

## **Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers**

**Auteur :** Simon, Henri

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

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique :** 2018-2019

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/6779>

---

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

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

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

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

---

# Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU  
GRADE DE MASTER "INGÉNIEUR CIVIL DES CONSTRUCTIONS" PAR  
HENRI SIMON

---

**Composition du jury :**  
L. COURARD (promoteur)  
Z. ZHAO (guidance)  
L. GREGOIRE  
PH. DESCAMPS

Année académique 2018-2019



# Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur Monsieur Luc Courard pour l'accueil qu'il m'a réservé ainsi que pour les précieux conseils qu'il m'a donnés. Je tiens également à remercier Monsieur Zengfeng Zhao qui m'a supervisé tout au long de mes recherches, m'a aidé à comprendre certains résultats et m'orienter pour les aspects plus théoriques.

Je remercie également Monsieur Léonard Grégoire et Monsieur Philippe Descamps d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je voudrais également remercier Monsieur Frédéric Michel qui m'a aiguillé à de nombreuses reprises lors des différentes réunions intermédiaires.

Évidemment tous les tests en laboratoire n'auraient pu se faire sans le soutien de l'équipe travaillant au sein du laboratoire. Je tiens ici à remercier Mesdames Monique Denotte, Fabienne Libioulle et Véronique Szepetiuk ainsi que Monsieur Amaury Daras pour leurs précieux conseils, pour m'avoir expliqué les méthodologies expérimentales, pour la collecte des résultats, pour leur soutien et leur gentillesse.

Je remercie également mes amis pour leur soutien et plus particulièrement Martin Wintgens, étudiant qui a partagé mon bureau pour ses nombreux avis, pour nos échanges de points de vue et pour ses encouragements.

Enfin je souhaite également remercier mes parents qui ont eu une attention bienveillante tout au long de mes études et pour la relecture de ce travail, sans oublier mes 2 frères qui m'ont permis de me changer les idées lors des moments plus difficiles.



# Résumé

Le secteur de la construction ne cesse de croître, la demande en ressources naturelles ne cesse d'augmenter et la quantité de déchet de construction et de démolition en fait de même. Dans les normes actuelles, la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton pour la fabrication de nouveaux bétons est limitée au vu de leurs propriétés moins bonnes que les granulats naturels.

Les granulats recyclés de béton sont constitués de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Cette pâte de ciment possède généralement une porosité plus grande que les granulats naturels et a donc un impact majeur sur les propriétés des granulats recyclés. Il est nécessaire d'améliorer alors les propriétés de la pâte de ciment durcie ou de réussir à séparer la pâte de ciment des granulats naturels composant les granulats recyclés.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de la carbonatation accélérée sur les granulats recyclés de béton et également l'impact de leur utilisation dans de nouveaux mortiers.

Dans un premier temps, le travail s'est concentré sur l'effet de la carbonatation sur l'absorption d'eau des granulats recyclés en fonction de l'origine du béton et de la granulométrie. Cette partie du travail a montré que la carbonatation réduit l'absorption d'eau et que plus la teneur en pâte de ciment est élevée, plus la carbonatation est bénéfique. De plus, la réduction de l'absorption d'eau est plus importante pour les granulats fins (0/2) que pour les granulats grossiers (2/6.3). Ensuite, différents mortiers ont été fabriqués à base de sables recyclés (0/2) de différentes origines. Ce second axe du travail a permis de montrer que l'utilisation de sable recyclé carbonaté a un impact positif sur la résistance en compression et sur la porosité des mortiers par rapport à l'utilisation de sable recyclé non-carbonaté. Cependant, les propriétés de ces mortiers n'atteignent pas encore celles des mortiers classiques.

**Mots clés : granulats recyclés de béton , mortier, béton , carbonatation, recyclage**



# Abstract

The sector of construction does not cease growing, the demand for natural resources does not cease increasing and the quantity of construction and demolition waste takes the same way. In the current standards, the substitution of the natural aggregates by recycled concrete aggregates for the manufacturing of new concretes is limited because the properties of recycled concrete aggregates are worst than the properties of natural aggregates.

The recycled concrete aggregates consist of natural aggregates and hardened cement paste. This cement paste generally has a porosity larger than the natural aggregates and thus have a major impact on the properties of the recycled aggregates. It is necessary to improve the properties of the hardened cement paste or to succeed in splitting the cement paste from the natural aggregates composing the recycled aggregates.

The objective of this work is to study the impact of the accelerated carbonation on the recycled concrete aggregates and also the impact of their use in new mortars.

Initially, the work concentrated on the effect of the carbonation on the absorption of water of the recycled aggregates according to the origin of the concrete and its granulometry. This part of work showed that the carbonation reduces the absorption of water and that higher the content of cement paste is, more the carbonation is beneficial. Moreover, the reduction of the absorption of water is more important for the fine aggregates (0/2) than for the coarse aggregates (2/6.3). Then, various mortars were manufactured with recycled sand (0/2) which come from various origins. This second axis of the work shows that the use of carbonated recycled sand has a positive impact on resistance in compression and the porosity of the mortars compared with the use of not-carbonated recycled sand. However, the properties of these mortars do not reach yet those of the classical mortars.

**Key words : recycling concrete aggregates , mortar, concrete, carbonation, recycling**



# Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des figures	viii
Liste des tableaux	xi
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Objectifs et plan du travail . . . . .	2
<b>2 États de l’art</b>	<b>3</b>
2.1 Introduction . . . . .	3
2.2 Déchets de construction et de démolition . . . . .	3
2.2.1 Contexte . . . . .	3
2.2.2 Processus de recyclage . . . . .	6
2.2.3 Classification des granulats recyclés et utilisation . . . . .	7
2.3 Granulats recyclés de béton . . . . .	9
2.3.1 Définition et Composition . . . . .	9
2.3.2 Propriétés des granulats de béton recyclé . . . . .	10
2.4 Techniques d’amélioration de la qualité des granulats recyclés . . . . .	15
2.4.1 Méthodes mécaniques . . . . .	15
2.4.2 Méthode chimique . . . . .	16
2.4.3 Méthodes thermiques . . . . .	16
2.4.4 Autres méthodes . . . . .	17
2.4.5 Carbonatation forcée . . . . .	20
2.5 Impact des granulats recyclés sur les propriétés des bétons/mortiers . . . . .	23
2.5.1 Ouvrabilité . . . . .	23
2.5.2 Résistances mécaniques . . . . .	24
2.5.3 Module de Young . . . . .	26
2.5.4 Absorption capillaire . . . . .	26
<b>3 Recherches expérimentales</b>	<b>29</b>
3.1 Matériaux utilisés . . . . .	29
3.1.1 Ciment . . . . .	29
3.1.2 Sable normalisé . . . . .	29

3.1.3	Granulats recyclés . . . . .	29
3.1.4	Traitement des granulats recyclés . . . . .	30
3.2	Composition des mortiers . . . . .	31
3.3	Méthodologie expérimentale . . . . .	33
3.3.1	Absorption d'eau . . . . .	33
3.3.2	Procédure de fabrication des éprouvettes . . . . .	35
3.3.3	Étalement . . . . .	39
3.3.4	Résistance mécanique . . . . .	40
3.3.5	Module de Young dynamique . . . . .	43
3.3.6	Absorption capillaire . . . . .	45
3.3.7	Carbonatation . . . . .	46
3.4	Effet de la carbonatation sur les granulats recyclés . . . . .	48
3.4.1	Absorption d'eau . . . . .	48
3.5	Effet des sables recyclés sur les mortiers . . . . .	51
3.5.1	Ouvrabilité . . . . .	51
3.5.2	Résistance en compression . . . . .	55
3.5.3	Résistance en flexion . . . . .	59
3.5.4	Module de Young . . . . .	63
3.5.5	Absorption capillaire . . . . .	66
3.5.6	Carbonatation . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Annexe : Ciment CEM I 52.5 N</b>	<b>I</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>III</b>

# Table des figures

2.1	Déchets produits par les activités économiques et les ménages (2016) [41]	4
2.2	Économies linéaire et circulaire [10]	4
2.3	Composition habituelle des déchets de démolition [35]	5
2.4	Composition des déchets de construction et de démolition en fonction des pays [24]	5
2.5	Processus de recyclage d'une installation de dernière génération [36]	7
2.6	Granulats recyclés de béton [23]	8
2.7	Granulats recyclés de maçonnerie [23]	8
2.8	Granulats recyclés d'hydrocarbonés [23]	8
2.9	Granulats recyclés de débris mixtes [23]	9
2.10	Constitution d'un granulats recyclés de béton [59]	10
2.11	Pourcentage de pâte de ciment en fonction de la taille moyenne des granulats recyclés de béton	11
2.12	Courbes granulométriques des granulats de béton en fonction du type de concasseur [2]	12
2.13	Courbes granulométriques des granulats recyclés de béton de l'étude de Zhao <i>et al.</i> [55]	12
2.14	Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve en fonction de la teneur en pâte de ciment [12]	13
2.15	Absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire [55]	14
2.16	Absorption d'eau en fonction de la teneur en pâte de ciment [12]	15
2.17	Principe du traitement par vibrations ultra-sonores [30]	17
2.18	Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité [26]	18
2.19	Principe de l'électro-fragmentation [44]	20
2.20	Dissolution du CO <sub>2</sub> [45]	21
2.21	Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative à 20 °C [47]	22
2.22	Etude de Xuan <i>et al.</i> [51]	26
2.23	Évolution du module de Young en fonction du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés de béton [51]	27
3.1	Courbes granulométriques des granulats 0/2	31
3.2	Pycnomètre	33
3.3	Séchage des granulats sur du papier absorbant	34
3.4	Étuve	35
3.5	Granulats saturés à surface sèche (NBN EN 1097-6)[20]	36
3.6	Malaxeur	37
3.7	Moule et rehausse	39
3.8	Appareil à chocs	39

3.9	Table à secousses, moule conique et dame . . . . .	40
3.10	Presse hydraulique . . . . .	41
3.11	Essai de flexion 3 points . . . . .	42
3.12	Essai de compression . . . . .	43
3.13	Position de l'éprouvette pour l'essai NBN 15-230 [3] . . . . .	44
3.14	Essai de module dynamique . . . . .	45
3.15	Essai d'absorption capillaire . . . . .	46
3.16	Fendage des éprouvettes . . . . .	47
3.17	Essai de carbonatation . . . . .	47
3.18	Numérotation des faces pour l'essai de carbonatation . . . . .	48
3.19	Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de carbonatation selon NBN EN 1097-6 . . . . .	49
3.20	Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de carbonatation selon IFSTTAR n°78 . . . . .	49
3.21	Étalement des différents mortiers étudiés . . . . .	51
3.22	Étalement des mortiers à base des granulats de blocs en fonction du taux de substitution . . . . .	53
3.23	Étalement des mortiers à base des granulats de hourdis en fonction du taux de substitution . . . . .	54
3.24	Étalement des mortiers à base des granulats de laboratoire en fonction du taux de substitution . . . . .	55
3.25	Comparaison des résistances en compression . . . . .	55
3.26	Résistance en compression des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution . . . . .	56
3.27	Résistance en compression des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution . . . . .	57
3.28	Résistance en compression des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonction du taux de substitution . . . . .	58
3.29	Comparaison des résistance en flexion . . . . .	59
3.30	Résistance en flexion des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution . . . . .	60
3.31	Résistance en flexion des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution . . . . .	61
3.32	Résistance en flexion des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonction du taux de substitution . . . . .	62
3.33	Comparaison des modules de Young . . . . .	63
3.34	Module de Young des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution . . . . .	64
3.35	Module de Young des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution . . . . .	64
3.36	Module de Young des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonc- tion du taux de substitution . . . . .	65
3.37	Comparaison de l'absorption capillaire des mortiers . . . . .	66
3.38	Évolution de l'absorption capillaire des mortiers à base de granulats de bloc . . . . .	67
3.39	Évolution de l'absorption capillaire des mortiers à base de granulats de hourdis . . . . .	68
3.40	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier REF . . . . .	69
3.41	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR25 BL . . . . .	69

---

3.42	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC25 BL . . .	70
3.43	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR50 BL . . .	70
3.44	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC50 BL . . .	71
3.45	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR25 HO . . .	71
3.46	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC25 HO . . .	72
3.47	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR50 HO . . .	72
3.48	Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC50 HO . . .	73
3.49	Profondeur de carbonatation moyenne après 7 jours . . . . .	74
3.50	Profondeur de carbonatation moyenne après 14 jours . . . . .	74
3.51	Profondeur de carbonatation moyenne après 21 jours . . . . .	75
3.52	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier REF . . .	76
3.53	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SR25 BL	77
3.54	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SRC25 BL	77
3.55	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SR50 BL	78
3.56	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SRC50 BL	78
3.57	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SR25 HO	79
3.58	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SRC25 HO	79
3.59	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SR50 HO	80
3.60	Régression linéaire du coefficient de carbonatation $k_c$ du mortier SRC50 HO	80



# Liste des tableaux

2.1	Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs [14] . . . . .	6
2.2	Propriétés des granulats recyclés et des granulats naturels [25] . . . . .	14
2.3	Volume molaire de la portlandite et du carbonate de calcium [48] . . . . .	23
3.1	Composition originelle des bétons (pour 1 m <sup>3</sup> de béton) . . . . .	30
3.2	Composition des mortiers à base de sable de bloc . . . . .	32
3.3	Composition des mortiers à base de sable de hourdis . . . . .	32
3.4	Composition des mortiers à base de sable de béton du laboratoire . . . . .	32
3.5	Valeurs des absorptions d'eau utilisées pour calculer l'eau absorbée . . . . .	32
3.6	Récapitulatif des opérations pour la réalisation des mortiers . . . . .	38
3.7	Comparaison et résultats de l'absorption d'eau selon les méthodes NBN EN 1097-6 et IFSTTAR n°78 . . . . .	50
3.8	Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ] . . . . .	51
3.9	Étalement des différents mortiers [mm] . . . . .	52
3.10	Tableau récapitulatif des résistances en compression . . . . .	59
3.11	Profondeur de carbonatation des différents mortiers [mm] . . . . .	75
3.12	Coefficient de carbonatation $k_c$ issu de la régression linéaire . . . . .	75



# Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Introduction

Le monde de la construction est un monde auquel nous ne pouvons pas échapper. Les pays émergeant se développent et ne cessent de construire pour répondre à leur explosion démographique, leur besoin de se montrer à l'échelle mondiale et/ou leur soif de grandeur. Nous pouvons citer la Chine au niveau de l'augmentation de sa population qui a plus que doublé en l'espace d'une soixantaine d'années [4] et qui, dès lors, a besoin de nombreux nouveaux logements. Nous pouvons également citer la ville de Dubaï qui a vu un nombre colossal d'édifices de grandes hauteurs se construire ces dernières années afin de montrer la richesse du pays. Plus proche de chez nous, nous côtoyons de nombreux chantiers de constructions tous les jours lors de nos déplacements comme par exemple la rénovation de voies à grande vitesse ou alors la construction de nouveaux complexes en bord de ces voiries.

Le domaine de la construction est présent partout et comporte certains points noirs tels que l'importante quantité de déchets ainsi que la demande en ressources premières qui sont des ressources limitées.

Une solution à ces problèmes pourrait être de recycler les déchets de construction et de démolition, comme par exemple le béton en granulats, afin de réduire la quantité de granulats naturels utilisée.

L'objet de ce travail de fin d'étude est de percevoir l'effet de la carbonatation des granulats recyclés de béton et l'impact de l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonaté dans la fabrication de nouveau mortier. Si les résultats sont concluants, l'utilisation de granulats recyclés carbonatés serait une solution aux différents points négatifs relevés précédemment.

Ce travail de fin d'étude fait suite au travail de Véronique Parmentier.

## 1.2 Objectifs et plan du travail

Au vu des différents points négatifs cités précédemment, ce mémoire poursuit deux objectifs. Le premier objectif est d'étudier l'impact de la carbonatation sur l'absorption d'eau des granulats recyclés de béton. Le second est d'étudier l'impact de l'utilisation de déchet de béton sous forme de sable recyclé dans la fabrication de nouveaux mortiers ce qui permettra dans le futur, si les résultats de ce travail sont concluants, de diminuer l'utilisation de ressources premières ainsi que la quantité de déchets.

Ce travail est divisé en trois grandes parties :

- Un état de l'art sur le recyclage des déchets de construction et de démolition ainsi que sur différentes techniques d'amélioration des granulats recyclés et plus précisément la carbonatation ;
- Une étude sur la carbonatation de granulats et de sables recyclés de béton ainsi que sur les mortiers fabriqués à base de sable recyclé carbonaté de béton ;
- Une conclusion reprenant les résultats principaux et donnant des axes de travail pour des études futurs.

La partie concernant les recherches expérimentales contient un descriptif des différents tests effectués, les résultats et une discussion de ces derniers.

# Chapitre 2

## États de l'art

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente les granulats recyclés ainsi que certaines propriétés avec un aperçu de recherches précédentes. Ensuite, différentes techniques d'améliorations des granulats recyclés sont listées et exposées. Pour finir, certaines propriétés des bétons et mortiers sont expliquées et des résultats de précédentes recherches sur les mortiers à base de granulats de béton recyclé sont présentés.

### 2.2 Déchets de construction et de démolition

#### 2.2.1 Contexte

En 2016, l'Union Européenne a produit 2533 millions de tonnes de déchets au total. Ce chiffre est à la hausse continuellement depuis le début des relevés en 2004 [41]. Parmi ce volume de déchet, plus d'un tiers provient du secteur de la construction ce qui représente plus ou moins 845 millions de tonnes de déchet par an. En ramenant ce chiffre au nombre d'habitant dans l'Union Européenne en 2016 à savoir 510 millions de personnes [40], cela signifie que chaque habitant produirait environ 1.65 tonne de déchet de construction par an. Ce volume de déchet ne risque pas de diminuer au fil du temps puisque de nombreuses anciennes constructions arrivent au bout de leur cycle de vie.

Il y a deux sources de déchet dans ce domaine : les déchets provenant de surplus, de chutes de matériaux lors de la phase de construction et les déchets provenant de la démolition d'anciens ouvrages.

De plus, comme le montre la FIGURE 2.1, le domaine de la construction est loin devant les autres domaines au niveau de la quantité de déchet produit.

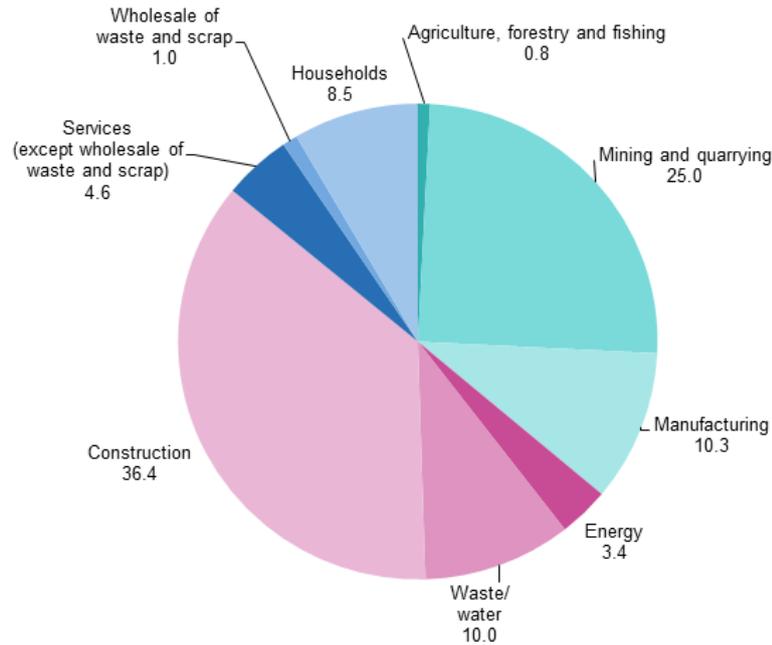
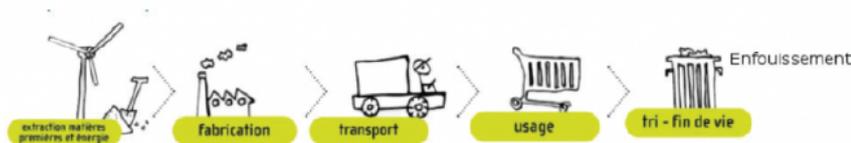


FIGURE 2.1 – Déchets produits par les activités économiques et les ménages (2016) [41]

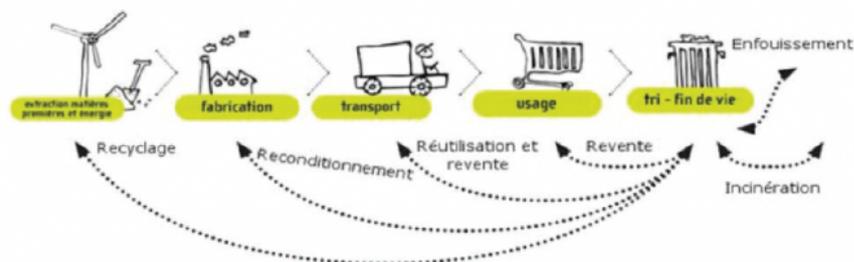
D'après la directive européenne 2008/98/EC, les pays membres doivent prendre des mesures afin que, d'ici 2020, 70 % des déchets de construction non-dangereux soient recyclés ou réutilisés [16].

Pour ce faire, il est nécessaire de changer l'économie du marché qui est pour l'instant linéaire, une économie dans laquelle un produit en fin de vie est un déchet, en une économie circulaire qui est une économie dans laquelle un déchet est réutilisé comme matière première dans la même filiale ou dans un autre domaine afin de donner une seconde vie aux déchets. La FIGURE 2.2 illustre ces deux principes.

### Économie linéaire



### Économie circulaire



Source : eco-conception.fr

FIGURE 2.2 – Économies linéaire et circulaire [10]

En plus de diminuer la quantité de déchet, l'économie circulaire permet également de limiter la consommation des ressources premières puisque les déchets sont réutilisés en tant que matière première. Dans le cadre de la construction, ce principe s'illustre par la transformation de certains déchets en remblais ou en granulats.

La FIGURE 2.3 montre la répartition usuelle des déchets de démolition en fonction de la nature des matériaux.

[15, 16]

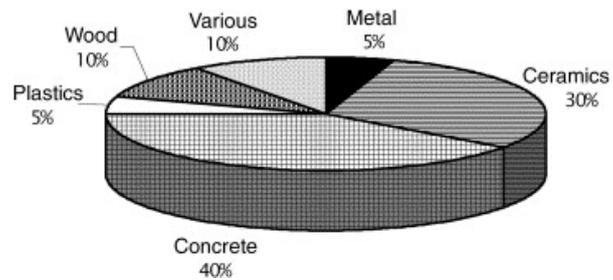


FIGURE 2.3 – Composition habituelle des déchets de démolition [35]

Cette composition est cependant très variable en fonction des pays comme le montre la FIGURE 2.4.

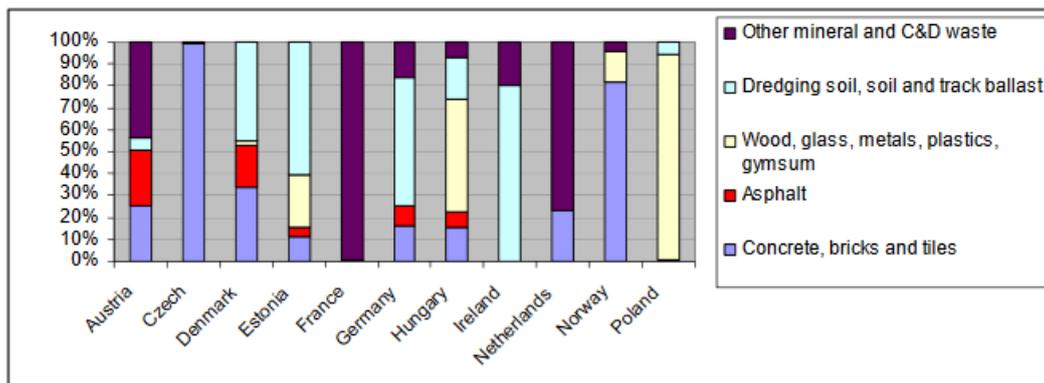


FIGURE 2.4 – Composition des déchets de construction et de démolition en fonction des pays [24]

Dès lors, pour atteindre un taux de recyclage de 70% des déchets de construction et de démolition dans l'Union Européenne, de nombreux pays ont anticipé et recyclent déjà une partie de leurs déchets de construction et de démolition. En 2009, le taux de recyclage était de l'ordre de 50% pour la moitié des pays membres de l'Union Européenne [24]. Cependant, le recyclage lié au dragage, au sol et aux ballasts représentent la majorité des efforts actuels. Les autres déchets ne sont toujours que trop peu traités et offrent une solution potentielle pour atteindre l'objectif fixé par la directive européenne.

Les déchets sont, en général, classés en trois catégories : déchets dangereux, déchets non-dangereux et déchets inertes [50]. Les déchets dangereux sont ceux qui sont nocifs pour l'environnement ou pour l'homme en raison de leur composition et/ou de leurs caractéristiques. Dans cette catégorie, se trouvent l'amiante, les peintures ou les solvants par exemple. Les déchets inertes sont des déchets ne se modifiant ou ne se décomposant

pas dans le temps, ne réagissant pas avec l'environnement et ne représentant aucun risque pour l'être humain. Dans cette catégorie, se trouvent le béton, les briques ou le carrelage par exemple. La dernière catégorie des déchets non-dangereux est formée des déchets ne rentrant pas dans les deux premières catégories comme par exemple le plastique, le bois ou encore le métal.

## 2.2.2 Processus de recyclage

Les informations concernant cette section se basent sur le document écrit par Delvoie S. dans le cadre de la conférence SeRaMCO de 2018 [14] et sont spécifiques aux déchets inertes.

La production de granulats à base de déchet de construction et de démolition est généralement réalisée sur des installations qui sont soit mobiles soit stationnaires [31]. Il faut noter que les installations mobiles sont moins performantes puisque la masse de l'installation est limitée afin de la rendre transportable comparée à une installation fixe.

Il y a deux étapes principales dans le processus de recyclage des déchets de construction et de démolition dans le but d'obtenir des granulats : le broyage et le criblage. Le broyage consiste à réduire la taille des déchets. Le but de cette étape est de réduire les déchets en granulats avec une taille moyenne voulue. Pour ce faire, trois types de broyeurs sont couramment utilisés : les broyeurs à percussion, à mâchoires et à cône. Les avantages et les inconvénients des trois types de concasseur sont repris dans la TABLE 2.1 ci-dessous.

Type de concasseur	Avantages	Inconvénients
Percussion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grand facteur de réduction (relation entre la taille des particules entrantes et sortantes)</li> <li>• Produit des granulats avec une bonne géométrie et une bonne résistance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produit plus de particules fines</li> <li>• Produit un intervalle de tailles de particules plus étendu</li> </ul>
Mâchoires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permet de traiter de grands morceaux de béton armé</li> <li>• Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance</li> </ul>
Cône	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produit moins de particules fines</li> <li>• Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite</li> <li>• Bon compromis entre le facteur de réduction et la production de particules fines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance</li> </ul>

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs [14]

L'étape de criblage permet d'enlever les matériaux indésirables des granulats obtenus par le concassage comme par exemple le plastique, le bois ou encore le métal. Dans un installation de recyclage, les déchets de construction et de démolition sont tout d'abord triés en fonction de leur composition, de leur origine et de leur taille. Ensuite, ces déchets sont tamisés afin d'enlever les particules fines c'est-à-dire d'un diamètre inférieur à 40 mm

déjà présentes. Après ces deux premières étapes, les déchets sont broyés et nettoyés des résidus ferreux au moyen d'aimant et, à la main pour les autres matériaux non-voulus. Pour ce faire, les granulats passent sur un convoyeur à basse vitesse pour permettre le tri manuel. Dans les installations de dernière génération, les composants légers et les fines sont séparés des granulats plus lourds au moyen d'un flux d'air ou au moyen d'un système de sédimentation. Dans de plus rare cas, les éléments non-ferreux sont séparés du reste des granulats au moyen d'un courant de Foucault.

La FIGURE 2.5 montre l'organigramme du processus de recyclage d'une installation de dernière génération.

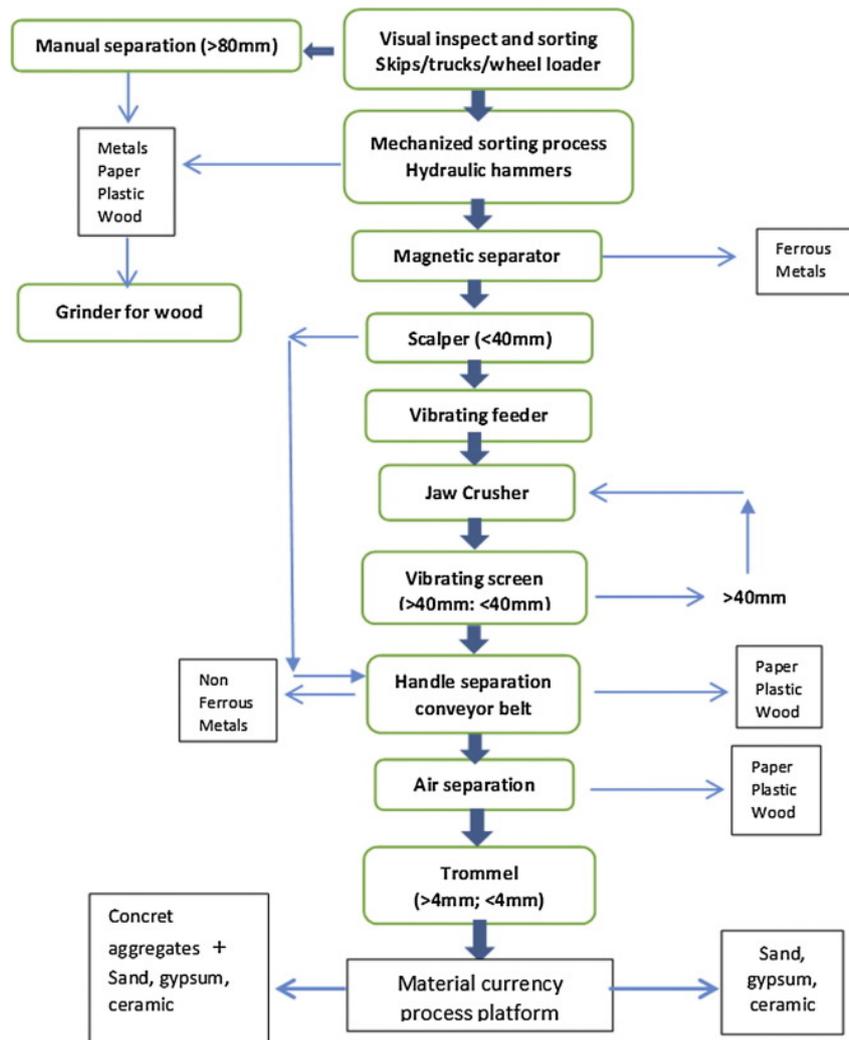


FIGURE 2.5 – Processus de recyclage d'une installation de dernière génération [36]

### 2.2.3 Classification des granulats recyclés et utilisation

Les granulats recyclés sont généralement divisés en 4 catégories [23, 27] :

- Granulats de débris de béton qui proviennent de la démolition d'infrastructure du génie civil et de bâtiments en béton et en béton armé



FIGURE 2.6 – Granulats recyclés de béton [23]

- Granulats de débris de maçonnerie qui proviennent de la démolition de bâtiments en brique ;



FIGURE 2.7 – Granulats recyclés de maçonnerie [23]

- Granulats d'hydrocarbonés qui proviennent de la démolition des voiries en béton bitumineux et ;

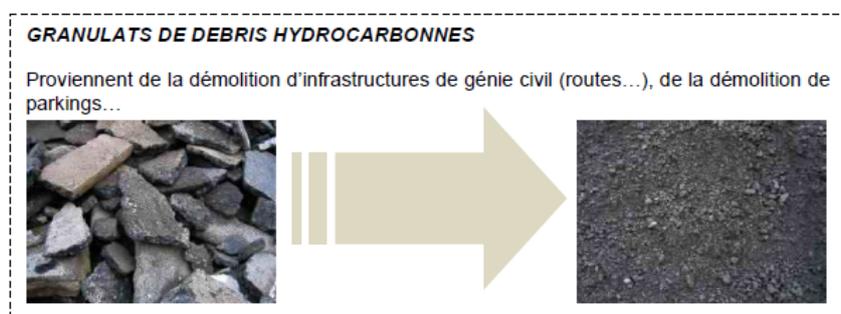


FIGURE 2.8 – Granulats recyclés d'hydrocarbonés [23]

- Granulats de débris mixtes qui proviennent de déchets de construction et de démolition non-triés.

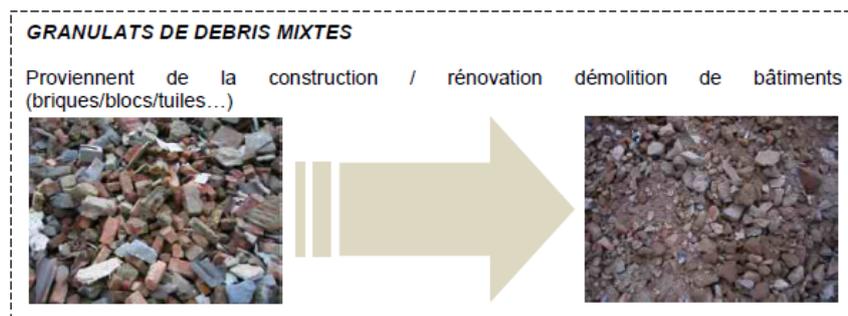


FIGURE 2.9 – Granulats recyclés de déchets mixtes [23]

La suite de ce travail se focalise sur les granulats recyclés de béton.

La norme européenne EN 12620 :2013 régit les caractéristiques minimales que doivent atteindre les granulats et les sables utilisés dans la fabrication de béton [15]. Les valeurs seuils des caractéristiques sont fixées en fonction de l'origine des granulats et des sables, et sont établies dans chaque pays membre.

La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés est limitée à 50% pour la fabrication des bétons pour lesquels les armatures n'ont aucun risque d'attaque ni de corrosion c'est-à-dire un béton de classe X0 [22]. Pour les autres classes de béton, le taux de substitution est inférieur. Concernant les éléments de béton préfabriqué, la norme EN 13369 :2018 fixe la quantité de granulats recyclés pouvant remplacer des granulats naturels [15]. Le taux de substitution maximal est fixé également à 50% lorsque l'origine des granulats n'est pas connue. Par contre, le taux de substitution maximal peut atteindre 100% si les granulats proviennent de l'entreprise de préfabrication sous réserve de la vérification des caractéristiques des granulats.

## 2.3 Granulats recyclés de béton

### 2.3.1 Définition et Composition

Les granulats recyclés de béton sont généralement divisés en deux parties en fonction de leur dimension. Les granulats plus grands que 5 mm sont dits grossiers et les granulats plus petit que 5 mm sont dits fins.

Les granulats recyclés de béton sont composés de deux matériaux :

- Granulats naturels et ;
- Pâte de ciment.

La FIGURE 2.10 montre les deux constituants d'un granulats recyclés de béton. Les granulats naturels sont numérotés "1" et la pâte de ciment "2". En général, les granulats naturels ont une plus faible porosité que la pâte de ciment. Dès lors, les caractéristiques des granulats recyclés de béton sont plus influencées par les caractéristiques de la pâte de ciment les constituant que par celles des granulats naturels. Ceci signifie que la qualité des granulats recyclés de béton dépend de la qualité et de la quantité de pâte de ciment les

constituant. Leur qualité est aussi moins bonne que celle des granulats naturels puisque la pâte de ciment est considérée comme une pierre de mauvaise qualité.



FIGURE 2.10 – Constitution d'un granulat recyclé de béton [59]

Selon les recherches de Zhao [12, 55, 59], la proportion de pâte de ciment dans un granulat recyclé de béton augmente lorsque la taille du granulat diminue. Pour déterminer la teneur en pâte de ciment, Zhao a développé une méthode basée sur la dissolution de la pâte de ciment entourant les granulats naturels par une solution d'acide salicylique qui permet de dissoudre uniquement la pâte de ciment sans attaquer les granulats naturels.

De plus la qualité d'un granulat recyclé de béton dépend de la qualité du béton d'origine ainsi que des contaminants. Plus la qualité de la pâte du béton est bonne, moins la pâte de ciment entourant les granulats est poreuse et a de meilleurs comportements mécaniques. La qualité du béton d'origine dépend du rapport  $E/C^a$  et également du type de ciment utilisé. En présence de contaminants, c'est-à-dire de matériaux d'autre nature comme, par exemple, le plâtre ou le verre mais également des chlorures ou des sulfates dans les déchets de béton, les propriétés des granulats recyclés de béton diminuent [59].

### 2.3.2 Propriétés des granulats de béton recyclé

Cette section présente les principales caractéristiques des granulats recyclés de béton testées lors de cette étude et donne des résultats de précédentes études.

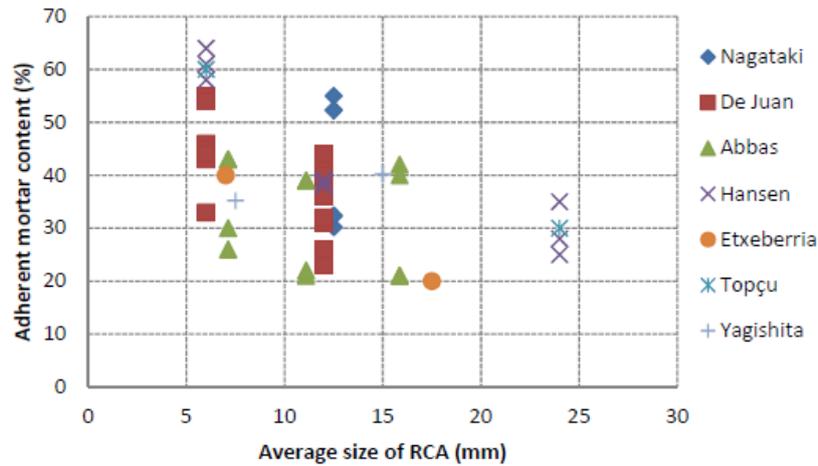
#### 2.3.2.1 Granulométrie

La granulométrie est une propriété indiquant les dimensions des granulats se trouvant dans un calibre donné.

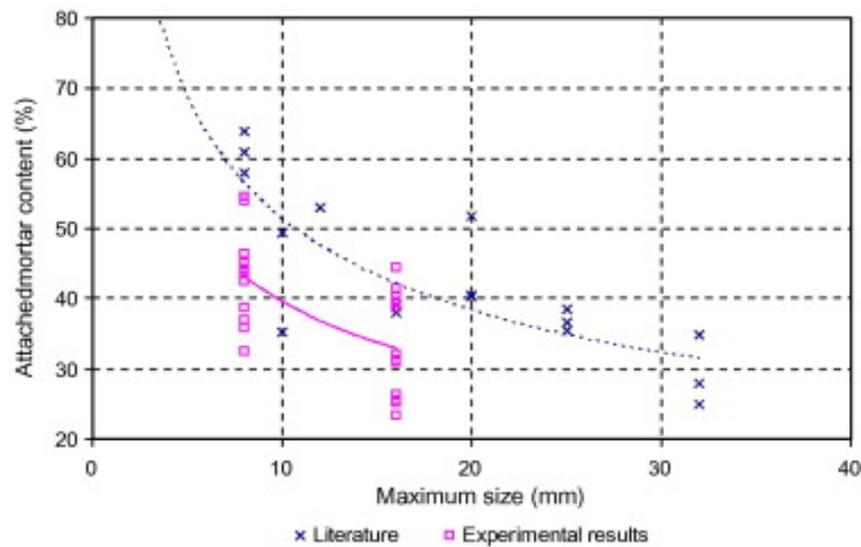
L'étude APERROUT [2] montre que la granulométrie dépend du moyen de concassage. Lorsque le broyage des déchets de construction et de démolition est effectué au

---

a.  $E/C$  : rapport massique entre l'eau et le ciment



(a) Étude de Zhao [59]



(b) Étude de De Juan [12]

FIGURE 2.11 – Pourcentage de pâte de ciment en fonction de la taille moyenne des granulats recyclés de béton

moyen d'un concasseur à mâchoires, la proportion de granulats grossiers est plus importante qu'en utilisant un concasseur à percussion qui offre une granulométrie plus linéaire pour un calibre donné. De plus, la diminution de la puissance du concasseur à percussion permet de réduire la fraction fine.

Zhao *et al.* [55] ont montré que la quantité de granulats ayant une dimension inférieure à 1 mm est plus grande pour les granulats recyclés issus de hourdis que ceux provenant de bloc. L'allure des courbes granulométriques de ces granulats recyclés est similaire à celles obtenues dans l'étude APERROUT [2] utilisant également un concasseur à mâchoires.

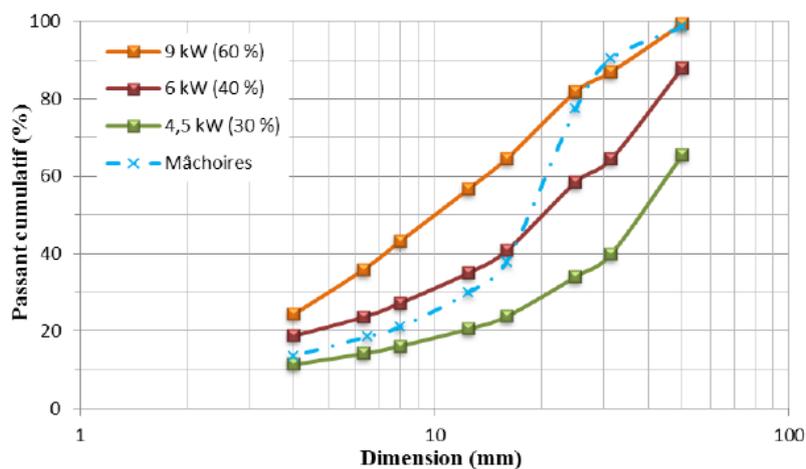


FIGURE 2.12 – Courbes granulométriques des granulats de béton en fonction du type de concasseur [2]

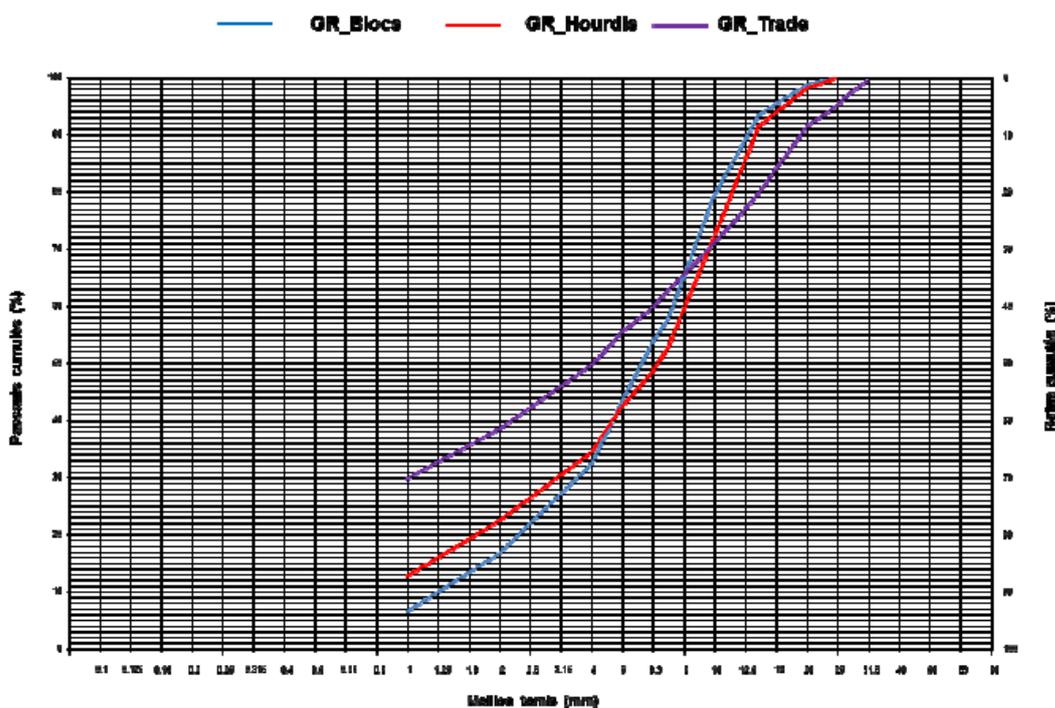


FIGURE 2.13 – Courbes granulométriques des granulats recyclés de béton de l'étude de Zhao *et al.* [55]

### 2.3.2.2 Masse volumique

La masse volumique des granulats est le rapport de la masse sur le volume des granulats. Cette propriété peut être représentée sous différentes formes : la masse volumique absolue, la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve et la masse volumique réelle saturée à surface sèche.

La masse volumique absolue est le rapport entre la masse des granulats sur le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains et sans prendre en compte

le volume des pores ouverts des granulats [20].

La masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve est le rapport entre la masse des granulats après séchage à l'étuve et le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains [20].

La masse volumique réelle saturée à surface sèche est le rapport entre la masse des granulats et la masse de l'eau présente dans les pores ouverts et le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains [20].

Les granulats recyclés de béton ont généralement une masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve plus faible que les granulats naturels puisque la pâte de ciment est plus poreuse que les granulats naturels [1, 32].

De Juan *et al.* [12] ont obtenu la même conclusion à savoir que la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve diminue lorsque la teneur en pâte de ciment augmente.

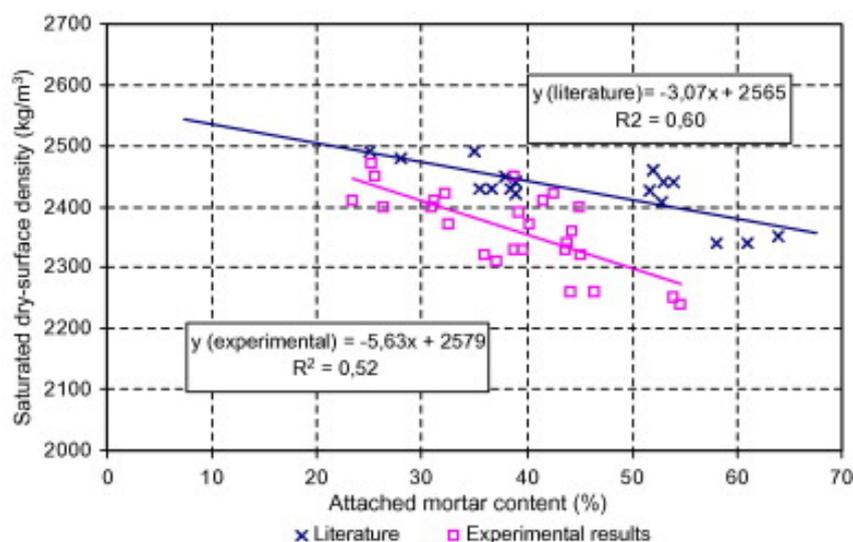


FIGURE 2.14 – Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve en fonction de la teneur en pâte de ciment [12]

### 2.3.2.3 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est la quantité d'eau qu'absorbe les granulats recyclés due à la pénétration de l'eau dans les pores ouverts. Cette absorption pour les granulats recyclés de béton dépend de l'absorption d'eau de la pâte de ciment et des granulats naturels ainsi que de la proportion entre ces deux constituants [55].

Zhao *et al.* [55] ont montré que l'absorption d'eau est plus élevée lorsque le calibre des granulats recyclés de béton est petit.

Également selon Zhao [59], l'absorption d'eau des granulats recyclés est supérieure à celle des granulats naturels ce qui s'explique par la porosité de la pâte de ciment.

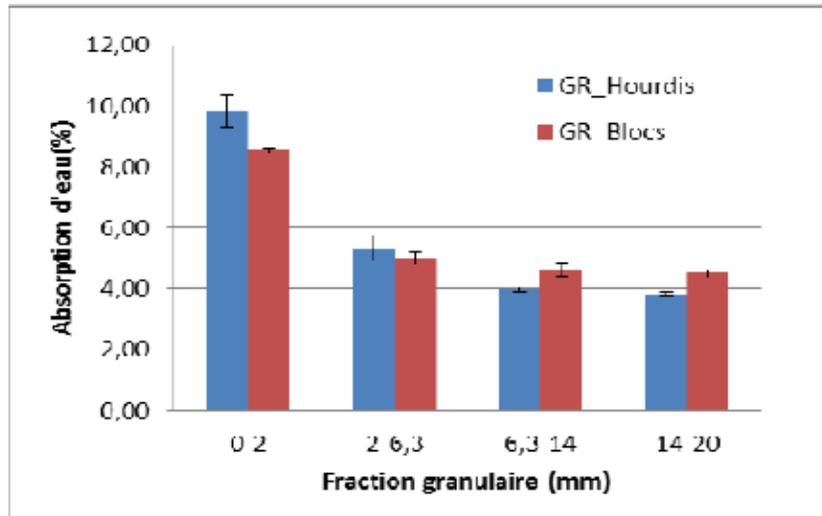


FIGURE 2.15 – Absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire [55]

Gómez-Soberón [25] et Deodonné [17] ont montré également que l'absorption d'eau des granulats naturels est inférieure à celle des granulats recyclés de béton et aussi que plus la fraction granulaire est petite, plus l'absorption d'eau est grande. Wagih *et al.* [49] et Agrela *et al.* [1] sont arrivés aux mêmes conclusions.

Property	RCA			NA		
	10 - 20	5 - 10	0 - 5	10 - 20	5 - 10	0 - 5
Dry specific gravity [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2280	2260	2170	2570	2640	2570
Specific gravity (surface dry) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2410	2420	2350	2590	2670	2600
Water absorption [%]	5.828	6.806	8.160	0.876	1.134	1.490

TABLE 2.2 – Propriétés des granulats recyclés et des granulats naturels [25]

De Juan *et al.* [12] ont montré que l'absorption d'eau des granulats recyclés de béton augmente lorsque la teneur en pâte de ciment augmente.

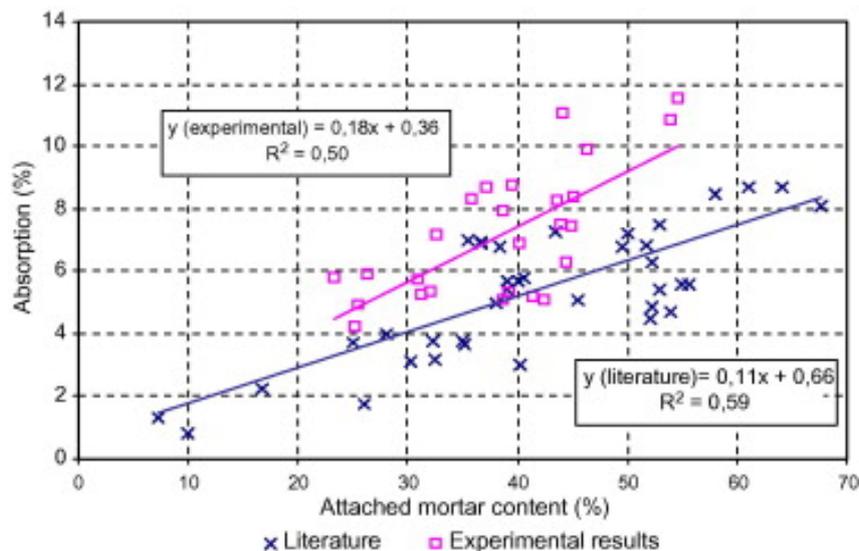


FIGURE 2.16 – Absorption d’eau en fonction de la teneur en pâte de ciment [12]

## 2.4 Techniques d’amélioration de la qualité des granulats recyclés

En synthèse des travaux examinés à la section précédente, il est observé que la pâte de ciment est le point faible dans les granulats recyclés de béton. Pour améliorer les granulats recyclés de béton, il faut dès lors, réduire la quantité de pâte de ciment ou améliorer ses propriétés. Cette partie explique différentes solutions pour améliorer la qualité des granulats recyclés.

Différentes méthodes de séparation entre les granulats naturels et la pâte de ciment existent et se basent sur des principes soit mécanique, soit chimique, soit physique. Ces méthodes se fondent sur la différence de propriétés entre les granulats naturels et la pâte de ciment ou sur la zone de transition interfaciale qui présente une grande porosité [8]. Pour commencer, les méthodes de séparation entre les deux constituants des granulats recyclés de béton sont expliquées et, ensuite, une méthode améliorant les caractéristiques de la pâte de ciment.

### 2.4.1 Méthodes mécaniques

#### 2.4.1.1 Séparation par chocs

La méthode de séparation par chocs se base sur l’essai Los Angeles qui consiste à étudier la résistance des granulats en les fragmentant dans un cylindre contenant des boulets en acier. L’efficacité de cette méthode dépend de la quantité de granulats à traiter, du nombre de boulets utilisés, de la vitesse de rotation du cylindre et de la durée du traitement. Pour avoir une séparation efficace, il suffit d’augmenter le temps de traitement mais cette méthode est fortement ”énergivore” [1].

### 2.4.1.2 Séparation par abrasion

La méthode de séparation par abrasion se base sur l'essai micro-Deval qui consiste à mesurer l'abrasion des granulats en mettant le matériau dans un récipient rempli d'eau et de billes d'acier. Le récipient est, ensuite, mis en rotation pour abraser le matériau testé. Cette méthode dépend également de la durée de traitement mais est moins efficace que la séparation par chocs. Malgré cela, la séparation par abrasion a pour avantage de garder les granulats naturels non-fragmentés [8].

### 2.4.2 Méthode chimique

La méthode chimique se base sur la différence de résistance à l'acide des granulats naturels et de la pâte de ciment. Le traitement consiste à plonger les granulats recyclés de béton dans une solution acide afin de dissoudre au moyen d'une réaction acide-base la pâte de ciment et de rincer les granulats obtenus après traitement pour enlever toute trace d'acide. Néanmoins, il est nécessaire de faire attention à la nature de l'acide utilisé et à la nature des granulats naturels car ces derniers, pouvant être calcaires, risquent également d'être détériorés si l'acide utilisé est puissant. Il est conseillé d'utiliser de l'acide salicylique lorsque les granulats naturels sont calcaires [59].

### 2.4.3 Méthodes thermiques

#### 2.4.3.1 Haute température

La méthode de traitement à haute température consiste à chauffer les granulats afin que trois phénomènes permettent la séparation entre la pâte de ciment et les granulats naturels [8]. Les trois phénomènes sont les suivants :

**Ecaillage par gradient thermique** La température de la surface des granulats recyclés de béton est à haute température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus basse ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

**Ecaillage par pression interne** L'eau présente dans les pores des granulats recyclés passe sous forme gazeuse grâce à l'augmentation de température. Une partie de cette vapeur d'eau ne pouvant s'échapper, montent en pression et induisent des pressions internes qui fissurent la pâte de ciment.

**Perte des propriétés mécaniques de la pâte de ciment** La pâte de ciment perd ses propriétés mécaniques à haute température et se détériore ce qui libère les granulats naturels.

#### 2.4.3.2 Basse température

La méthode de traitement à basse température repose sur les actions liées au cycle gel-dégel. Les granulats recyclés de béton sont d'abord saturés puis sont exposés à plusieurs cycles gel-dégel [8]. Les cycles gel-dégel vont mettre à contribution deux phénomènes qui sont :

**Ecaillage par gradient la thermique** La température de la surface des granulats recyclés de béton est à basse température alors que le noyau de ces derniers est à une

température plus élevée ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

**Augmentation de volume de l'eau** L'eau en présence dans les pores passe de la phase liquide à la phase solide. L'eau est le seul élément qui, en passant de sa forme liquide à sa forme solide, augmente son volume. Le volume des pores étant fixé, l'augmentation de volume de l'eau engendre des contraintes internes qui provoquent l'éclatement de la pâte de ciment.

## 2.4.4 Autres méthodes

### 2.4.4.1 Traitement par vibrations ultra-sonores

Le traitement par vibrations ultra-sonores se base sur la propagation des ondes sonores à haute fréquence et aux interférences se créant à l'interface de deux matériaux de natures différentes [8]. Au niveau de la zone de transition interfaciale c'est-à-dire la zone de transition entre le granulats naturels et la pâte de ciment, une partie des ondes est réfléchiée et des interférences se créent. Ces interférences créent des pressions et, dès lors, des contraintes qui fissurent la pâte de ciment au niveau de la zone de transition ce qui permet d'enlever la pâte de ciment. La FIGURE 2.17 illustre le principe de ce traitement.

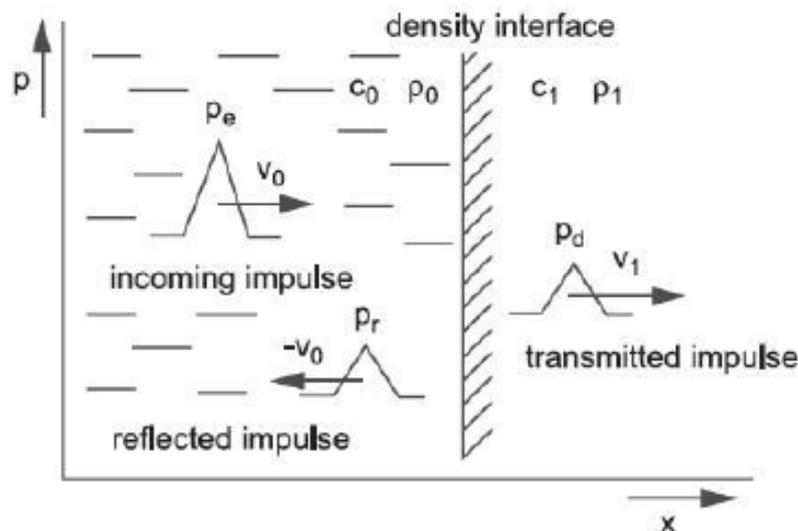


FIGURE 2.17 – Principe du traitement par vibrations ultra-sonores [30]

Pour optimiser cette méthode, il est conseillé d'avoir une répartition régulière des ondes autour des granulats recyclés ce qui permet d'améliorer l'efficacité du traitement et à réduire la dégradation des granulats naturels d'origine. Cette technique donne de meilleurs résultats que les méthodes de concassage au moyen de broyeur mais dépend fortement de la taille des granulats traités. Par contre, cette méthode consomme une quantité très importante d'énergie [30].

### 2.4.4.2 Traitement par micro-ondes

Le traitement par micro-ondes est plus à considérer comme un pré-traitement qu'un traitement en lui-même car il est à réaliser avant le concassage traditionnel. Le principe

de cette méthode se base sur la différence de sensibilité aux micro-ondes de la pâte de ciment et des granulats naturels constituant les granulats recyclés de béton. Il y a alors des gradients de température qui se créent dans les granulats recyclés qui vont engendrer des contraintes et créer des micro-fissures dans la pâte de ciment. De plus, si de l'eau est présente dans les pores des granulats recyclés de béton, cette eau va chauffer et passer de sa phase liquide à sa phase gazeuse qui créera des contraintes supplémentaires puisque la vapeur d'eau a une masse volumique plus grande que l'eau liquide. L'avantage de ce traitement est qu'il dégrade moins les granulats naturels comparé au traitement à haute température classique puisque la durée du traitement est plus courte et la température est moins élevée. Il faut noter que ce traitement est plus efficace en présence de granulats grossiers que de granulats recyclés fins [8, 9].

#### 2.4.4.3 Traitement par jet hydraulique

Le traitement par jet hydraulique se base sur la technique de l'hydrodémolition qui consiste à l'utilisation d'un jet d'eau sous pression dans le but de détacher le béton des armatures d'acier du béton armé. La pression du jet d'eau varie normalement entre 200 et 3000 bars [8]. Cette méthode repose sur deux principes :

**Impact** Le jet d'eau sous haute pression entre en contact avec les matériaux ce qui libère une grande quantité d'énergie sur une petite zone. Cette énergie provoque de grandes contraintes sur les matériaux qui se désagrègent.

**Pression dans les pores** Lorsque le matériau traité est poreux, l'eau sous pression s'engouffre dans les pores et crée des contraintes au sein de ce dernier. Ces contraintes vont entraîner la destruction du matériau.

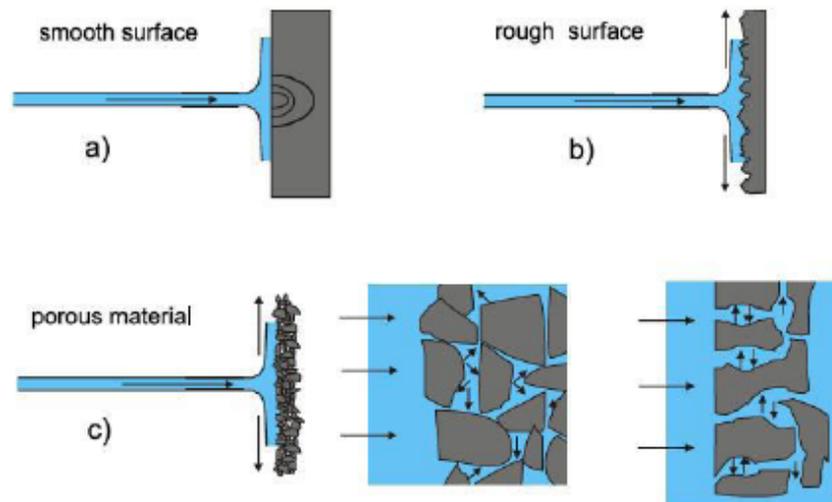


FIGURE 2.18 – Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité [26]

Ce traitement dépend de la pression utilisée ainsi que la distance entre le matériau traité et la buse. Il est nécessaire de bien régler ces paramètres afin de ne pas endommager les granulats naturels si l'énergie à dissiper est trop grande.

#### 2.4.4.4 Électro-fragmentation

L'électro-fragmentation consiste à faire passer un courant électrique dans un matériau multi-phasique. Le courant électrique, en passant à travers le matériau, polarise les différents constituants. La polarisation dépend de la nature des constituants. Un déséquilibre entre les charges positives et négatives se crée à l'interface entre les granulats naturels et la pâte de ciment et provoque la création locale de plasma. Cette création de plasma est accompagnée d'une dilatation thermique qui provoquent une onde de choc radial et libèrent les granulats naturels de la pâte de ciment [44].

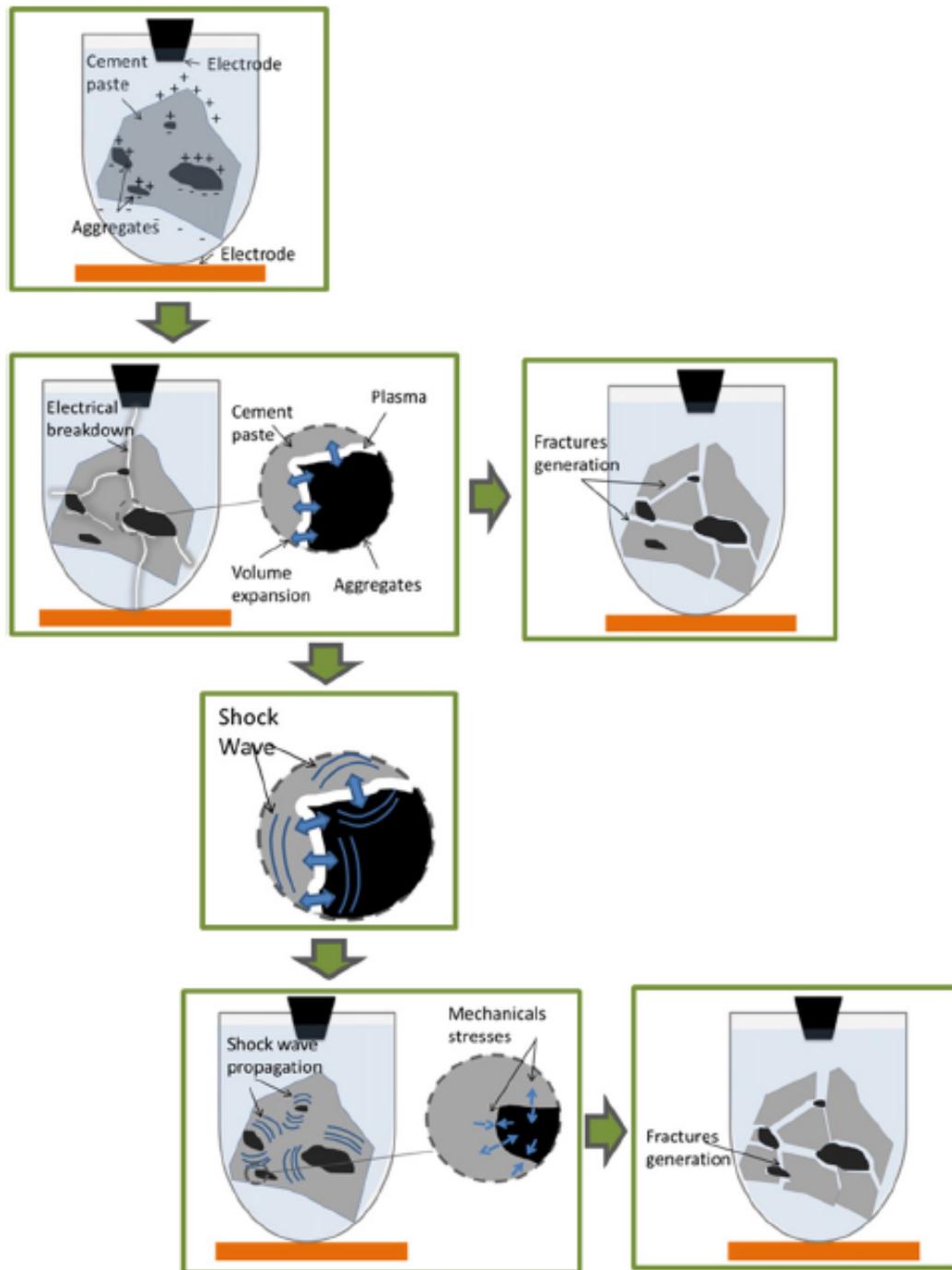


FIGURE 2.19 – Principe de l'électro-fragmentation [44]

### 2.4.5 Carbonatation forcée

La carbonatation forcée est une technique qui permet d'améliorer les propriétés de la pâte de ciment constituant les granulats recyclés de béton. Elle se base sur une réaction naturelle se produisant entre la matrice cimentaire du béton et le  $\text{CO}_2$  présent dans l'air. La concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère varie généralement entre 0.03% et 1%. La limite basse est d'application dans les milieux ruraux et la limite haute peut être atteinte dans des villes fortement polluées. L'augmentation des rejets en  $\text{CO}_2$  ne fait qu'augmen-

ter les valeurs de concentration vers la hausse [48].

Les différentes étapes de la réaction chimique entre le  $\text{CO}_2$  et la pâte de ciment du béton sont expliquées ci-dessous [11, 38, 45, 48, 51].

1. Le  $\text{CO}_2$  présent dans l'air va se dissoudre dans l'eau présente dans le béton pour former de l'acide carbonique .

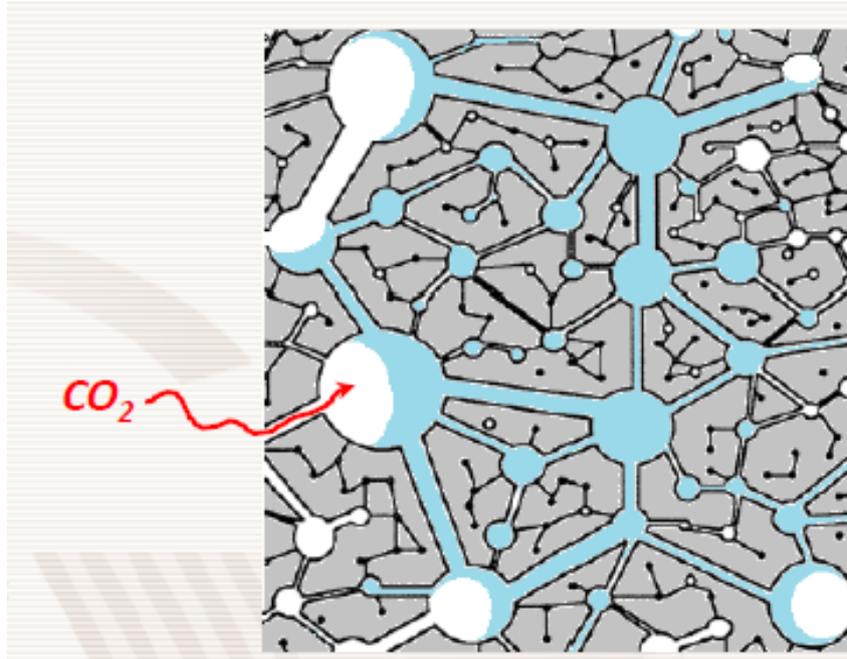
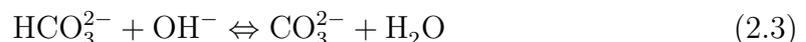


FIGURE 2.20 – Dissolution du  $\text{CO}_2$  [45]

L'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$  est instable dans un milieu alcalin comme le béton dont le pH est de l'ordre de 13 et se dissocie sous deux formes.



La dissolution du  $\text{CO}_2$  a pour conséquence de diminuer le pH du béton.

2. A cause de la diminution du pH, la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se dissout afin de rétablir l'équilibre acide-base.



Les cations  $\text{Ca}^{2+}$  réagissent ensuite avec les anions  $\text{CO}_3^{2-}$  pour former du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .



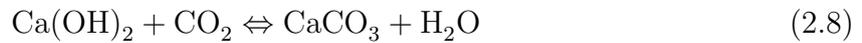
3. En plus de la réaction de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , le  $\text{CO}_2$  réagit avec les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et les aluminates de calcium hydratés (C-A-H) selon les réactions suivantes.





Ces derniers phénomènes chimiques ont, par contre, une cinétique plus lente que la réaction avec la portlandite.

De manière simplifiée, la réaction de carbonatation peut s'écrire



Ce phénomène dépend fortement de l'humidité relative puisque, si il n'y a pas d'eau, la réaction 2.1 ne peut pas avoir lieu et, si il y a trop d'eau, les pores du béton sont saturés et le  $\text{CO}_2$  ne peut pas y accéder [38, 45, 52]. Comme le montre la FIGURE 2.21, le phénomène de carbonatation est optimal pour une humidité relative entre 50 et 70% à 20 °C.

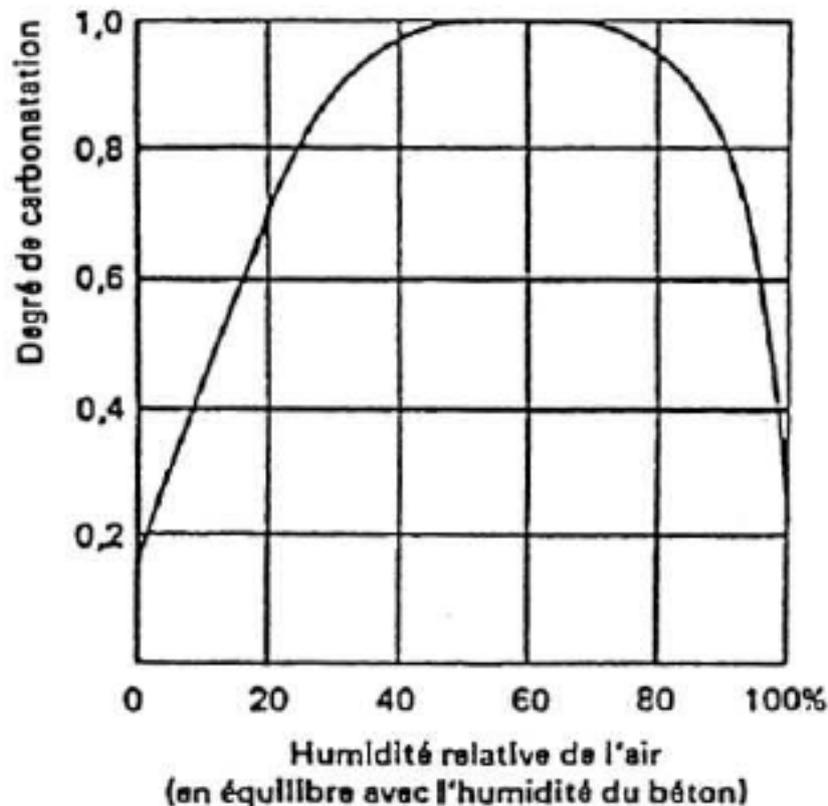


FIGURE 2.21 – Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative à 20 °C [47]

La vitesse de ce phénomène dépend donc de l'humidité relative du béton et le modèle simplifié suivant peut d'écrire cette vitesse [11, 38, 48] :

$$x_c = x_{c,0} + k_c \cdot \sqrt{t} \quad (2.9)$$

où

$x_c$  la profondeur de carbonatation [mm] ;

$x_{c,0}$  la profondeur de carbonatation au temps initial [mm] ;

$k_c$  le coefficient de carbonatation dépendant des caractéristiques du béton et des conditions environnementales  $[\text{mm}/\sqrt{\text{jour}}]$  et ;

$t$  le temps [jour].

La carbonatation a pour conséquence sur le béton de diminuer son pH de 13 à  $\pm 8$  à cause de la diminution de portlandite et de diminuer la porosité. La première conséquence a un effet néfaste sur les bétons armés et précontraints car la diminution du pH détruit la couche protectrice d'oxyde de fer créée autour des armatures d'acier lorsque le pH était élevé et empêchait ceux-ci de se corroder en présence d'oxygène et d'eau. Par contre, la seconde conséquence a un effet bénéfique pour le béton puisqu'elle diminue la porosité de ce dernier. En effet, les produits de la réaction de carbonatation ont un plus grand volume molaire que les réactifs ce qui entraîne une réduction des pores dans le béton. La TABLE 2.3 donne le volume molaire de la portlandite et du carbonate de calcium. Cette diminution de porosité entraîne une augmentation de la résistance mécanique.

Cristaux	Volume molaire $[\text{cm}^3/\text{mol}]$
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ Portlandite	33
$\text{CaCO}_3$ Calcite	35
$\text{CaCO}_3$ Vatérite	38
$\text{CaCO}_3$ Aragonite	34

TABLE 2.3 – Volume molaire de la portlandite et du carbonate de calcium [48]

Dans le cadre des granulats recyclés de béton, seule la seconde conséquence a un impact puisque les armatures sont séparées du béton pour le processus de recyclage. Dès lors, la carbonatation a un impact uniquement positif sur les granulats recyclés de béton puisqu'elle permet de diminuer la porosité de la pâte de ciment et d'améliorer ses propriétés mécaniques. Afin d'accélérer le processus de carbonatation, il faut contrôler l'humidité relative des granulats traités et augmenter le temps de traitement et la concentration en  $\text{CO}_2$ .

## 2.5 Impact des granulats recyclés sur les propriétés des bétons/mortiers

Cette section aborde l'impact sur les propriétés des bétons et mortiers fabriqués à base de granulats recyclés de béton carbonatés ou non.

### 2.5.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est la propriété des bétons et mortiers à l'état frais qui caractérise la fluidité du mélange. Cette caractéristique est intéressante à connaître pour la mise en œuvre.

Zhao [57, 59] a montré que le taux d'humidité des granulats recyclés au moment de la fabrication des mortiers a un impact sur l'ouvrabilité. Les résultats au test d'étalement des mortiers préparés avec des granulats secs montrent toujours un plus grand étalement

que ceux préparés avec des granulats saturés pour un même rapport E/C. Il a émis l'hypothèse que l'absorption des granulats secs dans le mortier est plus faible et/ou ce fait de manière plus lente que l'absorption d'eau déterminée à l'aide des procédures standards. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une partie des pores des granulats secs soit bouchée par des particules de ciment mais également par le fait que les grains de ciment augmentent la viscosité de l'eau et empêche l'absorption de l'eau par les granulats.

Wagih *et al.* [49] ont montré que l'ouvrabilité des bétons à base granulats recyclés de béton est inférieure que l'ouvrabilité des bétons ordinaires si on ne prend pas en compte l'absorption d'eau des granulats recyclés de béton qui est nettement supérieure que celle des granulats naturels utilisés généralement dans la fabrication des bétons et mortiers.

Batayneh *et al.* [5] ont expliqué que la diminution d'ouvrabilité des bétons à base de granulats recyclés par rapport au béton classique est liée à la forme plus anguleuse des granulats recyclés de béton et de leur absorption d'eau qui est plus grande que celle des granulats naturels.

Zhang *et al.* [53] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton diminue l'ouvrabilité des mortiers mais dans une mesure moins grande pour les granulats carbonatés puisque la carbonatation diminue l'absorption d'eau de la pâte de ciment composant les granulats recyclés de béton.

Lors de son étude, Deodonne [17] est arrivé à la même conclusion à savoir que l'utilisation de granulats recyclés de béton a un impact négatif sur l'ouvrabilité même en prenant en compte l'absorption d'eau élevée des granulats recyclés dans la fabrication des bétons.

Tahar *et al.* [43] déduisent également de leur étude que l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de mortiers diminue l'ouvrabilité de ces derniers.

## 2.5.2 Résistances mécaniques

Zhao [57, 59] a montré que la résistance en compression des mortiers diminue au plus le taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé de béton augmente. Cette diminution est linéaire en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé. Il a également montré que les fractions fines de granulats recyclés ont un impact plus néfaste sur la résistance que les fractions plus grossières car elles ont une plus grande teneur en pâte de ciment.

Gómez-Soberón [25] a montré que lorsque le taux de substitution en volume entre les granulats naturels et les granulats recyclés de béton augmente, les résistances en compression et en traction diminuent. Par contre, lorsque le taux de substitution est inférieur à 30%, la résistance en compression est plus ou moins identique au béton de référence ne contenant pas de granulats recyclés. Les différents bétons à base de granulats recyclés ont une évolution au cours du temps identique au béton de référence sans granulats recyclés.

Agrela *et al.* [1] ont également observé que lorsque le taux de substitution augmente, les caractéristiques mécaniques des bétons à base de granulats recyclés diminuent. Par contre, ils remarquent que la qualité des granulats recyclés utilisés pour la fabrication

des bétons est importante car les propriétés mécaniques sont meilleures lorsque les granulats recyclés proviennent d'un béton de bonne qualité. Ils ont observé que la perte de résistance en traction et en flexion est plus faible que la perte de résistance en compression. Lorsque le béton est jeune, le béton sans granulats recyclés a une meilleure résistance en traction mais à long terme les résistances entre les bétons conventionnels et les bétons à base de granulats recyclés sont du même ordre de grandeur. Pour la flexion, une perte de résistance de 10% est obtenue pour les bétons à base de granulats recyclés. Ils ont également montré que l'utilisation de sable recyclé de bonne qualité ne diminue pas la résistance en compression des bétons jusqu'à une substitution de 30%.

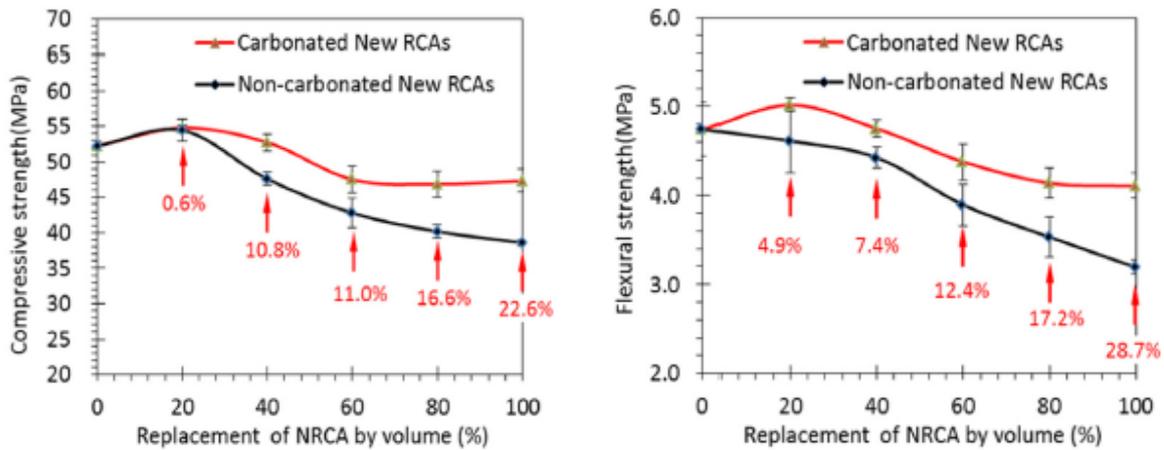
Tabsh *et al.* [42] ont montré également une perte de résistance en compression lors de l'utilisation de granulats recyclés de béton sauf lorsque le béton d'origine des granulats recyclés a de bonnes qualités mécaniques. La même conclusion a été trouvée concernant la résistance en traction.

Wagih *et al.* [49] ont obtenu la même conclusion par rapport à la diminution de la résistance en compression lors de l'utilisation de granulats recyclés de béton. Ils ont conclu de la même manière concernant la résistance en traction.

Deodonne [17], Kenai [28] et Tahar *et al.* [43] ont trouvé les mêmes résultats concernant la résistance en compression. Bouarroudj *et al.* [7] ont conclu de la même manière par rapport à la résistance en compression des mortiers fabriqués à base de granulats recyclés de béton et ont également montré que l'utilisation de granulats recyclés secs lors de la fabrication des mortiers a un impact moins négatif que l'utilisation de granulats recyclés saturés sur la résistance en compression.

Xuan *et al.* [51] ont pour leur part étudié l'impact de granulats recyclés de béton carbonatés et non-carbonatés sur les bétons. Concernant l'utilisation de granulats recyclés non-carbonatés, leur utilisation pour la fabrication de béton diminue la résistance en compression, mais en-dessous d'un remplacement à 30% des granulats naturels la diminution de résistance n'est pas significative. L'utilisation de granulats recyclés carbonatés diminue également la résistance mais cette diminution n'est pas significative jusqu'à un taux de remplacement des granulats naturels de 60%. Concernant la résistance en flexion, l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonatés améliore la résistance lorsque la substitution des granulats naturels est inférieure à 40%. Au delà de ce seuil l'utilisation de granulats recyclés carbonatés diminue la résistance en flexion. L'utilisation de granulats non-carbonatés diminue la résistance en flexion peu importe le taux de substitution.

Zhang *et al.* [53] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonatés a un impact moins négatif sur la résistance en compression que l'utilisation de granulats non-carbonatés. Ils ont également montré que lorsque le béton d'origine utilisé pour fabriquer des granulats est de moins bonne qualité, la carbonatation a un effet plus efficace et accroît significativement la résistance du béton fabriqué à base de granulats recyclés carbonatés par rapport à un béton fabriqué avec des granulats recyclés non-carbonatés provenant du même béton.



(a) Évolution de la résistance en compression en fonction du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés de béton

(b) Évolution de la résistance en flexion en fonction du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés de béton

FIGURE 2.22 – Etude de Xuan *et al.* [51]

### 2.5.3 Module de Young

Selon Agrela *et al.* [1], le module de Young diminue de 20% pour les bétons à base de 100% de granulats recyclés de béton et peut s'expliquer par la grande quantité de pâte de ciment ayant un plus faible module de Young attaché aux granulats naturels formant les granulats recyclés.

Wagih *et al.* [49] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de nouveau béton diminue le module de Young.

Xuan *et al.* [51] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonatés ou non-carbonatés à la place de granulats naturels diminue le module de Young des bétons.

### 2.5.4 Absorption capillaire

Gómez-Soberón [25] a montré que l'absorption d'eau augmente lorsque le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton augmente. Kenai [28] a observé la même chose.

Zhang *et al.* [53] ont montré que les mortiers à base de sable recyclé de béton ont une absorption d'eau plus grande que les mortiers à base de sable naturel. Cependant, la carbonatation permet de limiter cette augmentation d'absorption d'eau.

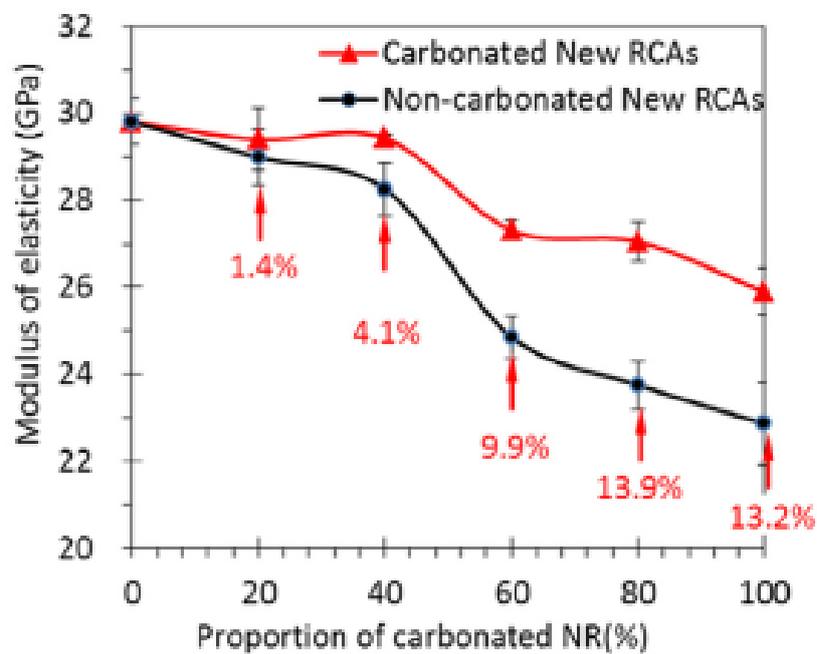


FIGURE 2.23 – Évolution du module de Young en fonction du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés de béton [51]



# Chapitre 3

## Recherches expérimentales

### 3.1 Matériaux utilisés

#### 3.1.1 Ciment

Le ciment utilisé pour fabriquer les différents échantillons est un ciment Portland de type CEM 52.5 N qui est constitué au minimum de 95% de clincker. La masse volumique apparente du ciment est de  $3100 \text{ kg/m}^3$ , la surface spécifique est de  $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$  et la résistance moyenne en compression à 28 jours est de 64 MPa. Ce ciment provient de la firme CBR et sa fiche technique se retrouve à l'ANNEXE A.

#### 3.1.2 Sable normalisé

Le sable normalisé est un sable respectant la norme EN 196-1 et a une masse volumique apparente de  $2600 \text{ kg/m}^3$ . Le sable normalisé provient de la société SNL.

#### 3.1.3 Granulats recyclés

Les granulats recyclés testés dans ce travail proviennent de bétons d'origine différente. Trois bétons différents sont utilisés :

- Béton provenant de bloc de maçonnerie fourni par la société PREFER située à Flémalle, Belgique ;
- Béton provenant de hourdis fourni par la société PREFER située à Flémalle, Belgique et ;
- Béton fourni par le laboratoire des Matériaux de Construction de l'université de Liège.

Les compositions originales de ces bétons sont reprises dans la TABLE 3.1 ci-dessous.

Ces bétons ont été concassés au moyen du concasseur à mâchoires situé dans le laboratoire GEMME de l'université de Liège afin d'obtenir des granulats. Ces derniers ont été tamisés afin d'obtenir deux calibres spécifiques : 0/2 et 2/6.3.

Composants	Hourdis	Blocs	Laboratoire [7]
Ciment [kg]	320 (CEM I 52.5N)	200 (CEM III/A 42.5)	350 (CEM I 52.5N)
Sable 0/2 [kg]	800	760	-
Sable 0/4 [kg]	-	-	612
Gravier 2/6 [kg]	-	460	-
Gravier 2/7 [kg]	-	-	216
Gravier 2/8 [kg]	880	650	-
Gravier 6/14 [kg]	320	-	-
Gravier 7/14 [kg]	-	-	658
Gravier 14/20 [kg]	-	-	436
Eau [kg]	165	112	175
Super-plastifiant [kg]	-	-	14
E/C	0.52	0.56	0.5

TABLE 3.1 – Composition originelle des bétons (pour 1 m<sup>3</sup> de béton)

Zhao *et al.* [55] ont étudié les propriétés des granulats recyclés de bétons de blocs et de hourdis provenant de la société PREFER. Ils ont trouvé que la teneur en pâte de ciment augmente lorsque les granulats recyclés sont fins. Ils ont également montré que l'absorption d'eau est fonction de la taille des granulats recyclés et qu'elle augmente lorsque la taille des granulats diminue. Leurs résultats ont également montré que les granulats de hourdis sont plus anguleux que les granulats de blocs peu importe la fraction étudiée.

La FIGURE 3.1 montre les courbes granulométriques des différents sables 0/2 utilisés dans cette étude. Ces courbes ont été obtenues au moyen de la norme EN NBN 933-2.

Dans un premier temps, nous pouvons voir que le sable recyclé provenant de hourdis est celui ayant la courbe granulométrique la plus proche de celle du sable normalisé. Nous pouvons constater également que le sable recyclé de blocs a la granulométrie la plus linéaire parmi les quatre types de sable utilisés c'est-à-dire qu'il est composé autant de grains fins que de grains grossiers.

### 3.1.4 Traitement des granulats recyclés

Les granulats recyclés de bétons sont traités au moyen d'une carbonatation accélérée. Ils sont maintenus dans un incubateur avec une concentration en CO<sub>2</sub> de 3%, une humidité relative de 60% et à une température de 23 ± 1°C pendant un certains laps de temps afin d'étudier l'impact de la carbonatation. Dans ce travail, ils sont carbonatés pendant 1, 7, 14 et 28 jours dans le but de réaliser des tests avec des temps de traitement différents et de fabriquer des mortiers.

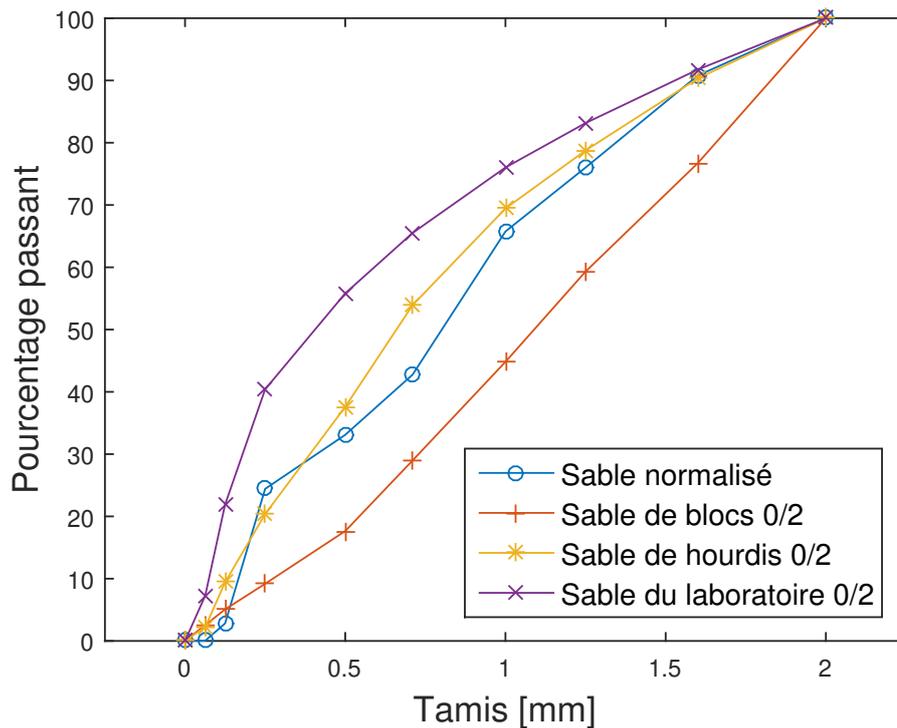


FIGURE 3.1 – Courbes granulométriques des granulats 0/2

## 3.2 Composition des mortiers

Dans ce travail, treize compositions de mortiers différentes ont été testées.

Premièrement, un mortier de référence dans lequel aucun sable recyclé n'a été utilisé pour sa fabrication.

Ensuite, les douze autres mélanges ont été confectionnés de la même manière par type de sable recyclé utilisé pour la fabrication dépendant de l'origine du sable (bloc de béton, hourdis, béton réalisé dans le cadre d'une précédente recherche).

Pour chaque type de sable, quatre compositions en découlent. Le principe est de réaliser une substitution en masse à 25% et à 50% du sable naturel et de le remplacer soit par du sable recyclé soit par du sable recyclé carbonaté. Les TABLE 3.2, TABLE 3.3 et TABLE 3.4 reprennent la composition des différents mélanges.

Pour toutes les compositions, le rapport massique entre les éléments secs (sable naturel, sable recyclé et sable recyclé carbonaté) et le ciment est égal à 3. La durée de carbonatation des sables recyclés utilisés pour la fabrication des mortiers diffère en fonction de l'origine des sables. Les sables recyclés carbonatés de bloc et de hourdis sont restés dans l'incubateur à  $\text{CO}_2$  pendant 1 mois alors que celui fournit par le laboratoire y est resté pendant 7 jours.

L'eau utilisée pour la fabrication des mortiers est de l'eau de distribution. Concernant l'eau absorbée, la quantité a été calculée sur base des résultats obtenus au moyen de l'essai d'absorption d'eau pour les granulats recyclés fournis par le laboratoire et par des résultats fournis par Zhao suite à une extrapolation. L'eau absorbée est calculée en multipliant la

Nom	Ciment [g]	Sable naturel [g]	Sable recyclé [g]	Sable recyclé carbonaté [g]	E/C	Eau efficace [g]	Eau absorbée [g]
REF	450	1350	0	0	0.5	225	0
SR 25 BL	450	1012.5	337.5	0	0.5	225	19.2
SR 50 BL	450	1012.5	675	0	0.5	225	38.5
SRC 25 BL	450	675	0	337.5	0.5	225	14.2
SRC 50 BL	450	675	0	675	0.5	225	28.4

TABLE 3.2 – Composition des mortiers à base de sable de bloc

Nom	Ciment [g]	Sable naturel [g]	Sable recyclé [g]	Sable recyclé carbonaté [g]	E/C	Eau efficace [g]	Eau absorbée [g]
REF	450	1350	0	0	0.5	225	0
SR 25 HO	450	1012.5	337.5	0	0.5	225	22.3
SR 50 HO	450	1012.5	675	0	0.5	225	44.6
SRC 25 HO	450	675	0	337.5	0.5	225	13.5
SRC 50 HO	450	675	0	675	0.5	225	27.0

TABLE 3.3 – Composition des mortiers à base de sable de hourdis

Nom	Ciment [g]	Sable naturel [g]	Sable recyclé [g]	Sable recyclé carbonaté [g]	E/C	Eau efficace [g]	Eau absorbée [g]
REF	450	1350	0	0	0.5	225	0
SR 25 LAB	450	1012.5	337.5	0	0.5	225	73.5
SR 50 LAB	450	1012.5	675	0	0.5	225	146.9
SRC 25 LAB	450	675	0	337.5	0.5	225	71.9
SRC 50 LAB	450	675	0	675	0.5	225	143.7

TABLE 3.4 – Composition des mortiers à base de sable de béton du laboratoire

masse sèche de sable recyclé ou de sable recyclé carbonaté par la valeur de l'absorption d'eau qui dépend de la granulométrie et de l'origine du sable recyclé carbonaté. La formule est :

$$\text{Eau absorbée [g]} = M_{SR(C)} \cdot WA_{24h}$$

où

$M_{SR(C)}$  la masse de sable recyclé ou de sable recyclé carbonaté [g] et ;

$WA_{24h}$  l'absorption d'eau [%].

Les valeurs d'absorption d'eau  $WA_{24h}$  utilisées sont reprises dans la TABLE 3.5 ci-dessous.

	Bloc	Hourdis	Laboratoire
Non-carbonaté	5.7%	6.6%	10.88%
Carbonaté	4.2%	3.95%	10.65%

TABLE 3.5 – Valeurs des absorptions d'eau utilisées pour calculer l'eau absorbée

Les différents mortiers ont été nommés d'une manière systématique à savoir de l'abréviation SR pour les sables recyclés et SRC pour les sables recyclés carbonatés. Ces abréviations sont suivies par le taux de substitution utilisé c'est-à-dire et 25 ou 50 et le nom du mélange se termine par la provenance du sable recyclé utilisé à savoir BL, HO et LAB respectivement pour bloc, hourdis et laboratoire. Seul le mélange de référence déroge à cette nomenclature et est nommé REF.

### 3.3 Méthodologie expérimentale

Cette section présente et explique les différents tests effectués lors de ce travail.

#### 3.3.1 Absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau des granulats est effectué sur base des normes NBN EN 1097-6 [20] et IFSTTAR 78 [33]. Il consiste à obtenir une valeur d'absorption d'eau des granulats et cette valeur est exprimée en pourcentage de masse sèche de granulat.

La procédure à suivre est la suivante :

1. Immerger les granulats testés dans de l'eau à  $22 \pm 3$  °C pendant  $24 \pm 0.5$  h ;
2. Remplir d'eau le pycnomètre et faire déborder l'eau en surplus en mettant le couvercle ;



FIGURE 3.2 – Pycnomètre

3. Sécher le pycnomètre rempli d'eau et peser sa masse  $M_3$  ;
4. Insérer les granulats saturés dans le pycnomètre et faire déborder l'eau en surplus en mettant le couvercle ;
5. Peser la masse du pycnomètre rempli d'eau et de granulat  $M_2$  ;



FIGURE 3.3 – Séchage des granulats sur du papier absorbant

6. Étaler les granulats de la prise d'essai sur du papier absorbant ;
7. Séparer la prise d'essai en deux afin d'appliquer sur une partie la méthode IFSTTAR n°78 et sur l'autre la norme NBN EN 1097-6 ;

La suite de la procédure est différente selon la méthode d'essai utilisée. La suite de la procédure est expliquée ci-dessous premièrement selon la méthode d'essai IFSTTAR n°78 et, ensuite, selon la norme NBN EN 1097-6.

#### **IFSTTAR n°78**

1. Étaler les granulats de la prise d'essai sur du papier absorbant et changer de papier tant que celui-ci ne reste pas sec ;
2. Peser la masse d'échantillon saturée à surface sèche  $M'_1$  ;
3. Mettre la prise d'essai dans l'étuve à  $110 \pm 5$  °C jusqu'à masse constante et ;
4. Peser la masse de granulat séché à l'étuve  $M'_4$ .

#### **NBN EN 1097-6**

1. Étaler les granulats de la prise d'essai en une couche régulière au fond d'un récipient ;
2. Exposer la prise d'essai à un courant d'air chaud tout en le remuant les granulats afin que les granulats n'adhèrent plus l'un à l'autre ;
3. Tester que le séchage de surface est bien réalisé : remplir un moule conique de granulats, damer légèrement à 25 reprises à l'aide d'un pilon, soulever le cône et comparer la forme formée par l'affaissement du cône de granulats avec la norme (voir FIGURE 3.5).
4. Peser la masse d'échantillon saturée à surface sèche  $M_1$  ;
5. Mettre la prise d'essai dans l'étuve à  $110 \pm 5$  °C jusqu'à masse constante et ;



FIGURE 3.4 – Étuve

6. Peser la masse de granulat séché à l'étuve  $M_4$ .

Le coefficient d'absorption d'eau en pourcentage de la masse sèche est donné par les équation ci dessous.

$$WA_{24,IFSTTAR} = \frac{100 \cdot (M'_1 - M'_4)}{M'_4} \quad (3.1)$$

$$WA_{24,NBN EN 1097-6} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.2)$$

De plus, cet essai permet également d'obtenir la masse volumique absolue  $\rho_a$ , la masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve  $\rho_{rd}$  ainsi que la masse volumique saturée à surface sèche  $\rho_{ssd}$  au moyen des trois formules suivantes :

$$\rho_a = \frac{M'_4 + M_4}{(M'_4 + M_4) - (M_2 - M_3)} \quad (3.3)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M'_4 + M_4}{(M'_1 + M_1) - (M_2 - M_3)} \quad (3.4)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M'_1 + M_1}{(M'_1 + M_1) - (M_2 - M_3)} \quad (3.5)$$

### 3.3.2 Procédure de fabrication des éprouvettes

La procédure de fabrication des échantillons de mortier se base sur la norme NBN EN 196-1 [21]. Deux variantes ont été utilisées : la première pour le mortier de référence et la seconde pour les mortiers à base de sable recyclé ; Dans les deux cas, le malaxeur du laboratoire des Matériaux de Construction a été utilisé. Elles sont toutes deux expliquées dans les paragraphes suivants.

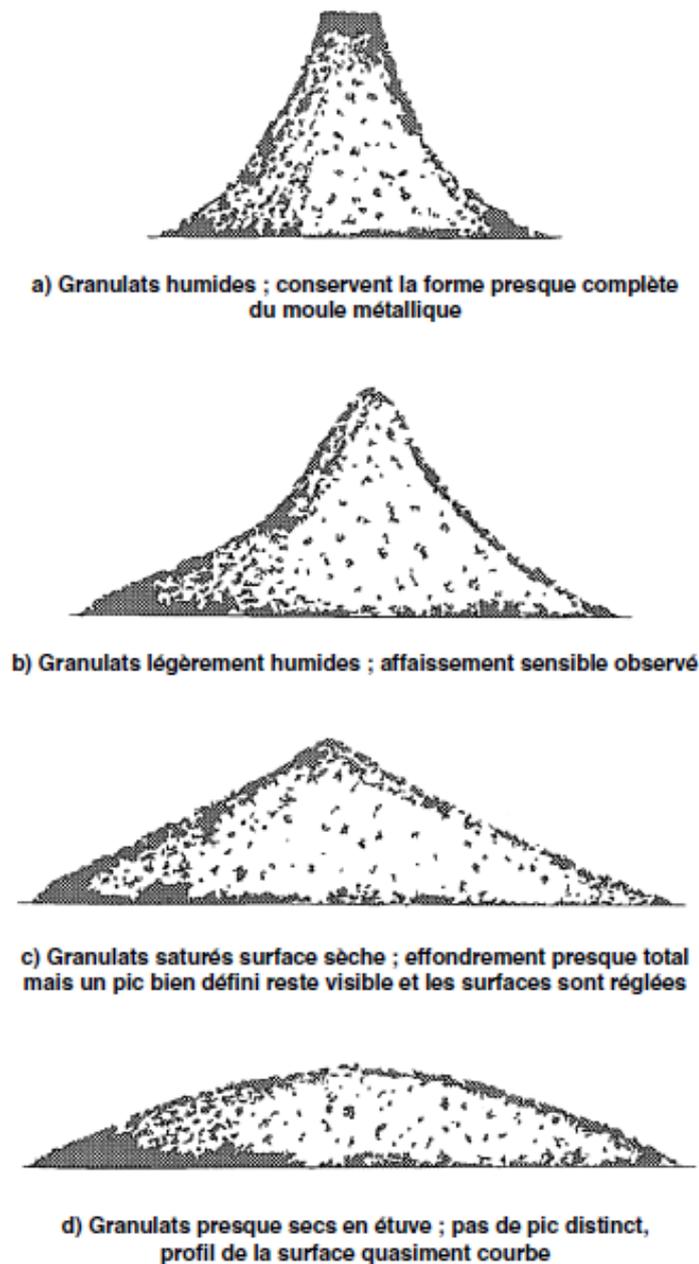


FIGURE 3.5 – Granulats saturés à surface sèche (NBN EN 1097-6)[20]

### 3.3.2.1 Mortier de référence

La procédure pour le mortier de référence est donnée ci-dessous :

1. L'eau et le ciment sont introduits dans le malaxeur et mélangés à la vitesse 1 pendant 30 secondes ;
2. Le sable est ajouté doucement dans le récipient tandis que le malaxeur continue de mélanger à vitesse 1 pendant 30 secondes ;
3. Mettre le malaxeur en vitesse 2 et mélanger pendant 30 secondes ;

4. Arrêter le malaxeur pendant 1 minute 30 secondes et, durant les 30 premières secondes, racler les parois et le fond du bol à l'aide d'une spatule en caoutchouc et ;
5. Mélanger à vitesse 2 pendant 1 minute.

La procédure dure 4 minutes au total. Par après, un test d'étalement est réalisé sur le mortier frais. Ce test est expliqué à la rubrique 3.3.3. Finalement, le mortier est coulé dans des moules. Cette dernière étape de la préparation des échantillons est expliquée à la section 3.3.2.3.



FIGURE 3.6 – Malaxeur

### 3.3.2.2 Mortier à base de sable recyclé

La procédure pour les mortiers à base de sable recyclé se différencie en quelques points de la procédure expliquée ci-dessus.

0. Saturer le sable recyclé avec l'eau efficace pendant 24 heures ;

1. Introduire le sable recyclé, le ciment, l'eau efficace et l'eau absorbée dans le malaxeur et mélanger à la vitesse 1 pendant 30 secondes ;
2. Ajouter le sable naturel doucement dans le récipient tandis que le malaxeur continue de mélanger à vitesse 1 pendant 30 secondes ;
3. Mettre le malaxeur en vitesse 2 et mélanger pendant 30 secondes ;
4. Arrêter le malaxeur pendant 1 minute 30 secondes et, durant les 30 premières secondes, racler les parois et le fond du bol à l'aide d'une spatule en caoutchouc et ;
5. Mélanger à vitesse 2 pendant 1 minute.

La procédure dure également 4 minutes mais nécessite une étape préliminaire pour saturer le sable recyclé. Ensuite, un test d'étalement est réalisé sur le mortier frais. Ce test est expliqué à la rubrique 3.3.3. Finalement, le mortier est coulé dans des moules. Cette dernière étape dans la préparation des échantillons est expliquée à la section 3.3.2.3. La TABLE 3.6 reprend les étapes principales des deux variantes pour la fabrication des mortiers.

Opération n°	Matériaux	Vitesse du malaxeur	Temps de l'opération
1	Eau + Ciment (+ Sable recyclé saturée en eau)	1	30''
2	Introduction du sable normalisé	1	30''
3	-	2	30''
4	-	Arrêt	1'30''
	Pendant les 30 premières secondes, racler les parois et le fond du bol à l'aide d'une spatule en caoutchouc		
5	-	2	1'

TABLE 3.6 – Récapitulatif des opérations pour la réalisation des mortiers

### 3.3.2.3 Moulage du mortier

Les différents mortiers préparés sont ensuite placés dans des moules afin de réaliser des barrettes utiles pour les différents essais. Dans cette étude, des moules 4\*4\*16 c'est-à-dire des moules ayant une longueur de 16 cm et une hauteur et une largeur de 4 cm. Ces moules sont tout d'abord enduits d'huile de décoffrage dans le but de simplifier le démoulage des barrettes. La FIGURE 3.7a représente le type de moule utilisé pour la fabrication des échantillons de mortier. Ceux-ci permettent de réaliser trois barrettes 4\*4\*16 en une fois.

Pour le moulage, une rehausse (FIGURE 3.7b) est disposée au-dessus du moule et le moule est rempli jusqu'à la moitié de sa hauteur. Ensuite, la couche de mortier est serrée par 60 chocs de l'appareil à chocs avec un choc par seconde (FIGURE 3.8). Par après une seconde couche est disposée dans le moule afin de remplir ce dernier en veillant à assurer un surplus. Une seconde vague de 60 chocs est appliquée avec la même fréquence que la première. Finalement, la rehausse est enlevée et le mortier en excès est enlevé à l'aide d'une règle.

Le moule est alors placé dans une chambre humide avec une humidité relative de 90% et à une température de  $20 \pm 1$  °C. Le démoulage est effectué entre 20h et 24h



(a) Moule 4\*4\*16



(b) Rehausse

FIGURE 3.7 – Moule et rehausse



FIGURE 3.8 – Appareil à chocs

après le moulage. Les différentes barrettes obtenues entament une cure dépendante du test appliqué à celles-ci. Dès lors, la cure spécifique à chaque test sera expliquée dans les sections expliquant les différents essais réalisés sur les mortiers.

### 3.3.3 Étalement

L'essai d'étalement se base sur la norme NBN EN 1015-3 [19] et consiste à mesurer le diamètre moyen de mortier frais après que celui-ci aie subi un certains nombres de secousses verticales sur une table à secousses. La procédure complète est explicitée ci-dessous :

1. Le moule conique est rempli de mortier frais en deux couches compactées respectivement par au minimum 10 coups de dame ;

2. Le surplus de mortier est enlevé et la surface libre du disque de la table à secousses est nettoyée pour qu'elle soit propre et sèche ;
3. Après 15 secondes, le moule est enlevé lentement et verticalement. Actionner la table à secousses pour avoir 15 secousses à une fréquence de 1 Hz et ;
4. Le diamètre dans 4 directions différentes est mesuré au millimètre près.



FIGURE 3.9 – Table à secousses, moule conique et dame

### 3.3.4 Résistance mécanique

Les essais de résistance mécanique sont réalisés sur base de la norme NBN EN 196-1 [21] et sont de deux natures : un essai à la flexion 3 points et un essai de compression. Ces deux tests sont effectués au moyen d'une presse hydraulique sur des mortiers âgés de 28 et 56 jours au moyen de dispositif spécifique à chaque essai. Les barrettes de mortier utilisées pour ces tests destructifs sont maintenues dans la chambre humide (90 % d'humidité relative et une température de  $20 \pm 1$  °C) entre le démoulage et le jour auquel les tests sont réalisés.

#### 3.3.4.1 Résistance à la flexion 3 points

Le prisme  $4*4*16$  est positionné dans le dispositif de chargement de l'essai de flexion 3 points sur une de ces faces latérales c'est-à-dire ni la face se trouvant au fond du moule



FIGURE 3.10 – Presse hydraulique

ni la face se trouvant à l'air libre lors du moulage. La FIGURE 3.11a montre le dispositif en question. Les deux appuis sont espacés de  $100 \pm 0.5$  mm et la charge est appliquée au moyen d'un troisième appui se situant à mi-distance et sur la face opposée aux deux autres. La charge est appliquée à une vitesse constante de  $50 \pm 10$  N/s jusqu'à la rupture de l'éprouvette en deux prismes.

La résistance en flexion 3 points est obtenue au moyen de la formule

$$f_{ct,fl} = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (3.6)$$

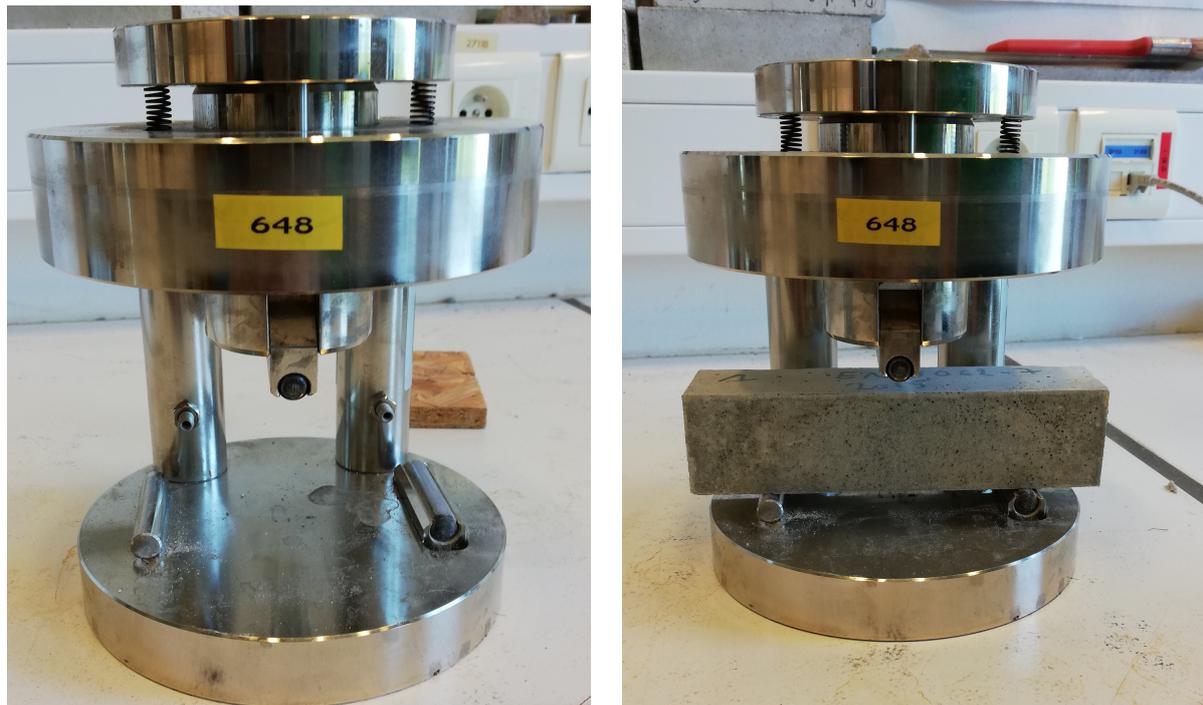
où

$f_{ct,fl}$  la résistance en traction par flexion 3 points [MPa] ;

$b$  la longueur du côté de la section carré du prisme [mm] ;

$F_f$  la charge appliquée au milieu à la rupture [N] et ;

$l$  la longueur entre les appuis [mm].



(a) Dispositif de chargement (flexion 3 points)

(b) Dispositif avec un prisme

FIGURE 3.11 – Essai de flexion 3 points

Selon L. Vandewalle [46], une relation existe entre la contrainte de rupture en traction pure et la contrainte en traction obtenue par l'essai de flexion 3 points et est la suivante

$$f_{ct} = 0.6 \cdot f_{ct,fl} \quad (3.7)$$

où

$f_{ct}$  la contrainte en traction pure [MPa] et ;

$f_{ct,fl}$  la contrainte en traction par flexion 3 points [MPa].

### 3.3.4.2 Résistance en compression

L'essai de compression est réalisé sur les deux prismes obtenus suite à l'essai de flexion 3 points. Chaque prisme est placé dans le dispositif nécessaire à l'essai de compression. Le dispositif est composé de deux plats parallèles ayant chacun une surface de  $1600 \text{ mm}^2$  entre lesquels est placé l'échantillon à tester. Il est visible à la FIGURE 3.12a. Le chargement se fait à une vitesse constante de  $2400 \pm 200 \text{ N/s}$  jusqu'à la rupture.

La résistance en compression est obtenue grâce à la formule

$$f_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.8)$$

où

$R_c$  la résistance en compression [MPa] ;

$F_f$  la charge appliquée à la rupture [N] et ;

1600 l'aire des plateaux de chargement [ $\text{mm}^2$ ].



(a) Dispositif de chargement (compression)

(b) Dispositif avec un prisme

FIGURE 3.12 – Essai de compression

### 3.3.5 Module de Young dynamique

Cet essai se base sur la norme NBN B 15-230 [3]. Le but de l'essai est de déterminer le module de Young dynamique du mortier au moyen d'un test non-destructif se basant sur la fréquence de résonance. Le module de Young dynamique est représenté par l'angle compris entre l'axe des abscisses et la tangente à l'origine de la courbe "contraintes-déformations" déterminée par un essai de mise en charge statique. Ce test est effectué sur les mortiers âgés de 28 et 56 jours. Les prismes de mortier 4\*4\*16 sont maintenus dans la chambre humide (90 % d'humidité relative et une température de  $20 \pm 1$  °C) entre le démoulage et le jour auquel le test est réalisé.

Pour cet essai, il est nécessaire d'avoir un fréquencemètre dans le but de mesurer la fréquence de résonance de l'éprouvette.

La procédure à suivre pour réaliser l'essai est détaillée ci-dessous.

1. Peser la masse  $M$  de l'éprouvette [kg] ;
2. Placer l'éprouvette sur les supports comme indiqué sur la FIGURE 3.13 et ;
3. Placer la sonde du fréquencemètre sur une des faces carrés de l'éprouvette, taper sur l'éprouvette au moyen de la baguette au milieu de la barrette et noter la fréquence de résonance flexionnelle  $F_{r_f}$  en Hz.

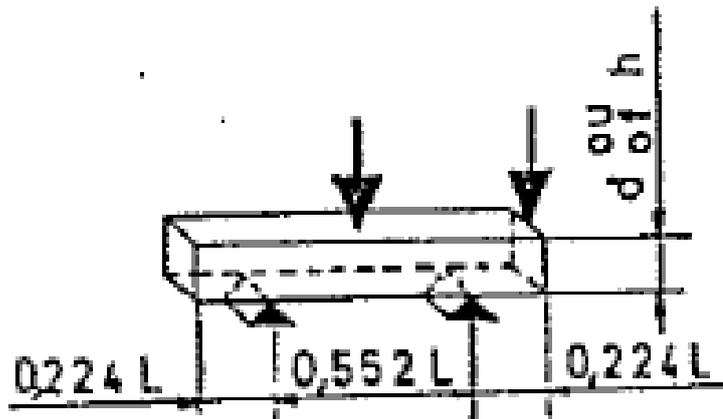


Fig. 3

FIGURE 3.13 – Position de l'éprouvette pour l'essai NBN 15-230 [3]

Le module dynamique est alors obtenu au moyen de la formule

$$E_{c,\infty} = 15.136 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot Fr_f^2 \cdot \rho \cdot C \quad (3.9)$$

où

$E_{c,\infty}$  le module de Young [MPa];

$l$  la longueur de l'éprouvette [m];

$Fr_f$  la fréquence de résonance en flexion [Hz];

$\rho$  la masse volumique du mortier [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] et;

$C$  un coefficient dépendant du coefficient de Poisson de l'échantillon.

Dans le cas de cette étude, la longueur  $l$  vaut 0.16 m. La masse volumique du mortier est quant à elle obtenue par la formule suivante

$$\rho = \frac{M}{2.56 \cdot 10^{-4}} \quad (3.10)$$

où

$M$  la masse de l'éprouvette [kg] et;

$2.56 \cdot 10^{-4}$  le volume de la barrette  $4 \times 4 \times 16$  [ $\text{m}^3$ ].

Concernant le coefficient  $C$ , celui-ci varie entre 1.409 et 1.451 et dépend du coefficient de Poisson du mortier. Selon G. De Schutter [13], le coefficient de Poisson d'un béton varie entre 0.15 et 0.2 selon le degré d'hydratation du ciment. En se basant sur l'EUROCODE 2 [22], le coefficient de Poisson peut être pris égal à 0.2 lorsque le béton est non-fissuré et égal à 0 lorsque le béton est fissuré. Dès lors, le coefficient de Poisson est fixé à 0.2 pour tous les types de mortier.

Par conséquent, le coefficient  $C$  est obtenu au moyen de la TABLE 1 de la norme NBN B 15-230 [3] et est égal à 1.425.

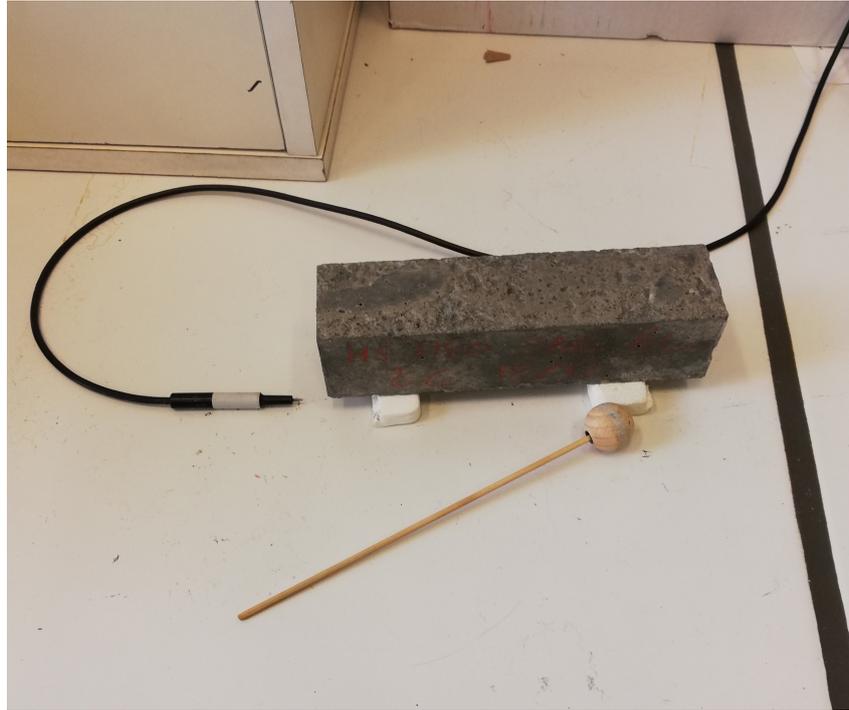


FIGURE 3.14 – Essai de module dynamique

### 3.3.6 Absorption capillaire

Cet essai se base sur la norme NBN EN 1015-18 [18]. Le but de l'essai est de déterminer le coefficient d'absorption d'eau d'un mortier par capillarité.

Pour ce test, les barrettes 4\*4\*16 sont maintenues pendant les 56 premiers jours dans la chambre humide (90 % d'humidité relative et une température de  $20 \pm 1$  °C) avant d'être utilisées. Ensuite, ces barrettes sont coupées en quatre cubes de 4 cm de côté. Les 4 faces correspondantes aux grandes faces du prisme d'origine sont enduites de deux couches de résine époxy pour les rendre étanche. Les cubes sont, par la suite, placés dans une étuve ventilée à  $60 \pm 5$  °C dans le but de sécher les prismes cubiques jusqu'à obtenir une masse constante c'est-à-dire quand la perte de masse entre deux pesées successives espacées de 24h est inférieure ou égale à 0.2% de la masse totale. Cette masse constante est notée  $M_0$ .

Ensuite, les cubes sont placés dans un récipient, la surface clivée vers le bas et sur-élevée, de manière à ce que la surface ne touche pas le fond du récipient. Les surfaces de rupture sont immergées à une profondeur de 5 à 10 mm pendant l'essai. Le récipient est couvert afin d'éviter l'évaporation de l'eau et de garder le niveau d'eau constant. La FIGURE 3.15 montre les prismes cubiques recouverts de résine époxy pour l'étanchéité et dont la surface clivée est immergée par 5 à 10 mm d'eau.

Des pesées à des temps précis sont effectuées afin de mesurer l'absorption d'eau. Ces mesures sont réalisées après 10, 20, 30, 60, 90, 120, 240, 420 minutes et après 1, 2, 7, et 14 jours après l'immersion des prismes.

Le coefficient d'absorption d'eau est obtenu grâce à la formule

$$C = 0.1 \cdot (M_2 - M_1) \quad (3.11)$$

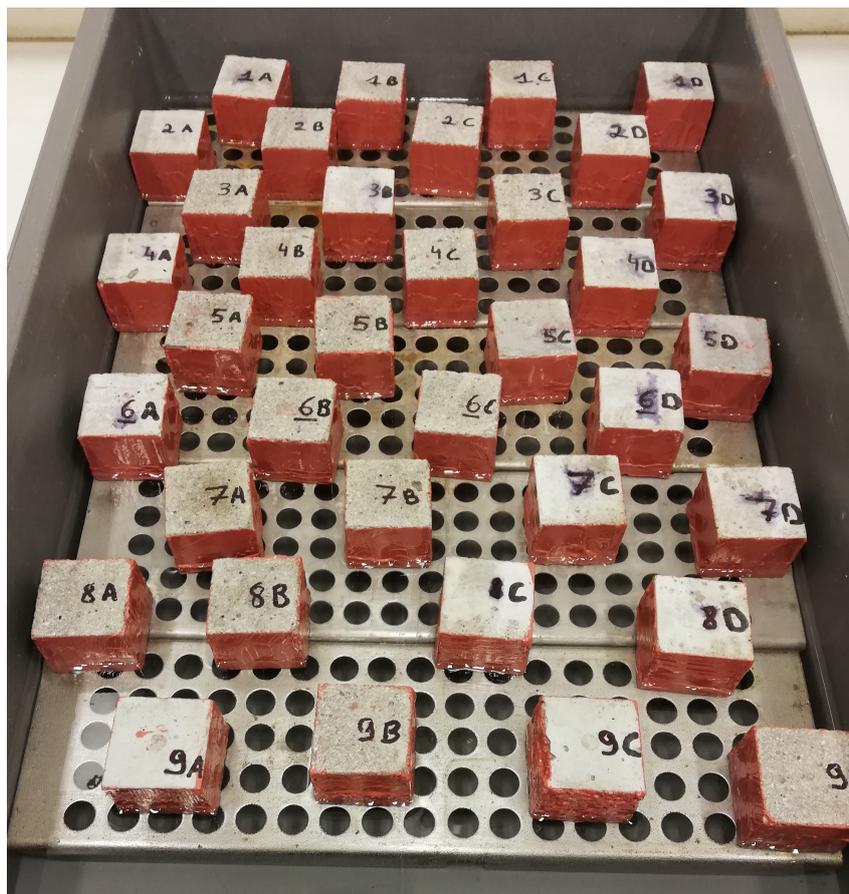


FIGURE 3.15 – Essai d’absorption capillaire

où

$C$  le coefficient d’absorption d’eau par capillarité [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ ];

$M_1$  la masse de l’éprouvette après 10 minutes [g] et ;

$M_2$  la masse de l’éprouvette après 90 minutes [g].

### 3.3.7 Carbonatation

Cet essai se base sur la norme RILEM CPC-18 [39] et a pour but de déterminer la profondeur de carbonatation dans un mortier.

Le test s’applique sur les barrettes  $4 \times 4 \times 16$  maintenues pendant les 56 premiers jours dans la chambre humide (90 % d’humidité relative et une température de  $20 \pm 1$  °C) et par la suite maintenue dans une pièce à  $21 \pm 2$  °C et à une humidité relative de  $60 \pm 5$  % jusqu’à la stabilisation de la masse c’est-à-dire quand la perte de masse entre deux pesées successives espacées de 24h est inférieure ou égale à 0.2% de la masse totale.

Une première mesure est réalisée à 0 jour c’est-à-dire lorsque le mortier n’a subi encore aucune carbonatation forcée. Pour ce faire, l’éprouvette est fendue afin d’avoir une tranche de plus ou moins 20 mm d’épaisseur (FIGURE 3.16). Ensuite, une solution avec une concentration de 1 % de phénolphthaléine diluée dans l’alcool éthylique à 70% est appliquée

sur la face de rupture de la tranche obtenue au moyen du fendage. La phénolphtaléine devient rose lorsque le pH est supérieur à 9, ce qui est le cas du béton non-carbonaté. Par contre, la phénolphtaléine reste incolore lorsque le pH est inférieur à 9 ce qui est le cas pour le béton carbonaté. Ceci permet de déterminer la profondeur de carbonatation. Afin de faciliter la prise de mesure du front de carbonatation, il est conseillé de prendre les mesures 24 heures après l'application de la solution de phénolphtaléine (FIGURE 3.17).



FIGURE 3.16 – Fendage des éprouvettes



FIGURE 3.17 – Essai de carbonatation

Les faces de la tranche obtenue sont numérotées de manière systématique. La face la plus irrégulière provenant de la surface ne se trouvant pas en contact avec le moule lors de la réalisation des éprouvettes est numérotée 1. La numérotation est ensuite effectuée dans le sens anti-horaire. La FIGURE 3.18 illustre la numérotation des faces. Les mesures de la profondeur de carbonatation sont réalisées sur chaque face.

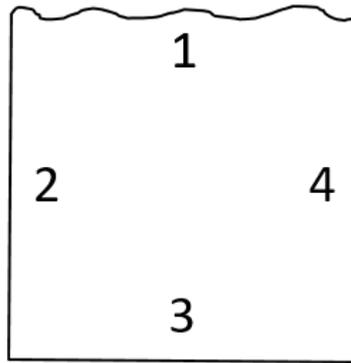


FIGURE 3.18 – Numérotation des faces pour l’essai de carbonatation

L’éprouvette, après cette première mesure, est placée dans un incubateur à  $\text{CO}_2$  avec une concentration en  $\text{CO}_2$  de 3%, une température de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  et une humidité relative de 60%.

Des mesures de la profondeur de carbonatation sont prises après 7, 14 et 21 jours selon la procédure expliquée pour la mesure à 0 jour.

### 3.4 Effet de la carbonatation sur les granulats recyclés

Dans cette section, l’impact de la carbonatation sur les granulats recyclés de béton est analysé et discuté.

#### 3.4.1 Absorption d’eau

Les FIGURE 3.19 et FIGURE 3.20 illustrent l’absorption d’eau des granulats recyclés en fonction du temps de carbonatation subie respectivement selon les normes NBN EN 1097-6 et IFSTTAR n°78.

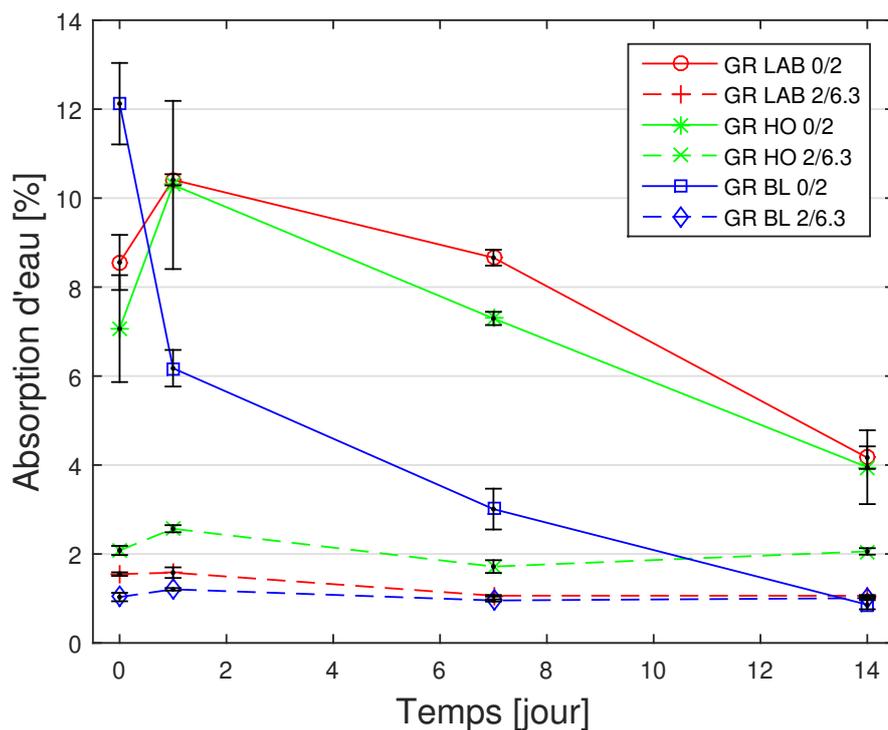


FIGURE 3.19 – Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de carbonatation selon NBN EN 1097-6

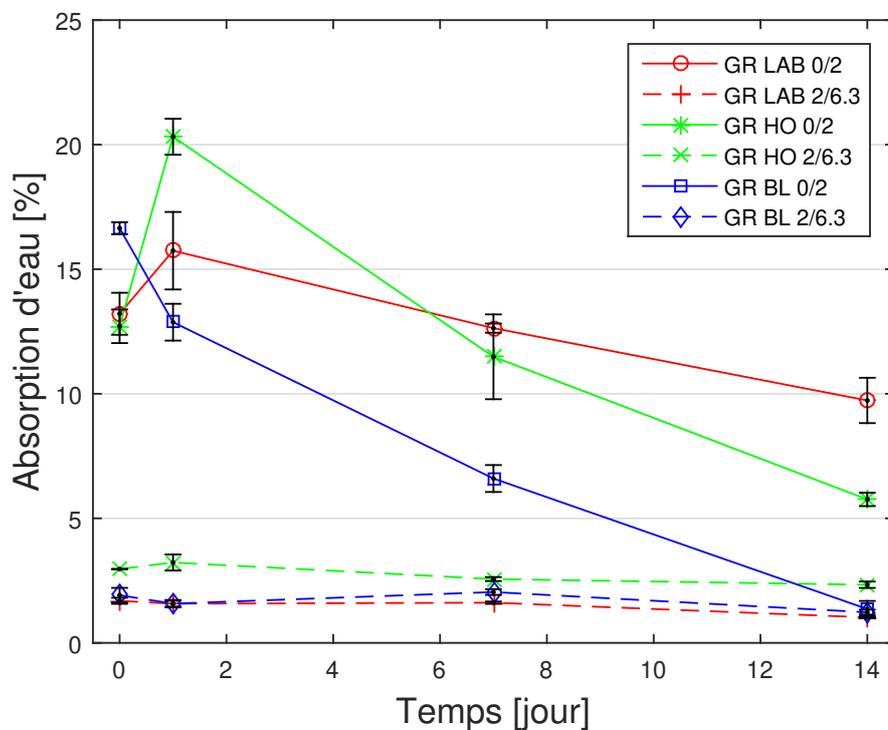


FIGURE 3.20 – Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de carbonatation selon IFSTTAR n°78

Nous pouvons constater sur les deux graphiques que l'absorption d'eau est plus importante pour les granulats 0/2 que les granulats 2/6.3 ce qui rejoint les résultats des études de Zhao *et al.* [55], Gómez-Soberón *et al.* [25], Wagih *et al.* [49] et Agrela *et al.* [1]. Cela peut s'expliquer par le fait que la surface spécifique est plus grande pour des grains fins et que la quantité de pâte de ciment, qui est la partie la plus poreuse des granulats recyclés, est plus importante pour les granulats fins que pour les granulats grossiers.

Nous pouvons également observer que plus les granulats recyclés passent de temps dans l'incubateur à  $\text{CO}_2$ , plus l'absorption d'eau est faible. La carbonatation a un impact plus important sur la fraction 0/2 que sur la fraction 2/6.3. Les granulats fins ayant une surface spécifique plus grande que les granulats grossiers, le phénomène de carbonatation est facilité. De plus, la quantité de pâte de ciment au sein des granulats recyclés de béton fins est plus importante ce qui augmente la quantité de réactifs pour la réaction de carbonatation.

La TABLE 3.7 reprend les résultats du test d'absorption d'eau des granulats recyclés de béton. Nous pouvons voir que les résultats obtenus au moyen de la norme IFSTTAR n°78 sont plus grands que ceux obtenus au moyen de la norme NBN EN 1097-6. Cette observation a été également faite par Bouarroudj *et al.* [7] dans leur étude.

	Norme	0 jour	1 jour	7 jours	14 jours
GR LAB 0/2	EN NBN 1097-6	8.55	10.41	8.66	4.17
	IFSTTAR n°78	13.21	15.74	12.64	9.73
	<b>Moyenne</b>	<b>10.88</b>	<b>13.08</b>	<b>10.65</b>	<b>6.95</b>
GR LAB 2/6.3	EN NBN 1097-6	1.55	1.58	1.06	1.06
	IFSTTAR n°78	1.69	1.57	1.62	1.02
	<b>Moyenne</b>	<b>1.62</b>	<b>1.58</b>	<b>1.34</b>	<b>1.04</b>
GR HO 0/2	EN NBN 1097-6	7.07	10.30	7.30	3.95
	IFSTTAR n°78	12.71	20.32	11.48	5.76
	<b>Moyenne</b>	<b>9.89</b>	<b>15.31</b>	<b>9.39</b>	<b>4.86</b>
GR HO 2/6.3	EN NBN 1097-6	2.08	2.57	1.72	2.06
	IFSTTAR n°78	2.96	3.23	2.56	2.34
	<b>Moyenne</b>	<b>2.52</b>	<b>2.90</b>	<b>2.14</b>	<b>2.20</b>
GR BL 0/2	EN NBN 1097-6	12.12	6.18	3.01	0.86
	IFSTTAR n°78	16.65	12.87	6.0	1.36
	<b>Moyenne</b>	<b>14.38</b>	<b>9.53</b>	<b>4.80</b>	<b>1.11</b>
GR BL 2/6.3	EN NBN 1097-6	1.03	1.21	0.96	1.01
	IFSTTAR n°78	1.91	1.58	2.04	1.23
	<b>Moyenne</b>	<b>1.47</b>	<b>1.39</b>	<b>1.50</b>	<b>1.12</b>

TABLE 3.7 – Comparaison et résultats de l'absorption d'eau selon les méthodes NBN EN 1097-6 et IFSTTAR n°78

La TABLE 3.8 reprend les valeurs des masses volumiques réelles déterminées par séchage à l'étuve  $\rho_{rd}$  calculées à partir de l'équation 3.4. Ces valeurs sont très variables car elles sont obtenues à partir de mesures de masse très délicates.

jour(s)	Bloc		Hourdis		Laboratoire	
	0/2	2/6.3	0/2	2/6.3	0/2	2/6.3
0	2038.59	2690.64	2208.06	2580.41	2199.72	2635.97
1	2279.70	2669.38	2064.89	2525.23	2122.16	2647.49
7	2617.60	2694.31	2190.65	2599.29	2132.05	2679.02
14	1863.43	2672.08	2376.62	2575.43	2369.15	2654.15

TABLE 3.8 – Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve  $\rho_{rd}$  [kg/m<sup>3</sup>]

## 3.5 Effet des sables recyclés sur les mortiers

Dans cette section, l'impact de l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonatés ou non-carbonatés sur les propriétés des mortiers est analysé et discuté.

### 3.5.1 Ouvrabilité

La FIGURE 3.21 illustre les résultats au test d'étalement des différents mortiers réalisés. Les barrettes turquoise représentent les mortiers fabriqués à partir de sable non-carbonaté de béton et les barrettes violettes représentent les mortiers fabriqués à base de sable carbonaté. Il est nécessaire de rappeler que l'absorption d'eau des granulats est prise en compte lors de la fabrication des mortiers et que les granulats recyclés ont été saturés avant leur incorporation au mélange. Les différents mortiers présentent donc le même rapport E/C à savoir 0.5. De plus, la substitution effectuée est une substitution en masse.

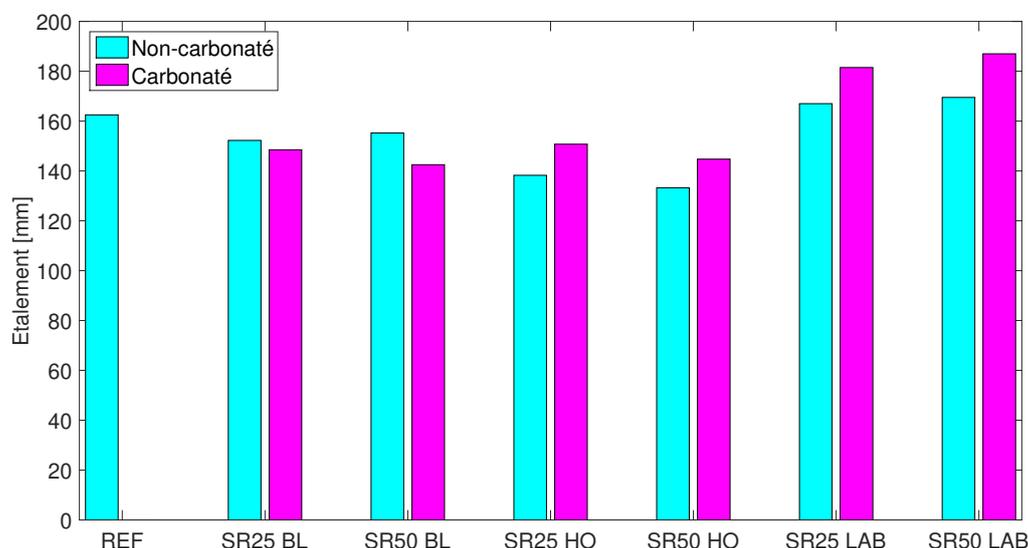


FIGURE 3.21 – Étalement des différents mortiers étudiés

En premier lieu, nous pouvons constater que l'utilisation de granulats recyclés carbonatés de béton améliore l'ouvrabilité sauf pour les granulats issus de bloc. La carbonatation a pour effet d'augmenter légèrement la masse volumique des granulats. Étant donné que la substitution a été réalisée en masse, le volume de granulats recyclés utilisé dans chaque mortier est différent et est inférieur pour les mortiers à base de granulats recyclés

carbonatés.

Le rapport E/C étant identique pour chaque type de mortier, le volume de matière solide inférieur pour les mortiers à base de granulats carbonatés peut expliquer leur meilleure ouvrabilité. Les granulats de blocs sont constitués d'une quantité moindre de pâte de ciment que les granulats recyclés issus de hourdis et provenant du laboratoire ce qui peut expliquer que la carbonatation n'a pas un réel impact sur l'ouvrabilité des mortiers à base de granulat de bloc et que la masse volumique des granulats non-carbonatés et carbonatés de bloc est quasiment identique.

Nous pouvons également observer que l'utilisation de granulats recyclés a pour conséquence de diminuer l'ouvrabilité de manière générale par rapport au mortier de référence. Cela peut être lié à la géométrie des granulats. Les granulats recyclés sont plus anguleux que les granulats naturels comme l'ont expliqué Wagih *et al.* [49] dans leur étude ce qui réduit l'ouvrabilité des mortiers. De plus, les granulats recyclés ont généralement une masse volumique plus faible que celle des granulats naturels. La substitution étant réalisée en masse dans cette étude et le rapport E/C étant identiques pour chaque mélange, l'ouvrabilité des mortiers à base de sable recyclé est inférieure à celle d'un mortier uniquement à base de sable naturel.

Seuls les mortiers à base de sable fournit par le laboratoire dérogent à cette observation. Cela peut être du à une quantité d'eau absorbée ajoutée au mélange lors de la fabrication qui auraient été surestimée suite à une mauvaise mesure de l'eau absorbée par les granulats du laboratoires.

	REF	SR25 BL	SR50 BL	SR25 HO	SR50 HO	SR25 LAB	SR50 LAB
Non-carbonaté	162.5	152.25	155.25	138.25	133.25	167.00	169.50
Carbonaté	-	148.5	142.5	150.75	144.75	181.50	187.00

TABLE 3.9 – Étalement des différents mortiers [mm]

La FIGURE 3.22 montre l'étalement des mortiers à base de granulats de béton recyclés issus de blocs en fonction du taux de substitution. Le mortier fabriqué à base de sable non-carbonaté est représenté en turquoise et le mortier fabriqué à base de sable carbonaté en violet. Nous pouvons observer que plus le taux de substitution augmente, moins l'étalement est important excepté pour une substitution à 50% en masse du sable naturel par du sable recyclé non-carbonaté pour lequel l'étalement est plus important que celui obtenu avec une substitution à 25% avec le même type de sable. Cette augmentation est de 3mm et est donc trop faible pour en tirer une conclusion. Nous pouvons également constater que l'utilisation de sable recyclé carbonaté de béton provenant de blocs diminue plus l'étalement que l'utilisation du même sable non-carbonatés

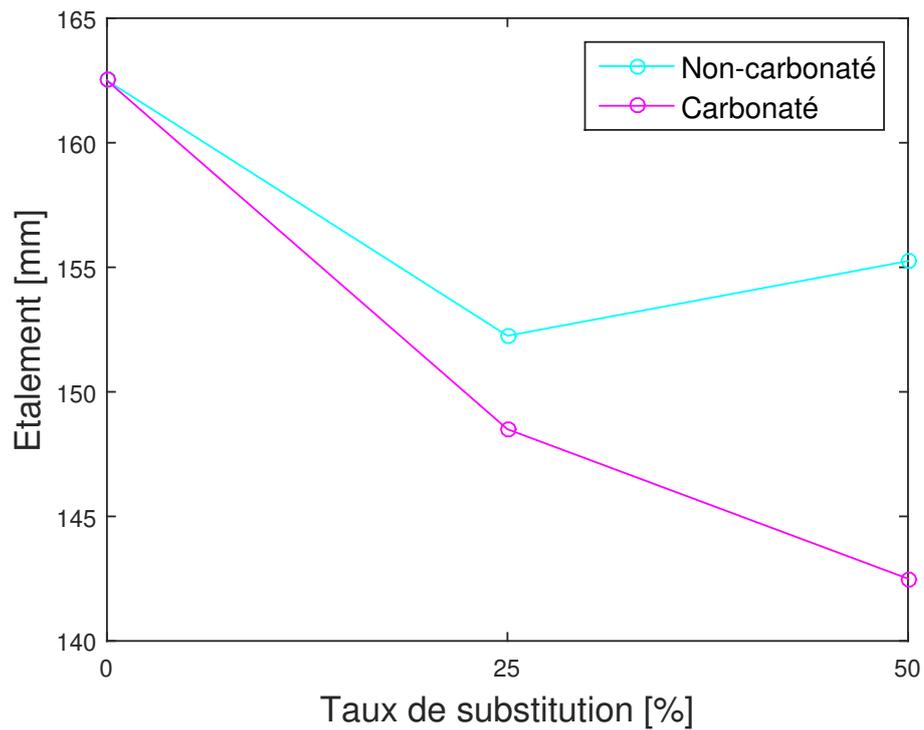


FIGURE 3.22 – Étalement des mortiers à base des granulats de blocs en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.23 montre l'étalement des mortiers à base de granulats recyclés de béton issus de hourdis en fonction du taux de substitution. Le mortier fabriqué à base de sable non-carbonaté est représenté en turquoise et le mortier fabriqué à base de sable carbonaté en violet. Nous pouvons voir que plus le taux de substitution augmente, plus l'étalement diminue et que l'utilisation de sable recyclé carbonaté de béton provenant de hourdis réduit davantage l'étalement.

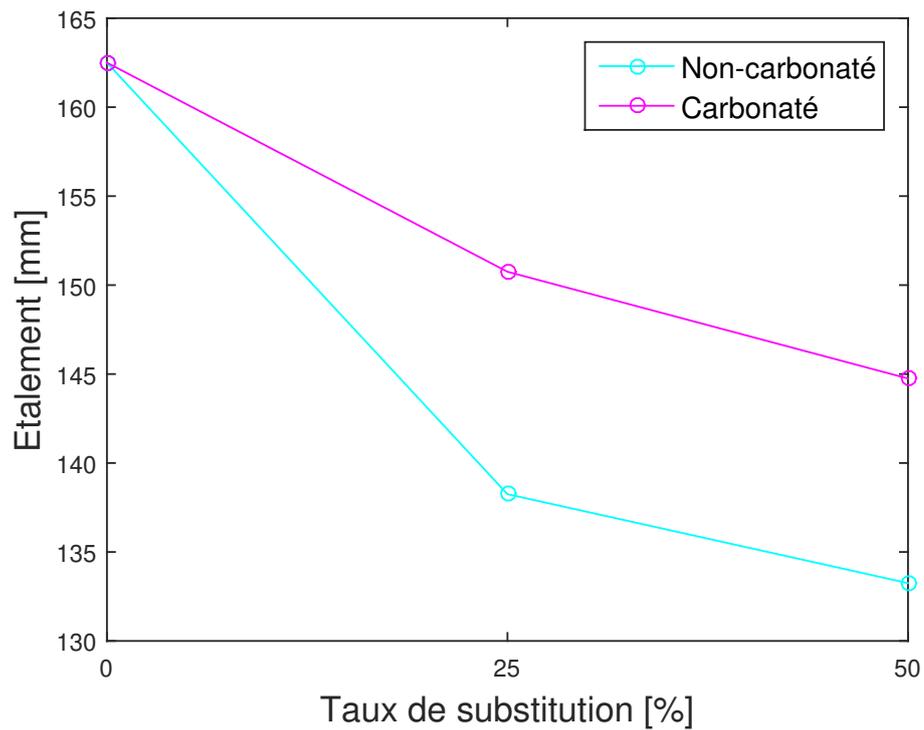


FIGURE 3.23 – Étalement des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.24 montre l'étalement des mortiers à base de granulats recyclés du béton fourni par le laboratoire en fonction du taux de substitution. Le mortier fabriqué à base de sable non-carbonaté est représenté en turquoise et le mortier fabriqué à base de sable carbonaté en violet. Nous pouvons observer que plus le taux de substitution augmente, plus l'étalement augmente. De plus l'utilisation de sable carbonaté augmente l'ouvrabilité du mortier davantage que l'utilisation de sable non-carbonaté.

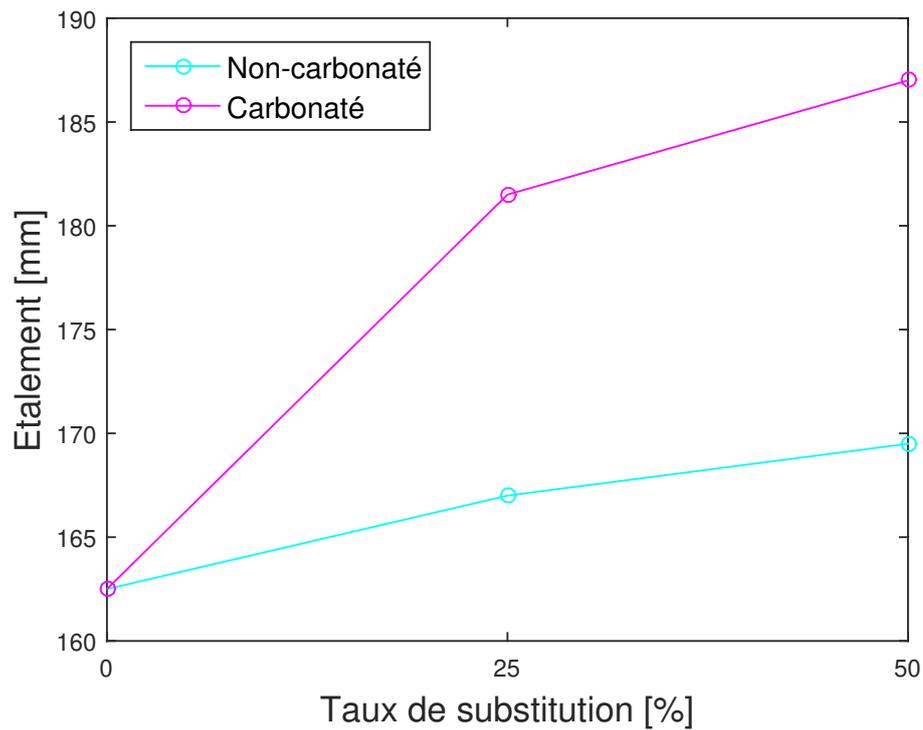


FIGURE 3.24 – Étalement des mortiers à base des granulats de laboratoire en fonction du taux de substitution

### 3.5.2 Résistance en compression

La FIGURE 3.25 montre la résistance en compression des différents mortiers étudiés. Les bâtonnets verts donnent la résistance à 28 jours et les jaunes donnent la résistance à 56 jours.

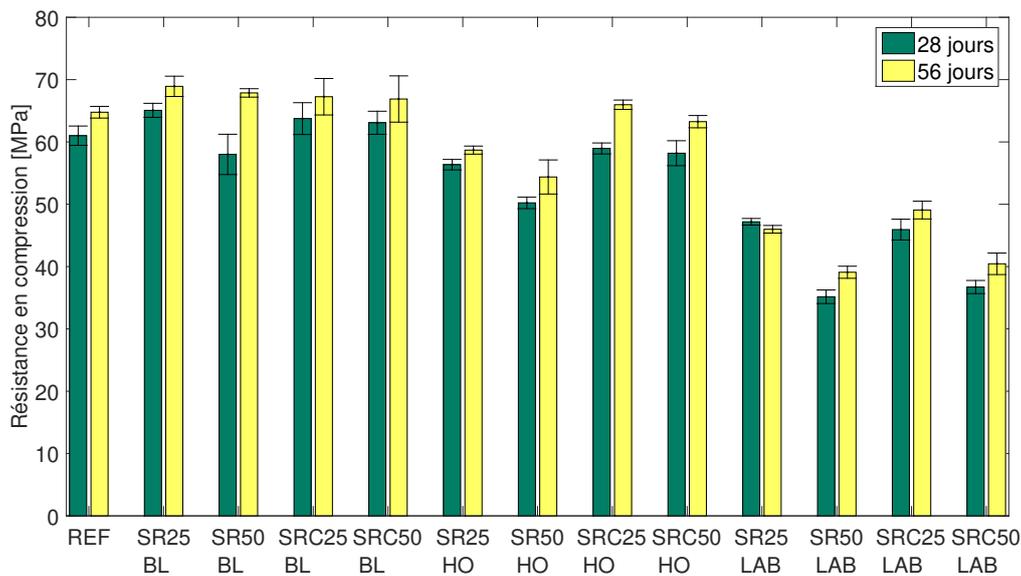


FIGURE 3.25 – Comparaison des résistances en compression

Nous pouvons constater que la résistance en compression à 56 jours est toujours supérieure à la résistance à 28 jours. Nous pouvons expliquer cela par le fait que l'hydratation du ciment se fait pendant une durée plus longue ce qui amène à une résistance plus élevée. Nous pouvons également voir que la résistance des mortiers fabriqués à base de granulats recyclés de béton provenant de blocs est du même ordre de grandeur que la résistance du mortier de référence. La résistance des mortiers fabriqués à base de granulats recyclés provenant de hourdis ont une résistance plus faible que ceux à base de granulats issus de blocs mais supérieure à la résistance des mortiers fabriqués à base des granulats recyclés fournis par le laboratoire. Une explication possible est que les granulats recyclés de blocs contiennent moins de pâte de ciment que les granulats issus du concassage de hourdis qui eux même contiennent moins de pâte de ciment que les granulats de béton fournis par le laboratoire. La pâte de ciment durcie des granulats recyclés de béton étant leur point faible au niveau de la résistance.

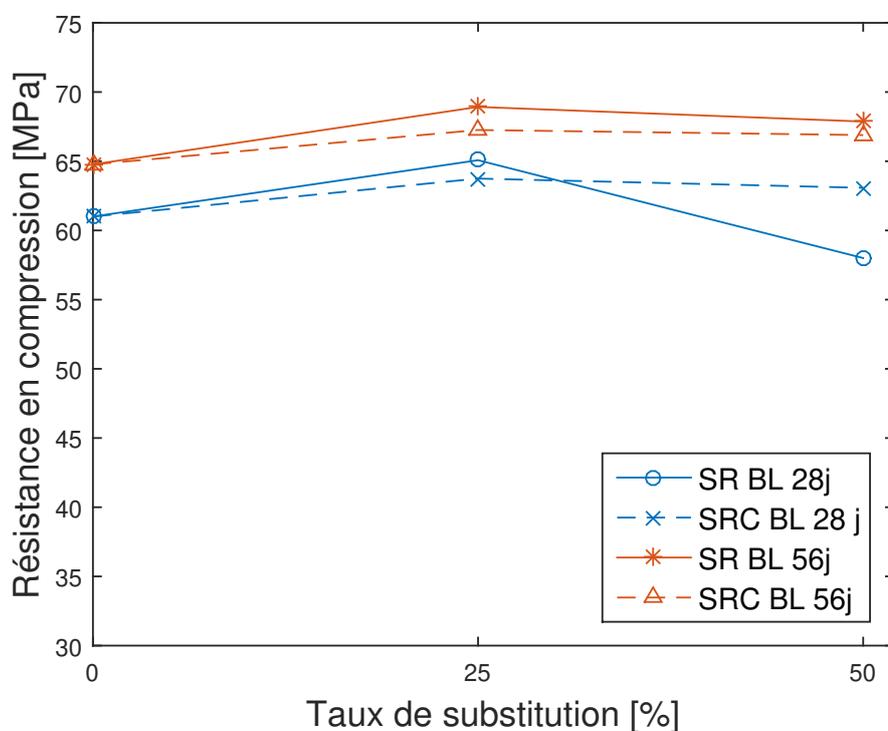


FIGURE 3.26 – Résistance en compression des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.26 montre l'évolution de la résistance en compression des mortiers à base de granulats recyclés de béton provenant de bloc en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons à nouveau remarquer l'utilisation de sable recyclé de bloc n'a pas d'impact néfaste sur la résistance en compression. La quantité de pâte de ciment durcie n'étant que très petite dans le sable de bloc, ce dernier est presque identique au sable naturel. La carbonatation du sable n'a pas de réel impact pour la même raison.

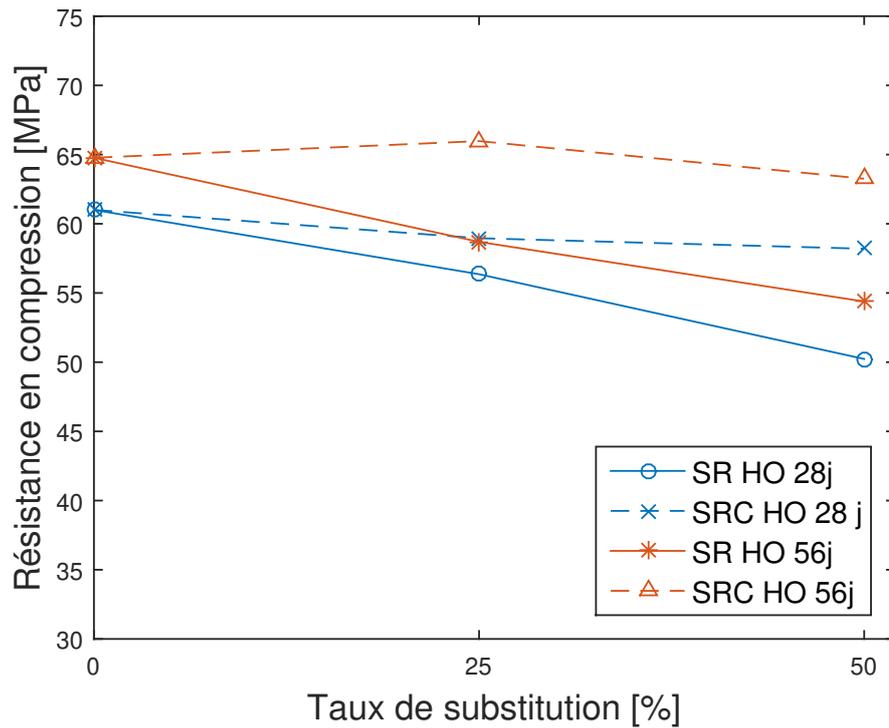


FIGURE 3.27 – Résistance en compression des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.27 montre l'évolution de la résistance en compression des mortiers à base de granulats recyclés de béton issus de hourdis en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons remarquer que plus le taux de substitution augmente, plus la résistance en compression diminue. De plus, nous pouvons voir que les mortiers fabriqués à base de sable carbonaté ont une résistance plus élevée que ceux fabriqués à base de sable non-carbonaté.

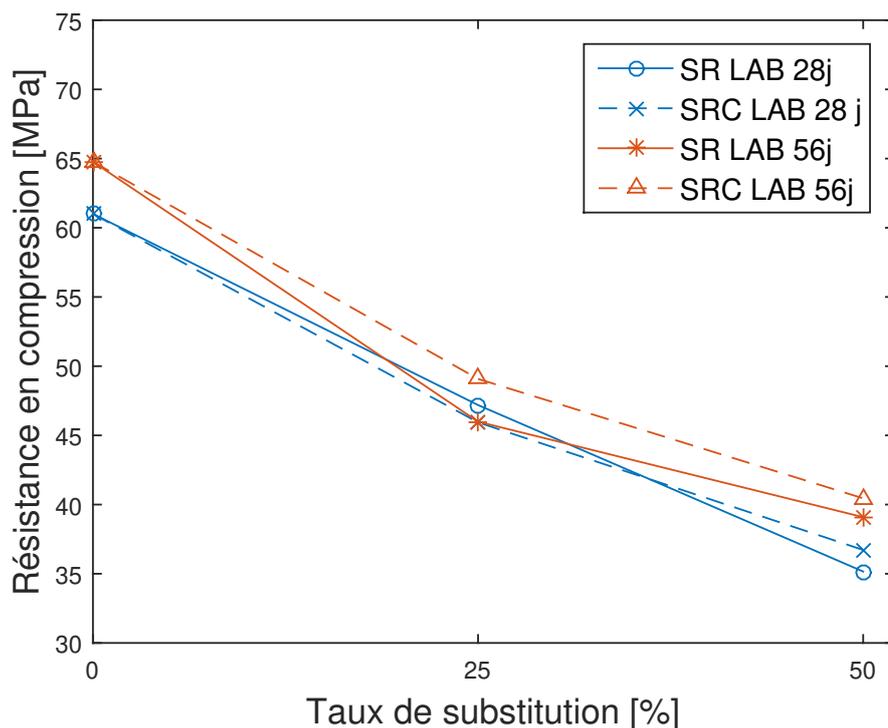


FIGURE 3.28 – Résistance en compression des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.28 montre l'évolution de la résistance en compression des mortiers à base de granulats recyclés de béton fournis par le laboratoire en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons constater dans les mortiers fabriqués qu'une substitution de 25% a pour conséquence de diminuer de 30% la résistance en compression par rapport au mortier de référence et qu'une substitution de 50% diminue de 40% la résistance en compression. Nous pouvons également remarquer que l'utilisation de sable carbonaté dans la fabrication des mortiers améliore légèrement la résistance en compression.

De manière générale, plus le taux de substitution augmente, plus la résistance en compression diminue pour des mortiers utilisant du sable recyclé et les mortiers avec du sables recyclés carbonatés de béton ont une meilleure résistance en compression que les mortiers fabriqués avec du sable recyclé non-carbonaté. La TABLE 3.10 reprend les différents résultats du test de résistance en compression.

		Résistance en compression [MPa]		Ecart-type		Résistance relative [%]	
		28 j	56 j	28 j	56 j	28 j	56 j
REF		61.00	64.77	1.55	0.94	100	100
SR25 BL	Non-carbonaté	65.07	68.92	1.13	1.63	106.67	106.41
	Carbonaté	63.75	67.26	2.55	2.93	104.51	103.86
SR50 BL	Non-carbonaté	58.00	67.87	3.23	0.68	95.08	104.79
	Carbonaté	63.08	66.89	1.85	3.71	103.41	103.27
SR25 HO	Non-carbonaté	56.35	58.69	0.84	0.65	92.28	90.61
	Carbonaté	58.96	65.97	0.88	0.75	96.66	101.85
SR50 HO	Non-carbonaté	50.23	54.38	0.93	2.73	80.34	83.96
	Carbonaté	58.19	63.25	2.00	0.98	95.39	97.65
SR25 LAB	Non-carbonaté	47.19	45.99	0.53	0.61	77.36	71.01
	Carbonaté	45.94	49.08	1.67	1.43	75.31	75.78
SR50 LAB	Non-carbonaté	35.16	39.09	1.09	0.97	57.64	61.60
	Carbonaté	36.72	40.45	1.05	1.73	60.20	62.45

TABLE 3.10 – Tableau récapitulatif des résistances en compression

### 3.5.3 Résistance en flexion

La FIGURE 3.29 montre la résistance en flexion des différents mortiers étudiés. Les bâtonnets verts donnent la résistance à 28 jours et les jaunes donnent la résistance à 56 jours.

Nous pouvons remarquer que l'ensemble des résistances en flexion varient entre 7 MPa et 9 MPa. La résistance à 56 jours est en général du même ordre de grandeur que la résistance à 28 jours pour tous les mortiers. De plus, la résistance en flexion est nettement plus faible que la résistance en compression.

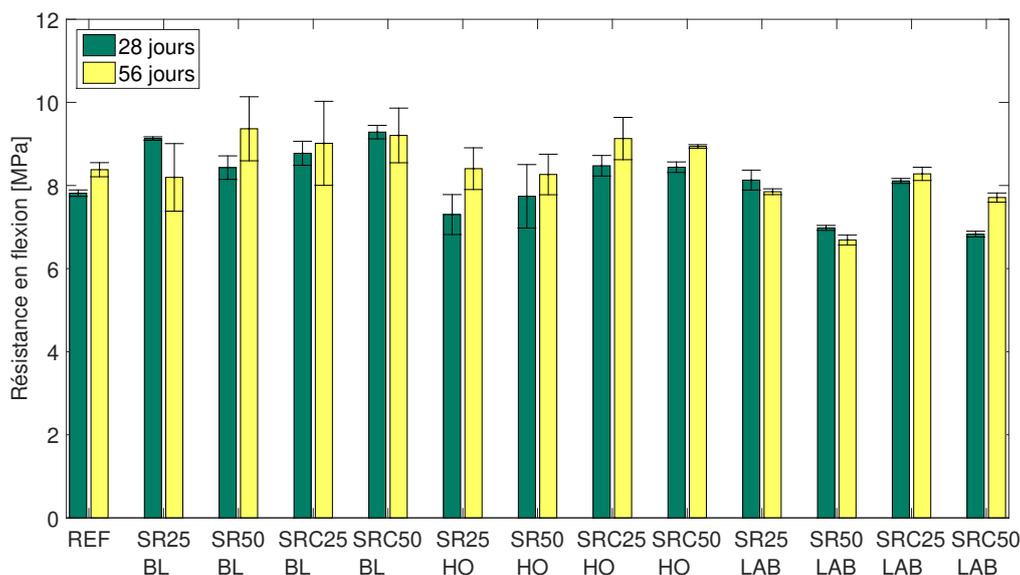


FIGURE 3.29 – Comparaison des résistances en flexion

La FIGURE 3.30 montre l'évolution de la résistance en flexion des mortiers à base de granulats recyclés de béton provenant de bloc en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons voir que l'utilisation de sable carbonaté et le taux de substitution n'ont que très peu d'impact car les résistances en flexion des mortiers fabriqués avec des granulats recyclés de béton issus de bloc varie dans un très petit intervalle.

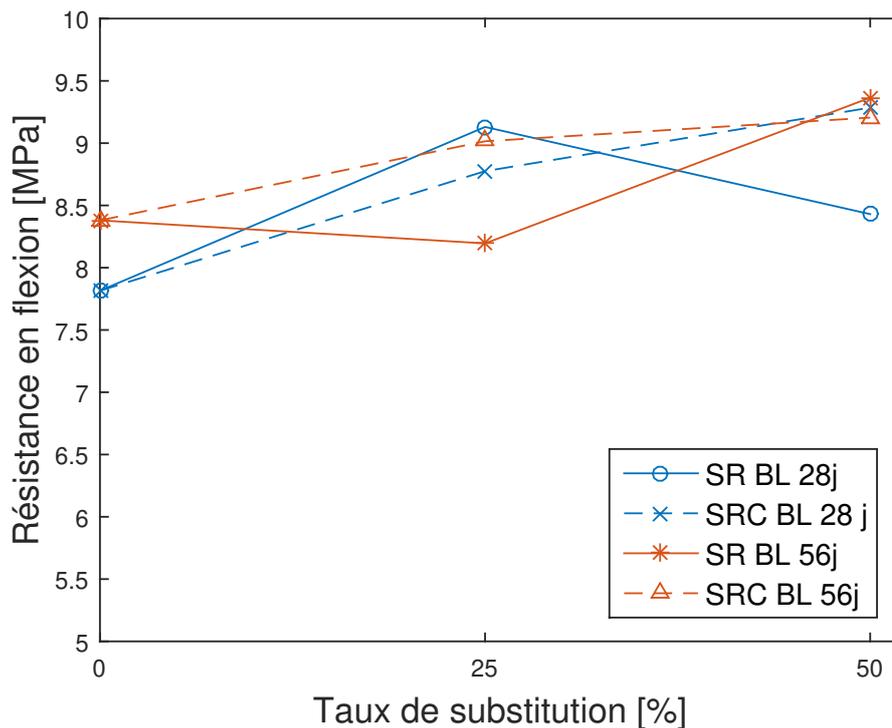


FIGURE 3.30 – Résistance en flexion des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.31 montre l'évolution de la résistance en flexion des mortiers à base de granulats recyclés de béton issus de hourdis en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons constater que le taux de substitution n'a pas d'impact car les résistances en flexion sont identiques. Par contre, l'utilisation de sable carbonaté améliore légèrement la résistance en flexion des mortiers fabriqués avec du sable recyclé provenant de hourdis.

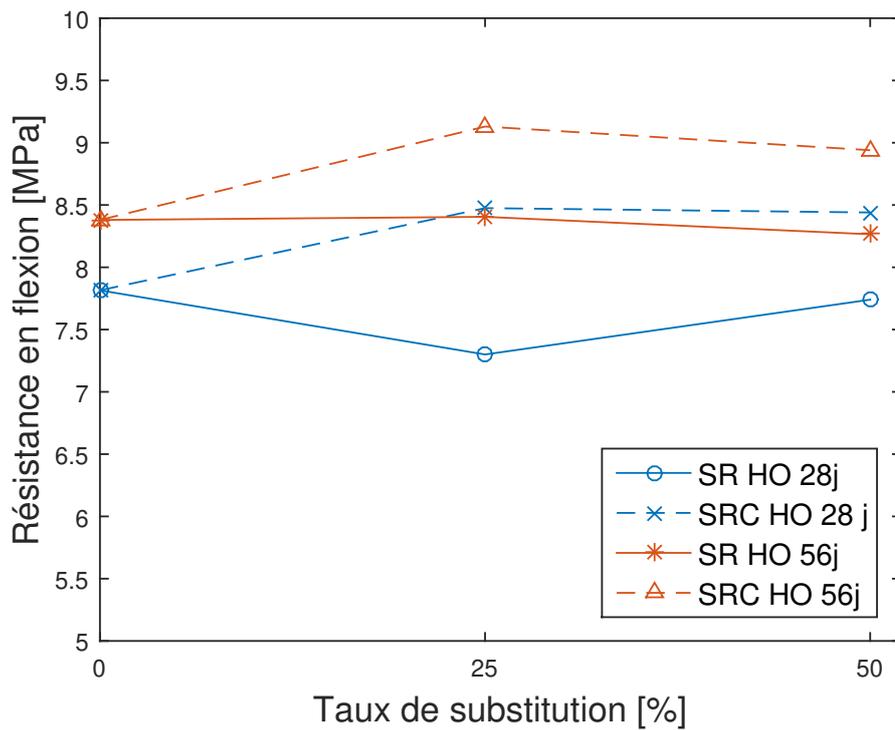


FIGURE 3.31 – Résistance en flexion des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution

La FIGURE 3.32 montre l'évolution de la résistance en flexion des mortiers à base de granulats recyclés de béton fournis par le laboratoire en fonction du taux de substitution. Les courbes des résistances à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu. Nous pouvons observer que plus la résistance en flexion diminue légèrement lorsque que le taux de substitution augmente. Concernant l'utilisation de sable carbonaté, celle-ci améliore légèrement la résistance en flexion des mortiers fabriqués avec du sable recyclé fourni par le laboratoire.

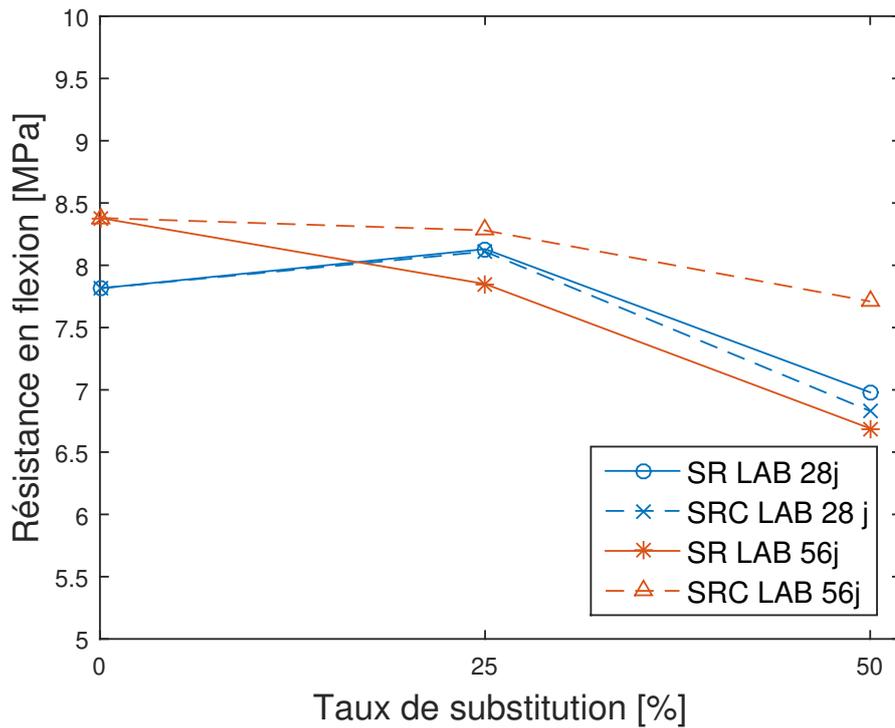


FIGURE 3.32 – Résistance en flexion des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonction du taux de substitution

De manière générale, l'utilisation de sable recyclé, peu importe qu'il soit carbonaté ou non et peu importe le taux de remplacement du sable naturel, n'a que très peu d'impact sur la résistance en flexion. Cela peut être expliqué par le fait que la rupture se fait dans la pâte de ciment constituant le mortier et que les granulats ont dès lors un effet négligeable par rapport à la résistance en flexion.

### 3.5.4 Module de Young

La FIGURE 3.33 montre le module dynamique de Young des différents mortiers étudiés. Les bâtonnets verts donnent le module à 28 jours et les jaunes donnent le module à 56 jours.

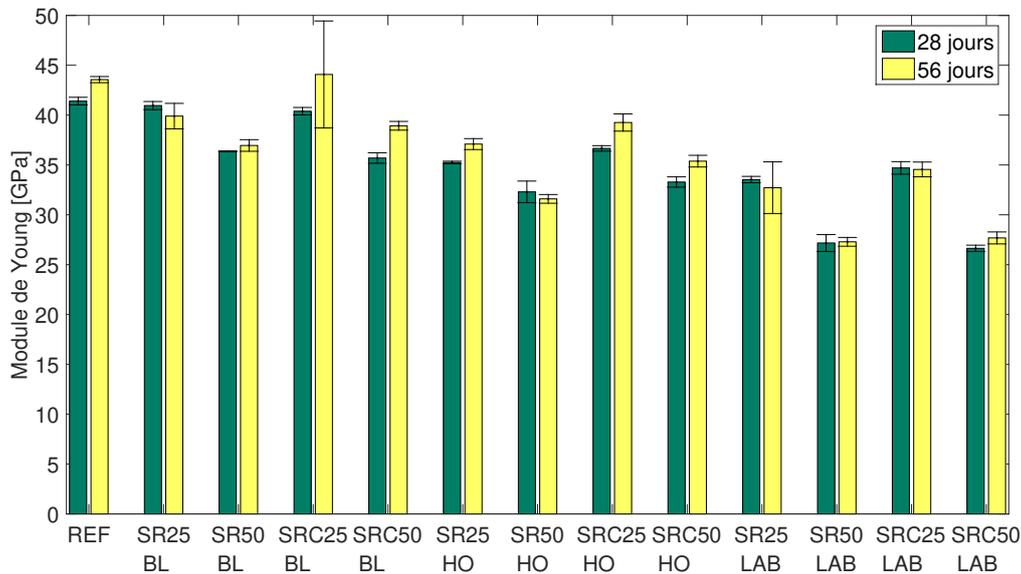


FIGURE 3.33 – Comparaison des modules de Young

Dans un premier temps, nous pouvons remarquer que plus la substitution du sable naturel par du sable recyclé augmente, plus le module de Young diminue. De manière générale, le module de Young est plus grand à 56 jours qu'à 28 jours. Ensuite, nous pouvons constater que l'utilisation de sable recyclé dans la fabrication de mortier diminue le module de Young puisque tous les mortiers ayant une fraction de sable recyclé dans leur composition ont un module plus faible que le mortier de référence. Nous pouvons également voir que le module de Young des mortiers fabriqués avec du sable recyclé de bloc est supérieur au module de Young des mortiers à base de sable de hourdis. Le module de Young de ces derniers est plus grand que le module des mortiers fabriqués avec du sable recyclé fourni par le laboratoire.

Les FIGURE 3.34, FIGURE 3.35 et FIGURE 3.36 représentent respectivement l'évolution de module de Young en fonction du taux de substitution des mortiers fabriqués avec du sable recyclé de bloc, de hourdis et fourni par le laboratoire. Sur ces graphiques, les courbes des modules d'élasticité à 28 jours sont en bleu et celles à 56 jours sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu.

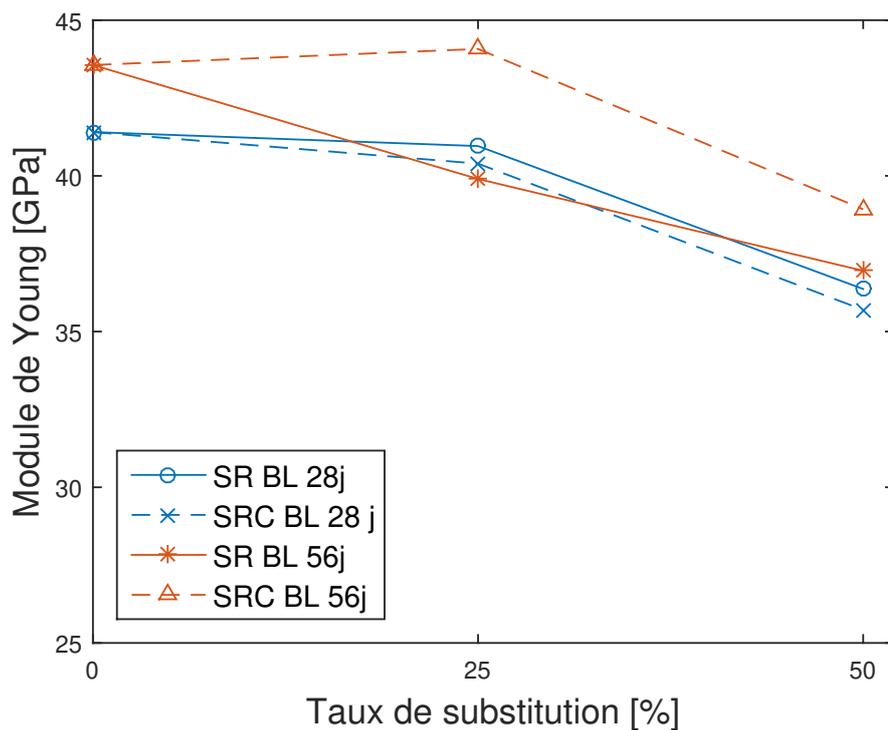


FIGURE 3.34 – Module de Young des mortiers à base de granulats de blocs en fonction du taux de substitution

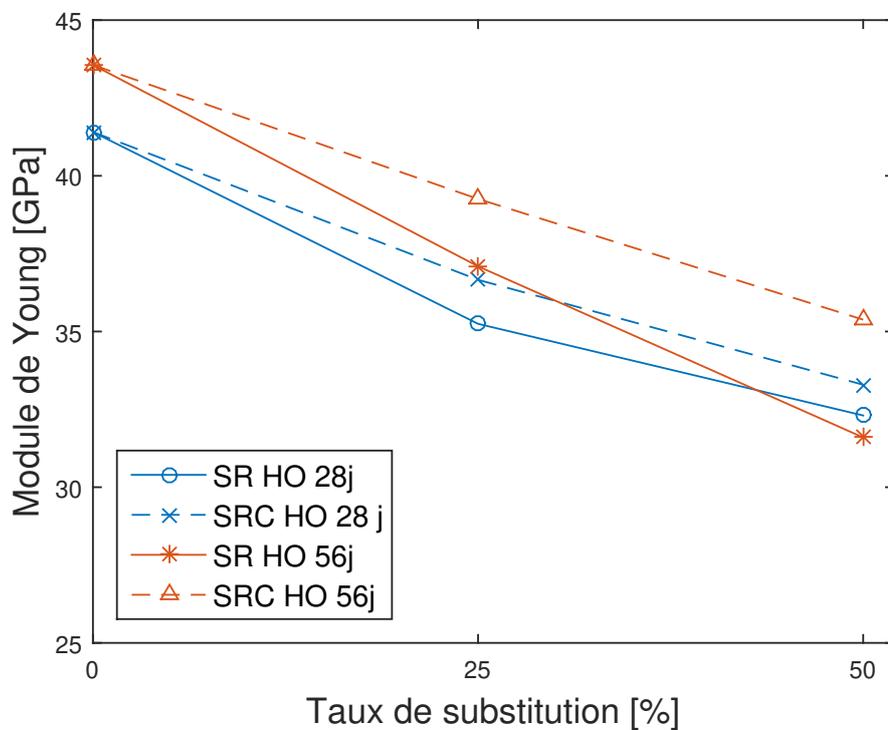


FIGURE 3.35 – Module de Young des mortiers à base de granulats de hourdis en fonction du taux de substitution

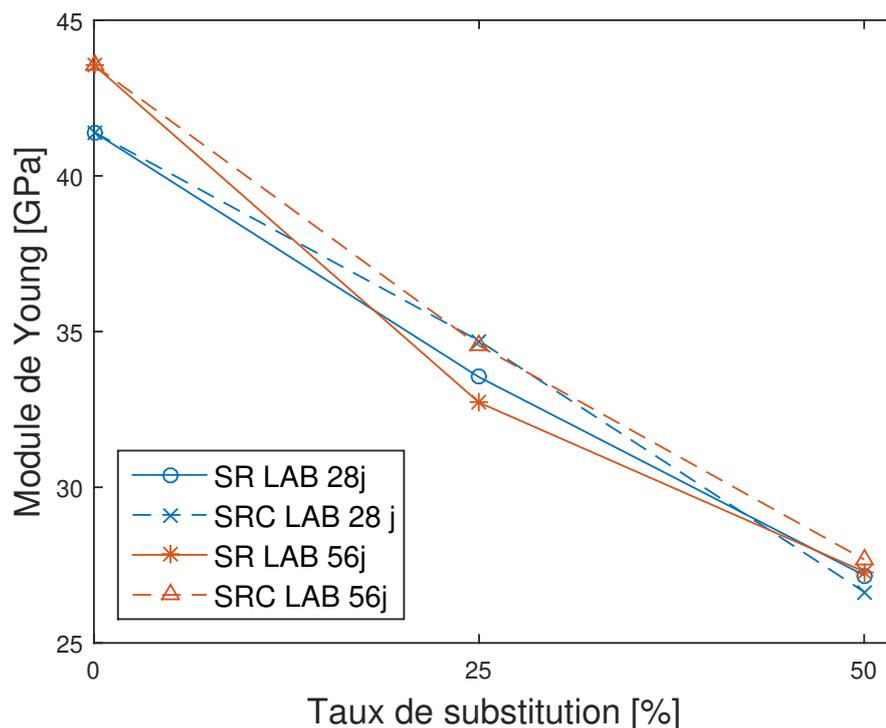


FIGURE 3.36 – Module de Young des mortiers à base de granulats du laboratoire en fonction du taux de substitution

Ces graphes permettent de montrer plus en détail l'impact de l'utilisation de sable recyclé carbonaté de béton. Nous pouvons observer que les mortiers fabriqués avec du sable recyclé carbonaté ont un module de Young plus élevé que leurs homologues fabriqués avec du sable recyclé non-carbonaté. Cela peut être expliqué par le fait que la carbonatation réduit la porosité des sables recyclés. Cette diminution de porosité a pour conséquence d'augmenter la densité des mortiers fabriqués avec ces sables carbonatés et d'augmenter leur module de Young.

De manière générale, plus la quantité de sable recyclé utilisée dans la fabrication de mortier est importante, plus le module de Young des mortiers diminue. L'utilisation de sable recyclé carbonaté au lieu de sable non-carbonaté dans la fabrication réduit moins fortement le module de Young. Cela rejoint la conclusion par rapport à la résistance en compression.

### 3.5.5 Absorption capillaire

La FIGURE 3.37 montre les coefficients d'absorption d'eau obtenus avec la formule 3.11 pour les mortiers fabriqués à base de sable recyclé de bloc et de hourdis ainsi que pour le mortier de référence. Les barrettes turquoises représentent les mortiers fabriqués à partir de sable non-carbonaté de béton et les barrettes violettes représentent les mortiers fabriqués à base de sable carbonaté.

Ce graphique montre que plus le taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé est important, plus le coefficient d'absorption capillaire est important et que les mortiers à base de sable recyclé ont un coefficient d'absorption d'eau plus élevé que le mortier de référence. L'utilisation de sable recyclé carbonaté améliore la qualité des mortiers par rapport aux mortiers à base de de sable recyclé non-carbonaté puisque le coefficient d'absorption d'eau est plus faible. Cependant, ce graphe illustre des coefficients d'absorption qui montrent uniquement la première phase de l'absorption capillaire car le calcul se base sur des mesures effectuées après une immersion partielle de 10 et 90 minutes.

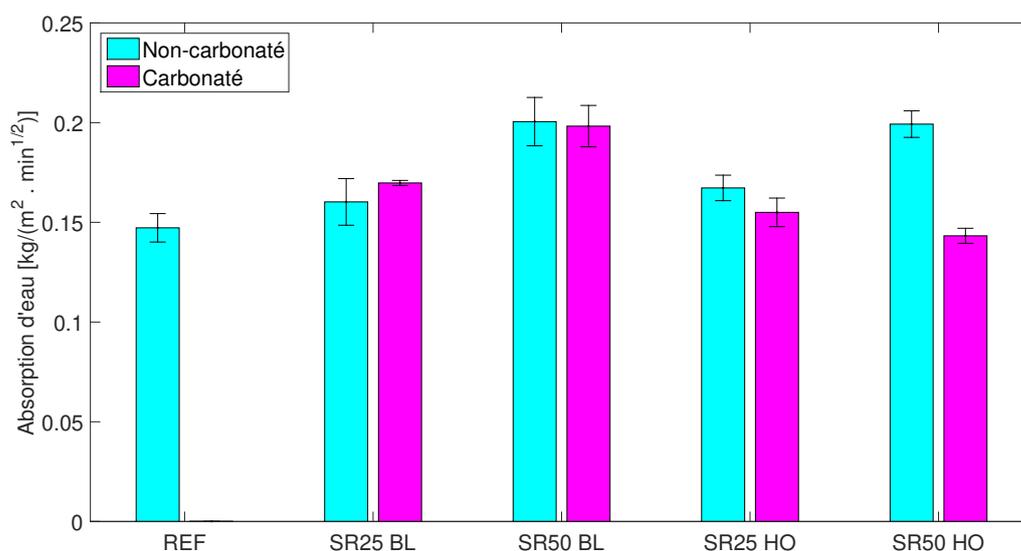


FIGURE 3.37 – Comparaison de l'absorption capillaire des mortiers

Les FIGURE 3.38 et FIGURE 3.39 montrent la prise de masse par unité de surface immergée en fonction du temps ce qui permet de déduire plus facilement l'impact du sable recyclé sur l'absorption capillaire des mortiers. Sur ces graphiques, les courbes des mortiers fabriqués avec 25% de sable recyclé à la place du sable naturel sont en bleu et ceux avec 50% sont en orange. Les courbes des mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté sont en trait plein et ceux avec du sable carbonaté en trait discontinu.

Dans un premier temps, nous pouvons constater que l'absorption capillaire des mortiers s'effectue selon deux cinétiques. Avant 24 heures d'immersion partielle, l'absorption capillaire est rapide puisque le gain en masse des mortiers est rapide. Après ce laps de temps, l'absorption capillaire se fait de manière beaucoup plus lente. Cela peut être au fait que les échantillons de mortiers utilisés pour le test sont presque totalement saturés

en eau après 24 heures au vu de leur petite dimension.

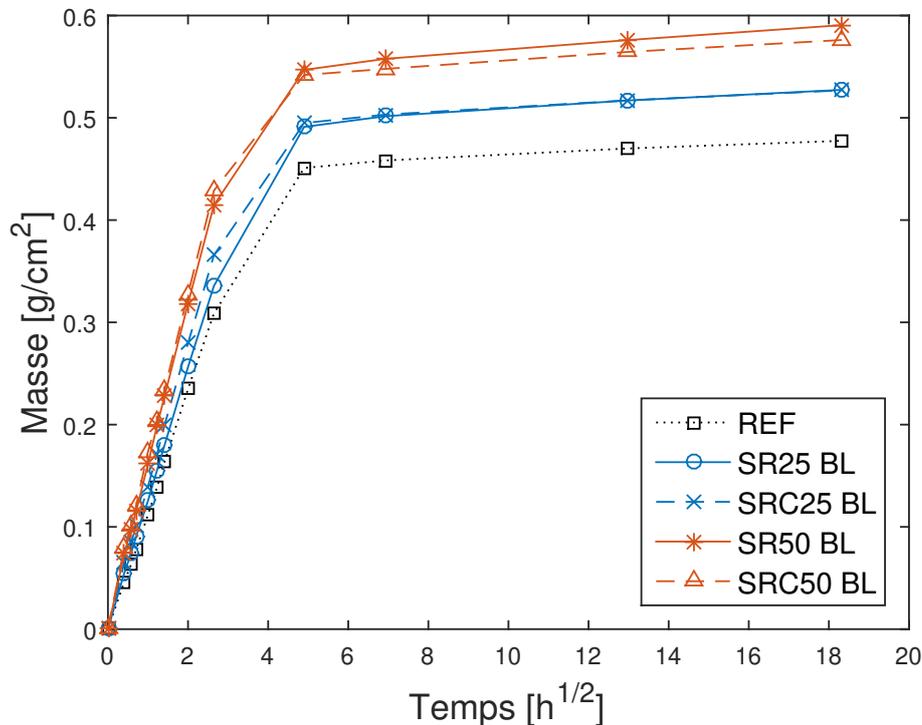


FIGURE 3.38 – Évolution de l'absorption capillaire des mortiers à base de granulats de bloc

Ces deux graphiques permettent également de bien mettre en évidence que l'utilisation de sable recyclé carbonaté dans la fabrication de mortier augmente l'absorption capillaire de ces derniers et plus le taux de substitution est élevé plus l'absorption capillaire augmente. De plus, nous pouvons remarquer que la carbonatation du sable recyclé permet de réduire l'absorption d'eau mais ne permet pas d'atteindre l'absorption d'eau d'un mortier sans sable recyclé.

Nous pouvons également observer que la carbonatation a un impact plus favorable sur le sable de hourdis que sur le sable de bloc ce qui est dû à la proportion de pâte de ciment dans le sable recyclé qui est plus importante pour le sable issu de hourdis que pour le sable provenant de bloc.

Nous pouvons conclure que l'utilisation de sable recyclé dans les mortier augmente la porosité de ces derniers et les rend moins durable puisqu'ils seront plus facilement impactés par le cycle gel-dégel ou par des attaques chimiques néfastes pour la longévité des mortiers. La carbonatation des sables recyclés permet de réduire la porosité des mortiers mais sans atteindre la porosité d'un mortier fabriqué uniquement avec du sable naturel.

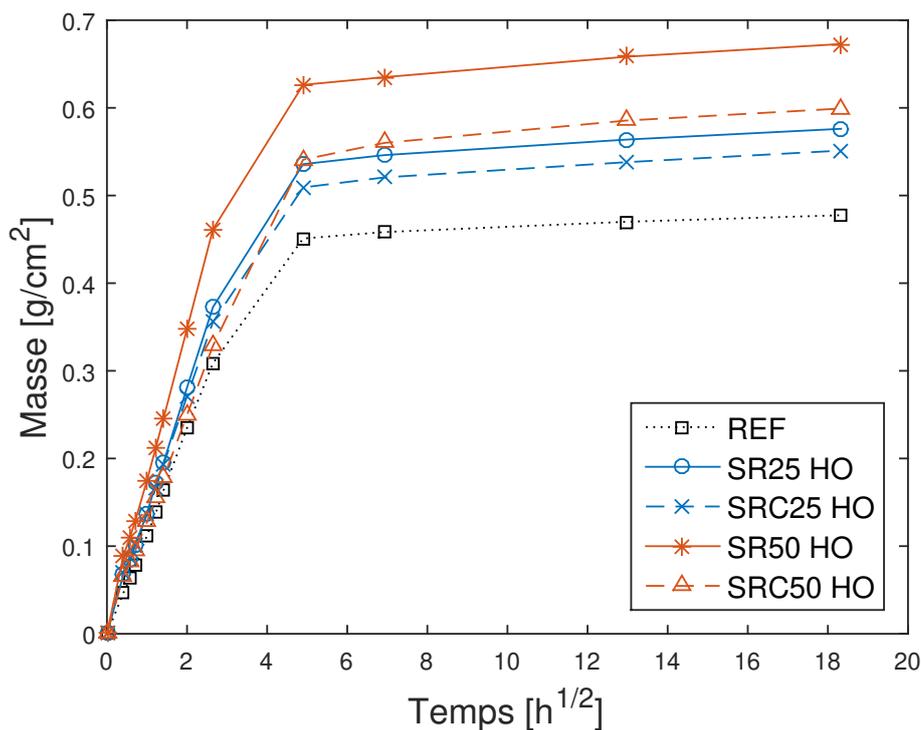


FIGURE 3.39 – Évolution de l'absorption capillaire des mortiers à base de granulats de hourdis

### 3.5.6 Carbonatation

Les FIGURE 3.40, FIGURE 3.41, FIGURE 3.42, FIGURE 3.43, FIGURE 3.44, FIGURE 3.45, FIGURE 3.46, FIGURE 3.47 et FIGURE 3.48 illustrent la profondeur de carbonatation en fonction du temps passé dans l'incubateur à CO<sub>2</sub> des mortiers de référence, fabriqués avec du sable recyclé de bloc et du sable recyclé provenant de hourdis. Les courbes en bleu correspondent à la profondeur de carbonatation de la face 1, en rouge de la face 2, en jaune de la face 3 et en mauve de la face 4 (voir la SECTION 3.3.7 pour la numérotation des faces).

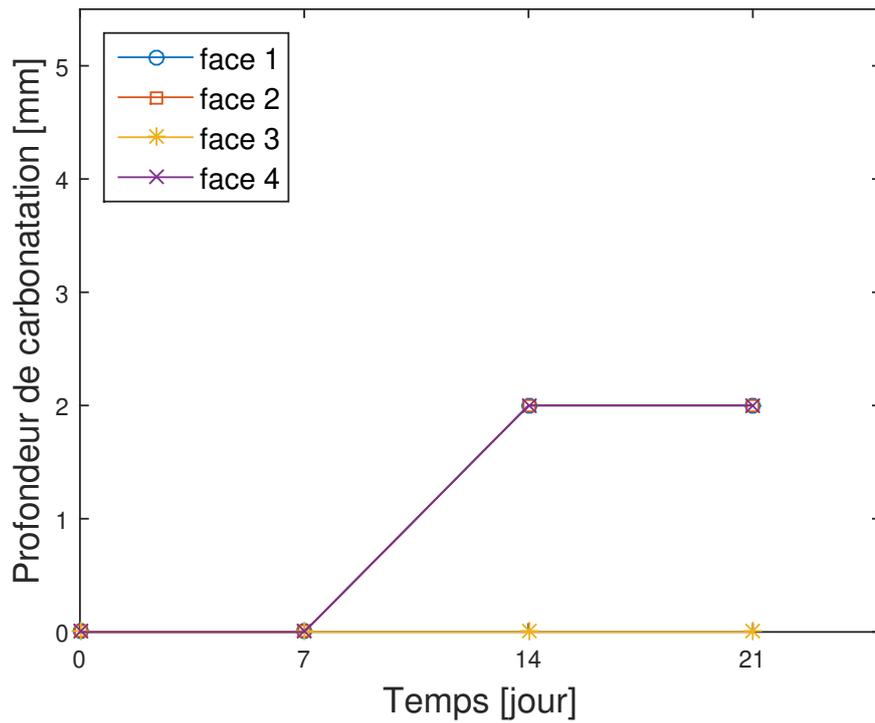


FIGURE 3.40 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier REF

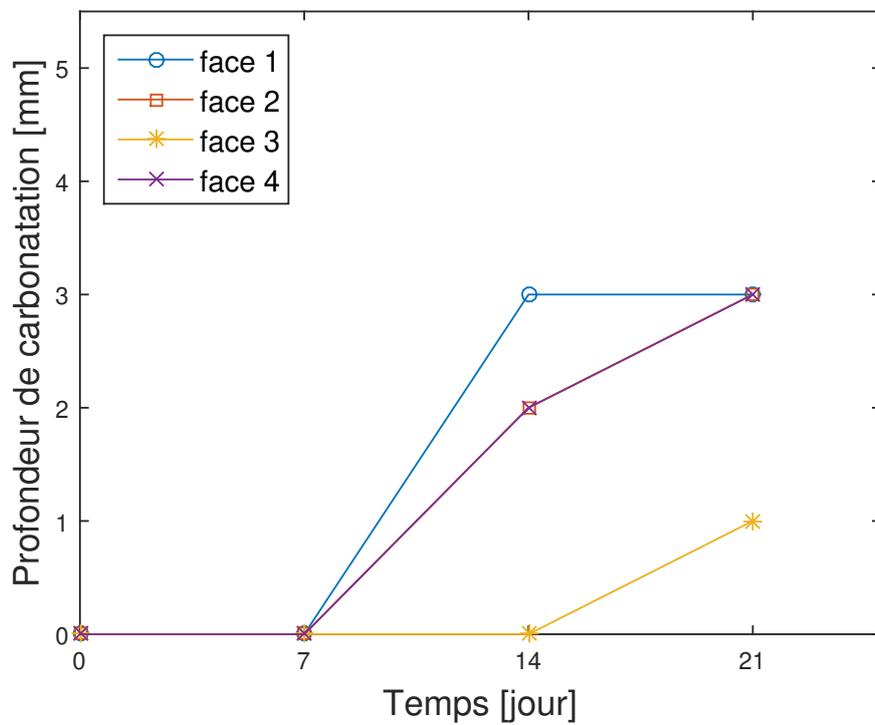


FIGURE 3.41 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR25 BL

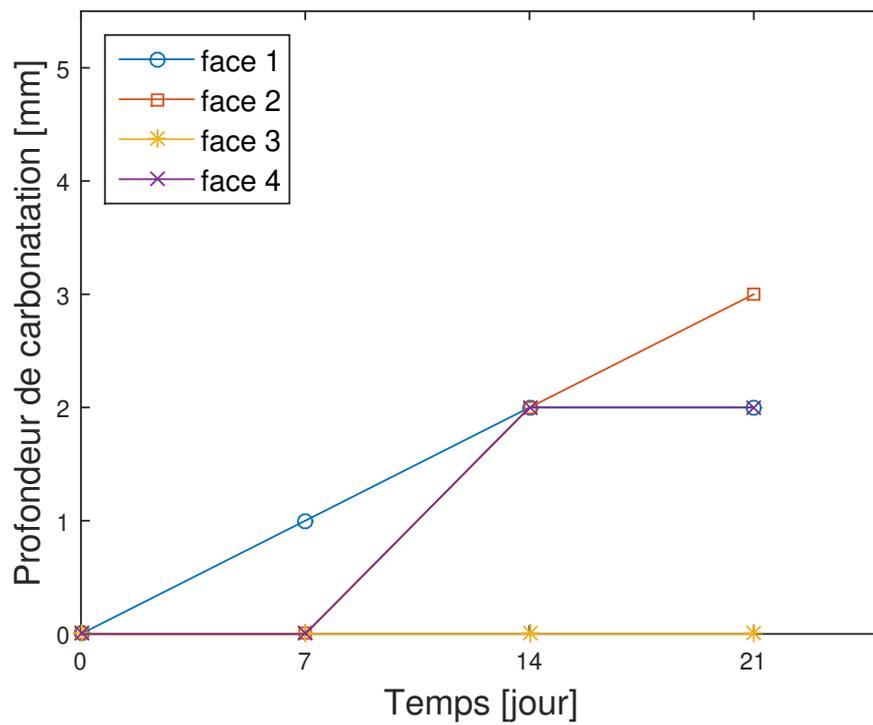


FIGURE 3.42 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC25 BL

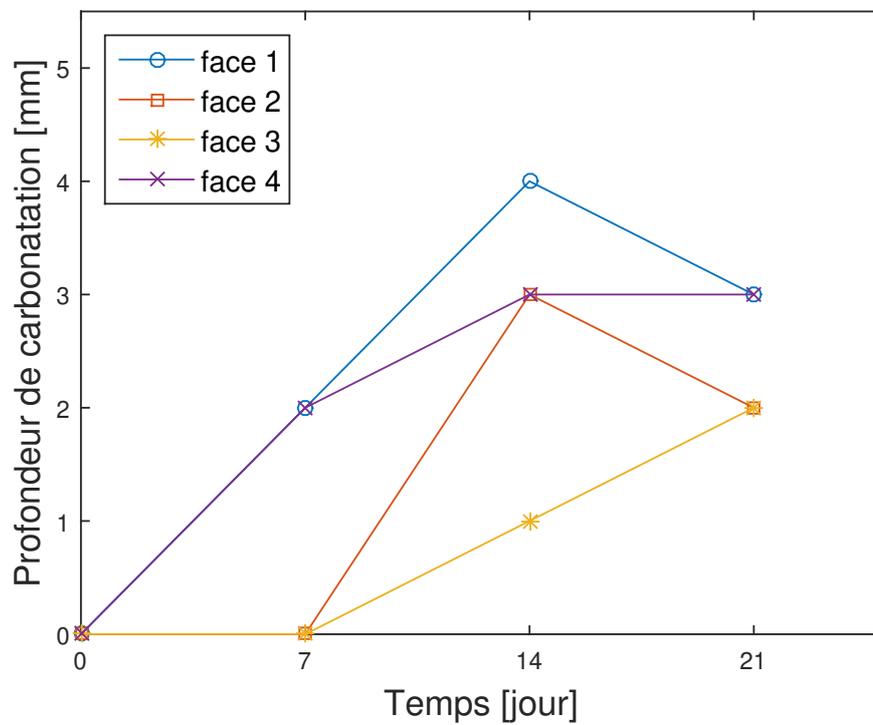


FIGURE 3.43 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR50 BL

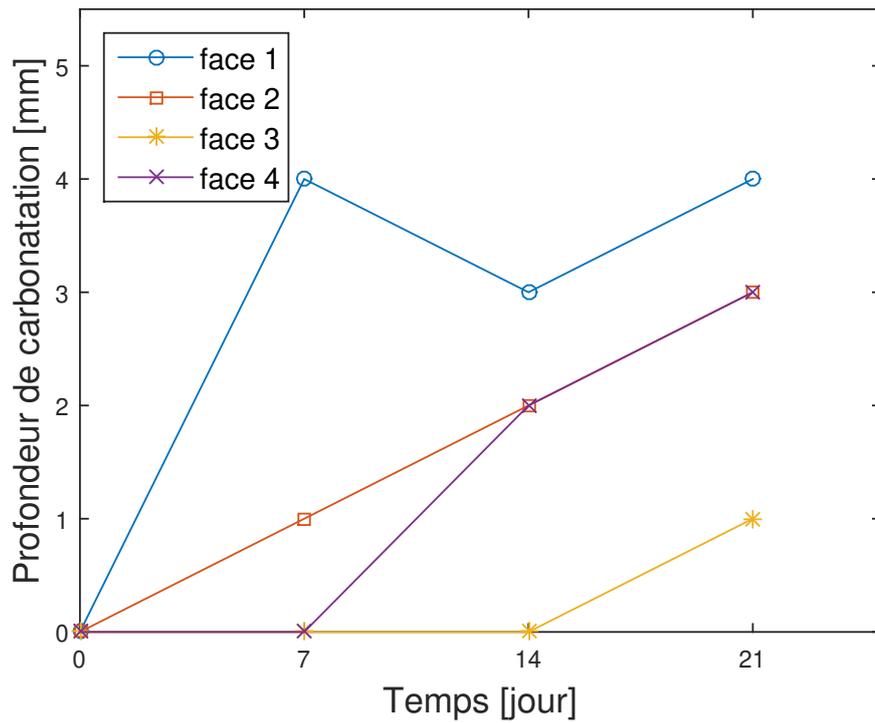


FIGURE 3.44 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC50 BL

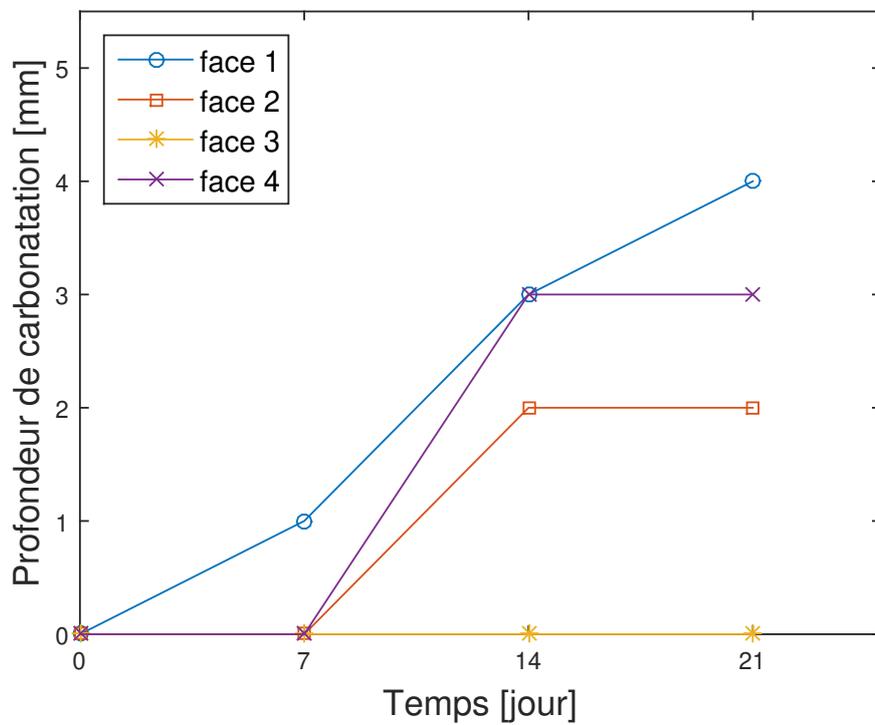


FIGURE 3.45 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR25 HO

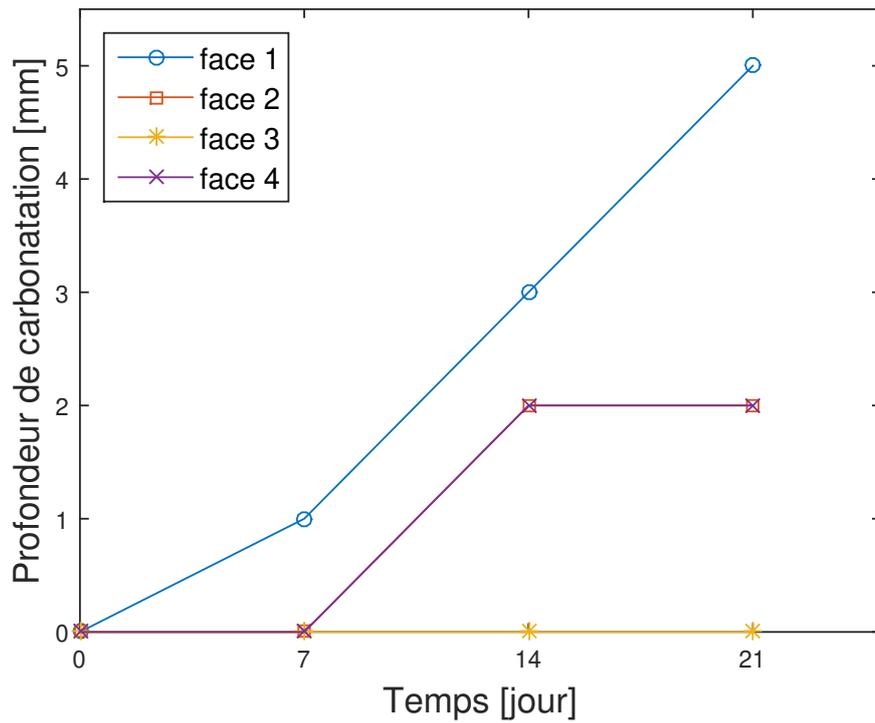


FIGURE 3.46 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC25 HO

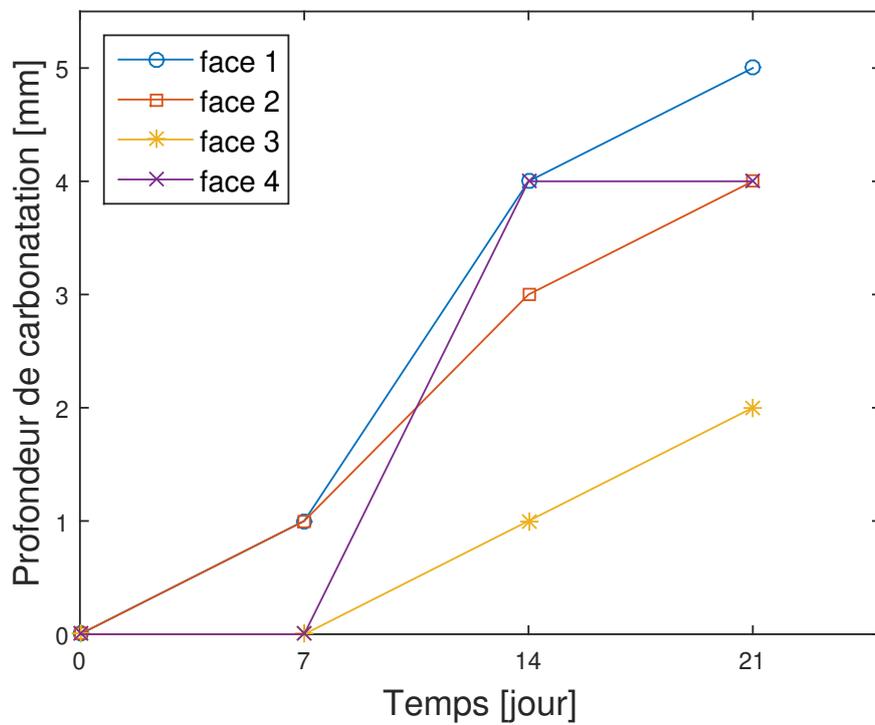


FIGURE 3.47 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SR50 HO

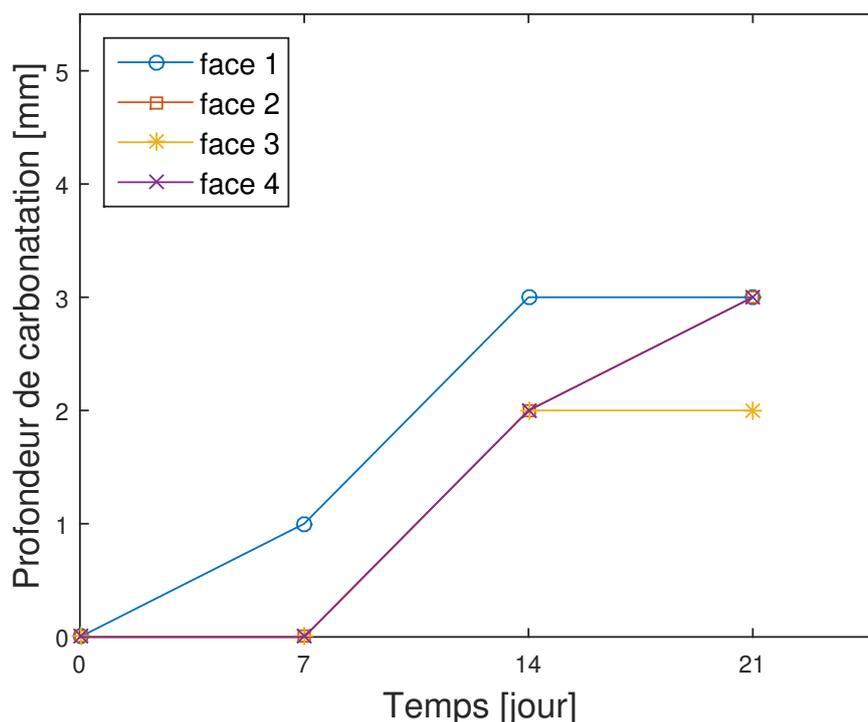


FIGURE 3.48 – Profondeur de carbonatation en fonction des faces du mortier SRC50 HO

Nous pouvons observer que la profondeur de carbonatation est généralement supérieure pour les faces 1 et inférieure pour les faces 3 par rapport aux faces 2 et 4. Cela peut être expliqué par la manière dont les faces ont été numérotées. Les faces 1 correspondent à la face se trouvant au dessus du moule lors de la fabrication des prismes 4\*4\*16 et les faces 3 correspondent à la face se situant au fond du moule. Les moules ayant été tassés au moyen d'un appareil à choc, les bulles d'air se trouvant dans les mortiers ont migré du fond du moule vers la surface libre, ce qui rend les faces 3 moins poreuses et les faces 1 plus poreuses que les faces 2 et 4. Dès lors, les profondeurs de carbonatation correspondantes aux faces 1 et 3 ne sont pas prises pour étudier l'impact de l'utilisation de sable recyclé de béton dans sur la profondeur de carbonatation.

Les FIGURE 3.49, FIGURE 3.50 et FIGURE 3.51 illustrent respectivement la profondeur de carbonatation moyenne des différents mortiers après 7, 14 et 21 jours. Les barrettes turquoise représentent les mortiers fabriqués avec du sable non-carbonaté de béton et les barrettes violettes représentent les mortiers ayant dans leur composition du sable recyclé carbonaté. Les résultats de la profondeur de carbonatation à 0 jour de traitement ne sont pas illustrés car les profondeurs sont tous nulles.

La TABLE 3.11 reprend les profondeurs moyennes de carbonatation par mortier en fonction du temps. Nous pouvons constater que plus la substitution du sable naturelle par du sable recyclé augmente, plus la profondeur de carbonatation augmente. L'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire légèrement cette profondeur de carbonatation sans toutefois être inférieure à celle du mortier de référence.

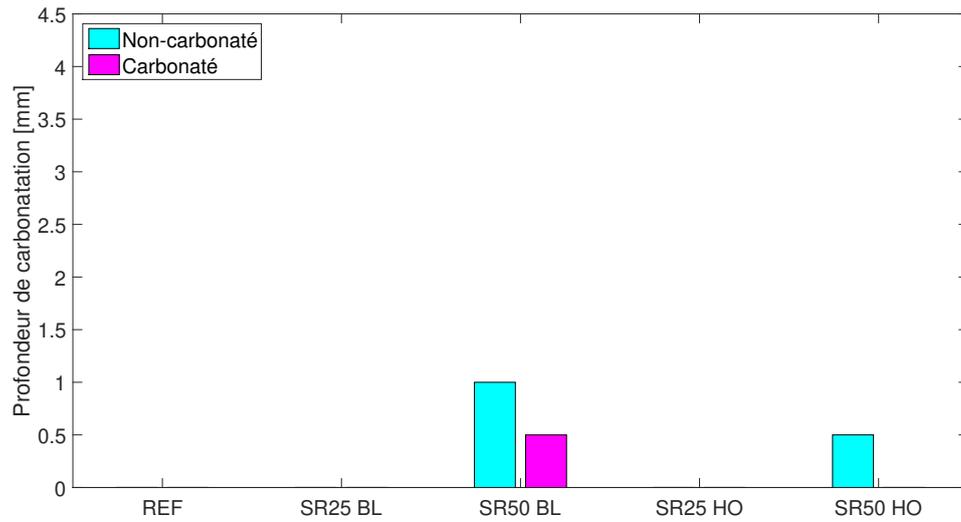


FIGURE 3.49 – Profondeur de carbonatation moyenne après 7 jours

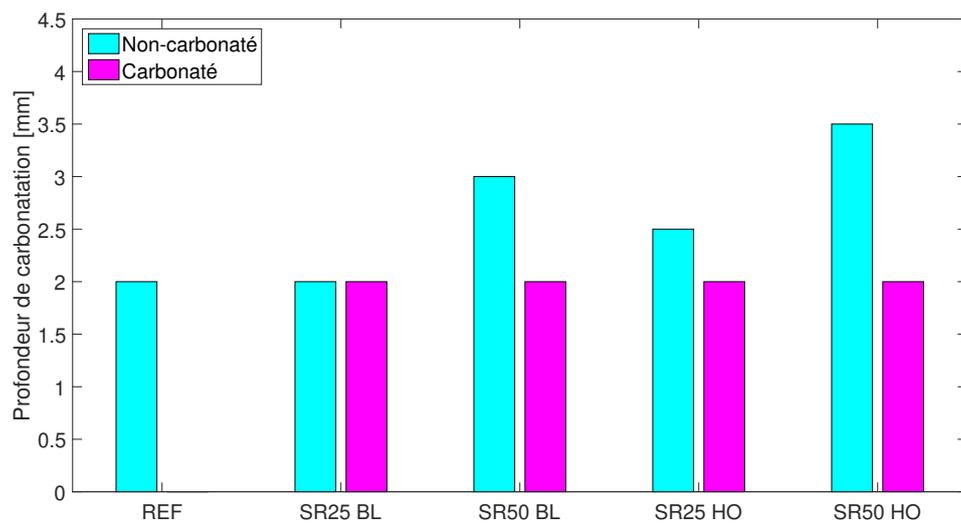


FIGURE 3.50 – Profondeur de carbonatation moyenne après 14 jours

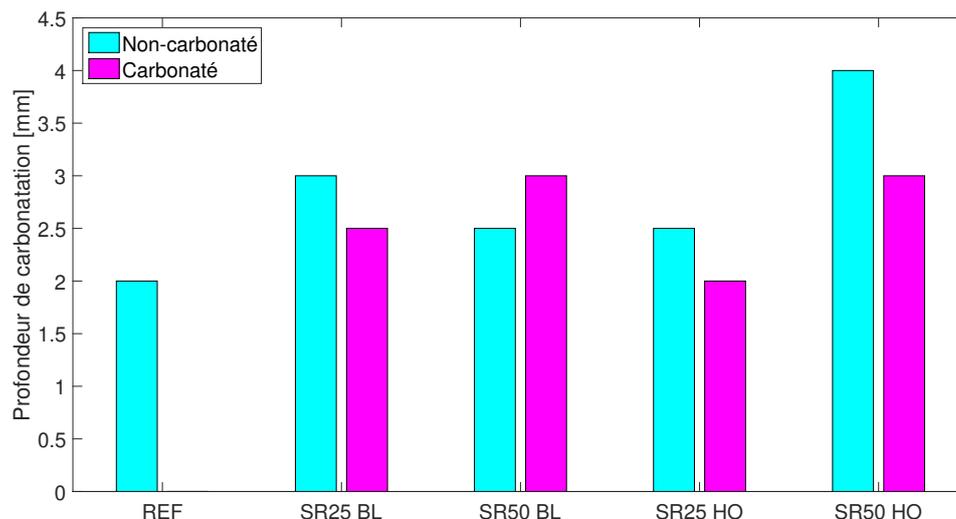


FIGURE 3.51 – Profondeur de carbonatation moyenne après 21 jours

jour(s)	REF		SR25 BL		SR50 BL		SR25 HO		SR50 HO	
	N-C <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	N-C	C	N-C	C	N-C	C	N-C	C
0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	-	0	0	1	0.5	0	0	0.5	0
14	2	-	2	2	3	2	2.5	2	3.5	2
21	2	-	3	2.5	2.5	3	2.5	2	4	3

TABLE 3.11 – Profondeur de carbonatation des différents mortiers [mm]

Nous avons pu voir à la SECTION 2.4.5 que la profondeur de carbonatation peut être modélisée par une relation entre la racine carré du temps et un coefficient  $k_c$  dépendant des caractéristiques du mortier ainsi que de l'environnement dans lequel il se situe (équation 2.9). Une régression linéaire au moindre carré a été réalisée se basant sur les résultats obtenus afin d'obtenir ce coefficient  $k_c$  pour les différents mortiers testés. Les coefficients sont repris à la TABLE 3.12 et la régression linéaire est illustrée aux FIGURE 3.52, FIGURE 3.53, FIGURE 3.54, FIGURE 3.55, FIGURE 3.56, FIGURE 3.57, FIGURE 3.58, FIGURE 3.59 et FIGURE 3.60

coefficient	REF		SR25 BL		SR50 BL		SR25 HO		SR50 HO	
	N-C	C	N-C	C	N-C	C	N-C	C	N-C	C
$k_c$	0.48	-	0.63	0.55	0.63	0.63	0.60	0.48	0.91	0.63
$x_{c,0}$	-0.31	-	-0.48	-0.39	-0.10	-0.34	-0.38	-0.31	-0.49	-0.48

TABLE 3.12 – Coefficient de carbonatation  $k_c$  issu de la régression linéaire

Nous pouvons constater que plus la substitution du sable naturelle par du sable recyclé augmente, plus le coefficient  $k_c$  augmente et que le sable recyclé carbonaté permet

b. N-C : Non-carbonaté

c. C : Carbonaté

de réduire légèrement ce coefficient de carbonatation sans toutefois être inférieure à celle du mortier de référence. Nous pouvons également observer que la carbonatation du sable recyclé a un plus grand impact sur le sable issu de hourdis que sur le sable provenant de bloc puisque la diminution du coefficient  $k_c$  est entre 20% et 30% pour le sable de hourdis alors que la réduction est entre 0% et 13% pour le sable de bloc. Cela est lié à la proportion de pâte ciment dans les sable recyclés qui est plus importante dans le sable de hourdis comparé au sable de bloc.

Pour conclure, nous pouvons dire que l'utilisation de sable recyclé augmente la profondeur de carbonatation et donc la porosité car plus un mortier est poreux plus la réaction de carbonatation est facilitée. De plus, l'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire la profondeur de carbonatation par rapport à l'utilisation de sable recyclé non-carbonaté parce que la carbonatation des sables permet de réduire leur porosité.

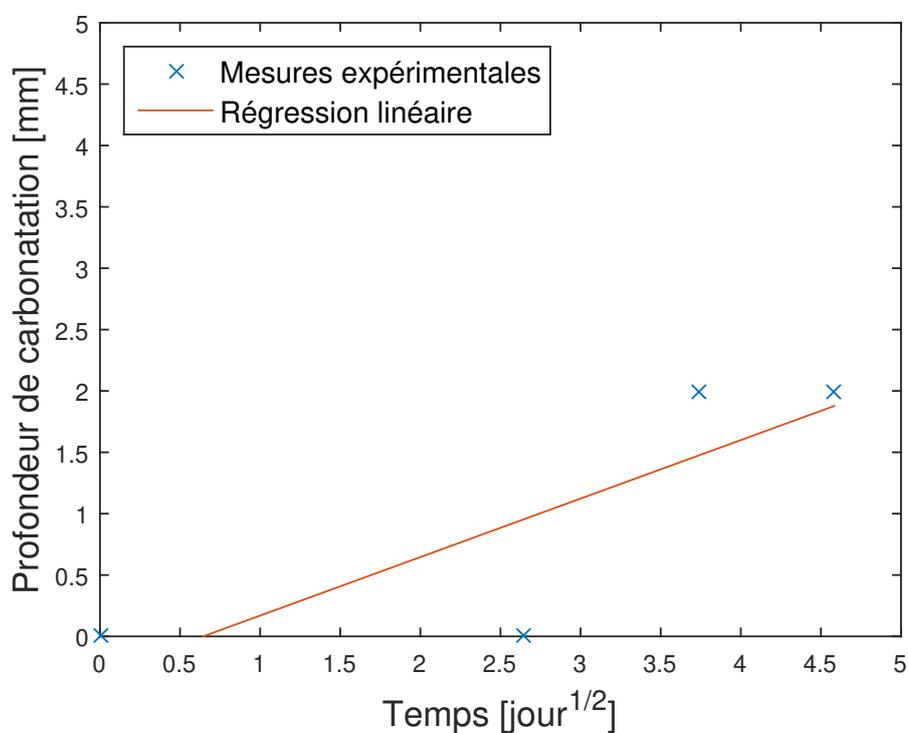
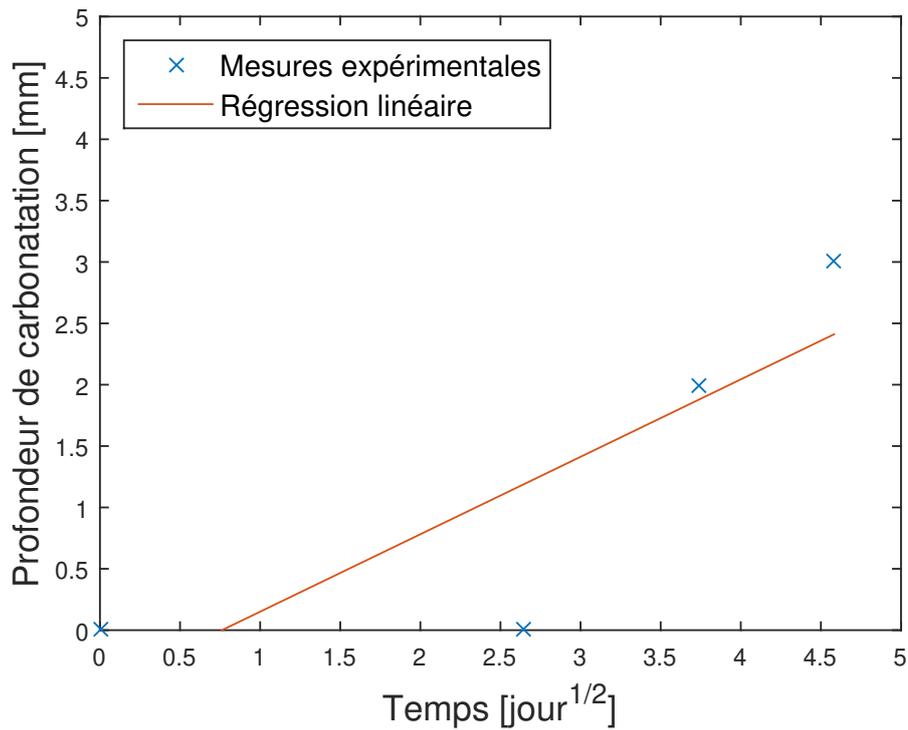
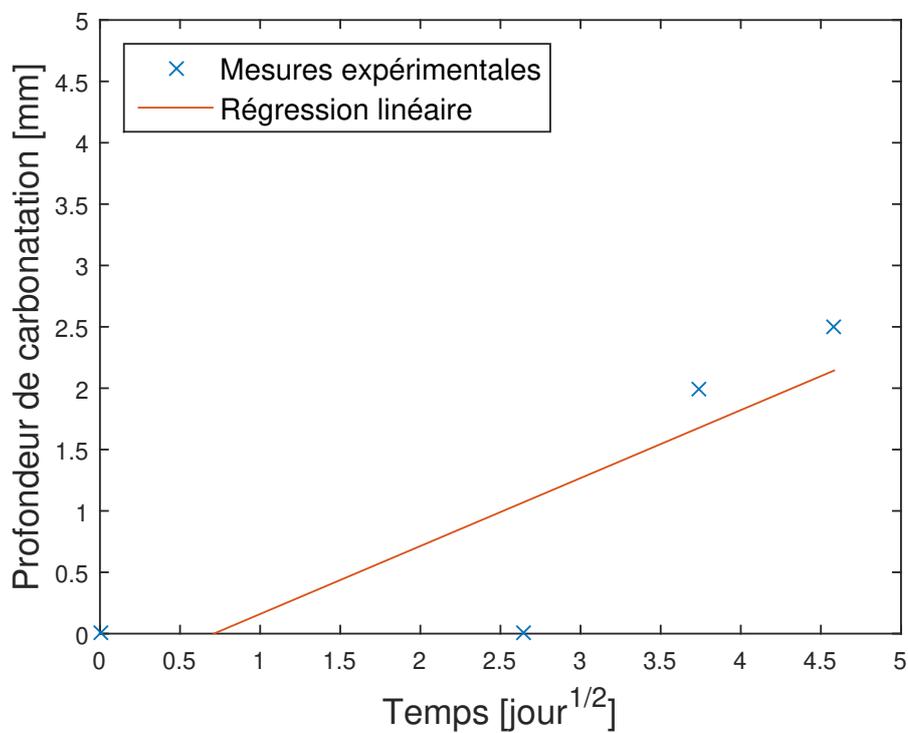
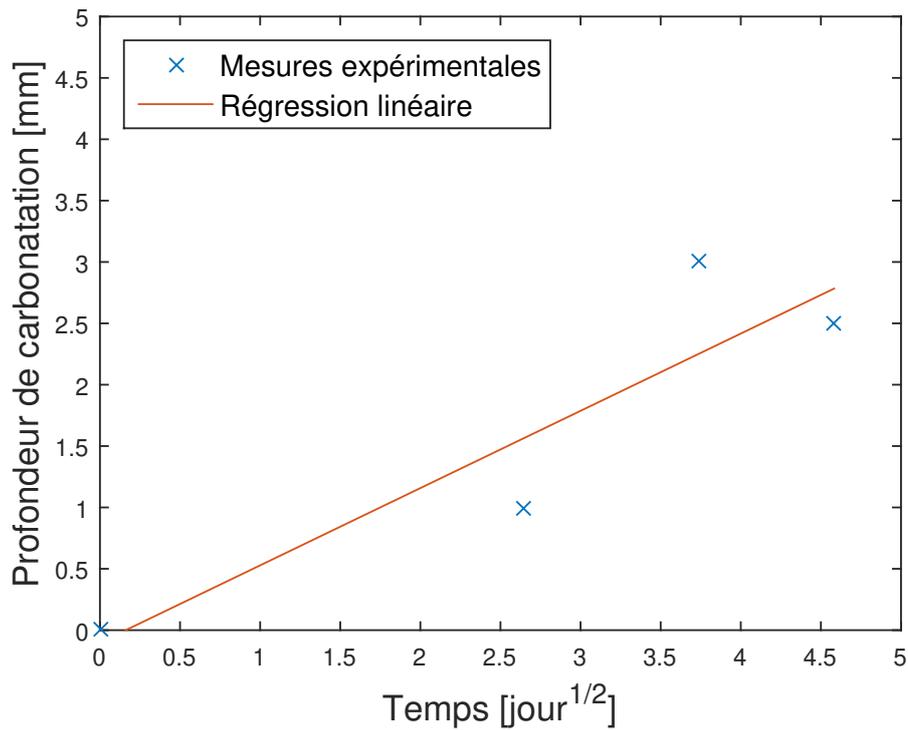
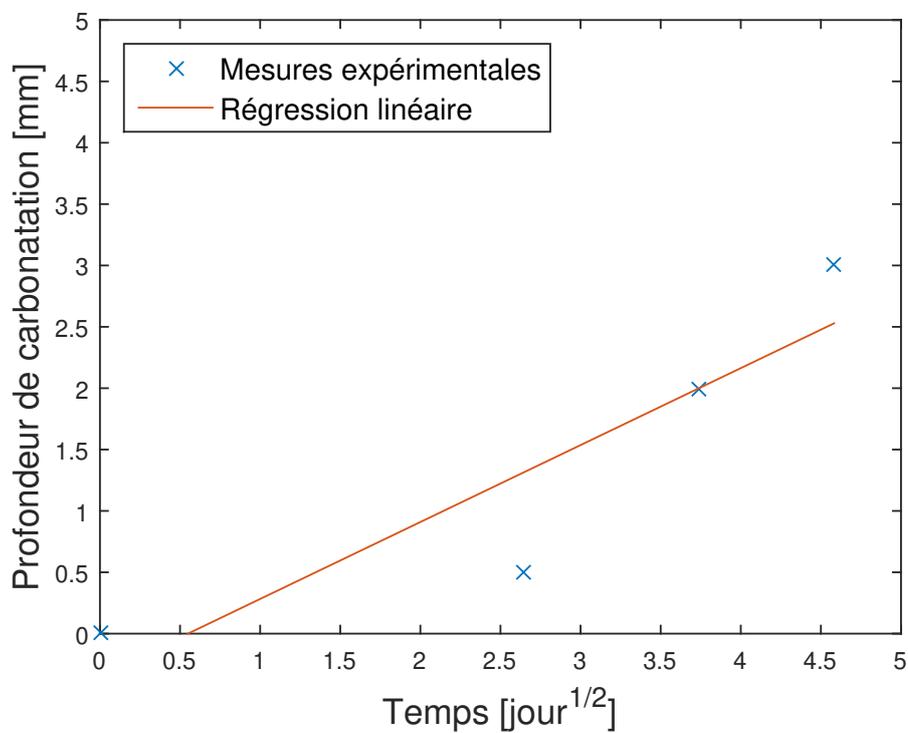
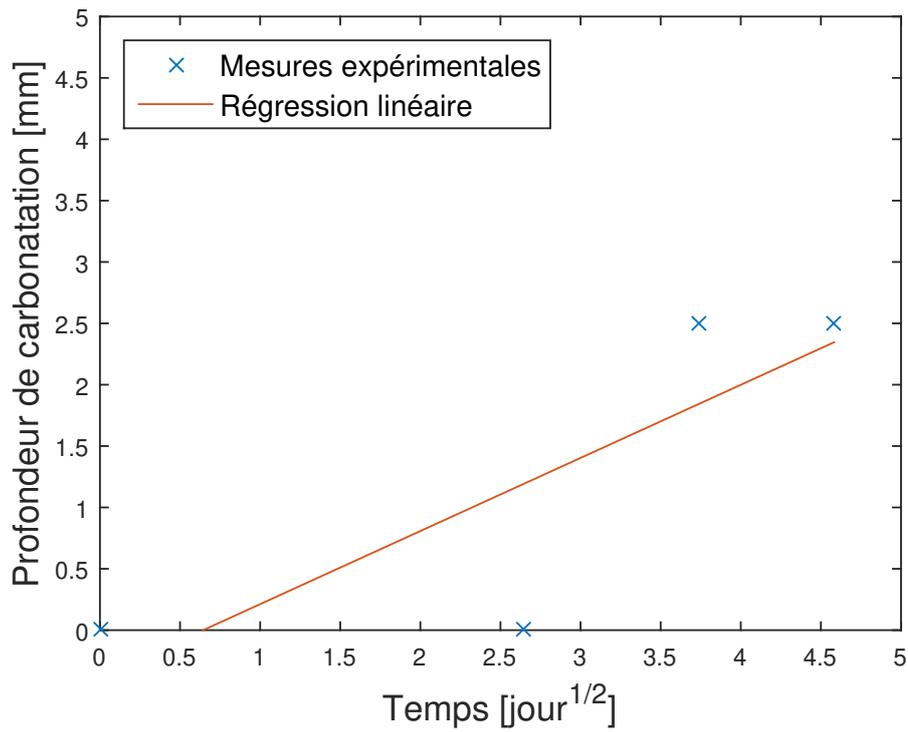
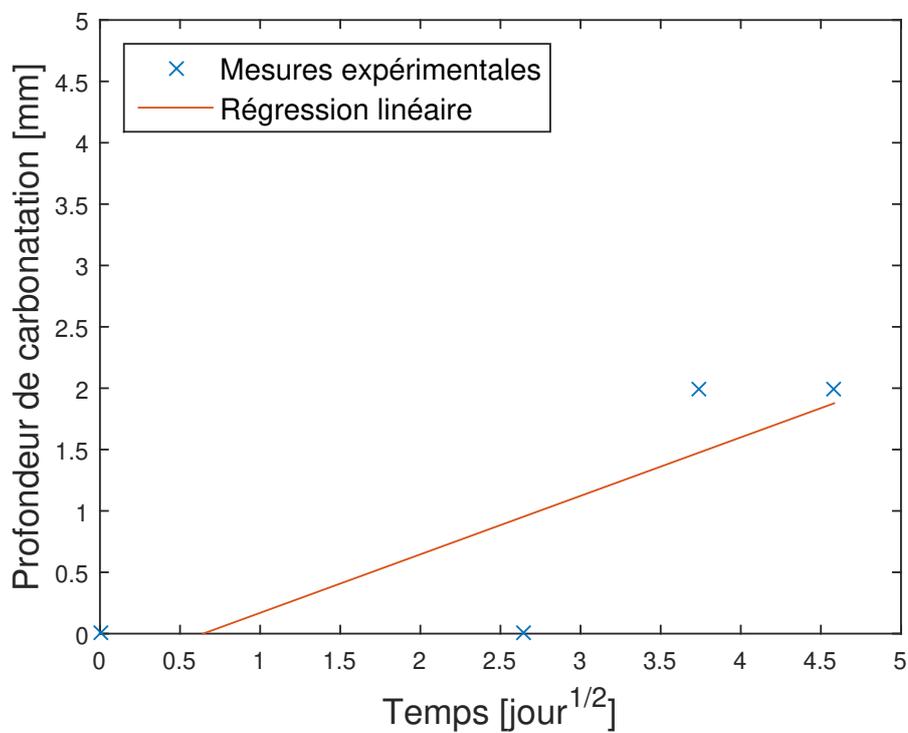
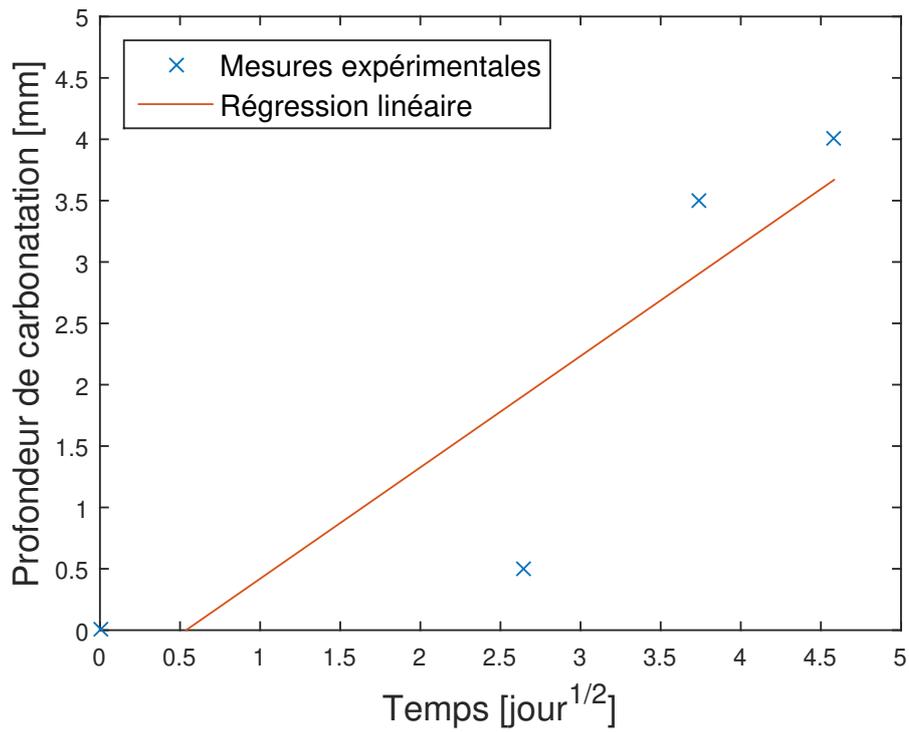
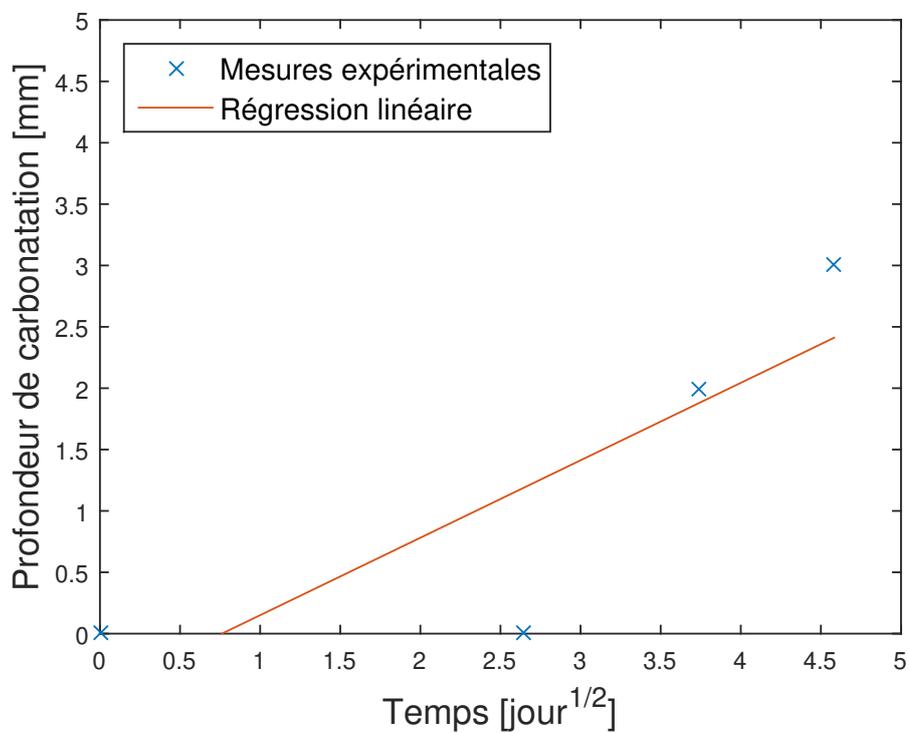


FIGURE 3.52 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier REF

FIGURE 3.53 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SR25 BLFIGURE 3.54 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SRC25 BL

FIGURE 3.55 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SR50 BLFIGURE 3.56 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SRC50 BL

FIGURE 3.57 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SR25 HOFIGURE 3.58 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SRC25 HO

FIGURE 3.59 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SR50 HOFIGURE 3.60 – Régression linéaire du coefficient de carbonatation  $k_c$  du mortier SRC50 HO

# Chapitre 4

## Conclusions et perspectives

Ce travail de fin d'étude a permis de rappeler le processus de recyclage des déchets de construction et de démolition en se focalisant sur les déchets de béton. Nous avons rappelé l'impact des différentes méthodes de recyclage et l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de nouveaux bétons et mortiers. Nous avons compris les normes qui limitent l'incorporation de granulat recyclé. Nous avons ensuite étudié l'impact de la carbonatation sur des granulats recyclés de béton. Finalement, nous avons analysé l'impact de l'utilisation des granulats recyclés carbonatés et non-carbonatés sur les propriétés des mortiers.

Concernant l'impact de la carbonatation sur les granulats, nous nous sommes concentrés sur la porosité au moyen d'un test d'absorption d'eau. Nous avons remarqué que l'absorption d'eau est plus importante pour les granulats fins (0/2) que pour les granulats grossiers (2/6.3). Cela s'explique par le fait que les granulats fins ont une teneur en pâte de ciment plus élevée et une plus grande porosité. Nous avons également constaté que la carbonatation diminue l'absorption d'eau mais d'une manière plus significative pour les granulats de petite dimension. Cela est également dû à une teneur en pâte plus importante dans les granulats recyclés de béton lorsque ceux-ci sont fins et que la teneur en pâte de ciment est plus élevée pour ces derniers. Nous avons finalement remarqué que la carbonatation a un plus gros impact sur les granulats issus de hourdis et fournis par le laboratoire que sur les granulats provenant de bloc car ils ont une teneur en pâte de ciment plus élevée.

Pour étudier l'ouvrabilité, nous avons effectué une substitution en masse et les granulats recyclés ont été au préalable saturés avant leur incorporation aux mélanges lors de la fabrication des mortiers. De manière générale, l'utilisation de sable recyclé diminue légèrement l'ouvrabilité. La carbonatation des sables recyclés a pour conséquence de réduire cette diminution.

Concernant la résistance en compression des mortiers, l'utilisation de sable recyclé diminue la résistance et plus le taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé augmente, plus la résistance diminue. La carbonatation du sable a pour conséquence de réduire cette diminution et a un effet favorable sur la résistance en compression.

La résistance des mortiers en flexion n'est pas fortement impactées par l'utilisation de granulats recyclés car la résistance en flexion est surtout liée à la résistance de la pâte de ciment formant le mortier. Néanmoins une légère amélioration a pu être constatée pour

les mortiers à base de granulats recyclés carbonatés par rapport aux mortiers à base de granulats recyclés non-carbonatés.

Concernant le module de Young, la même conclusion que celle par rapport à la résistance en compression peut être faite.

Par rapport à l'absorption capillaire des mortiers, plus la proportion en sable recyclé est importante dans le mortier, plus le mortier absorbe de l'eau. L'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire cette absorption sans toutefois atteindre celle du mortier de référence qui contient uniquement du sable naturel. L'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire la porosité des mortiers à base de sable recyclé.

Concernant la carbonatation des mortiers, plus les mortiers contiennent du sable recyclé, plus la profondeur de carbonatation est élevée. L'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire cette profondeur de carbonatation. Ces observations rejoignent celles par rapport à l'absorption capillaire et permettent de dire que l'utilisation de sable recyclé carbonaté permet de réduire la porosité des mortiers à base de sable recyclé.

La carbonatation est un moyen de traitement qui permet d'améliorer les granulats recyclés de béton contenant une haute teneur en pâte de ciment et permet d'améliorer les caractéristiques des mortiers incorporant des granulats recyclés. Ce traitement permettrait de revoir à la hausse les normes fixant le maximum de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton. Cela nous mènerait vers une économie encore plus circulaire et limiterait l'utilisation de granulats naturels et la quantité de déchet de béton provenant du secteur de la construction et de la démolition.

Cette étude pourrait être complétée par des travaux sur la durabilité des mortiers à base de granulat recyclé, sur l'impact de la carbonatation sur des réels déchets de béton issus de centres de revalorisation puisque les granulats recyclés de bétons utilisés dans ce travail étaient d'origine et de composition connues. Dans ce mémoire, la carbonatation a eu lieu uniquement avec une concentration en  $\text{CO}_2$  de 3%, il serait alors intéressant d'étudier d'autre concentration en  $\text{CO}_2$ . Il serait également intéressant d'étudier économiquement parlant la faisabilité à l'échelle industrielle d'un tel traitement tant au niveau technologique qu'au niveau économique. Voilà une liste non-exhaustive de sujets à approfondir dans de futures recherches.

# Annexe A

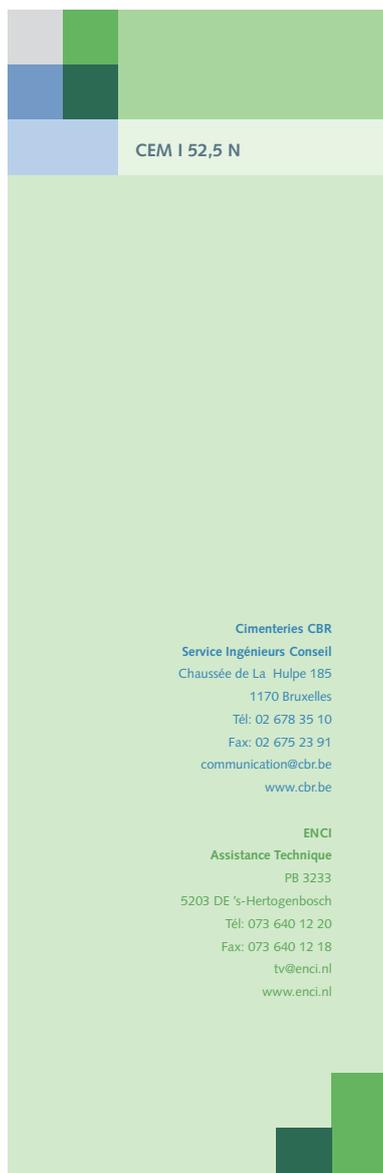
## Ciment CEM I 52.5 N

### Ciment Portland

CEM I 52,5 N

CEM I

Mars 2014



#### 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.
<i>Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires</i>				
Clinker (K)	%	99	95	100
Filler	%	1	–	5
<i>Ajouts en % du ciment fini</i>				
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 <sub>2</sub>	%	20,8	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,9	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,6	–	–
C <sub>2</sub> A	%	7,1	–	–
Sulfate SO <sub>3</sub>	%	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 <sub>2</sub> 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-type

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

ENCI  
Assistance Technique  
PB 3233  
5203 DE 's-Hertogenbosch  
Tél: 073 640 12 20  
Fax: 073 640 12 18  
tv@enci.nl  
www.enci.nl



Liste

#### 4. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont déterminées selon les méthodes d'essai normalisées, mentionnées dans la 2<sup>e</sup> 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 <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup>	3100	–	–
Apparente	–	kg/m <sup>3</sup>	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](http://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

# Bibliographie

- [1] Francisco Agrela, P Alaejos, and M.S. De Juan. Properties of concrete with recycled aggregates, chapter 12, pages 304 – 329. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2013.
- [2] APERROUT. Amélioration des performances des recyclés en domaine routier par optimisation des unités de traitement, 2016.
- [3] NBN B 15-230. Essais des bétons - essais non destructifs - mesure de la fréquence de résonance. Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 1976.
- [4] The World Bank. China. <https://data.worldbank.org/country/china>. En ligne, consulté le 30 avril 2019.
- [5] Malek Batayneh, Iqbal Marie, and Ibrahim Asi. Use of selected waste materials in concrete mixes. Waste Management, 27(12) :1870 – 1876, 2007.
- [6] Monalisa Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti. Recycled aggregate from c&d waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector : A review. Construction and Building Materials, 68 :501 – 516, 2014.
- [7] Mohamed ElKarim Bouarroudj, Sébastien Remond, Frédéric Michel, Zengfeng Zhao, David Bulteel, and Luc Courard. Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. Materials and Structures, 52(1) :18, Jan 2019.
- [8] Sandrine Braymand, Sébastien Roux, and Hanaa Fares. Thème1 Évaluation en laboratoire de techniques destinées à séparer la pâte de ciment du gravillon naturel d’origine. Rapport de recherche, IJL Nancy -IMFS, Mars 2017.
- [9] Kathy Bru, Solène Touzé, Florent Bourgeois, Nicholas Lippiatt, and Yannick Ménard. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. International Journal of Mineral Processing, 126 :90 – 98, 2014.
- [10] Pôle éco conception. Éco-conception et économie circulaire. <https://www.eco-conception.fr/static/economie-circulaire.html>. En ligne, consulté le 17 mai 2019.
- [11] Luc Courard. Durabilité des bétons - mécanismes de dégradation. notes fournies dans le cours ” Technologie des bétons et matériaux nouveaux ”, Université de Liège, Liège, BE, 2017.

- [12] Marta Sánchez de Juan and Pilar Alaejos Gutiérrez. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 23(2) :872 – 877, 2009.
- [13] Geert De Schutter. Technologie du béton, chapter 3, page 167. Groupement Belge du Béton, 2006.
- [14] Simon Delvoie, Zengfeng Zhao, Frédéric Michel, and Luc Courard. State of the art on recycling techniques for the production of recycled sands and aggregates from construction and demolition wastes. In Circular Concrete - SeRaMCo - Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products, Luxembourg, LU, Novembre 2018. Mid-term conference SeRaMCo.
- [15] Simon Delvoie, Zengfeng Zhao, Frédéric Michel, and Luc Courard. Utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton préfabriqué : comparaison des exigences réglementaires et techniques en Europe. In Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018, Liège, BE, Novembre 2018. Université de Liège.
- [16] Simon Delvoie, Zengfeng Zhao, Frédéric Michel, and Luc Courard. Market analysis of recycled sands and aggregates in North-West Europe : drivers and barriers. In Conference Series Earth and Environmental Science, Bruxelles, BE, Février 2019. BAMB’s final event : buildings as material banks - a pathway for a circular future.
- [17] Kunwufine Deodonne. Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental. PhD thesis, Université de Strasbourg, Juillet 2015.
- [18] NBN EN 1015-18. Méthodes d’essai des mortiers pour maçonneries - partie 18 : Détermination du coefficient d’absorption d’eau par capillarité des mortiers. Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2002.
- [19] NBN EN 1015-3. Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (à la table des secousses). Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 1999.
- [20] NBN EN 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2013.
- [21] NBN EN 196-1. Méthodes d’essais des ciments - partie 1 : Détermination des résistances. Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2016.
- [22] NBN EN 1992-1-1. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (+ac :2010). Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2005.
- [23] Bruxelles Environnement. Fiche 4.1 : L’utilisation de granulats issus du recyclage. Technical report, Bruxelles Environnement, 2010.
- [24] Christian Fischer and Mads Werge. Eu as a recycling society, present recycling levels of municipal waste and construction and demolition waste in the eu. WorkingPaper ETC/SCP working paper 2/2009, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, 2009.

- [25] José M.V Gómez-Soberón. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate : An experimental study. Cement and Concrete Research, 32(8) :1301 – 1311, 2002.
- [26] F. Homand-Etienne and R. Houpert. Thermally induced microcracking in granites : characterization and analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(2) :125 – 134, 1989.
- [27] Jan Horemans. Technologie du béton, chapter 2.2, page 181. Groupement Belge du Béton, 2006.
- [28] Said Kenai. Performance des bétons à base de granulats recyclés. Chantiers du Maroc, 112, 2013.
- [29] François Larrard and Horacio Colina. Le béton recyclé. IFSTTAR, Novembre 2018.
- [30] Elske Linß and Anette Mueller. High-performance sonic impulses—an alternative method for processing of concrete. International Journal of Mineral Processing, 74 :S199 – S208, 2004. Special Issue Supplement Comminution 2002.
- [31] Nabil Manseur and Sifax Ziani. Étude et caractérisation des granulats recyclés de démolition. Master’s thesis, Université Abderrahmane Mira-Béjaïa, Juin 2014.
- [32] C Meyer. The greening of the concrete industry. Cement and Concrete Composites, 31(8) :601 – 605, 2009.
- [33] IFSTTAR Méthode d’essai n° 78. Essais sur granulats pour béton : Mesure de l’absorption totale d’eau par un sable concassé. Standard, IFSTTAR - Institut français des sciences et technologies des transports, de l’aménagement et des réseaux, Paris, FR, 2011.
- [34] P. J. Nixon. Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. Matériaux et Construction, 11(5) :371–378, Septembre 1978.
- [35] Nikolaos Oikonomou. Recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 27(2) :315 – 318, Février 2005. Cement and Concrete Research in Greece.
- [36] Raul Oliveira Neto, Pascal Gastineau, Bogdan Grigore Cazacliu, Lauredan Le Guen, Régis Sebben Paranhos, and Carlos Otávio Petter. An economic analysis of the processing technologies in cdw recycling platforms. Waste Management, 60 :277 – 289, 2017.
- [37] Véronique Parmentier. Tentative de fixation du CO<sub>2</sub> dans les blocs de béton à base de fibres végétales et granulats recyclés. Master’s thesis, Université de Liège, Juin 2012.
- [38] Valérie Pollet, Bram Doods, and Gunther Mosselmans. Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s’en prémunir ? Les dossiers du CSTC, 3(2), 2007.
- [39] RILEM TC 56-MHM. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. Materials and Structures, 21(6) :453–455, Novembre 1988.

- [40] Eurostat Statistics Explained. Population au 1er janvier. <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=fr&pcode=tps00001>. En ligne, consulté le 13 mai 2019.
- [41] Eurostat Statistics Explained. Waste statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics). En ligne, consulté le 30 avril 2019.
- [42] Sami W. Tabsh and Akmal S. Abdelfatah. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Construction and Building Materials, 23(2) :1163 – 1167, 2009.
- [43] Zine-El-Abidine Tahar, El-Hadj Kadri, Tien-Tung NGO, Adrien Bouvet, Abdelhak Kaci, and Salima Aggoun. Étude de l'influence des granulats recyclés sur le comportement des MBE. In RUGC 2015, Bayonne, FR, Mai 2015. Étude de l'influence des granulats recyclés sur le comportement des MBE.
- [44] Solène Touzé, Kathy Bru, Yannick Ménard, Alexander Weh, and Frédéric Von der Weid. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste – effect on aggregate liberation. International Journal of Mineral Processing, 158 :68 – 75, 2017.
- [45] Philippe Turcry. Carbonatation des matériaux cimentaires. [https://edurmat.sciencesconf.org/conference/edurmat/pages/Pres\\_Ecole\\_EdurMat\\_Turcry\\_1.pdf](https://edurmat.sciencesconf.org/conference/edurmat/pages/Pres_Ecole_EdurMat_Turcry_1.pdf). En ligne, consulté le 24 mai 2019.
- [46] Lucie Vandewalle. Technologie du béton, chapter 4, page 181. Groupement Belge du Béton, 2006.
- [47] Georges Verbeck. Carbonatation oh hydrated portland cement. Cement and Concrete, 205 :17–36, 1958.
- [48] Ngoc Tru Vu. Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste. PhD thesis, Université de Toulouse, Juin 2011.
- [49] Ashraf M. Wagih, Hossam Z. El-Karmoty, Magda Ebid, and Samir H. Okba. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. HBRC Journal, 9(3) :193–200, 2013.
- [50] Confédération Construction Wallonne. La gestion des déchets de construction. [https://www.confederationconstruction.be/Portals/28/cellule%20environnement/guidesdocumentsutiels/gestiondesdechets/Les%20d%C3%A9marches%20administratives%20\(stockage%20-%20transport-%20valorisation\).pdf](https://www.confederationconstruction.be/Portals/28/cellule%20environnement/guidesdocumentsutiels/gestiondesdechets/Les%20d%C3%A9marches%20administratives%20(stockage%20-%20transport-%20valorisation).pdf), 2013. En ligne, consulté le 27 mai 2019.
- [51] Dongxing Xuan, Baojian Zhan, and Chi-Sun Poon. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 65 :67–74, Octobre 2015.
- [52] Baojian Zhan, Chi-Sun Poon, Qiong Liu, Shicong Kou, and Caijun Shi. Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. Construction and Building Materials, 67 :3–7, Septembre 2014.

- [53] Jiake Zhang, Caijun Shi, Yake Li, Xiaoying Pan, Chi-Sun Poon, and Zhaobin Xie. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 98 :1–7, Août 2015.
- [54] Zengfeng Zhao. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers. PhD thesis, Université Lille 1, Février 2014.
- [55] Zengfeng Zhao, Luc Courard, Frédéric Michel, Sébastien Remond, and Denis Damidot. Influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. In RUGC 2016, Liège, BE, Mai 2016. Rencontres Universitaires de Génie civil.
- [56] Zengfeng Zhao, Luc Courard, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Denis Fian-daca. Tentatives de prétraitement des granulats recyclés pour l'amélioration des bétons préfabriqués. In Ciments, bétons et fibres - Matériaux et structures, Lausanne, CH, Février 2015. 16e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B.
- [57] Zengfeng Zhao, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Weiya Xu. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. Construction and Building Materials, 81 :179–186, Avril 2015.
- [58] Zengfeng Zhao, Sébastien Rémond, Denis Damidot, Luc Courard, and Frédéric Michel. Improving the properties of recycled concrete aggregates by accelerated carbonation. ICE Proceedings Civil Engineering, 171, Juin 2017.
- [59] Zengfeng Zhao, Sébastien Rémond, Denis Damidot, and Weiya XU. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2 :186–203, Juillet 2013.