Ces variations sont exprimées en %, et ce, toujours par rapport à la mesure étalon.

La section 8.4 précise également que des mesures des largeurs des barrettes étaient également exécutées afin d'observer un éventuel gonflement des largeurs des échantillons et pas uniquement une variation de longueur. Les conclusions sont logiquement identiques à celles concernant la variation de longueurs.

En effet, la largeur des barrettes ne varie pas réellement. Aucun graphique n'a été présenté pour ces mesures étant donné qu'ils n'apportaient pas d'information pertinente. En effet, les mesures étaient réalisées à l'aide d'un pied à coulisse qui est un instrument bien moins précis que le rétractomètre. De plus, il n'était pas aisé de mesurer exactement au même point à chaque fois, ceci enlevait encore un peu plus de précision. Les résultats ont donc tendance à osciller mais ne dépasse presque jamais 1% de déformation (ce qui correspond à 0.4mm). Ils sont disponibles dans l'annexe L.

Chapitre 13

Retrait : Présentation et analyse des résultats

Le phénomène de retrait dans le béton peut être très néfaste pour la durabilité de ceux-ci. Effectivement, comme expliqué dans la section 4.1, le retrait peut provoquer l'apparition de fissures qui seraient alors des endroits de passage privilégiés pour les agents extérieurs dangereux pour le béton (CO_2 , ions chlorure, sulfate,...). L'essai de retrait réalisé durant l'expérimentation est décrit dans la section 8.5.

L'annexe M détaille toutes les mesures ainsi que les moyennes (en mm et en %) de déformations et les écarts-types conjugués, et ce, pour toutes les différentes périodes de mesures (3, 7, 14 et 28 jours).

Résultats

Le premier graphique de la figure 13.1 illustre la variation de la dimension longitudinale des barrettes au cours du temps des mortiers composés de sable de brique. Cette variation est traduite en % (cfr section 8.5). Chaque point correspond à la moyenne des retraits des trois barrettes d'un même mélange.

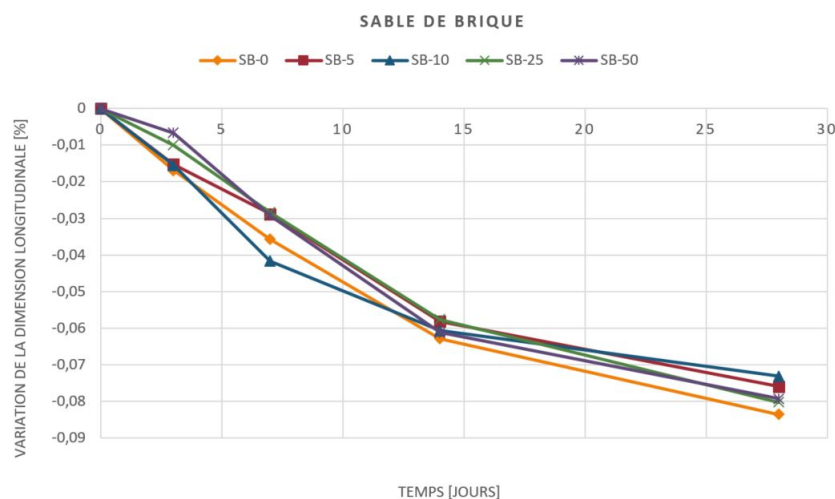


FIGURE 13.1 – Variation de la dimension longitudinale au cours du temps : sable de brique

Le deuxième graphique représenté à la figure 13.2 a été ajouté afin de comparer de manière plus précise les déformations longitudinales (en % et en valeur absolue) des différents mélanges à la fin de

l'essai, c'est-à-dire après 28 jours. Pour chaque mélange composé de sable de brique, les déformations maximales et minimales en fonction des 3 échantillons différents ont été représentées.

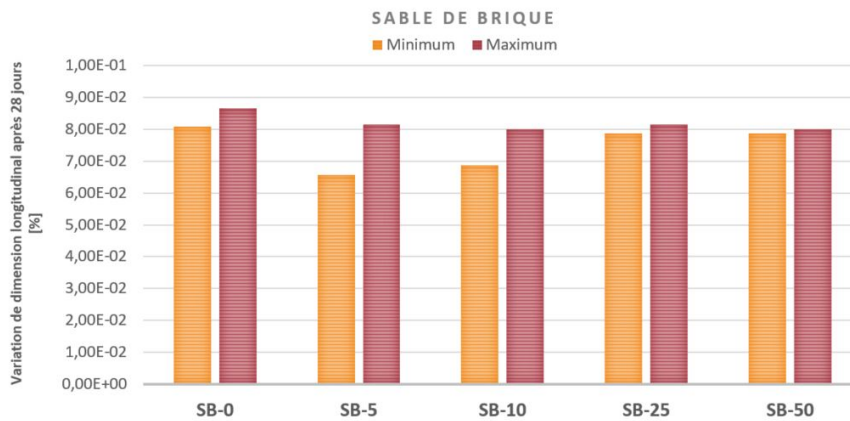


FIGURE 13.2 – Variation de la dimension longitudinale après 28 jours : sables de brique

Les résultats sont présentés de la même manière pour les mélanges composés avec de la poudre de brique. Les graphiques 13.3 et 13.4 caractérisent le retrait de ces mélanges.

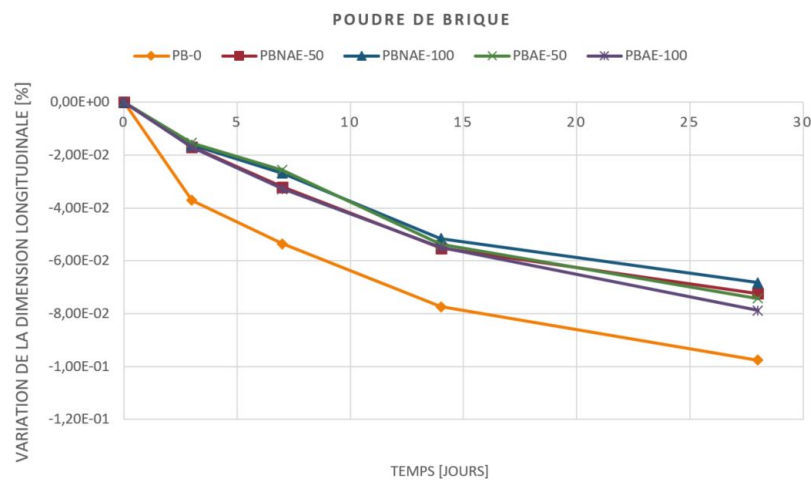


FIGURE 13.3 – Variation de la dimension longitudinale au cours du temps : poudre de brique

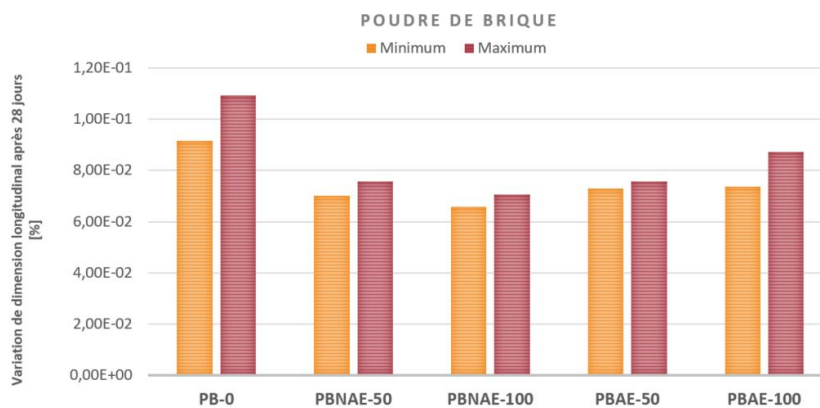


FIGURE 13.4 – Variation de la dimension longitudinale après 28 jours : poudre de brique

Observations

Les graphiques présentés ci-dessus permettent d'observer différentes tendances :

- **Observation n°1** : Le % de sable brique (figure 13.1 et 13.2) n'a presque aucun effet notable sur le retrait dans les mortiers. Les variations de dimensions longitudinales suivent les mêmes courbes et ont des valeurs de retrait finales (après 28 jours) très proches situées dans un intervalle de [0.066 % ; 0.086 %].
- **Observation n°2** : Concernant les mélanges avec de la poudre de brique (figure 13.3 et 13.4), le mélange PB-0 se détache des 4 autres (composés d'une substitution de 50 à 100 % de poudre de brique). Le retrait est légèrement plus important et la différence se produit durant les 3 premiers jours. Après ceux-ci, la pente du mélange PB-0 est quasiment identique à celles des autres mélanges. Les valeurs finales du retrait (après 28 jours) sont comprises entre [0.067 % ; 0.109 %], le mélange PB-0 a donc un retrait plus important que les 9 autres mélanges réalisés pour cet essai.

Interprétations

L'observation n°2 semble relativement étonnante étant donné que la brique est un matériau plus poreux que le calcaire or la brique a tendance à diminuer le retrait sur la figure 13.3.

L'article cité dans la section 2.5 qui présente les résultats d'une étude sur le retrait de mortiers contenant de la fine de brique va pourtant dans le même sens que l'observation n°2. Pour rappel, les auteurs ont émis l'hypothèse que la fine de brique agirait comme un agent "Self-curing" pour diminuer le retrait. Elle retiendrait potentiellement l'eau dans ses pores pendant de plus longues périodes et la relâcherait plus lentement [6].

Cependant ce n'est qu'une hypothèse et d'autres études montrent un effet contraire comme celle réalisée par l'université de Médéa, en Algérie [20]. En effet, cette étude a réalisé des essais de retrait sur des bétons contenant différents % de fines de brique et plus ce % augmente plus le retrait augmente (cfr annexe N). De plus, les incertitudes concernant l'absorption d'eau par les fines de brique rajoute une inconnue au problème.

Il faut donc rester critique par rapport à cet essai et tout comme les chercheurs de l'université de Lisbonne l'ont précisé, des recherches supplémentaires concernant ce phénomène doivent être réalisées.

En ce qui concerne l'observation n°1, il y a très peu de différences entre le retrait des différents mortiers contenant du sable de brique. L'étude réalisée par l'université de Médéa a, dans ce cas ci, des résultats identiques à ceux obtenus dans ce travail (cfr annexe N).

En effet, le retrait des différents bétons constitués de granulats de brique sont plus ou moins identiques après 28 jours. Cependant, dans l'étude réalisée par l'Université de Médéa, après 28 jours, la tendance change et les bétons avec la brique ont un retrait plus important que le béton de référence après 90 jours [20]. Il aurait donc été intéressant de mesurer le retrait sur une plus longue période afin d'observer l'évolution de ce phénomène plus loin dans le temps.

Chapitre 14

Absorption d'eau : Présentation et analyse des résultats

L'absorption d'eau d'un mortier est un critère intéressant qui peut donner certaines informations sur la durabilité de ce mortier. Effectivement, un mortier qui absorbe beaucoup d'eau est un mortier poreux et l'eau absorbée peut avoir beaucoup d'effets néfastes sur sa durabilité. Pour rappel, les échantillons utilisés pour réaliser cet essai sont les mêmes échantillons que ceux utilisés pour l'essai de diffusion d'ions chlorure forcée (cfr section 8.6).

Résultats

Le tableau 14.1 fournit les moyennes des absorptions d'eau mesurées sur les 10 mortiers de compositions différentes (3 échantillons par mortier) :

Mortier	Absorption d'eau [%]	Mortier	Absorption d'eau [%]
SB-0	13.64	PB-0	11.79
SB-5	13.93	PBNAE-50	12.00
SB-10	13.56	PBNAE-100	11.92
SB-25	14.89	PBAE-50	12.41
SB-50	16.63	PBAE-100	13.13

TABLE 14.1 – Valeur moyenne du coefficient d'absorption d'eau pour les 10 compositions de mortier différentes

Pour plus de lisibilité, les pourcentages d'absorption d'eau sont également présentés sous forme de diagramme bâtonnet au figure 14.1 et 14.2. Ces diagrammes possèdent également les valeurs maximales et minimales des coefficients d'absorption d'eau mesurés sur les 3 échantillons de chaque mortier.

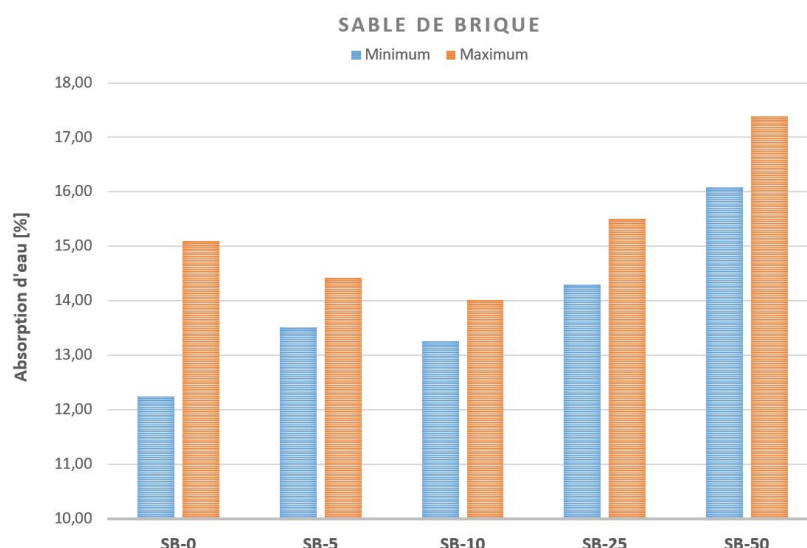


FIGURE 14.1 – Coefficient d'absorption d'eau : sable de brique

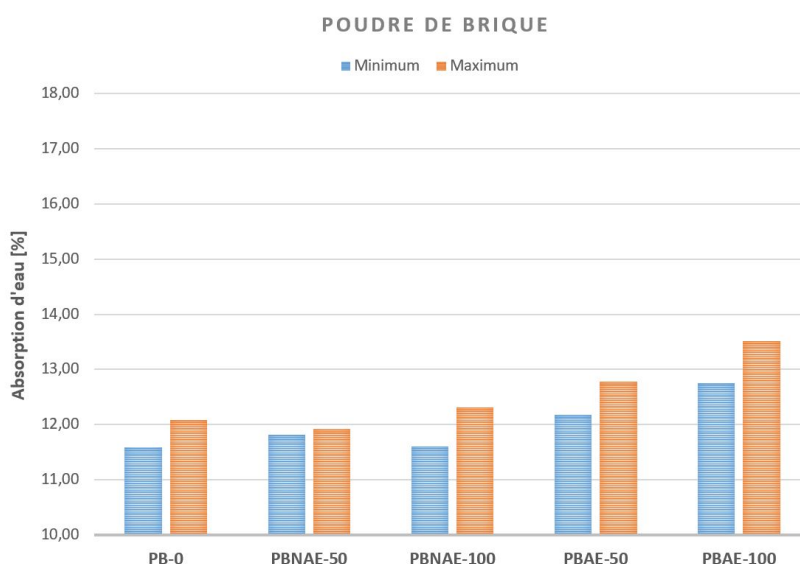


FIGURE 14.2 – Coefficient d'absorption d'eau : poudre de brique

Observations

Le tableau ainsi que les graphiques présentés ci-dessus permettent d'observer certaines tendances :

- Observation n°1** Les mortiers composés de sable de brique ont des coefficients d'absorption d'eau relativement élevés (entre 13 et 18%). Les 3 premiers (SB-0, SB-5 et SB-10) sont proches tandis que les deux derniers (SB-25 et SB-50) sont plus hauts. L'augmentation du sable de brique a donc tendance à augmenter l'absorption d'eau des échantillons. De plus, un des échantillons du mortier SB-0 est très grand par rapport aux deux autres (15% au lieu de 13%), il fait monter fortement la moyenne.
- Observation n°2** Les coefficients d'absorption d'eau des mortiers composés de fines de brique sont plus faibles par rapport aux mortiers de sable de brique (entre 11,5 et 13,5%). Il est clair que les différences entre les coefficients d'absorption sont très faibles (dans le tableau tout

comme sur les graphiques). Les mortiers PBAE-50 et PBAE-100 se détachent tout de même légèrement.

Interprétation

L'observation n°1 semble logique. Effectivement, du sable de calcaire avec un coefficient d'absorption d'eau très faible (=1%) est substitué par du sable de brique avec un coefficient d'absorption d'eau 10x plus important (=11.3%). Logiquement, l'absorption d'eau par immersion augmente plus le % de sable de brique augmente.

Toujours concernant l'observation n°1, la forte absorption d'eau de l'échantillon SB-0 n°3 peut être expliquée par le traitement qu'elle a subi (pour rappel, les échantillons pour le test d'absorption d'eau sont les mêmes échantillons utilisés pour réaliser l'essai de diffusion d'ions chlorure forcée). En effet, l'échantillon SB-0 n°3 était l'échantillon qui a été testé avec une cellule sans ailettes de refroidissement et avec une différence de potentiel de 60V (cfr annexe F). La cellule avait surchauffé et l'essai avait dû être interrompu. Par hypothèse, cette surchauffe a potentiellement abîmé l'échantillon de mortier et augmenté sa porosité.

L'observation n°2 est, quant à elle, très intéressante. Deux types différents de mélanges avec de la poudre de brique ont été réalisés pour tenter de caractériser l'absorption d'eau par les fines de brique (PBNAE et PBAE) qui, pour rappel, ne peut pas être mesurée à cause de la petitesse des particules (cfr section 6.5.2). Au vu des résultats, l'absorption d'eau des mélanges PB-0, PBNAE-50 et PBNAE-100 est quasiment similaire (entre 11.6 et 12.3%), ce qui pourrait montrer que les fines de brique n'absorbent pas beaucoup plus d'eau que les fines de calcaire.

De plus, l'absorption d'eau des mélanges PBAE est juste légèrement supérieure (entre 12.2 et 13.5%). Cette légère augmentation vient très certainement de l'ajout d'eau réalisé dans les mélanges PBAE qui avait pour but de considérer la potentielle absorption d'eau des fines de brique. Cet ajout d'eau a donné, au final, un mortier légèrement plus poreux. Mais au final, la même conclusion peut ressortir avec les résultats de ces deux mélanges : les fines de brique n'absorbent potentiellement pas autant d'eau que les sables de brique.

Chapitre 15

Conclusion et recommandations

Les déchets de construction et de démolition sont, chaque année, produits en grande quantité. Il est important de diminuer cette production afin de limiter d'une part le volume des déchets qui polluent notre planète et surtout, d'autre part, la consommation des matières premières dont la disponibilité est limitée dans le temps. Le but de ce travail de fin d'étude est de mesurer l'influence de l'utilisation de déchets de briques recyclées sur la durabilité de liants auto-compactant afin d'évaluer la possibilité du recyclage des déchets de briques.

Pour faciliter la conclusion de ce travail de fin d'études, il est nécessaire de faire un petit récapitulatif des résultats obtenus lors de la réalisation des différents essais réalisés pour caractériser la durabilité d'un liant composé de briques recyclées.

Le tableau n°15.1 donne une information qualitative (positive ou négative) des résultats de tous les essais pour les 10 compositions différentes de mortier. Ce tableau permet de mettre en avant les effets positifs ou négatifs de la brique (sable et fines) par rapport aux mortiers de référence (SB-0 et PB-0) sur les indices de durabilité évalués lors des essais.

Évidemment, les comparaisons sont effectuées entre les mélanges "de même composition", en d'autres mots, les mortiers SB-5, SB-10, SB-25 et SB-50 sont comparés au mortier SB-0 et les mortiers PBNAE-50, PBNAE-100, PBAE-50 et PBAE-100 sont comparés au mortier PB-0.

Essai réalisé → Mortier ↓	Carbonatation	Diffusion d'ions chlorure	Attaque des sulfates	Retrait	Absorption d'eau
SB-0	/	/	/	/	/
SB-5	+	0	0	0	-
SB-10	-	+	0	0	-
SB-25	--	++	0	0	--
SB-50	---	+++	0	0	---
PB-0	/	/	/	/	/
PBNAE-50	0	+++	0	++	0
PBNAE-100	--	+++	0	++	0
PBAE-50	-	++	0	++	-
PBAE-100	---	++	0	++	--

TABLE 15.1 – Récapitulatif des résultats des différents essais. Légende : +++ = Très très positif, ++ = Très positif, + = Positif, 0 = Sans effet, - = Négatif, -- = Très négatif et --- = Très très négatif

En règle générale, les résultats caractérisant la durabilité des mortiers composés de poudre et de sable

de brique sont relativement encourageants. La brique semble améliorer grandement la résistance des mortiers à la pénétration d'ions chlorure, qui pour rappel, sont dévastateurs pour les armatures métalliques des bétons armés. Par contre, elle diminue également la résistance à la carbonatation qui est un des phénomènes les plus destructeur pour les bétons et ses armatures.

Pour expliquer les résultats de ces 3 essais (Carbonatation, Diffusion d'ions chlorure forcée et stationnaire), l'éventualité d'une réaction pouzzolanique entre la brique et la chaux a été avancée mais ne peut pas être confirmée dans ce travail. Des études supplémentaires devraient pouvoir être menées afin de valider cette hypothèse.

Les essais d'absorption d'eau se sont eux aussi montrés relativement intéressants. En effet, l'absorption d'eau des mortiers composés de sable de brique n'est pas vraiment surprenante. Le sable de brique étant plus poreux et absorbant plus d'eau que le sable de calcaire, l'absorption d'eau augmente donc logiquement.

Par contre, une question persistait quant à l'éventuelle absorption d'eau par les fines de brique et l'essai correspondant laisse penser que ces dernières n'absorbent pas beaucoup plus d'eau que les fines de calcaire. A nouveau, cette hypothèse est confortée par les résultats obtenus mais ne peut pas être confirmée dans ce rapport et justifie que des études approfondies sur la porosité des fines particules de brique soient réalisées.

Les deux autres essais réalisés pour caractériser la durabilité des liants apportent moins d'information. En effet, l'essai d'attaque des sulfates est très long et aucun gonflement n'a été aperçu pour aucun type de mortier après 12 semaines de test.

L'essai de retrait quant à lui montre une possible influence positive des fines de brique sur les résultats mais il est difficile de la confirmer d'autant plus que différentes sources de la littérature se contredisent sur le sujet. Par rapport au retrait des mortiers composés de sable de brique, il aurait été intéressant de mesurer l'évolution sur une plus longue période afin de s'assurer qu'il n'y avait pas d'évolution dans les tendances.

Finalement, les mortiers à base de sable et de fines de brique pourraient s'avérer durables s'ils étaient protégés de la carbonatation. Pour cela, Il serait donc préférable de ne pas les placer dans des classes d'expositions de type "XC" (cfr annexe n°A) qui correspondent en général à des environnements humides et exposés à la pluie. Une autre précaution envisageable serait d'augmenter l'épaisseur d'enrobage des armatures afin que ces dernières soient protégées par une couche de béton plus épaisse.

Enfin, les mortiers contenant des fines de brique ont un léger avantage sur les mortiers contenant des sables de brique étant donné que les fines de brique semblent absorber moins d'eau que les sables. Le tableau 15.1 montre que le mortier PBNAE-50 est le plus durable étant donné qu'il n'a aucun point négatif par rapport au mortier de référence PB-0 et améliore nettement sa résistance à la pénétration d'ions chlorure.

Annexe A

Durabilité : Classe d'exposition [43]

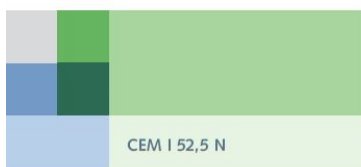
Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1 - Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
X0	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions, sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique. Béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
2 - Corrosion induite par carbonatation		
XC1	Sec ou humide en permanence.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec.	Surface de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Humide modérée.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternativement humide et sec.	Surface de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3 - Corrosion induite par les chlorures		
XD1	Humidité modérée.	Surface de béton exposées à des chlorures transportés par voir aérienne.
XD2	Humide, rarement sec.	Piscines. Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternativement humide et sec.	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parcs de stationnement de véhicules.
4 - Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structure sur ou à proximité d'une côte.
XS2	Immergé en permanence.	Éléments de structures marines.
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.	Éléments de structures marines.
5 - Attaque gel/dégel		
XF1	Saturation modérée en eau, sans agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage.	Surface horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.
6 - Attaques chimiques		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA3	Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.

Annexe B

Fiche technique : Ciment Portland [CEM I 52.5 N]

Ciment Portland

CEM I 52,5 N



CEM I 52,5 N

Cimenteries CBR
Service Ingénieurs Conseil
Chaussée de La Hulpe 185
1170 Bruxelles
Tél: 02 678 35 10
Fax: 02 675 23 91
communication@cbi.be
www.cbr.be

ENCI
Assistance Technique
PB 3 233
5203 DE 's-Hertogenbosch
Tél: 073 640 12 20
Fax: 073 640 12 18
tv@enci.nl
www.enci.nl

1. Normes et certificats

Type de ciment	Certificat	Norme
CEM I 52,5 N (2)	CE	EN 197-1 0965-CPR-C00318
CEM I 52,5 N (2)	BENOR	NBN B12 14/02/318
CEM I 52,5 N (2)	KOMO	NEN 3550 1118-14-1059
CEM I 52,5 N	NF	NF 002 11-12

2. Composition déclarée

	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires				
Clinker (K)	%	99	95	100
Filler	%	1	–	5
Ajouts en % du ciment fini				
Régulateur de prise	%	6,0	–	–
Agent de mouture	%	< 0,2	–	1,0
Agent réducteur*	%	0,5	–	–

* 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.

3. Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques sont déterminées selon EN 196-2.

	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
CaO	%	64	–	–
SiO ₂	%	20,8	–	–
Al ₂ O ₃	%	4,9	–	–
Fe ₂ O ₃	%	3,6	–	–
C ₃ A	%	7,1	–	–
Sulfate SO ₃	%	2,9	–	4,0
Résidu insoluble	%	0,5	–	5,0
Perte au feu	%	1,3	–	5,0
Chlorures	%	0,07	–	0,10
Chrome (VI)*	%	< 0,0002	–	0,0002
Na ₂ O équivalent	%	0,83**	–	–

* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), la teneur en chrome (VI) soluble est limitée à 0,0002 % maximum. La teneur en chrome (VI) est déterminée selon EN 196-10.

** Valeur moyenne = 1,96 x écart-typique



Liège

4. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont déterminées selon les méthodes d'essai normalisées, mentionnées dans la 2^e colonne.

	Méthode d'essai	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
				min.	max.
Eau de consistance normale	EN 196-3	%	26,8	–	–
Début de prise	EN 196-3	minutes	120	60	–
Fin de prise	EN 196-3	heures	2:40	–	12:00
Stabilité	EN 196-3	mm	1,0	–	10
Surface spécifique (Blaine)	EN 196-6	cm ² /g	4400	–	–
Refus au tamis de 200 µm	EN 196-6	%	0	–	3,0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	–	J/g	–	–	–
Masse volumique					
Absolue	–	kg/m ³	3100	–	–
Apparente	–	kg/m ³	1000	–	–

5. Caractéristiques mécaniques

La résistance à la compression du ciment, mesurée sur éprouvettes de mortier normalisé, est déterminée selon EN 196-1.

Résistance à la compression	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
A 1 jour	MPa	21	–	–
A 2 jours	MPa	34	20,0	–
A 7 jours	MPa	51	–	–
A 28 jours	MPa	64	52,5	–
Rapport R2d / R28d		0,53		

6. Production et conditionnement

Ce ciment est produit dans la cimenterie de CBR Lixhe et est disponible dans les conditionnements suivants:

Vrac bateau	Vrac camion	Sac
x	x	–

7. Le système de management de l'usine est certifié

8. Déclaration de performance conforme à CPR(EU) n° 305/2011

Identification : 0965-CPR-C00318

Site internet : www.cbr.be



Les valeurs reprises ci-dessus sont des valeurs moyennes qui sont données à titre indicatif.
Les limites garanties figurent dans la colonne exigences.

Lixhe CEM I 52,5 N (2) - Mars 2014

Annexe C

Fiche technique : Sable normalisé [EN 196-1]



Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)
Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72
Internet : www.s-n-l.fr - e.mail : contact@s-n-l.fr • s.n.l@wanadoo.fr

SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE CONFORME –
EN 196-1 par l'AFNOR et conforme ISO 679
Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville
de Paris (L.E.M.V.P.)
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy
75014 PARIS

Caractéristiques du sable - Autres que granulométrie et masse sachet

Fabrication Sable Normalisé CEN, conforme EN 196-1				
	Date mesure	Valeur ponctuelle	Valeur min	Valeur max
Masse volumique réelle (Mg/m ³) EN 1097-6	novembre-11	2,64		
Absorption eau (%) EN 1097-6	novembre-11	0,2		
Module de finesse (%) EN 12620	novembre-11		2,6	2,7
Ecoulement sable (s) EN 933-6	novembre-11	28		
Teneur en eau (%)	janvier-17		0,02	0,07
	février-17		0,01	0,07
	mars-17		0,03	0,07
Teneur en chlorure (ppm)	janvier-17		< 50	
	février-17		< 50	
	mars-17		< 50	
Teneur en silice (% SiO ₂)	janvier-16	98,05		
Teneur alumine (% Al ₂ O ₃) ISO 29581-2	janvier-16	0,54		
Teneur fer (% Fe ₂ O ₃) ISO 29581-2	janvier-16	0,07		
Perte au feu 950 °C (EN 196-2)	janvier-16	0,16		
teneur P ₂ O ₅ % ISO 29581-2	janvier-16	0		



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CEMENTS

FR C3 - MAJ 04/12-



Annexe D

Fiche technique Filler calcaire



FICHE TECHNIQUE

CALCITEC 2001S

FILLER CALCAIRE – CaCO₃

ANALYSE CHIMIQUE TYPE (valeurs moyennes sur sec)

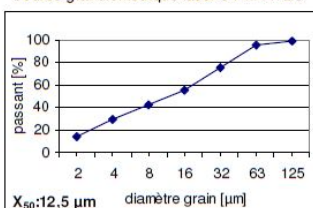
	Exigence absolue BRL 1804	Exigence BRL 1804	Exigence suivie 90%	Moyenne		
Carbonate	≥ 87	≥ 90	94-100	98,8 %	Réactivité aux alcalins	non réactif
CaCO ₃	≥ 72	≥ 75	94-100	98,1 %	Na ₂ O _{eq} = Na ₂ O + 0,658 x K ₂ O	0,03 %
MgO				0,31 %	Teneur en eau	0,12 %
SiO ₂				0,60 %	Soufre total (S)	0,04 %
Al ₂ O ₃				0,16 %	Sulfates solubles dans l'acide (SO ₃)	0,1 %
Fe ₂ O ₃				0,08 %	Ions chlorures solubles dans l'eau (Cl ⁻)	< 0,008 %
					Matières organiques	pas de M.O.
					pH	9,5

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES & DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (valeurs moyennes)

CALCAIRE VISEEN	
Masse volumique réelle	2.700 kg/m ³
Densité apparente non tassé	1.000 kg/m ³
Densité apparente tassé	1.500 kg/m ³
Surface spécifique Blaine	350 m ² /kg
Surface spécifique BET	1,0 m ² /kg
Valeur au bleu MB	0.66 %
Blancheur FY	53
Dureté (Mohs)	3

DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE

Courbe granulométrique laser SYMPATEC



Passant au tamis de	Exigence individuelle % m/m	Intervalle 90% % m/m	Moyenne % m/m
2 mm	100	100	100
500 µm	-	99 - 100	99,9
125 µm	85 - 100	90 - 100	97
63 µm	70 - 100	74 - 84	78



LIEU DE PRODUCTION
B - 4480 ENGIS

SECURITE

Fiche de sécurité disponible sur demande.
Le produit est inerte et non dangereux

STOCKAGE

Stocker à l'abri de l'humidité.

REF/NORMES

EINECS 215-279-6
CAS 471-34-1
Exempté de REACH
0785-CPR-31-214-13
04
EN 12620
EN 13139
DoP: 0785-CPR-31-214-04-En-42-1306



Le produit étant d'origine naturelle, les valeurs mentionnées peuvent être sujettes à des variations et n'engagent nullement la société

Annexe E

Fiche technique : Briques



Bloc haute résistance / Hoge weerstandsblok 288 x 138 x 138



Déclaration des Performances

Type de produit
Usage prévu

Nom du fabricant

Organisme notifié

Prestatieverklaring

Producttype
Beoogt gebruik

Naam fabrikant

Certificerende instantie

DoP_HB780_20160101

Bloc haute résistance / Hoge weerstandsblok

Briques HD pour maçonnerie non-protégée dans murs, poteaux et cloisons en maçonnerie / HD metselstenen voor onbeschermde metselwerk in metselwerkuren, kolommen en scheidingswanden.

SA Briqueteries de / Steenbakkerijen van Ploegsteert nv • Touquetstraat 228 • 7782 Ploegsteert

Division Barry • Grand Route 533 • 7534 Barry

BCCA (n° NB 0749) : Inspection initiale de l'établissement de fabrication et du contrôle de la production en usine ; Surveillance, évaluation et appréciation permanentes du contrôle de la production en usine ; Livraison du certificat de conformité du contrôle de la production en usine. / Initiale inspectie van productie-installatie en productiecontrole in de fabriek. Permanente bewaking, beoordeling en evaluatie van de productiecontrole in de fabriek. Verstrekt conformiteitscertificaat van productiecontrole in de fabriek.

Performances déclarées	Verklaarde prestaties	(selon norme EN 771-2:2011)			
Dimensions	Afmetingen	Longueur	Length	mm	288
		Largeur	Breedte	mm	138
		Hauteur	Hoogte	mm	138
Tolérances dimensionnelles	Tolerantie				T2
Plage	Maatspreiding				R2
Planéité des faces de pose	Vlakheid legvlakken			%	1
Parallélisme des faces de pose	Parallellisme van legvlakken				2
Configuration	Versnijningsvorm	Brique à perforation verticale	Verticaal geperforeerd product		Groupe 2
		Pourcentage des vides	Percentage holte ruimtes	%	<50
Masse volumique apparente sèche	Bruto volumieke massa			kg/m³	1150-1200
Masse volumique absolue sèche	Netto droge volumemassa			kg/m³	2000-2100
Résistance à la compression	Druksterkte	Rés. Moy. \perp à la face de pose	Gem. drukst. \perp op mortelbedvlak	N/mm²	≥ 35
		Facteur de forme / format	Vormfactor / formaat		1.1
		Rés. norm. \parallel à la face de pose	Genorm. drukst. \parallel op mortelbedvlak	N/mm²	38
		Catégorie	Categorie		I
Dilatation due à l'humidité	Vochtexpansie			mm/m	NPD
Adhérence mortier d'usage mince	Hechtsterkte verfijnd	Valeurs fixes tabl. EN998-2 ann C	Tabelwaarden EN998-2 ann C	N/mm²	NPD
Adhérence mortier d'usage courant	Hechtsterkte vermeteld	Valeurs fixes tabl. EN998-2 ann C	Tabelwaarden EN998-2 ann C	N/mm²	NPD
Teneur en sels solubles actifs	Gehalte actieve oplosbare zouten	Classe	Klasse		S2
Réaction au feu	Brandreactie	Classe	Klasse		A1
Absorption d'eau	Wateropneming			%	≤ 12
Taux initial d'absorption d'eau	Initiële wateropzuiging	Classe	Klasse	kg/m².min	1,5 < Iw ≤ 4,0
Propriétés thermiques	Thermische eigenschappen	λ_{10} max. 0,108	λ_{10} max. 0,108	W/m.K	0,28
Durabilité contre gel/dégel : résistance au (dé)gel	Duurzaamheid inzake vriezen en dooien				F2
Substances dangereuses	Gevaarlijke stoffen				NPD
Perméabilité à la vapeur d'eau	Dampdoorlatendheid	Valeur min. et max. (EN1745, tableau 1)	Min. en max. waarde (EN1745 Tabel 1)		05/10

Les performances du produit identifié sont conformes aux performances déclarées dans le tableau ci-dessus. Signé pour le fabricant et en son nom par Karel Rommel, directeur commercial briques, à Ploegsteert.

De prestaties van het hierboven omschreven product zijn conform de verklaarde prestaties. Deze prestatieverklaring werd ondertekend voor en namens de fabrikant door Karel Rommel, commercieel directeur stenen, te Ploegsteert.

Date / Datum 20160101

Propriétés techniques nationales supplémentaires / Aanvullende nationale specificaties (Selon / Volgens BB/202/681/024-00-P/01)

Résistance au gel/dégel	Vorst/Dooi weerstand	Selon / Volgens NBN B 27-209	Résistance élevée au gel
Propriétés thermiques	Thermische eigenschappen	W/m.K	0.32
λ_{10} max. 0,108 (90/90)	λ_{10} max. 0,108 (90/90)	Selon / Volgens NBN B 24-209	Pas d'éfflorescence
Efflorescence	Neiging tot uitbloeiing		



Avis au client au verso / Bericht aan de klant op keerzijde.

Bloc haute résistance / Hoge
weerstandsblok

288 x 138 x 138

HB780

Annexe F

Diffusion forcée : Essai de l'appareil à 60V

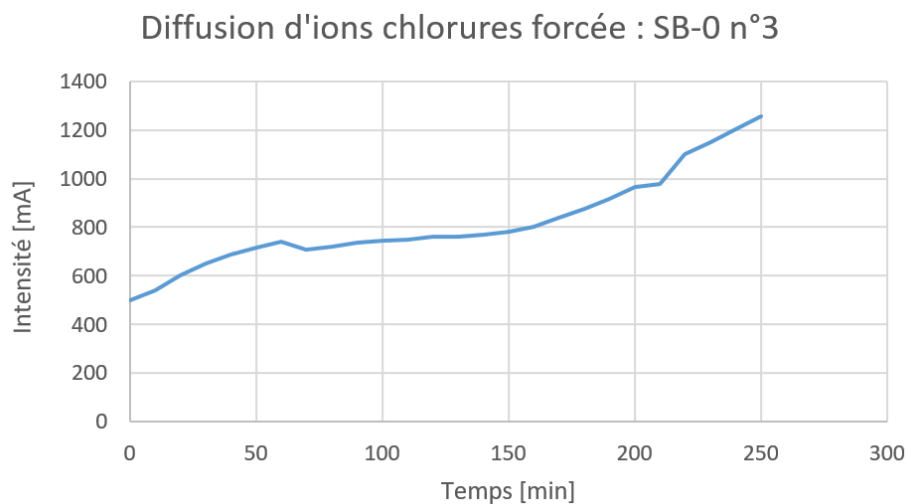


FIGURE F.1 – Essai sur mortier de référence : SB-0 n°3

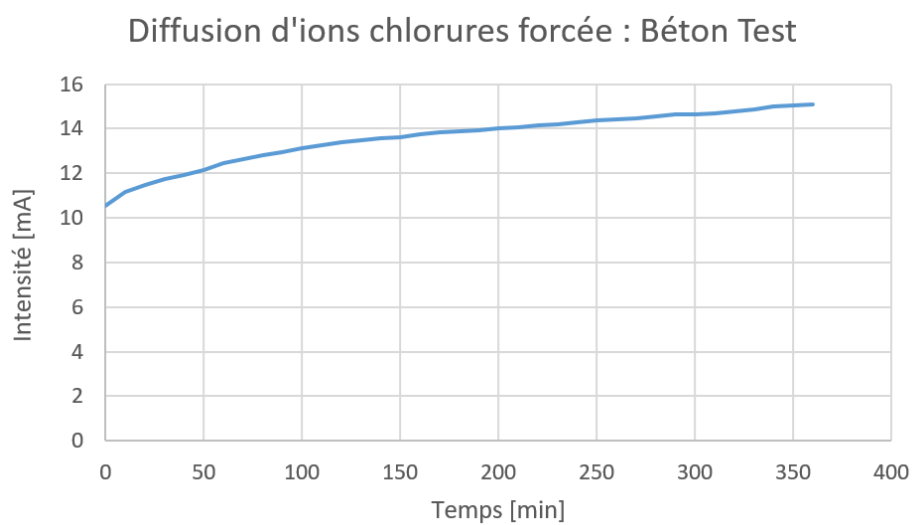


FIGURE F.2 – Essai sur un béton test

Annexe G

Résultats de la carbonatation après 28 jours

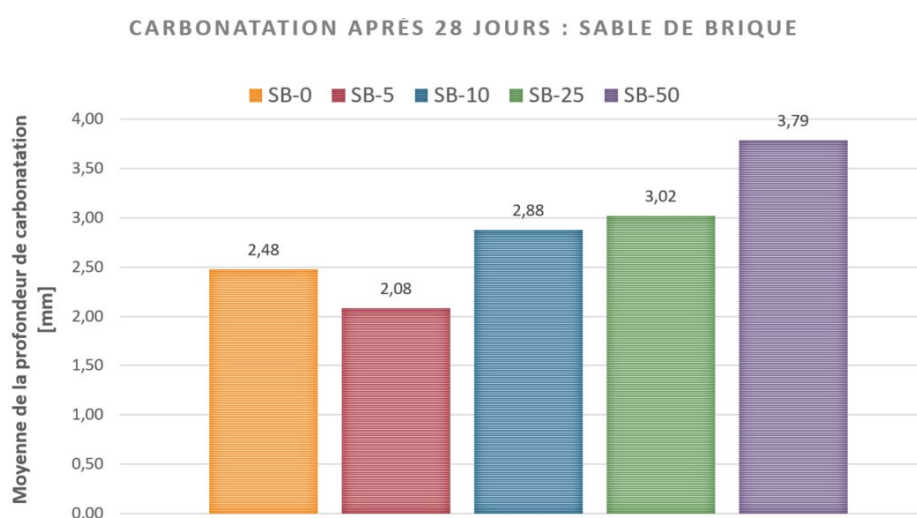


FIGURE G.1 – Carbonatation après 28 jours des mortiers auto-compactants avec du sable de brique

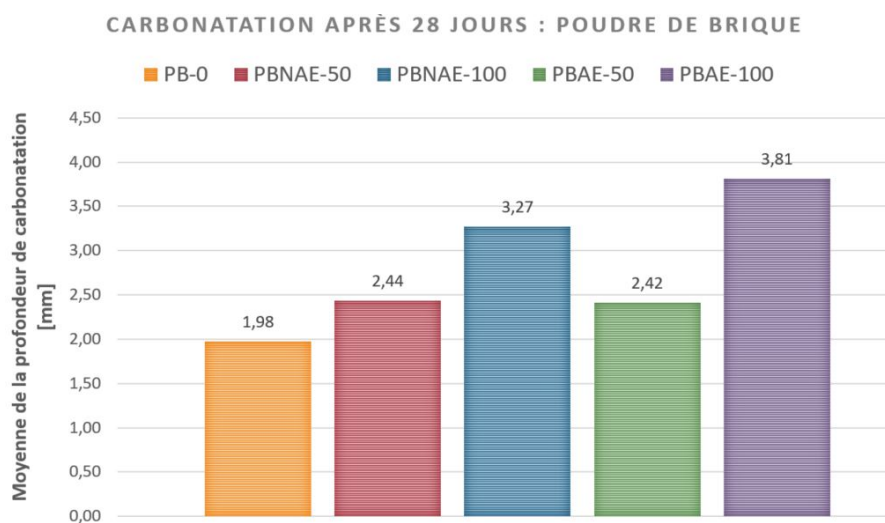


FIGURE G.2 – Carbonatation après 28 jours des mortiers auto-compactants avec de la poudre de brique

Annexe H

Carbonatation des échantillons après 56 jours



FIGURE H.1 – Carbonatation après 56 jours (Sable de brique). Mélange correspondant de gauche à droite et de haut en bas : SB-0, SB-5, SB-10, SB-25, SB-50

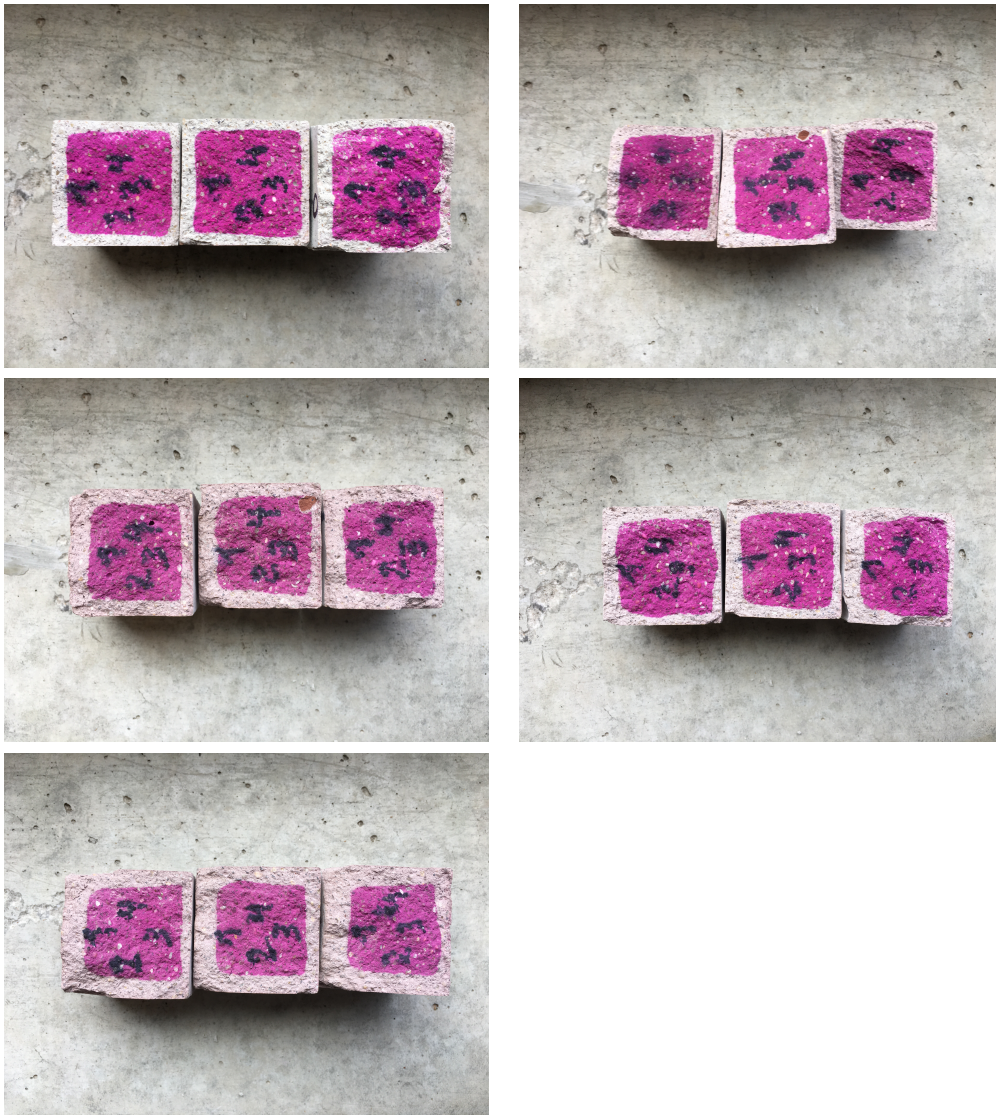


FIGURE H.2 – Carbonatation après 56 jours (Poudre de brique). Mélange correspondant de gauche à droite et de haut en bas : PB-0, PBNAE-50, PBNAE-100, PBAE-50, PBAE-100

Annexe I

Diffusion d'ions chlorure forcée : Évolution de l'intensité du courant au cours du temps (Série n°1 et n°2)

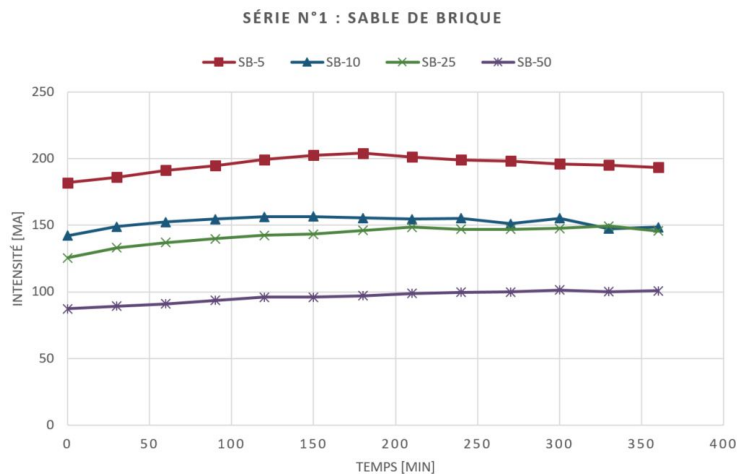


FIGURE I.1 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°1 : Sable de brique

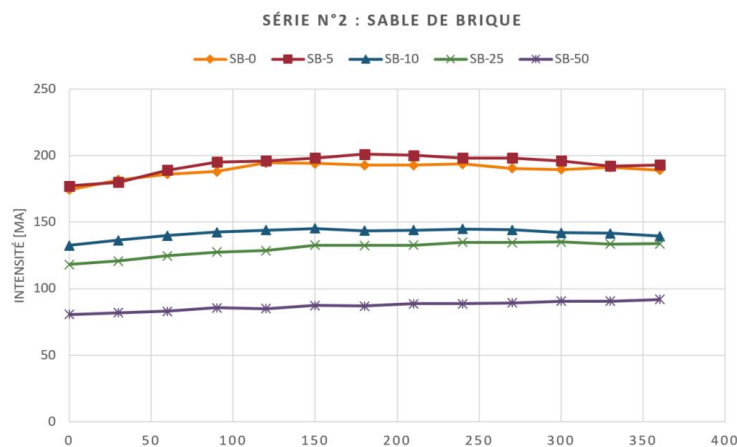


FIGURE I.2 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°2 : Sable de brique

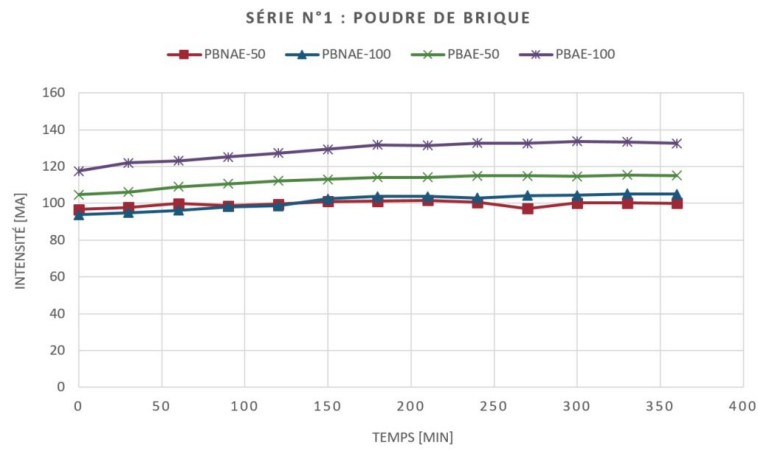


FIGURE I.3 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°1 : Poudre de brique

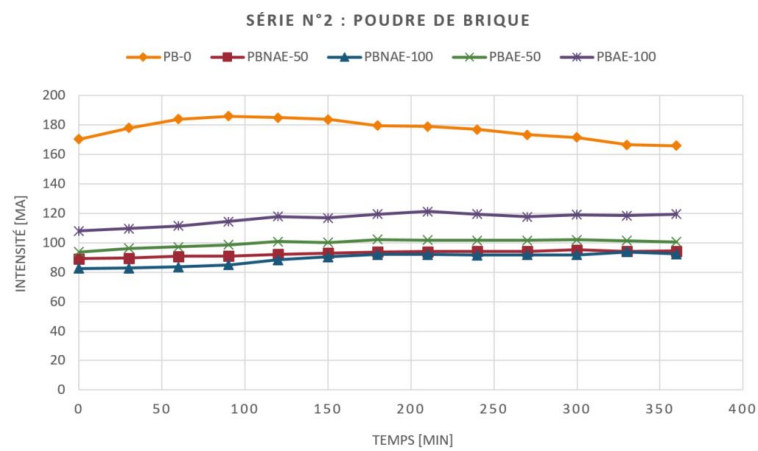


FIGURE I.4 – Évolution de l'intensité du courant au cours du temps série n°2 : Poudre de brique

Annexe J

Résultats des prélèvements pour la diffusion stationnaire

Sable de brique : DS		Diffusion [mg/l] au cours du temps [jours]						
Mortier	N° Eprouvette	0	14	28	42	56	70	84
SB0	1	0	45,37	159,82	273,25	437,47	557,67	642,59
	2	0	61,45	196,42	342,97	493,98	635,91	722,67
	Moyenne	0	53,41	178,12	308,11	465,725	596,79	682,63
	E-T	0	8,04	18,3	34,86	28,255	39,12	40,04
SB5	1	0	44,08	115,84	255	410,2	572,4	716,99
	2	0	42,72	176,47	353,51	546,2	751,64	864,82
	Moyenne	0	43,4	146,155	304,255	478,2	662,02	790,905
	E-T	0	0,68	30,315	49,255	68	89,62	73,915
SB10	1	0	63,69	148,17	301,08	427,31	547,73	623,79
	2	0	55,1	178	258,33	371,33	481,73	547,59
	Moyenne	0	59,395	163,085	279,705	399,32	514,73	585,69
	E-T	0	4,295	14,915	21,375	27,99	33	38,1
SB25	1	0	26,63	99,05	218,29	349,18	487,45	592,53
	2	0	27,25	88,04	185,98	302,14	422,1	503,89
	Moyenne	0	26,94	93,545	202,135	325,66	454,775	548,21
	E-T	0	0,31	5,505	16,155	23,52	32,675	44,32
SB50	1	0	33,49	75,9	153,93	234,9	313,25	362,92
	2	0	33,21	74,21	124,32	193,58	267,39	318,22
	Moyenne	0	33,21	74,21	124,32	193,58	267,39	340,57
	E-T	0	0,1979899	1,19501046	20,937432	29,2176522	32,427917	22,35

FIGURE J.1 – Concentration des prélèvements dans les cellules de diffusions des mortiers contenant du sable de brique

Poudre de brique : DS		Diffusion [mg/l] au cours du temps [jours]						
	N° Eprouvette	0	14	28	42	56	70	84
PB-0	1	0	25,08	37,06	38,68	47,57	87,05	185,65
	2	0	28	40	38,03	46,78	112,61	153,15
	Moyenne	0	26,54	38,53	38,355	47,175	99,83	169,4
	E-T	0	1,46	1,47	0,325	0,395	12,78	16,25
PBNAE-50	1	0	23,42	27,18	42,6	77,46	98,71	136,99
	2	0	26,11	36,26	61,66	100,07	126,63	169,65
	Moyenne	0	24,765	31,72	52,13	88,765	112,67	153,32
	E-T	0	1,345	4,54	9,53	11,305	13,96	16,33
PBNAE-100	1	0	14,33	34,22	64,57	102,52	144,26	157,35
	2	0	15,82	28,51	59,6	82,69	138,84	145,94
	Moyenne	0	15,075	31,365	62,085	92,605	141,55	151,645
	E-T	0	0,745	2,855	2,485	9,915	2,71	5,705
PBAE-50	1	0	15,82	37,8	35,11	61,1	144,26	199,25
	2	0	16,54	31,12	46,4	76,43	133,48	133,48
	Moyenne	0	16,18	34,46	40,755	68,765	138,87	166,365
	E-T	0	0,36	3,34	5,645	7,665	5,39	32,885
PBAE-100	1	0	19,76	40,86	81,33	123,45	161,17	195
	2	0	16,92	55,74	109,73	135,24	209,34	236
	Moyenne	0	18,34	48,3	95,53	129,345	185,255	215,5
	E-T	0	1,42	7,44	14,2	5,895	24,085	20,5

FIGURE J.2 – Concentration des prélèvements dans les cellules de diffusions des mortiers contenant de la poudre de brique

Annexe K

Paramètres pour le calcul des coefficients de diffusions pour tous les échantillons (Diffusion stationnaire)

Sable de brique		Calcul coefficient de diffusion						
Mortier	N° Eprouvette	(t-t ₀) [J]	C _{amont} [kg/m³]	C _{aval} [kg/m³]	e [m]	V _{aval} [m³]	A [m²]	D _{eff} [m²/s]
SB0	1	84	1,06E+02	6,43E-01	1,22E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,49E-12
	2	84	1,06E+02	7,23E-01	1,25E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,72E-12
	Moyenne							1,61E-12
	E-T							1,12E-13
SB5	1	84	1,06E+02	7,17E-01	1,10E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,50E-12
	2	84	1,06E+02	8,65E-01	1,10E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,81E-12
	Moyenne							1,66E-12
	E-T							1,55E-13
SB10	1	84	1,06E+02	6,24E-01	8,04E-03	4,37E-04	2,38E-03	1,19E-12
	2	84	1,06E+02	5,48E-01	8,43E-03	4,37E-04	2,38E-03	1,10E-12
	Moyenne							1,15E-12
	E-T							4,75E-14
SB25	1	84	1,06E+02	5,93E-01	1,15E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,30E-12
	2	84	1,06E+02	5,04E-01	1,18E-02	4,37E-04	2,97E-03	1,14E-12
	Moyenne							1,22E-12
	E-T							8,24E-14
SB50	1	84	1,06E+02	3,63E-01	1,20E-02	4,37E-04	2,97E-03	8,32E-13
	2	84	1,06E+02	3,18E-01	1,21E-02	4,37E-04	2,97E-03	7,32E-13
	Moyenne							7,82E-13
	E-T							5,03E-14

FIGURE K.1 – Calcul du coefficient de diffusion effectif pour les mortiers contenant du sable de brique

Poudre de brique		Calcul coefficient de diffusion						
Mortier	N° Eprouvette	(t-t ₀) [J]	C _{amont} [kg/m³]	C _{aval} [kg/m³]	e [m]	V _{aval} [m³]	A [m²]	D _{eff} [m²/s]
PB-0	1	84	1,06E+02	1,86E-01	1,23E-02	4,37E-04	2,97E-03	4,34E-13
	2	84	1,06E+02	1,53E-01	1,29E-02	4,37E-04	2,97E-03	3,75E-13
	Moyenne							4,05E-13
	E-T							2,92E-14
PBNAE-50	1	84	1,06E+02	1,37E-01	1,28E-02	4,37E-04	2,97E-03	3,34E-13
	2	84	1,06E+02	1,70E-01	1,23E-02	4,37E-04	2,97E-03	3,98E-13
	Moyenne							3,66E-13
	E-T							3,20E-14
PBNAE-100	1	84	1,06E+02	1,57E-01	1,17E-02	4,37E-04	2,97E-03	3,51E-13
	2	84	1,06E+02	1,46E-01	1,23E-02	4,37E-04	2,97E-03	3,41E-13
	Moyenne							3,46E-13
	E-T							4,65E-15
PBAE-50	1	84	1,06E+02	1,99E-01	1,28E-02	4,37E-04	2,38E-03	6,09E-13
	2	84	1,06E+02	1,33E-01	1,26E-02	4,37E-04	2,38E-03	4,01E-13
	Moyenne							5,05E-13
	E-T							1,04E-13
PBAE-100	1	84	1,06E+02	1,95E-01	1,27E-02	4,37E-04	2,97E-03	4,71E-13
	2	84	1,06E+02	2,36E-01	1,23E-02	4,37E-04	2,97E-03	5,55E-13
	Moyenne							5,13E-13
	E-T							4,17E-14

FIGURE K.2 – Calcul du coefficient de diffusion effectif pour les mortiers contenant de la poudre de brique

Annexe L

Résultats Attaque des Sulfates

Sable de brique : Attaque Sulfates		Variation de la longueur des barrettes [%] au cours du temps [Jours]							
	N° Eprouvette	0	7	14	21	28	35	42	77
SB-0	1	0	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	2	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	3	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
SB-5	1	0	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	2	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	3	0	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
SB-10	1	0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	2	0	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
	3	0	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
SB-25	1	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04
	2	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	3	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
SB-50	1	0	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04
	2	0	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	3	0	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02

FIGURE L.1 – Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Sable de brique

Poudre de brique : Attaque Sulfates		Variation de la longueur des barrettes [%] au cours du temps [Jours]							
	N° Eprouvette	0	7	14	21	28	35	42	77
PB-0	1	0	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
	2	0	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04
	3	0	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
PBNAE-50	1	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	3	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
PBNAE-100	1	0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
	2	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
	3	0	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
PBAE-50	1	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	3	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
PBAE-100	1	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	3	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03

FIGURE L.2 – Variation de la longueur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Poudre de brique

Sable de brique : Attaque Sulfates		Variation de la largeur des barrettes [%] au cours du temps [Jours]							
	N° Eprouvette	0	7	14	21	28	35	42	77
SB-0	1	0	0,12	-0,03	0,20	0,25	0,05	-0,03	0,20
	2	0	-0,35	-0,23	-0,40	-0,18	-0,23	-0,40	-0,18
	3	0	-1,37	-1,35	-1,32	-1,30	-1,12	-1,37	-1,00
SB-5	1	0	0,13	0,23	0,40	0,25	0,13	0,00	0,05
	2	0	-0,12	0,13	0,00	-0,07	0,13	-0,22	-0,12
	3	0	-1,00	-0,95	-0,92	-1,05	-0,98	-1,00	-1,00
SB-10	1	0	-0,05	0,05	-0,15	-0,08	0,12	-0,15	-0,08
	2	0	0,15	0,25	0,10	0,20	0,22	0,02	0,08
	3	0	-0,13	0,02	-0,03	-0,05	-0,05	-0,15	-0,13
SB-25	1	0	-0,13	-0,48	-0,30	-0,35	-0,38	-0,40	-0,38
	2	0	0,05	0,18	-0,03	0,02	0,18	0,00	0,02
	3	0	-0,05	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,07	0,05
SB-50	1	0	-0,05	-0,02	-0,05	0,10	0,02	0,02	0,05
	2	0	0,00	-0,08	-0,15	0,27	0,12	-0,05	0,05
	3	0	0,02	0,00	-0,13	0,25	0,00	-0,10	0,25

FIGURE L.3 – Variation de la largeur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Sable de brique

Poudre de brique : Attaque Sulfates		Variation de la largeur des barrettes [%] au cours du temps [Jours]							
	N° Eprouvette	0	7	14	21	28	35	42	77
PB-0	1	0	-0,43	-0,12	-0,18	-0,35	-0,25	-0,40	-0,37
	2	0	-0,03	0,12	-0,13	-0,03	0,18	0,12	-0,10
	3	0	-0,70	-0,27	-0,77	-0,67	-0,53	-0,53	-0,72
PBNAE-50	1	0	0,08	0,10	0,37	0,10	0,35	0,00	0,10
	2	0	0,25	0,05	-0,02	0,08	0,08	0,30	0,15
	3	0	-0,30	-0,32	-0,27	-0,32	-0,35	-0,20	-0,25
PBNAE-100	1	0	0,00	0,18	0,05	0,08	0,25	-0,02	0,00
	2	0	0,02	0,00	0,02	0,08	0,15	-0,05	0,00
	3	0	0,03	0,27	-0,02	0,05	0,15	-0,15	-0,02
PBAE-50	1	0	-0,15	-0,27	-0,22	-0,20	0,02	-0,22	-0,22
	2	0	-0,33	-0,35	-0,20	-0,25	-0,33	-0,08	-0,15
	3	0	-0,02	0,00	-0,05	0,02	0,15	0,05	0,00
PBAE-100	1	0	-0,25	0,22	-0,18	-0,20	-0,15	-0,12	-0,25
	2	0	-0,08	0,35	0,05	0,08	0,05	0,00	0,02
	3	0	-0,12	-0,02	-0,10	-0,18	0,20	-0,30	-0,20

FIGURE L.4 – Variation de la largeur des barrettes de mortier au cours du temps [%] : Poudre de brique

Annexe M

Mesures du Retrait

Sable de brique : Retrait		Retrait [mm] au cours du temps [jours]				
	N° Eprouvette	0	3	7	14	28
SB0	1	0	-2,00E-02	-4,50E-02	-8,00E-02	-1,13E-01
	2	0	-2,60E-02	-5,10E-02	-8,90E-02	-1,21E-01
	3	0	-2,50E-02	-5,40E-02	-9,50E-02	-1,17E-01
	Moyenne	0	-2,37E-02	-5,00E-02	-8,80E-02	-1,17E-01
	E-T	0	2,62E-03	3,74E-03	6,16E-03	3,27E-03
	%	0	-1,69E-02	-3,57E-02	-6,29E-02	-8,36E-02
SB5	1	0	-2,10E-02	-4,60E-02	-7,90E-02	-1,14E-01
	2	0	-2,10E-02	-3,60E-02	-8,20E-02	-1,13E-01
	3	0	-2,20E-02	-3,90E-02	-8,30E-02	-9,20E-02
	Moyenne	0	-2,13E-02	-4,03E-02	-8,13E-02	-1,06E-01
	E-T	0	4,71E-04	4,19E-03	1,70E-03	1,01E-02
	%	0	-1,52E-02	-2,88E-02	-5,81E-02	-7,60E-02
SB10	1	0	-2,20E-02	-8,20E-02	-8,30E-02	-9,60E-02
	2	0	-2,00E-02	-4,50E-02	-8,00E-02	-9,90E-02
	3	0	-2,30E-02	-4,80E-02	-9,20E-02	-1,12E-01
	Moyenne	0	-2,17E-02	-5,83E-02	-8,50E-02	-1,02E-01
	E-T	0	1,25E-03	1,68E-02	5,10E-03	6,94E-03
	%	0	-1,55E-02	-4,17E-02	-6,07E-02	-7,31E-02
SB25	1	0	-1,10E-02	-3,90E-02	-8,40E-02	-1,13E-01
	2	0	-1,80E-02	-4,60E-02	-8,40E-02	-1,14E-01
	3	0	-1,30E-02	-3,40E-02	-7,40E-02	-1,10E-01
	Moyenne	0	-1,40E-02	-3,97E-02	-8,07E-02	-1,12E-01
	E-T	0	2,94E-03	4,92E-03	4,71E-03	1,70E-03
	%	0	-1,00E-02	-2,83E-02	-5,76E-02	-8,02E-02
SB50	1	0	-5,00E-03	-4,10E-02	-8,60E-02	-1,11E-01
	2	0	-1,20E-02	-4,00E-02	-8,30E-02	-1,10E-01
	3	0	-1,10E-02	-4,20E-02	-8,80E-02	-1,12E-01
	Moyenne	0	-9,33E-03	-4,10E-02	-8,57E-02	-1,11E-01
	E-T	0	3,09E-03	8,16E-04	2,05E-03	8,16E-04
	%	0	-6,67E-03	-2,93E-02	-6,12E-02	-7,93E-02

FIGURE M.1 – Mesures complètes du retrait : Sable de brique

Poudre de brique : Retrait		Retrait [mm] au cours du temps [jours]				
	N° Eprouvette	0	3	7	14	28
PB-0	1	0	-5,40E-02	-7,50E-02	-9,70E-02	-1,29E-01
	2	0	-6,10E-02	-8,50E-02	-1,24E-01	-1,53E-01
	3	0	-4,10E-02	-6,50E-02	-1,04E-01	-1,28E-01
	Moyenne	0	-5,20E-02	-7,50E-02	-1,08E-01	-1,37E-01
	E-T	0	8,29E-03	8,16E-03	1,14E-02	1,16E-02
	%	0,00E+00	-3,71E-02	-5,36E-02	-7,74E-02	-9,76E-02
PBNAE-50	1	0	-2,40E-02	-4,80E-02	-8,10E-02	-1,06E-01
	2	0	-2,40E-02	-4,30E-02	-7,30E-02	-1,00E-01
	3	0	-2,30E-02	-4,40E-02	-7,80E-02	-9,80E-02
	Moyenne	0	-2,37E-02	-4,50E-02	-7,73E-02	-1,01E-01
	E-T	0	4,71E-04	2,16E-03	3,30E-03	3,40E-03
	%	0,00E+00	-1,69E-02	-3,21E-02	-5,52E-02	-7,24E-02
PBNAE-100	1	0	-2,30E-02	-3,90E-02	-7,60E-02	-9,90E-02
	2	0	-1,60E-02	-3,30E-02	-6,60E-02	-9,20E-02
	3	0	-2,90E-02	-4,10E-02	-7,50E-02	-9,60E-02
	Moyenne	0	-2,27E-02	-3,77E-02	-7,23E-02	-9,57E-02
	E-T	0	5,31E-03	3,40E-03	4,50E-03	2,87E-03
	%	0,00E+00	-1,62E-02	-2,69E-02	-5,17E-02	-6,83E-02
PBAE-50	1	0	-2,00E-02	-2,20E-02	-7,50E-02	-1,02E-01
	2	0	-2,30E-02	-4,50E-02	-7,80E-02	-1,06E-01
	3	0	-2,20E-02	-4,10E-02	-7,30E-02	-1,04E-01
	Moyenne	0	-2,17E-02	-3,60E-02	-7,53E-02	-1,04E-01
	E-T	0	1,25E-03	1,00E-02	2,05E-03	1,63E-03
	%	0,00E+00	-1,55E-02	-2,57E-02	-5,38E-02	-7,43E-02
PBAE-100	1	0	-2,20E-02	-4,10E-02	-7,50E-02	-1,03E-01
	2	0	-2,90E-02	-4,40E-02	-6,90E-02	-1,06E-01
	3	0	-2,10E-02	-5,30E-02	-8,70E-02	-1,22E-01
	Moyenne	0	-2,40E-02	-4,60E-02	-7,70E-02	-1,10E-01
	E-T	0	3,56E-03	5,10E-03	7,48E-03	8,34E-03
	%	0,00E+00	-1,71E-02	-3,29E-02	-5,50E-02	-7,88E-02

FIGURE M.2 – Mesures complètes du retrait : Poudre de brique

Annexe N

Retrait : Résultats d'une étude réalisée à l'université de Médéa, Algérie

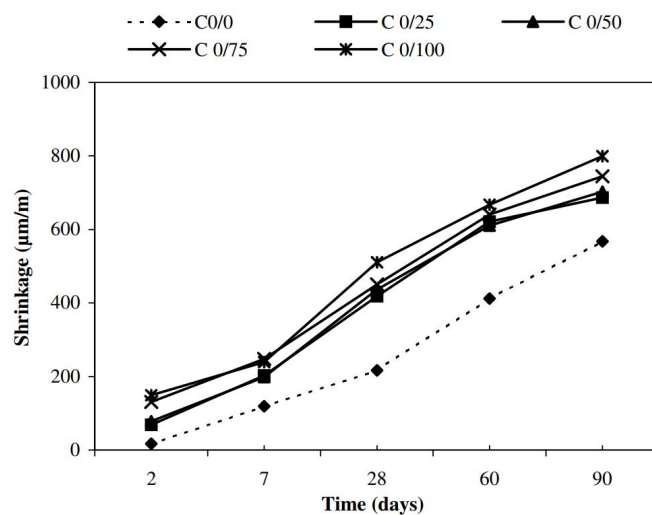


FIGURE N.1 – Retrait pour des bétons avec Fines de brique (=FB) : C0/0 = 0% de FB, C0/25 = 25% de FB, C0/50 = 50% de FB, C0/75 = 75% de FB et C0/100 = 100% de FB [20]

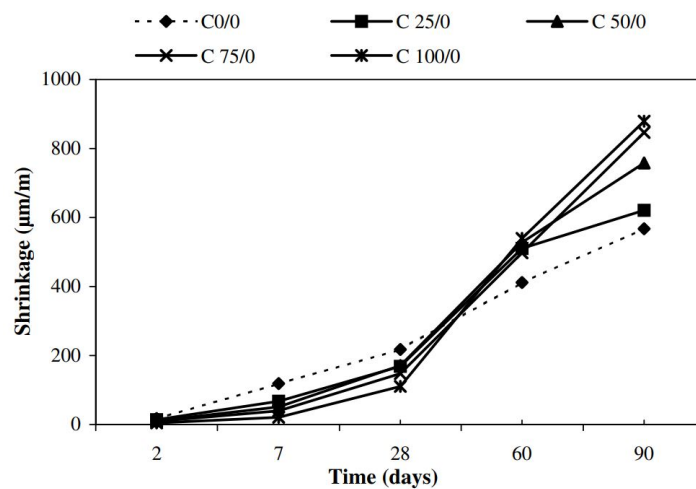


FIGURE N.2 – Retrait pour des bétons avec Sable de brique (=SB) : C0/0 = 0% de SB, C25/0 = 25% de SB, C50/0 = 50% de SB, C75/0 = 75% de SB et C100/0 = 100% de SB, [20]

Bibliographie

- [1] Image comparaison économie linéaire >< circulaire. <https://es.dreamstime.com/econom%C3%ADa-circular-y-linear-comparada-image107451878>.
- [2] NBN B 14-217. Essais des mortiers : Retrait et gonflement. Technical report, Institut du génie civil, 1983.
- [3] NBN B 15-215. Essais des bétons : Absorption d'eau par immersion. Technical report, Institut du génie civil, 1969.
- [4] RILEM TC 56-MHM. Cpc-18 measurement of hardened concrete carbonation depth. Technical report, Materials and Structures, 1998.
- [5] Ramin Amjadi, Maryam Monazami, Ehsan Mohseni, Hamed Azar Hamed Azar Balgouri, and Malek Mohammad Ranjbar. Effectiveness of different recycled materials in self-compacting mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, April 2016.
- [6] F. Bektas, K. Wang, and H. Ceylan. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, October 2008.
- [7] Fahima Benbrahim. Effet des granulats de verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier autoplaçant. Master's thesis, UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES, 2014.
- [8] Artisan Béton. Béton autoplaçant - définition - avantages - mise en oeuvre. <https://www.artisanbeton.fr/beton-autoplacant.html>.
- [9] METALS FOR BUILDINGS. Essentiels & 100 % recyclables. Technical report, METALS FOR BUILDINGS, 2019.
- [10] Maurice Bureau, Julie et Duval. Recyclage. Technical report, Alu Québec, Décembre 2017.
- [11] ASTM Standard C1012-05. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. Technical report, ASTM International, 2004.
- [12] ASTM Standard C1202-05. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Technical report, ASTM International, 2005.
- [13] Christophe Cadre. La carbonatation. *Bétons - Le magazine*, n°2 :53–54, Janvier/Février 2006.
- [14] Christophe Cadre. Le retrait des bétons. *Bétons - Le magazine*, n°6 :85–86, Septembre/Octobre 2006.
- [15] Loredana Casasanta. Effet des hydrofuges sur la diffusion des ions chlorures. Master's thesis, Université de Liège, 2015.
- [16] Laurent Chateau. Déchets du bâtiment. Technical report, Service Mobilisation et valorisation des Déchets - Direction Economie Circulaire et Déchets - Ademe Angers, December 2014.
- [17] L. Courard, O. Gérard, F. Michel, V. Lucquiaud, M. Handy, S. Aggoun, and A. Cousture. Hydrophobe vii. *7th International Conference on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building Materials*, Lisbon, pages 29–38, September 2014.
- [18] Luc Courard. Durabilité des bétons : Mécanismes de dégradation. Note de cours.

- [19] Luc Courard. Transforming wastes into secondary resources : Challenges for construction industry, December 2018.
- [20] Farid Debieb and Said Kenai. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *ScienceDirect*, February 2007.
- [21] David Deharbe. Les apports de la nouvelle directive-cadre relative aux déchets en droit français de l'environnement industriel. *Revue juridique de l'environnement*, 35 :7–24, 2010.
- [22] E-devis.ch. La carbonatation, le cancer du béton qui attaque vos murs, Août 2013.
- [23] PR.M.CARCASSÈS et DR.F.CASSAGNABÈRE. Durabilité des bétons : La nouvelle approche performantielle fondée sur les indicateurs de durabilité. indicateurs de durabilité gEnÉraux, Décembre 2016. Laboratoire Matériaux Durabilité des Constructions (Toulouse).
- [24] V.Dieryck et J.Desmyter. Le béton auto-compactant. *Technologie du béton*, pages 491–504, 2006. Editeur : Groupement Belge du Béton.
- [25] Eurostat. Ressources minérales (non-métallique).
- [26] L. Evangelista and J. de Brito. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, October 2009.
- [27] Khalaf1 Fouad M and DeVenny Alan S. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete : Review. *Materials in Civil Engineering*, 16, August 2004.
- [28] Matos Grecia and Wagner Loris. Consumption of materials in the united states, 1900-1995. *Annual Review of Energy and the Environment*, 23 :107–122, November 1998.
- [29] The European Project Group. The european guidelines for self-compacting concrete, May 2005.
- [30] Li Guanshu. Etude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés. Master's thesis, L'école nationale des ponts et chaussées, 2010.
- [31] Wang Heming, Tian Xin, Tanikawa Hiroki, Chang Miao, Hashimoto Seiji, Moriguchi Yuichi, and Lu† Zhongwu. Exploring china's materialization process with economic transition : Analysis of raw material consumption and its socioeconomic drivers. *Environmental Sciences & Technology*, pages 5025–5032, 2014.
- [32] Hydroxyle. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyle>.
- [33] Le retrait du béton. https://fr.wikipedia.org/wiki/Retrait_du_b%C3%A9ton#Retrait_plastique.
- [34] Ségrégation en milieu granulaire. https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9gr%C3%A9gation_en_milieu_granulaire.
- [35] PAPREC GROUP. <https://www.paprec.com/fr/comprendre-recyclage-paprec/valorisation-matiere/recyclage-bois>.
- [36] Pathologie du béton. <http://www.guidebeton.com/pathologies-beton>.
- [37] HUNNEBECK. Coffrage tunnel. <http://www.directindustry.fr/prod/huennebeck-gmbh/product-57436-1840710.html>.
- [38] J.Apers. La durabilité des bétons. *Technologie du béton*, 2006. Editeur : Groupement Belge du Béton.
- [39] Gálvez-Martosa José-Luis, Styles David, Schoenbergerd Harald, and Zeschmar-Lahl Barbara. Construction and demolition waste best management practice in europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 136 :Pages 166–178, Septembre 2018.
- [40] Panda K C and Bal P K. Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. *Procedia Engineering*, 2013.
- [41] MABAMURE. Armatures pour les bétons armés. <http://www.mabamure.eu/>.

- [42] Jan Stephanus Malherbe. Self-compacting concrete versus normal compacting concrete : A technoeconomic analysis. Master's thesis, Stellenbosch University, December 2015.
- [43] Gaëtan Mauny. Calcul des structures en béton. <http://www.mabamure.eu/>.
- [44] Jean-Michel Ollivier, Jean-Pierre et Torrenti. La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert, January 2008.
- [45] Planétoscope. Production de déchets dans le monde, Juin 2007.
- [46] Ir C. Ployaert. La corrosion des armatures des bétons armés et précontraints. Technical report, Fédération de l'industrie cimentière Belge, Novembre 2008.
- [47] Bitume Québec. Le recyclage des enrobés bitumineux. Technical report, Bitume Québec, Octobre 2010.
- [48] Elgizawy¹ Sally M, El-Haggar² Salah M, and Nassar¹ Khaled. Approaching sustainability of construction and demolition waste using zero waste concept, Mars 2016.
- [49] Jongsung Sim and Cheolwoo Park. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, 31 :2352–2360, Novembre 2011.
- [50] Enrico Tabarelli. The recycling of crushed waste bricks in the self-compacting mortar. Master's thesis, Université de Liège, 2018.
- [51] T. Vieira, A. Alves, J. de Brito, J.R. Correia, and R.V. Silva. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Materials and Design*, November 2015.
- [52] Dosho Yasuhiro. Development of a sustainable concrete waste recycling system. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5 :27–42, 2007.