



HAL
open science

Utilisation de matériaux naturels modèles pour la formulation de mortier contenant des sables et des fines de granulats recyclés

Mohamed Elkarim Bouarroudj

► To cite this version:

Mohamed Elkarim Bouarroudj. Utilisation de matériaux naturels modèles pour la formulation de mortier contenant des sables et des fines de granulats recyclés. Génie civil. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai; Université de Liège, 2019. Français. NNT : 2019MTLD0016 . tel-02497234

HAL Id: tel-02497234

<https://theses.hal.science/tel-02497234>

Submitted on 3 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre

IMT Lille Douai et L'Université de Liège

Présentée en vue d'obtenir
le grade de

DOCTEUR

en

Génie Civil

par

Mohamed ElKarim Bouarroudj

Titre de la thèse :

Utilisation de matériaux naturels modèles pour la formulation de mortier contenant des sables et des fines de granulats recyclés

Directeur de thèse : Sébastien Rémond

Directeur de thèse : Luc Courard

Soutenue le 19 novembre 2019 devant le jury d'examen

Jury de thèse :

Président : André Lecomte, Pr. Université de Lorraine

Rapporteur : Stéphanie Staquet, Pr. Université Libre de Bruxelles

Rapporteur : Ahmed Loukili, Pr. Ecole Centrale de Nantes

Examineur : Bogdan Cazacliu, Directeur de recherche. IFSTTAR de Nantes

Examineur : Salima Aggoun, MCF-HDR. Université de Cergy Pontoise

Examineur : Boyan Mihaylov, Pr. Université de Liège

Directeur de thèse : Sébastien Rémond, Pr. IMT Lille Douai

Directeur de thèse : Luc Courard, Pr. Université de Liège

Invité (Encadrant) : David Bulteel, Pr. IMT Lille Douai

Remerciements

Ce manuscrit présente les résultats obtenus dans le cadre des travaux de recherche réalisés en cotutelle entre le département de Génie Civil et Environnemental de l'IMT Lille Douai (France) et le département ArGEnCo (GeMMe Building Materials) de l'université de Liège (Belgique).

Dans ce cadre, j'adresse mes remerciements :

En premier lieu, j'affiche toute ma gratitude aux professeurs Sébastien Rémond et Luc Courard de m'avoir, tous deux, dirigé dans les travaux de recherche et de consolidation de cette thèse de doctorat. Je vous remercie pour votre confiance, votre rigueur et votre patience à mon égard. Je vous remercie pour vos qualités humaines et scientifiques. Je tiens à confirmer qu'à vos côtés, je me suis forgé dans le traitement des sujets délicats en matière de recherche et de développement.

Je remercie mon encadrant, le Professeur David Bulteel, de m'avoir accordé toute l'intention voulue durant tous les travaux de recherche. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour son soutien scientifique et technique durant toute la période qu'on a passé ensemble.

Je remercie sincèrement les professeurs Stéphanie Staquet, et Ahmed Loukili d'avoir rapporté la thèse. J'aimerais aussi remercier Monsieur Bogdan Cazacliu, Madame Salima Aggoun, et le professeur Boyan Mihaylov d'avoir examiné la thèse de doctorat. Je remercie le Professeur André Lecomte de m'avoir fait l'honneur de présider la soutenance de thèse du doctorat.

Je remercie tous les membres du laboratoire GeMMe, pour leur aide précieuse, leur bienveillance durant la période des travaux de recherche. Mes salutations vont à Frederic Michel, Zengfeng Zhao, Monique Denotte, Amaury Daras, Grigoletto Sophie, Szepetiuk Véronique et Libioule Fabienne. Par votre présence et l'aide apportée sous toutes les formes attendues, je me sentais au milieu de ma deuxième famille en Belgique.

Je remercie toute l'équipe du GCE à IMT Lille Douai pour leur accueil et leur support moral. Je remercie Guillaume Potier, Johanna Caboche, Damien Betrancourt et Dominique Dubois pour leur aide et leurs conseils au sein du laboratoire. Mes remerciements vont aussi à Carole et à l'ensemble des Enseignants chercheurs, doctorants et post doctorants de l'Université.

Je remercie mes amies et collègues : Charlotte, Estelle, Philippe, Chinh, Adrien, Philbert, Hamza, Youcef, Abdelhadi, Mel, Adèle, Adoum, Bader et Mathilde. Je vous remercie pour votre soutien moral.

Je remercie ma femme Sabrina pour son soutien inconditionnel et continu. Je remercie ma famille pour son encouragement et son amour : mon père Kamel, ma mère Nassima et mes sœurs Kenza et Radia, que dieu les garde pour moi.

Table des matières

Introduction générale.....	19
1. Etat de l'art	24
1.1 Introduction	24
1.2 Recyclage des granulats de béton	24
1.3 Caractéristiques des GBR	26
1.3.1 Teneur en pâte de ciment dans les GBR	27
1.3.2 Masse volumique, porosité et absorption d'eau	29
1.3.3 Saturation et cinétique d'absorption dans l'eau et dans la pâte des GBR	35
1.3.4 Hétérogénéité des GBR	40
1.4 Effet des caractéristiques physiques des granulats sur l'état frais des bétons et des mortiers	42
1.5 Caractéristiques des bétons et des mortiers réalisés avec des GBR	48
1.6 Utilisation des GBR comme addition minérale dans le domaine du Génie Civil	52
1.6.1 Utilisation des GBR dans la fabrication du clinker	52
1.6.2 Utilisation des GBR comme addition minérale dans la fabrication du béton ou du mortier	53
1.7 Conclusion.....	56
1.7.1 Bilan des travaux antérieurs	56
1.7.2 Objectifs fixés pour la thèse	57

2. Utilisation d'un sable naturel modèle pour la compréhension du comportement à l'état frais et durci d'un mortier fabriqué avec un sable recyclé.	62
2.1 Introduction	62
2.2 Méthodologie.....	63
2.3 Préparation des sables (recyclé et naturel)	65
2.3.1 Matériaux naturels utilisés	65
2.3.2 Préparation du béton.....	68
2.3.3 Préparation du sable recyclé.....	69
2.3.4 Préparation des sables naturels modèles	71
2.4 Caractérisation des sables (recyclé et naturel)	72
2.4.1 Etude morphologique	72
2.4.2 Mesure de l'absorption d'eau des SR et des SN	73
2.4.3 Mesure de compacité.....	78
2.5 Etude à l'état frais	80
2.5.1 Composition des mortiers de référence	80
2.5.2 Procédure de mesure du seuil de cisaillement.....	81
2.5.3 Conditions de pré-saturation et procédure de malaxage	82
2.5.4 Résultat de seuil de cisaillement des différents mortiers réalisés	84
2.6 Propriétés mécaniques	87
2.6.1 Composition des mortiers.....	88

2.6.2 Etude de l'effet limitant des propriétés mécaniques	89
2.6.3 Résultats et discussions	91
2.7 Conclusion.....	94
3. Mesure de porosité et d'absorption d'eau d'une pâte de ciment broyée (>125µm).....	99
3.1 Introduction	99
3.2 Méthodologie.....	99
3.3 Fabrication et caractérisation des matériaux	100
3.3.1 Fabrication des matériaux	100
3.3.2 Protocole de caractérisation.....	101
3.3.3 Résultats et discussion.....	102
3.4 Approche théorique.....	105
3.4.1 Présentation du modèle théorique	105
3.4.2 Vérification statistique du modèle théorique.....	109
3.4.3 Application du modèle théorique sur PCB et BP	112
3.5 Approche expérimentale.....	113
3.5.1 Test de porosité au mercure réalisée sur la poudre non poreuse (FC)	113
3.5.2 Le test de porosité au mercure réalisée sur PCB et BP	116
3.6 Absorption et cinétique d'absorption d'une poudre	119
3.6.1 Absorption d'eau d'une poudre	120
3.6.2 Cinétique d'absorption d'une poudre	121

3.7 Demande en eau de PCB et FC	123
3.7.1 Mélanges réalisés et mesure de la maniabilité	123
3.7.2 Résultats et discussions	125
3.8 Conclusion.....	128
4. Utilisation d'une pâte de ciment broyée comme addition minérale	131
4.1 Introduction	131
4.2 Méthodologie.....	131
4.3 Etude de l'hydratation et de la porosité d'une matrice cimentaire fabriquée avec la PCB et le FC.....	133
4.3.1 Composition et préparation des pâtes.....	133
4.3.2 Estimation du degré d'hydratation	134
4.3.3 Mesure de porosité des différents mélanges	140
4.4 Etude du comportement mécanique et rhéologique des mortiers	141
4.4.1 Composition des mortiers et protocole de malaxage	142
4.4.2 Procédure expérimentale	143
4.4.3 Comportement des mortiers à l'état frais	143
4.4.4 Comportement des mortiers à l'état durci	145
4.5 Conclusion.....	151
Conclusion générale et perspectives	153
Conclusion générale	153

Perspectives.....156
Références bibliographiques157
Annexes165

Table des figures

Figure 1-1: Production des granulats dans les carrières (hors recyclage direct sur chantier) [3] .	25
Figure 1-2 : Taux de recyclage des déchets de construction et démolition en Europe [7].....	26
Figure 1-3 : Exemple de granulats de béton recyclé (GBR).....	27
Figure 1-4 : Teneur en mortier en fonction de la taille des particules [11].....	28
Figure 1-5 : Teneur en mortier en fonction de l'absorption d'eau. [11]	29
Figure 1-6 : Forme du cône de sable pour les différents états (humide, légèrement humide, saturé surface sèche et sec) [16]	31
Figure 1-7 : Illustration de la méthode IFSTTAR [10] [21]	32
Figure 1-8 : Absorption d'eau des fractions granulaires du sable recyclé [10].....	33
Figure 1-9 : Courbe de séchage d'un matériau poreux ; évolution de la teneur en eau et du gradient d'évaporation de/dt en fonction du temps [23].	34
Figure 1-10: Méthode hydrostatique pour étudier la cinétique d'absorption d'eau des GBR	35
Figure 1-11 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés et naturels [27].....	36
Figure 1-12 : (a) Quantité d'eau estimée dans les sables recyclés, (b) degré de saturation des différents sables recyclés utilisés dans l'étude [33]	38
Figure 1-13: Etalement des mortiers en fonction de la quantité d'eau de pré saturation du sable recyclé [13].....	39
Figure 1-14 : Evolution de la puissance du malaxeur en fonction du temps de malaxage pour le béton. Un rapport E_{eff} (théorique)/ P proche de 0,34 et des conditions d'humidité initiales différentes pour les GBR sont utilisés ; S_i représente l'affaissement initial des différents mélanges [34]	40

Figure 1-15 : Constituant des gravillons recyclés selon la norme NF EN 206/CN [36].....	41
Figure 1-16 : Variation de WA sur un GBR trié avec la jig à eau [37]	42
Figure 1-17 : Effet d’interactions entre classes granulaires [42][43].....	44
Figure 1-18 : Représentation schématique de l’analyse de la forme des particules [48].....	45
Figure 1-19 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la fraction volumique ajouté de sable ou de gravillon [52].....	46
Figure 1-20 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du volume du squelette granulaire [54]	47
Figure 1-21 : Variation du seuil de cisaillement relatif en fonction des différents types de sables utilisés [55].....	48
Figure 1-22 : Présentation de la zone interstitielle entre la nouvelle pâte et l’ancienne pâte lors de l’utilisation du sable saturé (à gauche) et sec (à droite) [63]	51
Figure 1-23 : Résistance en compression des différents mortiers réalisés avec un filler calcaire, FN 1 et FN 2 [71]	54
Figure 1-24 : Comparaison des chaleurs d’hydratation d’un ciment avec les fines recyclées (FN 1 et FN 2)[71].....	54
Figure 1-25 : Résultat de la résistance mécanique obtenue par Bordy et al. [73].....	55
Figure 1-26 : Résultat de la chaleur d’hydratation obtenue par Bordy et al. [73].....	56
Figure 2-1 : Méthodologie suivie pour atteindre les objectifs visés du chapitre 2.....	65
Figure 2-2 : Granulométries du ciment et du filler calcaire	66
Figure 2-3 : Granulométrie des granulats naturels.....	67
Figure 2-4 : Granulat supérieur à 4mm après le premier concassage	70

Figure 2-5 : Granulométrie des deux lots obtenus de sable recyclé.....	70
Figure 2-6 : Granulométrie des sables obtenus après concassage.....	72
Figure 2-7 : Elongations obtenues pour les différentes fractions granulaires de SR et de SN.....	73
Figure 2-8 : Variation de WA en fonction de la SFSA [74]	76
Figure 2-9 : Variation de WA en fonction de la perte de masse entre 105°C et 475°C [74]	76
Figure 2-10 : Courbes granulométriques du SR avant et après une saturation préalable avec WA +5% pendant 7 jours.....	78
Figure 2-11 : Courbe granulométrique avant et après le test de compacité	79
Figure 2-12 : Mini cône pour mesurer la maniabilité du mortier.....	81
Figure 2-13 : Préparation des différents mortiers pour étudier les mouvements d'eau entre la pâte et le SR.	83
Figure 2-14: Procédure de malaxage des mortiers	84
Figure 2-15 : Maniabilité des mortiers réalisés avec le SN ou le SR immergé dans l'eau pendant 24 heures.	85
Figure 2-16: Variation du seuil de cisaillement en fonction du rapport E_{eff}/P pour les différents mortiers réalisés avec les différents états de saturation du SR.....	87
Figure 2-17: Illustration des paramètres p, q	91
Figure 3-1 : Distribution de la taille des pores des monolithes PCD et brique	102
Figure 3-2: Comparaison des résultats d'élongation pour le FC, BP et la PCB	104
Figure 3-3: Distribution granulométrique de la PCB, BP et de FC	105
Figure 3-4: Illustration du réseau de pores et de la procédure de broyage. R est la dimension caractéristique du pore et V_{cp} est le volume du pore.....	106

Figure 3-5 : Illustration du plus petit pore inter granulaire dans un empilement de particules sphériques mono dimensionnées. Les pores en rouge sont plus grands que le plus petit pore inter granulaire, ils ne sont donc pas pris en compte dans le calcul de la porosité intra granulaire	107
Figure 3-6: Illustration des pores qui sont exclus en raison de la procédure de broyage. Les pores en rouge sont des pores exclus	109
Figure 3-7 : Comparaison entre le calcul avec eq.3-8 le modèle numérique	112
Figure 3-8 : Comparaison entre le calcul avec eq.3-9 et le modèle numérique	112
Figure 3-9 : Variation de γ_{total} en fonction du diamètre des pores pour FC	115
Figure 3-10: Illustration des différents volumes lors de l'utilisation d'analyses MIP sur une poudre poreuse. Les différents volumes correspondent à des tailles de pores décroissantes.....	116
Figure 3-11: Variation de γ_{total} en fonction du diamètre des pores pour FC, BP et PCB	118
Figure 3-12: Procédure de détermination de la cinétique d'absorption d'une poudre	122
Figure 3-13: Démarche expérimentale suivie pour l'étude rhéologique sur pâtes.....	124
Figure 3-14 : Seuil de cisaillement en fonction du temps pour les pâtes fabriquées avec le FC et la PCB pour les différents rapports V_E/V_{Poudre}	127
Figure 3-15 : Variation du seuil à 30 minutes en fonction du rapport V_E/V_P pour les pâtes fabriquées avec les deux poudres (FC et PCB)	128
Figure 4-1 : Illustration schématique des mélanges réalisés	132
Figure 4-2 : ATG des différents mélanges étudiés à 1 jour	136
Figure 4-3 : Degré d'hydratation des différents mélanges obtenus en fonction du temps.....	139
Figure 4-4 : Porosité au mercure obtenue après correction des mélanges PCB+C et PCB WA+C à différentes échéances.....	141
Figure 4-5 : Mesure de maniabilité avec le cône MBE.....	143

Figure 4-6 : Variation de la maniabilité des différents mortiers en fonction du pourcentage de substitution	144
Figure 4-7 : Teneur en air des différents mortiers réalisés.....	145
Figure 4-8 : Résistance en compression à 2 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés	146
Figure 4-9 : Résistance en compression à 7 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés	146
Figure 4-10: Résistance en compression à 28 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés	147
Figure 4-11: Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 2 jours.....	148
Figure 4-12 : Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 7 jours.....	149
Figure 4-13: Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 28 jours.....	149
Figure 4-14 : Comparaison des coefficients K_{Ferret} obtenus, par calcul sur les mélanges PCB WA+C et FC+C	151

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Caractéristiques physiques des granulats naturels utilisés	67
Tableau 2-2: Composition du béton utilisé pour la production du sable recyclé modèle	68
Tableau 2-3: Caractéristique du béton utilisé pour la production du sable recyclé modèle	69
Tableau 2-4: Coefficients d'absorption d'eau mesurés dans les différents états de saturation du SR	77
Tableau 2-5: Masse volumique absolue, réelle et absorption d'eau du SR et du SN	78
Tableau 2-6: Composition des mortiers pour l'étude du comportement à l'état frais	80
Tableau 2-7: Comparaison des viscosités relatives des mortiers de SR et de SN	81
Tableau 2-8: Résultats obtenus à l'état frais pour les différents états de saturation du SR ainsi que pour le SN.....	85
Tableau 2-9: Compositions des mortiers pour réaliser l'étude à l'état durci	89
Tableau 2-10: Résultats de résistances mécaniques ainsi que détails du calcul pour obtenir le paramètre p illustrant l'adhésion entre le granulat et la matrice cimentaire	92
Tableau 2-11: Comparaison du paramètre p du SR avec les différents résultats obtenus de la littérature	94
Tableau 3-1 : Porosité mesurée en utilisant le MIP sur les deux monolithes. * Résultat obtenu sur le monolithe LP selon la fiche technique	103
Tableau 3-2: Résultats de surface spécifique obtenus pour les trois poudres	104
Tableau 3-3: Simulations numériques effectuées pour la validation des équations 3-5 et 3-6. La porosité initiale du monolithe prise égale à 30%.	111
Tableau 3-4: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de (eq.11) pour identifier la zone de compactage pour LP	115

Tableau 3-5: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de l'équation 11 pour identifier la zone de compaction du PCB	118
Tableau 3-6: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de l'équation 11 pour identifier la zone de compaction pour BP.....	119
Tableau 3-7: Absorption d'eau, masse volumique et porosité obtenues à l'eau et au mercure. .	120
Tableau 3-8 : Résultats d'absorption d'eau obtenus pour les poudres.....	122
Tableau 3-9: Compositions des différents mélanges réalisés avec la PCB (en volume absolu et en volume réel) et le FC.....	123
Tableau 4-1 : Composition des pâtes réalisées	133
Tableau 4-2 : Quantité de Portlandite produite pour une hydratation complète du ciment utilisé	135
Tableau 4-3: Quantité de Portlandite (CH) présente dans les différentes pâtes.....	138
Tableau 4-4: Degré d'hydratation des différents mélanges réalisés	139
Tableau 4-5: Porosités obtenues pour les différents mélanges à différentes échéances	141
Tableau 4-6: Composition des mortiers étudiés.....	142
Tableau 4-7: Détail du calcul réalisé sur les mélanges FC+C et PCB WA+C avec la méthode de Féret.....	150

Introduction générale

En Europe, chaque année, le secteur du bâtiment et des travaux publics produit plus de 850 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition. Ces déchets sont issus des constructions neuves mais aussi de la réhabilitation et de la démolition d'une partie du patrimoine bâti qui a atteint la fin de vie.

Devant la rareté des ressources naturelles, l'usage des déchets de construction et de démolition devient de plus en plus nécessaire voire urgent. Par ailleurs, la mise en décharge de ces déchets est onéreuse et porte atteinte à l'environnement ; elle est également interdite dans certains pays.

A ce jour, les déchets de démolition sont utilisés essentiellement en techniques routières ou en remblais, car les exigences nationales et régionales dans ce secteur sont beaucoup plus faibles que celles du secteur du bâtiment. De nombreux pays enregistrent des avancées dans les modes de déconstruction qui permettent une meilleure séparation des flux, ce qui facilite considérablement le traitement des déchets. Ce traitement commence, après réduction des dimensions des produits à valoriser par concassage, par un tri manuel suivi d'une séparation magnétique, d'un concassage et d'un criblage. Dans le cas du recyclage de débris de béton, compte tenu de l'évolution des méthodes de tri, on peut s'attendre à une amélioration de la qualité des granulats de béton recyclé (GBR), que l'on pourrait ainsi utiliser avec une plus grande valeur ajoutée (« upcycling » à la place de « downcycling »). Malgré les efforts déployés par le secteur du bâtiment et des travaux publics, la consommation des matériaux naturels est croissante alors que les déchets de démolition restent peu utilisés. Pour encourager le recyclage de ces déchets, l'Union Européenne a fixé comme objectif leur réutilisation à au moins 70% dans le secteur du bâtiment à l'horizon 2020.

Les travaux de recherche liés à cette thèse sont orientés principalement vers la valorisation des granulats de béton recyclé (GBR). Les GBR sont constitués d'un mélange intime entre un granulats naturel et une pâte de ciment durcie adhérente. Cette pâte de ciment durcie est responsable de la grande porosité des GBR et donc de leur absorption d'eau plus élevée que pour les granulats naturels. Cette porosité engendre des échanges d'eau entre la nouvelle pâte et l'ancienne pâte, ce qui complique ainsi le contrôle de l'eau efficace et donc le comportement à l'état frais et à l'état durci du béton.

Après concassage et tamisage, les GBR peuvent être classés en trois catégories selon leur fraction granulaire : les gravillons recyclés ($>4\text{mm}$), les sables recyclés ($<4\text{mm}$) et les poudres de recyclage ($<125\mu\text{m}$). De nombreux travaux de recherche ont été réalisés dans le but de valoriser les gravillons recyclés. La norme EN 206-1 permet leur réutilisation dans le béton à un taux de 30% en substitution d'un matériau naturel. Par contre, les travaux de recherche sur les sables recyclés et a fortiori sur les poudres de recyclage sont moins nombreux. En effet, il a été montré que la pâte de ciment se concentre plus dans les particules fines, ce qui rend difficile la réutilisation de ces matériaux.

De nombreux projets ont été réalisés dans le but d'améliorer des techniques de caractérisation des GBR et de mieux comprendre les propriétés des bétons fabriqués avec ces derniers, notamment le projet national RECYBETON [1] qui a démarré en janvier 2012 et pris fin en 2017.

Les travaux de thèse que nous présentons s'inscrivent dans le cadre du projet européen INTERREG VALDEM (2017-2020). Ce projet se fixe pour objectif d'initier le traitement des déchets sur site à un territoire transfrontalier, en soutien aux entreprises des secteurs bien définis (entreprise de déconstruction, centre de traitement et de tris...). Ainsi, le projet INTERREG VALDEM vise à la valorisation à plus forte valeur ajoutée des GBR.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire traitent des sables recyclés et des poudres recyclées. L'objectif de ces travaux est de mieux formuler et mieux contrôler les propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons et des mortiers fabriqués avec ces matériaux. Nos travaux de recherche sont exposés en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les GBR. La première partie du chapitre résume la production des GBR dans le monde en général et en Europe en particulier. Une étude de l'influence des différents paramètres (composition du béton d'origine, taille des particules...) sur les propriétés des GBR est abordée. Ensuite, l'influence des caractéristiques physiques des granulats (granulométrie, morphologie et compacité) sur le comportement rhéologique et mécanique du béton est présentée. Aussi, les caractéristiques à l'état frais et à l'état durci de mortiers ou de bétons fabriqués avec des GBR sont abordées. De même, une revue bibliographique sur l'utilisation des poudres issues du recyclage dans la fabrication du clinker ou comme addition minérale pour la formulation de bétons ou de mortiers est présentée. Pour conclure, un bilan des travaux antérieurs et de la démarche suivie dans la thèse est proposé.

Le chapitre deux décrit les travaux de recherche réalisés sur le sable recyclé afin de le valoriser dans un mortier. L'objectif principal de ce chapitre est de comparer les comportements des mortiers réalisés avec un sable recyclé à ceux réalisés avec un sable naturel modèle. Dans un premier temps, une méthodologie permettant d'obtenir un sable recyclé et un sable naturel modèle avec des caractéristiques physiques proches est présentée. Par la suite, une caractérisation spécifique sur les deux matériaux est réalisée. Dans la troisième partie, une comparaison du comportement à l'état frais entre mortiers fabriqués avec différents états de saturation du sable recyclé et ceux fabriqués avec le sable naturel modèle est présentée. Enfin, une étude mécanique est effectuée sur les mortiers fabriqués avec le sable recyclé ainsi que sur le sable naturel modèle.

Dans le troisième chapitre, les travaux de recherche sont menés dans le but d'estimer l'absorption d'eau d'une poudre issue du recyclage. La porosité restante d'une poudre broyée est étudiée avec deux approches distinctes : la première approche est basée sur un modèle qui considère que le monolithe poreux est composé de pores sphériques partiellement éliminés lors du broyage. La porosité restante après broyage est calculée à partir de la distribution de la taille des pores du matériau monolithique et de la distribution de la taille des particules de la poudre. La deuxième approche expérimentale est basée sur la comparaison des tests de porosimétrie à intrusion de mercure (MIP) réalisés sur la poudre poreuse étudiée (pâte de ciment broyée) et sur une poudre non poreuse (filler calcaire) ayant une distribution granulométrique et une morphologie similaire. Les résultats obtenus avec les deux approches sont comparés.

Le chapitre quatre présente les travaux réalisés pour l'utilisation d'une pâte de ciment broyée comme addition minérale dans un mortier. L'objectif principal de ce chapitre est de comparer le comportement à l'état frais et à l'état durci d'un mortier fabriqué avec un filler calcaire et de mortiers réalisés avec une pâte de ciment broyée dans laquelle l'absorption d'eau est prise en compte ou non.

Le document se termine par les conclusions et les perspectives pour les travaux de recherche futurs.

Chapitre 1 : Etat de l'art

1.1 Introduction.....	24
1.2 Recyclage des granulats de béton	24
1.3 Caractéristiques des GBR	26
1.3.1 Teneur en pâte de ciment dans les GBR	27
1.3.2 Masse volumique, porosité et absorption d'eau	29
1.3.3 Saturation et cinétique d'absorption dans l'eau et dans la pâte des GBR	35
1.3.4 Hétérogénéité des GBR	40
1.4 Effet des caractéristiques physiques des granulats sur l'état frais des bétons et des mortiers	42
1.5 Caractéristiques des bétons et des mortiers réalisés avec des GBR	48
1.6 Utilisation des GBR comme addition minérale dans le domaine du Génie Civil	52
1.6.1 Utilisation des GBR dans la fabrication du clinker	52
1.6.2 Utilisation des GBR comme addition minérale dans la fabrication du béton ou du mortier	53
1.7 Conclusion.....	56
1.7.1 Bilan des travaux antérieurs	56
1.7.2 Objectifs fixés pour la thèse	57

1. Etat de l'art

1.1 Introduction

Une grande partie du bâti atteint ou dépasse l'âge du demi-siècle, et arrive ainsi en fin de vie. L'entretien, la réhabilitation et la démolition de ce patrimoine industriel, immobilier et routier génèrent des quantités très importantes de déchets de construction et de démolition (C&D). La construction de nouvelles infrastructures ou leur entretien (réhabilitation) utilise des ressources naturelles de plus en plus difficiles à trouver. Le recyclage des déchets de C&D permet d'atténuer la pénurie de matériaux naturels. La plupart de ces déchets sont souvent considérés comme des déchets n'entraînant pas de pollution de l'environnement et ne peuvent nuire à la santé humaine.

Dans cette partie de nos travaux, un état de l'art sur la réutilisation de ce type de déchets est présenté. Dans une première étape, nous présentons les statistiques recueillies sur la consommation des matériaux naturels ainsi que sur les matériaux recyclés dans le domaine de la construction dans le monde en général et en Europe en particulier. Par la suite, nous nous intéressons aux caractéristiques des granulats de béton recyclé (GBR). Un état de l'art sur l'influence de leur caractéristique physique (granulométrie, morphologie des grains, compacité) sur le comportement à l'état frais et à l'état durci sur des mortiers et des bétons est présenté. Enfin, les différents travaux qui traitent des propriétés à l'état frais et à l'état durci des mortiers et des bétons réalisés avec ce type de déchets sont présentés. De même, nous nous intéressons à l'utilisation des GBR comme filler ($<125\mu\text{m}$) dans la fabrication du béton et du mortier.

1.2 Recyclage des granulats de béton

Les granulats représentent un constituant majeur pour la fabrication du béton. Ils sont généralement définis comme étant des fragments de roches. Leurs natures et leurs formes diffèrent selon leur provenance et leur mode de fabrication. Les granulats représentent un des matériaux le plus utilisé par l'homme avec une consommation moyenne d'environ 6,8 tonnes par habitant et par an. Cette consommation se classe de loin devant celle du pétrole (1,5t/hab./an), le bois (0,8t/hab./an) ou encore le charbon (0,7t/hab./an) [2].

Selon une étude de l'UNICEM [3], la production annuelle de granulats en France a connu une croissance constante jusqu'à l'année 2007, avant de chuter de 26% pour atteindre une production de 330 millions de tonnes par an en 2016 (figure 1-1). Cette chute de production des granulats naturels est due en partie à la législation environnementale qui est de plus en plus contraignante pour limiter l'impact de cette production sur l'environnement.

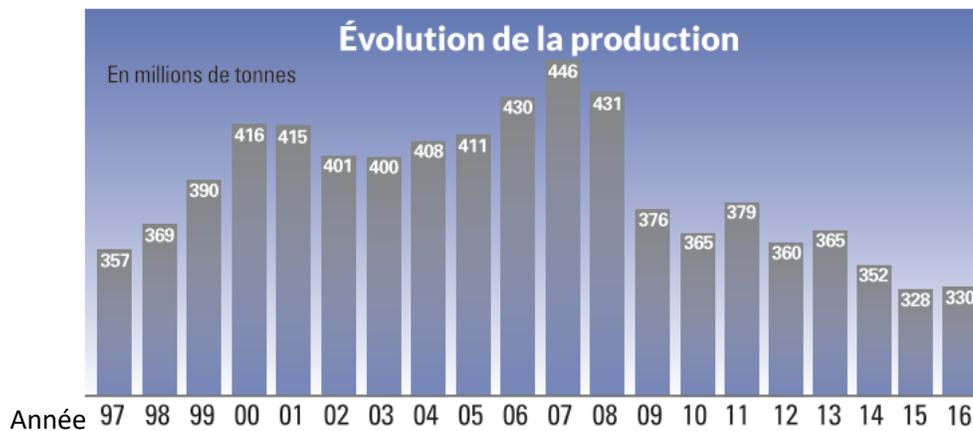


Figure 1-1: Production des granulats dans les carrières (hors recyclage direct sur chantier) [3]

Les déchets de démolition peuvent être considérés comme une ressource supplémentaire pour diminuer l'utilisation des ressources naturelles. En 2016, 204 millions de tonnes de granulats recyclés ont été produits en Europe [4]. L'Allemagne, la France, la Belgique, les Pays Bas et le Royaume Uni produisent à eux seuls 90% de la totalité des granulats recyclés en Europe. L'intérêt de la réutilisation des granulats recyclés est double. En premier lieu, elle permet d'éviter le stockage des déchets d'une manière sauvage, mais surtout de sauvegarder les ressources en granulats naturels.

Pour augmenter le taux de recyclage des déchets de démolition, la directive Européenne 2008/98/EC a fixé comme objectif le recyclage au minimum de 70% des déchets de construction et de démolition à l'année 2020 [5]. En Europe, il n'y a que 50% de ces déchets qui sont valorisés [6]. L'Allemagne, le Danemark et les Pays Bas présentent le taux de recyclage le plus élevé (près de 90%). En Belgique, le taux de recyclage est de 80%, alors qu'en France il est de 60% [7] (figure 1-2).

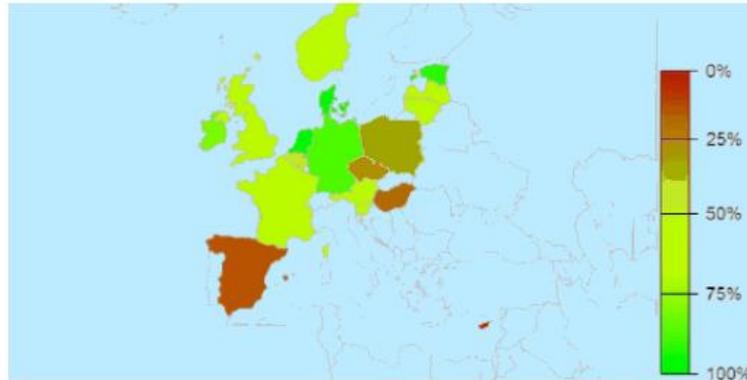


Figure 1-2 : Taux de recyclage des déchets de construction et démolition en Europe [7]

En Asie, le Japon est le pays qui recycle le plus avec un taux de recyclage de 96% des déchets de C&D [8], contrairement à la Chine où la notion de recyclage en général est très peu présente [9].

En Amérique, le recyclage, d'une manière générale est très peu présent. Au Brésil, par exemple, on observe une augmentation croissante dans la demande en granulat qui met en péril les ressources naturelles. En 2002, aux Etats-Unis, seulement 20 à 30% de déchets de C&D sont recyclés sur la totalité des 250 à 300 millions tonnes de déchets de construction et de démolition produits [10].

1.3 Caractéristiques des GBR

Les GBR proviennent des déchets de construction et de démolition (béton). Leur nature et leur composition diffèrent selon la nature du béton d'origine et surtout selon la qualité du processus de déconstruction/démolition. Les GBR sont principalement constitués de granulats naturels et de pâte de ciment durcie adhérente (figure 1-3). La différence entre un GBR et un granulat naturel réside essentiellement dans cette pâte adhérente (figure 1-3).

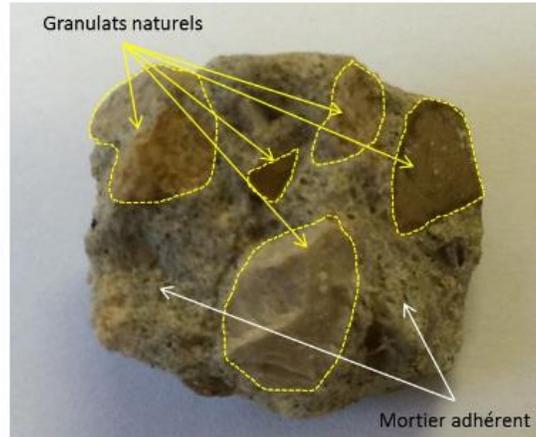


Figure 1-3 : Exemple de granulat de béton recyclé (GBR)

1.3.1 Teneur en pâte de ciment dans les GBR

Les GBR sont obtenus après concassage des déchets issus du béton. Lors de cette opération, la pâte de ciment adhérente reste collée sur les granulats et elle est responsable de la qualité médiocre des GBR comparés aux granulats naturels [1].

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la quantification de cette pâte de ciment adhérente dans les GBR dans le but d'estimer leur qualité. Certaines de ces méthodes ne fournissent que des grandeurs proportionnelles à la teneur en pâte de ciment. D'autres méthodes sont applicables pour les gravillons recyclés et non pour les sables recyclés car elle mesure la teneur en mortier adhérent. La quantification de la teneur en pâte de ciment/mortier adhérent pour les gravillons recyclés se fait selon trois méthodes thermique, chimique ou par analyse d'image :

- Méthodes thermiques [11]: Cette méthode consiste à réaliser plusieurs cycles d'immersion dans l'eau et de chauffage à 500°C, pour pouvoir détacher progressivement l'ancien mortier de la surface du GBR. Après plusieurs étapes, le mortier adhérent reste toujours attaché. Ainsi, un marteau en caoutchouc est utilisé pour gratter la surface. La teneur en mortier est calculée par la perte de masse entre le granulat recyclé d'origine et le granulat grossier obtenu. Pour les sables recyclés, Zhao et al. [12] et Le et al. [13] ont développé une méthode thermique qui consiste à mesurer la différence de perte de masse entre 105°C et 475°C, cette méthode permet de mesurer la teneur en pâte de ciment adhérente pour les sables recyclés;

- Méthodes chimiques [14] : Cette méthode consiste à dissoudre de manière sélective la pâte de ciment adhérente au granulat par différentes solutions acides (acide nitrique, acide chlorhydrique, acide salicylique) ;
- Méthode d'analyse par imagerie [15] : Cette méthode consiste à utiliser l'analyse par imagerie pour quantifier la quantité de pâte de ciment adhérente dans un GBR. Cette démarche est très compliquée à utiliser, car il est très difficile de faire la distinction entre le sable et la pâte de ciment adhérente. Aussi, pour que l'analyse soit représentative, il est nécessaire de réaliser une étude statistique ce qui peut prendre beaucoup de temps.

De Juan et al. [11] ont réalisé une comparaison entre les différents granulats en fonction de la quantité de mortier adhérent. Ils ont trouvé que plus la taille de la fraction granulaire est petite plus la teneur en mortier attaché augmente (figure 1-4).

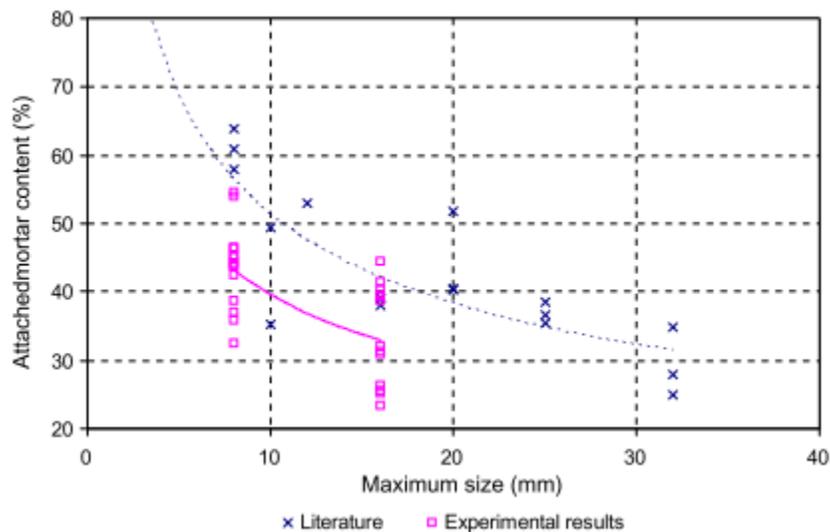


Figure 1-4 : Teneur en mortier en fonction de la taille des particules [11]

La pâte de ciment adhérente dans le GBR est responsable de l'absorption d'eau élevée, comparée à celle des granulats naturels. De Juan et al. [11] ont réalisé une étude comparative entre l'absorption d'eau et la quantité du mortier adhérent. Les résultats montrent que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la quantité de mortier (figure 1-5).

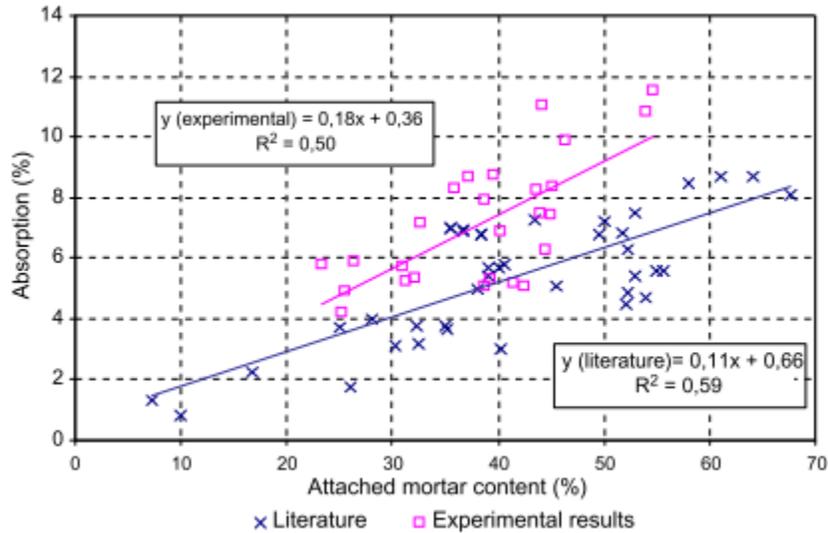


Figure 1-5 : Teneur en mortier en fonction de l'absorption d'eau. [11]

Zhao et al. [12] ont aussi démontré que la quantité de pâte de ciment influence significativement la masse volumique des matériaux. Cette dernière diminue avec l'augmentation de la teneur en pâte de ciment. Ainsi, on peut conclure que la pâte de ciment adhérente influence significativement l'absorption d'eau et la masse volumique.

1.3.2 Masse volumique, porosité et absorption d'eau

La masse volumique, la porosité et l'absorption d'eau sont des grandeurs très importantes dans la formulation des bétons. La masse volumique absolue et la porosité permettent de connaître la proportion volumique réelle du GBR dans une formulation de béton et la valeur d'absorption d'eau permet de contrôler l'eau efficace qui va jouer un rôle très important pour étudier le comportement à l'état frais et à l'état durci du béton ou du mortier.

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) d'un matériau est définie comme étant une caractéristique physique intrinsèque du matériau. Cette valeur correspond à la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans les grains ; cette valeur est obtenue suivant la norme européen NF EN 1097-6 [16].

Zhang et al. [17] distinguent deux types de pores dans les matériaux poreux. Les pores ouverts et les pores fermés. Les pores ouverts forment entre eux un système connecté. Les pores fermés sont des pores isolés et ne sont pas connectés entre eux. Seuls les pores connectés sont capables de

transporter de la matière. La proportion de pores connectés diffère suivant la nature et la source des granulats. Dans le cas des GBR, cette porosité est beaucoup plus importante comparée à un matériau naturel à cause de la pâte de ciment adhérente qui est très poreuse et donc absorbante [18].

Le coefficient d'absorption d'eau (WA) des granulats est déterminé suivant la norme EN 1097-6 [16]. Selon la procédure décrite dans cette dernière, les granulats sont immergés dans de l'eau à 22°C pendant 24 heures. La mesure d'absorption d'eau passe par la détermination de l'état saturé surface sèche (SSS). Cet état est défini comme étant un état où la porosité intra granulaire est saturée avec une fine pellicule d'eau en surface et qu'il ne reste plus d'eau inter granulaire. Une fois cet état déterminé, la masse à l'état SSS est enregistrée (M_{SSS}), l'échantillon est séché jusqu'à masse constante dans un four à 105°C (M_{sec}). Dans le cas des GBR, la température de séchage est souvent réduite (à 60°C ou 75°C selon les études) pour éviter la détérioration des hydrates qui sont toujours présents dans la pâte de ciment [19]. Le coefficient d'absorption d'eau (WA) est calculé suivant (eq.1-1).

$$WA = \frac{M_{SSS} - M_{sec}}{M_{sec}} \dots\dots\dots (1-1)$$

La valeur de l'absorption de l'eau (WA) est directement liée à la porosité accessible du matériau, cette porosité (P) influence significativement le volume réel qu'occupe le matériau. Les valeurs de la porosité et de la masse volumique réelle (ρ) peuvent être calculées selon les formules suivantes, où ρ_{abs} correspond à la masse volumique absolue du matériau :

$$P = \frac{WA}{WA + \frac{1}{\rho_{abs}}} \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\rho = \rho_{abs} \times (1 - P) \dots\dots\dots (1-3)$$

Comme évoqué dans le paragraphe 1.3.1, la qualité d'un GBR est directement liée à la teneur en pâte de ciment adhérente. Cette dernière étant poreuse, elle augmente significativement l'absorption d'eau et diminue la masse volumique [20]. Il a été prouvé que la pâte de ciment est plus concentrée dans les particules fines que dans les particules grossières [12] : c'est pour cette raison qu'il est beaucoup plus difficile de valoriser les particules fines (<4mm) dans le domaine de la construction que les particules grossières (>4mm).

Pour obtenir l'état SSS, il faut individualiser les grains lors de la procédure du séchage. Cette opération est beaucoup plus compliquée pour les particules fines que pour les particules grossières. Pour les particules inférieures à 4mm, la norme EN 1097-6 [16] propose un protocole pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau. Ce protocole se base sur l'annihilation des forces capillaires entre les grains dans le but de déterminer l'état SSS. Tout d'abord, il faut pré saturer le matériau pendant 24 heures par immersion totale sous l'eau, et par la suite le sécher avec un courant d'air chaud jusqu'à arriver à l'état SSS. L'état SSS est reconnu grâce à un test d'effondrement réalisé avec un moule tronconique. Suivant cette méthode, l'état SSS est obtenu si la forme du tas après le test d'effondrement a une forme régulière (figure 1-6).

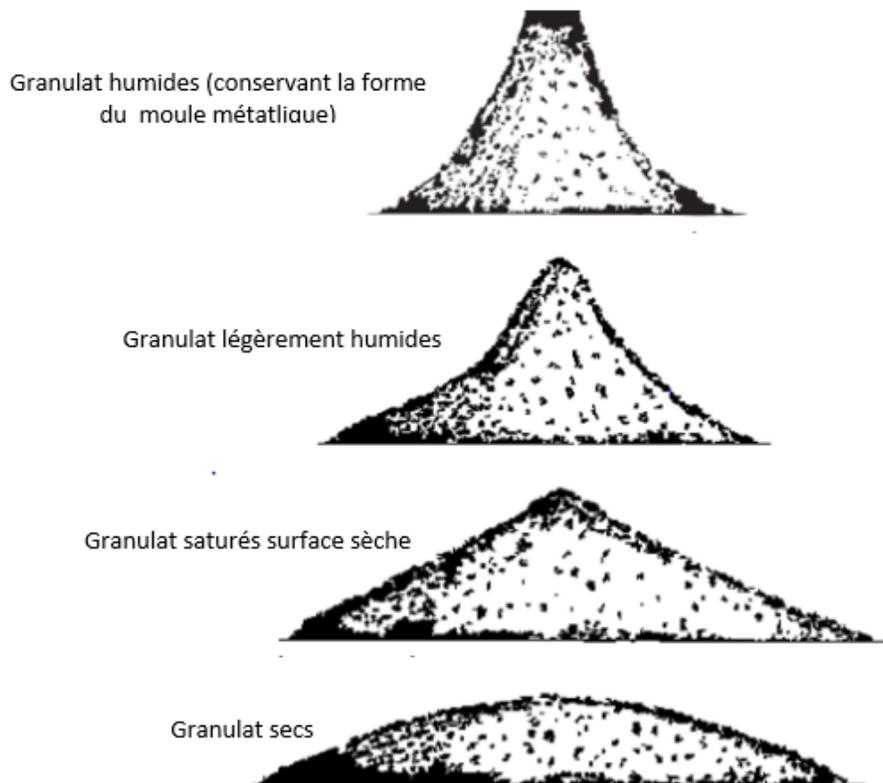


Figure 1-6 : Forme du cône de sable pour les différents états (humide, légèrement humide, saturé surface sèche et sec) [16]

Une deuxième méthode existe. Elle est connue sous le nom de méthode IFSTTAR N78 [21], le principe de cette dernière est le même que celui de la norme EN 1097-6. La différence vient de la manière avec laquelle l'état SSS est déterminé : le séchage du matériau est réalisé avec un chiffon, et l'état SSS est obtenu quand il n'y a plus de traces d'humidité sur le chiffon (figure 1-7).

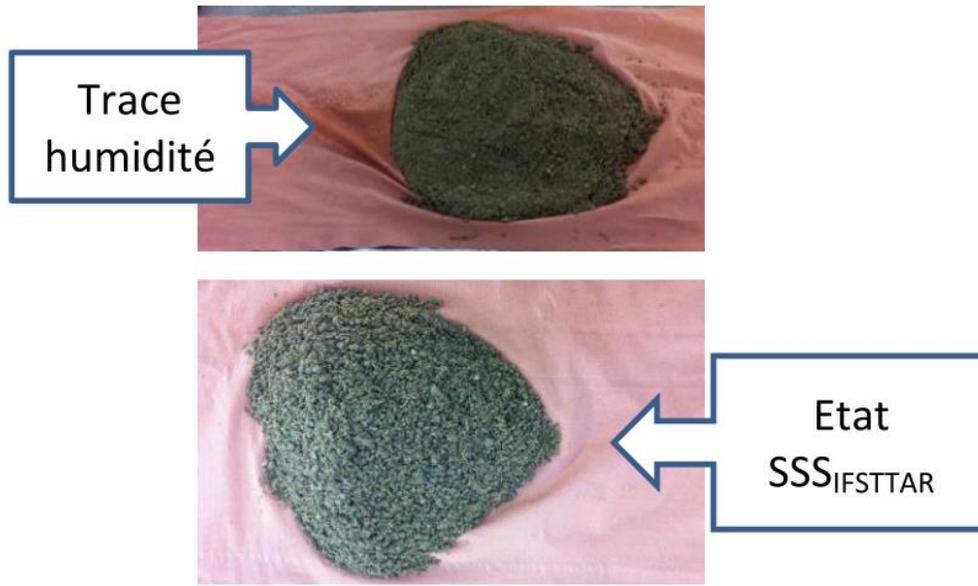


Figure 1-7 : Illustration de la méthode IFSTTAR [10] [21]

Le et al. [22] ont étudié les limites que peuvent avoir les deux méthodes présentées dans cette partie sur un sable recyclé. Les mesures du coefficient d'absorption d'eau ont été réalisées sur différentes classes granulaires d'un sable recyclé ($GBR < 4\text{mm}$). Pour les particules supérieures à $0,5\text{ mm}$, la méthode IFSTTAR N78 ou la norme EN 1097-6 donnent des résultats très proches; par contre, une différence significative pour les particules de dimensions inférieures à $0,5\text{mm}$ a été remarquée (Figure 1-8). Le et al. [22] ont conclu que, pour les particules inférieures à $0,5\text{mm}$, la méthode IFSTTAR surestime l'absorption d'eau, à l'inverse de la norme européenne qui la sous-estime. La difficulté rencontrée pour mesurer l'absorption d'eau de particules inférieures à $0,5\text{mm}$ tient au fait qu'il n'est pas possible d'individualiser les grains de cette taille.

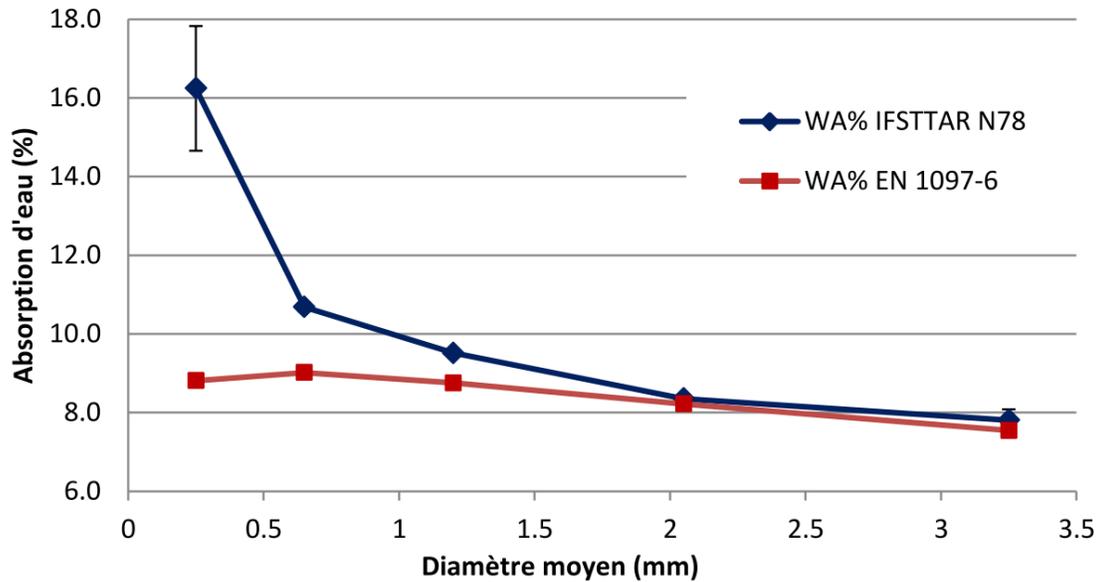


Figure 1-8 : Absorption d’eau des fractions granulaires du sable recyclé [10]

Afin de remédier à cette problématique, Zhao et al. [12] proposent une méthode alternative appelée méthode par extrapolation. Cette méthode consiste à diviser le sable en différentes classes granulaires et à mesurer, pour chaque classe granulaire, la quantité de pâte de ciment adhérente. Zhao et al. [12] ont montré qu’il y avait une relation linéaire entre l’absorption d’eau et la pâte de ciment adhérente. Les fractions granulométriques supérieures à 0,5mm peuvent être mesurées par la méthode IFSTTAR ou la norme EN 1097-6 ; par la suite, grâce à une extrapolation linéaire avec la teneur en pâte de ciment, il est possible de mesurer l’absorption d’eau des fractions inférieures à 0,5mm. Grâce à la courbe granulométrique, la proportion de chaque fraction granulaire du sable recyclé est connue, et le calcul de l’absorption d’eau totale du sable recyclé peut ainsi être effectué.

La mesure de la pâte de ciment adhérente est réalisée suivant les méthodes présentées dans le paragraphe 1.3.2.

Mechling et al. [23] ont développé une méthode pour mesurer l’absorption d’eau. La technique consiste à suivre l’évaporation d’un mince tapis granulaire imprégné d’eau déposé dans un bac de section constante, lui-même suspendu horizontalement dans l’enceinte d’une étuve réglée à une température modérée. Le principe de l’essai repose sur le fait que l’eau externe aux grains ne s’évapore pas à la même vitesse que l’eau interne. On sait en effet que le séchage par convection d’un corps poreux comporte, après une phase transitoire où le système se met en température, une

phase à vitesse de séchage constante (eau externe) suivie d'une phase à vitesse décroissante (eau interne), la transition de l'une à l'autre se faisant par un point critique de séchage. Le point critique est obtenu à partir de la dérivée de la teneur en eau en fonction du temps. Une fois le point critique t_c obtenu, la teneur en eau critique e_c peut être directement déduite. La figure 1-9 illustre les différentes phases obtenues, ainsi que la manière avec laquelle le point critique peut être déterminé.

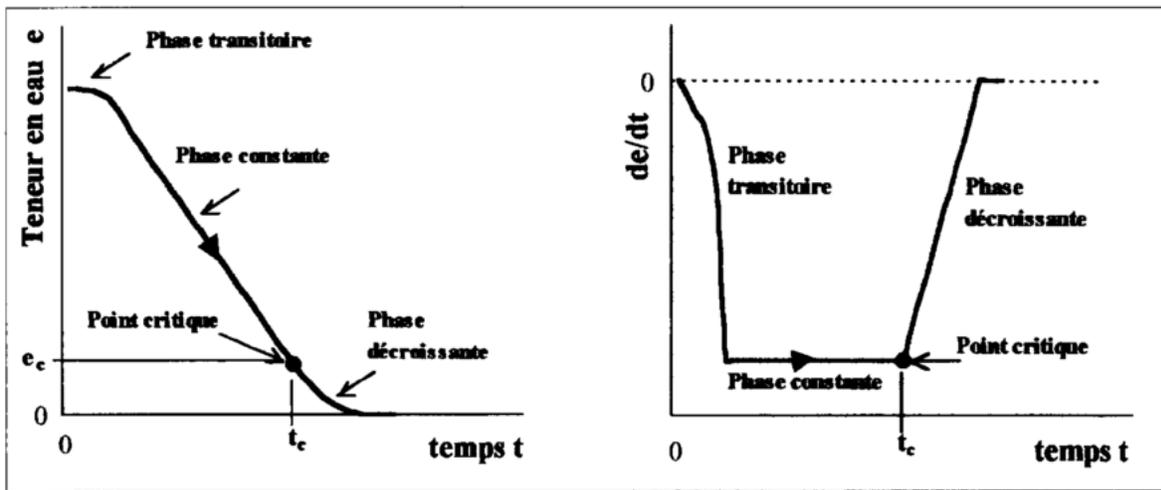


Figure 1-9 : Courbe de séchage d'un matériau poreux ; évolution de la teneur en eau e et du gradient d'évaporation de/dt en fonction du temps [23].

Le et al. [10] ont utilisé cette méthode pour 3 sables recyclés et 2 sables naturels, et ont comparé les résultats avec les résultats d'absorption d'eau obtenus avec la méthode de la norme EN 1097-6 ainsi que la méthode IFSTTAR. Suivant cette méthode, le coefficient d'absorption d'eau des matériaux recyclés se situe entre 10% et 11,6% pour 3% pour les matériaux naturels. Les valeurs obtenues sont plus élevées que les valeurs obtenues suivant la norme, mais semblables à la valeur obtenue avec la méthode IFSTTAR. Ainsi, tout comme la méthode IFSTTAR, la méthode par évaporométrie semble surestimer l'absorption d'eau.

Gentilini et al. [24] proposent une méthode basée sur la thermodynamique [23] pour déterminer l'absorption d'eau des matériaux inférieurs à 4 mm. La méthode est basée sur le séchage en tambour tournant à une température constante d'un matériau pré-saturé. Grâce au suivi de l'évolution de la masse et de l'hygrométrie, un point critique séparant la phase d'évaporation de l'eau inter granulaire de la phase d'évaporation de l'eau liée est obtenu. Ce point critique correspond à l'état SSS. La difficulté de cette méthode vient de l'homogénéisation de l'échantillon lors du séchage.

1.3.3 Saturation et cinétique d'absorption dans l'eau et dans la pâte des GBR

Tam et al. [25] ont développé une méthode qui permet de suivre l'évolution de l'absorption d'eau dans le temps. Cette méthode est basée sur l'immersion des GBR dans un pycnomètre, la cinétique d'absorption d'eau est obtenue en quantifiant la baisse du niveau d'eau dans le pycnomètre dans un intervalle de temps régulier. Tam et al. [25] ont montré que l'absorption d'eau est très rapide les premières minutes. L'inconvénient de cette méthode réside dans l'impossibilité de quantifier l'eau absorbée au cours des premières minutes, lors de la mise en place du matériau dans le pycnomètre.

Tegger [26] a développé une méthode basée sur une pesée hydrostatique pour suivre l'absorption d'eau au cours du temps d'un GBR (Figure 1-10). Cette méthode consiste à placer les granulats dans un bain thermostaté, et de suivre la variation de la masse correspondant à la cinétique d'absorption d'eau. Comme pour la méthode de Tam et al. [25] les premières minutes d'absorption d'eau sont très difficiles à obtenir. Cette méthode montre aussi que dès les 5 premières minutes le degré de saturation est très élevé.

Les méthodes proposées par Tam et al. [25] et Tegger et al. [26] sont plus applicables pour les GBR de taille supérieure à 4mm qu'aux GBR de plus petites dimensions.

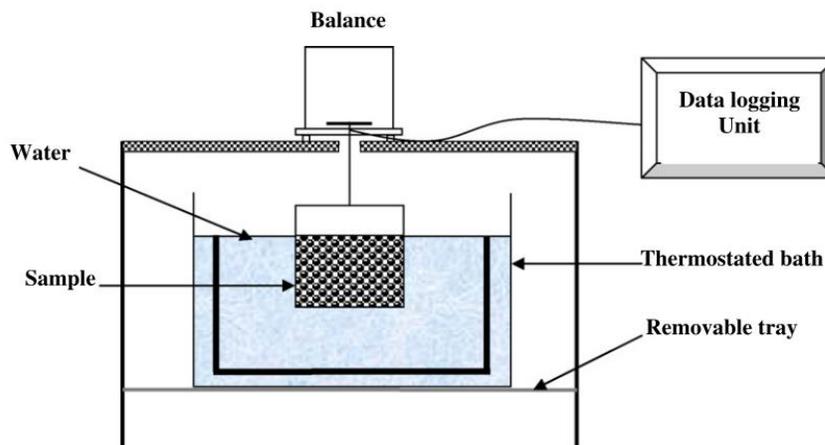


Figure 1-10: Méthode hydrostatique pour étudier la cinétique d'absorption d'eau des GBR

Bendimerad et al.[27] ont combiné les méthodes de Tam et al. [25] et de Tegger [28] pour suivre la cinétique d'absorption d'eau des GBR. Ils ont étudié deux types de GBR issus d'un béton de

démolition (RA 4-10, $W_a= 5,62\%$, RA 10-20, $W_a = 5,31\%$) et des granulats naturels (Na 6.3-20, $W_a= 0,65\%$, NLA 4-20, $W_a=0,6\%$). Les résultats de cinétique d'absorption sont présentés dans la figure 1-11. Bendimerad et al. [27] montrent que, si les bulles d'air sont correctement évacuées, une absorption d'eau de plus de 80% est obtenue au bout de 15 minutes pour les matériaux recyclés, et de 4 heures pour les matériaux naturels. Cette différence peut être attribuée à la taille des pores, largement plus petits pour les matériaux naturels comparés aux matériaux recyclés, qui ralentirait ainsi l'absorption d'eau.

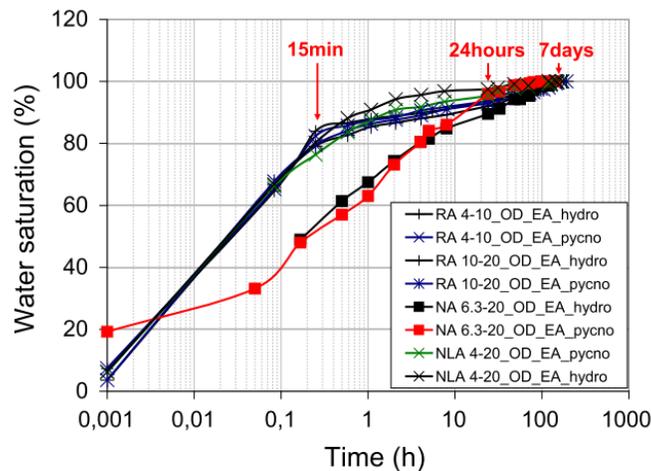


Figure 1-11 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés et naturels [27]

Mills-Beale et al. [29] ont suggéré au lieu de l'immersion sous eau pendant 24 heures, de réaliser une immersion sous vide partiel de 30mmHg (4kPa) pendant 10, 20 et 30 minutes. Ils ont montré qu'avec cette méthode de saturation sous vide partiel, la saturation totale est atteinte seulement après 30 minutes. Zhang et al [30] ont fait une comparaison entre l'absorption par immersion simple dans l'eau et l'absorption sous vide. Ils ont démontré que l'absorption est nettement supérieure quand elle est faite sous vide. Khoury et al.[31] dans une étude réalisée sur une fraction de GBR 6,3/10mm trouvent des résultats similaires à ceux de Mills-Beale et al. [29] et Zhang et al. [30].

Souvent, l'absorption d'eau durant le malaxage du mortier ou du béton est supposée la même que celle obtenue dans l'eau. Ainsi l'influence potentielle de la capacité de liaison de l'eau avec les fines est négligée. Bello et al.[32] ont étudié l'absorption de gravillons légers d'une granulométrie

4/8mm dans une pâte réalisée avec différents rapports E/C. Il a été observé que l'absorption d'eau dans la pâte est plus faible que dans l'eau, une réduction de 25% a été observée.

Maimouni et al. [33] ont étudié le degré de saturation d'un sable recyclé modèle immergé dans une pâte de filler et dans une pâte de ciment : 3 types de sables recyclés modèles ont été utilisés. Les sables modèles ont été obtenus après concassage d'une pâte de ciment fabriquée en laboratoire avec 3 différents rapports E/C (0,3, 0,5 et 0,7). L'absorption d'eau de ces pâtes de ciment était respectivement de 12,9%, 23,9% et 35,6%. Afin d'étudier la cinétique d'absorption, des essais d'étalement sur mortier ont été réalisés. La figure 1-12 montre que l'absorption atteint un maximum après 6 minutes, peu importe le type de sable recyclé utilisé (E/C différents). Le degré de saturation après 90 minutes dépend du type de sable recyclé et varie entre 49% et 87%. Cette différence est attribuée à la différence de perméabilité obtenue en fonction des sables recyclés réalisés avec les différents rapports E/C.

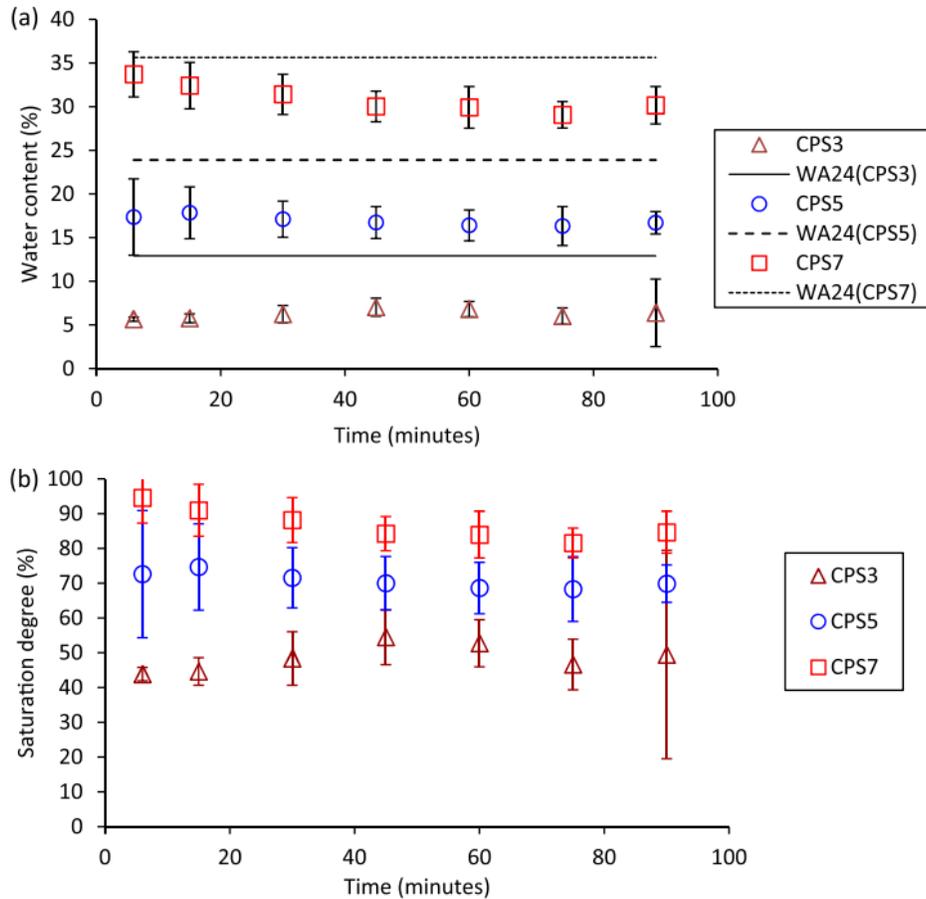


Figure 1-12 : (a) Quantité d'eau estimée dans les sables recyclés, (b) degré de saturation des différents sables recyclés utilisés dans l'étude [33]

Le et al. [13] ont étudié l'influence de l'état de saturation d'un sable de béton recyclé ($WA = 8,7\%$) et de son mode et temps de pré saturation sur la maniabilité de mortiers. Des essais d'étalement sur mortier ont été réalisés avec un sable recyclé pré saturé avec différentes teneurs en eau. Dans le cas où le sable recyclé pouvait être saturé avec une quantité d'eau égale au coefficient d'absorption d'eau, n'importe quelle teneur en eau supérieure à WA permettrait d'obtenir un étalement constant. Or, dans les résultats obtenus, l'étalement diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. L'étalement commence à être constant au-delà d'une teneur en eau égale à 14% . Cette teneur en eau correspond à une teneur supérieure au coefficient d'absorption d'eau du sable (figure 1-13). Cela signifie que l'eau introduite dans le bidon étanche n'est pas entièrement absorbée et qu'il en reste une partie dans l'espace inter granulaire. Une des conclusions que propose Le et al. [13] est

qu'une pré saturation d'un sable recyclé avec une teneur en eau égale à WA +5% pendant une semaine, permet de saturer le matériau et ainsi de bien contrôler l'eau efficace.

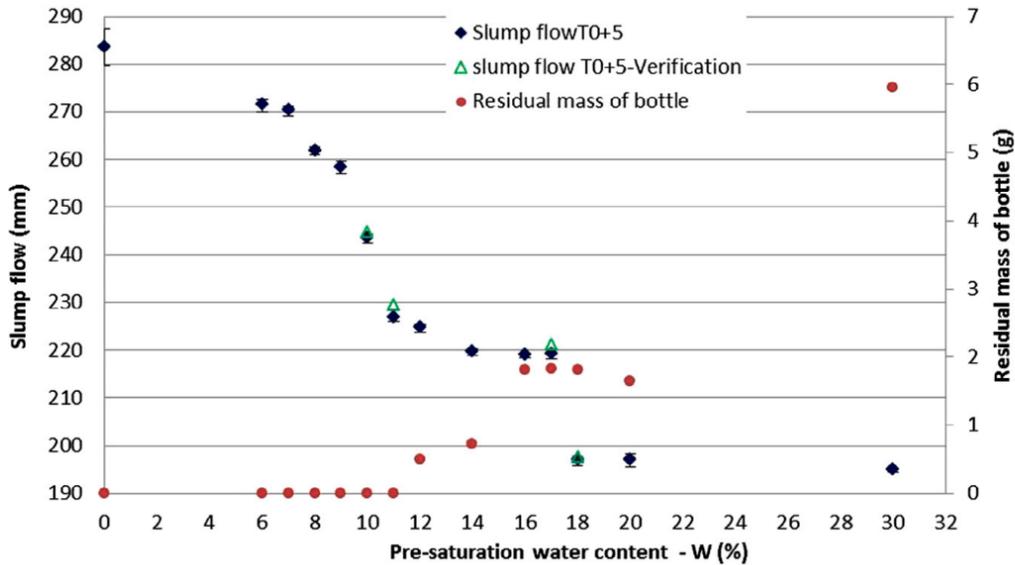


Figure 1-13: Etalement des mortiers en fonction de la quantité d'eau de pré saturation du sable recyclé [13]

Khoury et al. [34] ont développé une méthode permettant de suivre l'évolution de l'eau efficace et l'absorption d'eau d'un GBR lors du malaxage d'un béton. L'eau efficace est estimée grâce à une comparaison effectuée entre les courbes de puissance de béton fabriqué avec un GBR et celles de béton fabriqué avec un granulat naturel (figure 1-14). Cette méthode permet de suivre en continue l'évolution des échanges entre le granulat et le mélange. Les résultats montrent que l'eau efficace réelle dans le mélange est systématiquement plus élevée que l'eau efficace théorique calculée à partir du coefficient d'absorption d'eau des GBR mesuré à partir de la norme EN 1097-6. Ainsi, les auteurs proposent qu'une saturation sous vide ou une saturation à long terme permette le remplissage des pores et réduit les échanges d'eau entre le GBR et la pâte de ciment, donc un meilleur contrôle de l'eau efficace et ce dès le début de la fabrication du béton est obtenu.

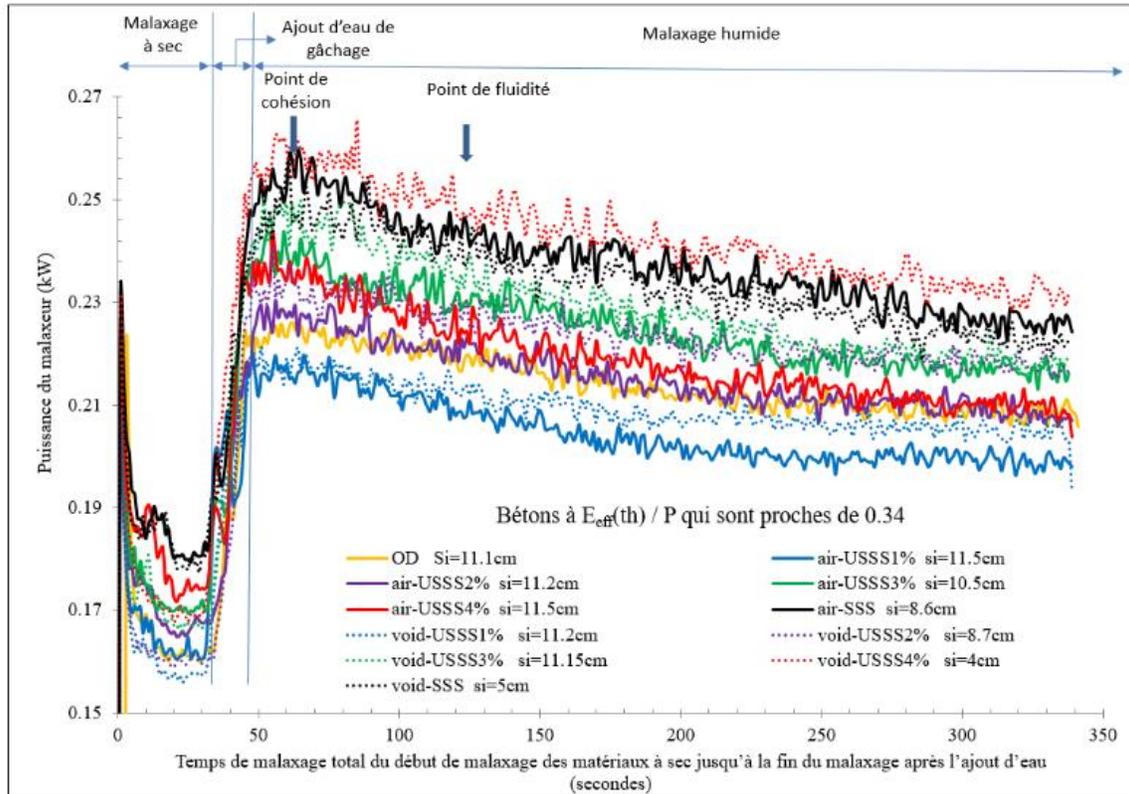


Figure 1-14 : Evolution de la puissance du malaxeur en fonction du temps de malaxage pour le béton. Un rapport $E_{eff}(th)/P$ proche de 0,34 et des conditions d'humidité initiales différentes pour les GBR sont utilisés ; S_i représente l'affaissement initial des différents mélanges [34]

1.3.4 Hétérogénéité des GBR

La norme Européenne NF EN 12620+A1 [35] définit un granulat recyclé comme étant un granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction. La norme EN 206/CN [36] permet l'utilisation des GBR qui sont conforme à la spécification de la norme NF EN 12620+A1 [35] dans la formulation de béton, à l'exclusion du béton précontraint. Trois types de GBR sont définis à partir de leur classification et de la fréquence d'essai associée, les caractéristiques sont définies dans la figure 1-15 :

- Type 1 : CR_B
- Type 2 : CR_B ou CR_C
- Type 3 : CR_B ou CR_C ou CR_D .

Code	Constituants principaux catégorie NF EN 12620 + A1	Constituants secondaires				Types de fréquence d'essai ³	
		Catégories NF EN 12620 + A1				Temporelle	Quantitative (en tonne)
CR _B	RCU ₉₅	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0.5-}	FL _{0.2-}	2/mois	1/2000
CR _C	RCU ₉₀	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg ₁₋	FL ₂₋		
CR _D	RCU ₇₀	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XRg ₂₋	FL ₂₋		

Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.2 doit faire l'objet d'un essai minimum de classification des constituants. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

NOTE : Glossaire spécifique aux granulats recyclés :

- Rc béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé ;
- Ru granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques contenus dans un granulat recyclé ;
- Rcu correspond à Rc + Ru ;
- Rg verres contenus dans un granulat recyclé ;
- Rcu correspond à Rc + Ru + Rg ;
- Ra matériau bitumineux contenu dans un granulat recyclé ;
- Rb éléments en argile cuite (briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant contenus dans un granulat recyclé ;
- X argiles, sols, métaux ferreux et non ferreux, bois, plastiques, caoutchouc non flottants, plâtre contenus dans un granulat recyclé ;
- XRg correspond à X + Rg ;
- FL matériau flottant (exprimé en volume) contenu dans un granulat recyclé.

Figure 1-15 : Constituant des gravillons recyclés selon la norme NF EN 206/CN [36]

Malgré la classification proposée par la norme NF EN 206/CN [36], l'hétérogénéité reste une des problématiques essentielles que l'on rencontre avec les GBR. Cette variabilité vient de la nature du béton concassé et de la quantité de la pâte adhérente dans les différentes classes granulaires qui dépendent aussi du mode de concassage utilisé. Khoury et al. [37] ont utilisé un Jig à eau pour étudier l'hétérogénéité des GBR. L'objectif de cette étude est de trier suivant la masse volumique une quantité donnée de GBR et de s'intéresser à la caractérisation d'une classe granulaire étroite (6,3/10mm). L'absorption d'eau mesurée selon la norme EN 1097-6 sur cette classe granulaire est de 4,8%. Par contre, lors des essais réalisés sur la même fraction après le tri au jig, les résultats d'absorption d'eau varient de 1,8 à 9,1%. La figure 1-16 montre l'hétérogénéité du lot utilisé.

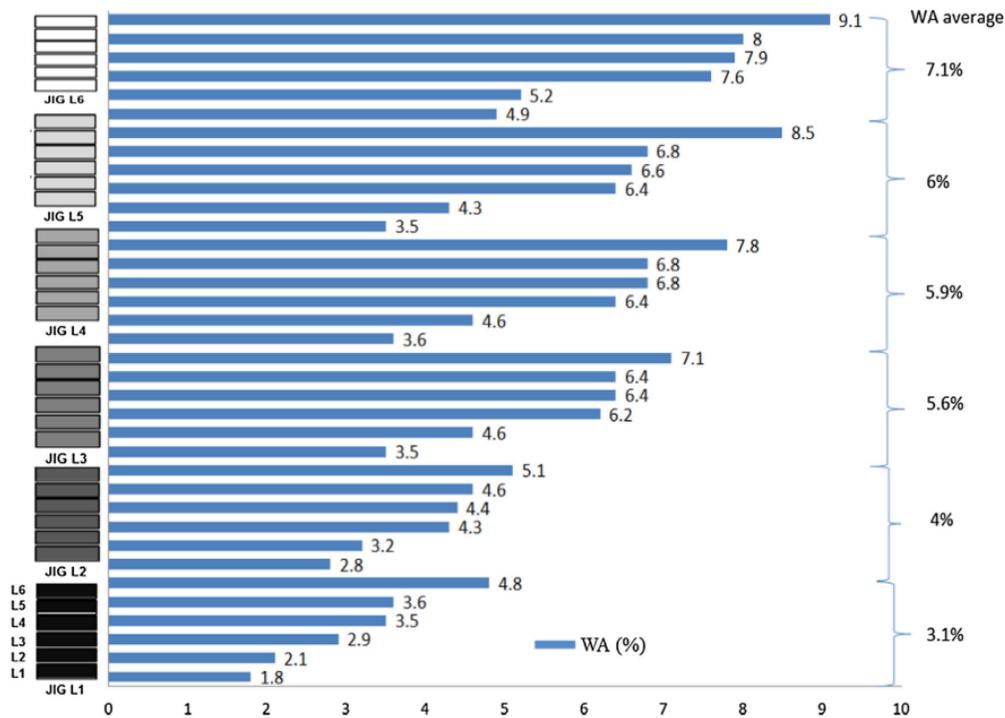


Figure 1-16 : Variation de WA sur un GBR trié avec la jig à eau [37]

Un autre risque qui peut être causé par l'hétérogénéité (compliqué à contrôler) est la présence de contaminant dans les GBR. Khalaf et De Venny [38] ont trouvé du bitume, du gypse, de la matière organique et du verre dans des GBR, ce qui peut diminuer d'une manière significative les propriétés d'un béton ou d'un mortiers. Lamond et al. [39] ont contaminé un GBR avec 7% de plâtre, 5% de terre, 4% de bois, 3% de gypse, et 2% d'asphalte. Ils ont montré une diminution d'au moins 15% de la résistance mécanique comparée à un béton réalisé avec un GBR non contaminé. Debieb et al. [40] ont montré l'effet d'un GBR contaminés avec Cl^- et SO_4^{2-} sur les propriétés mécaniques et les propriétés de durabilité. Ils ont trouvé une différence significative comparé à ceux réalisés avec un GBR non contaminé.

1.4 Effet des caractéristiques physiques des granulats sur l'état frais des bétons et des mortiers

Il est possible de classer les granulats suivant leur forme, ainsi deux types sont distingués :

- Les granulats roulés : ce type de granulat se trouve principalement dans les fleuves et les rivières, et ils ont des formes arrondies

- Les granulats concassés : ils sont issus de roche broyée à l'aide d'un concasseur. Ce procédé produit des granulats de forme aléatoire et irrégulière, beaucoup plus anguleuse.

Dans un béton, le volume des granulats représente entre 60 et 75% du volume total du mélange. La forme et la granulométrie ont une influence sur la compacité des granulats. Cette dernière influence le volume du vide qui doit être rempli avec la pâte de ciment. Ainsi, l'optimisation de la compacité du squelette granulaire peut être utilisée pour réaliser un béton plus durable et permettre un meilleur contrôle de la maniabilité.

Le comportement rhéologique d'une suspension peut être décrit approximativement par le modèle de Krieger et Dougherty [41] (eq.1-4) :

$$\eta_c(\phi) = \eta_c(0) \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \dots \dots \dots (1-4)$$

Où $\eta_c(\phi)$ est la viscosité de la suspension, $\eta_c(0)$ est la viscosité du liquide interstitiel, ϕ est la fraction volumique solide des particules en suspension, ϕ_m est la compacité maximale du sable et $[\eta]$ est la valeur intrinsèque de la viscosité des particules (en fonction de leur forme).

De nombreux modèles ont été établis dans le but d'obtenir la compacité théorique et ainsi prédire la compacité des matériaux granulaires. Dans ces modèles, l'effet paroi et l'effet de desserrement doivent être pris en considération.

L'effet de desserrement est provoqué par l'inclusion d'un grain de taille inférieure dans un milieu dominé par les grains de taille plus importante. Cet effet est engendré par le fait que le vide inter granulaire des grains de grande taille est insuffisant devant le nombre de grains de petite taille. Ceci engendre un éloignement des gros grains et une décompaction.

L'effet de paroi est l'inclusion d'un gros grain dans un milieu dominé par des grains de petite taille ; il se produit autour du gros grain une perte de compacité du fait notamment du rapport de dimensions. Les gros grains agissent ainsi comme une barrière entre les petits grains et génèrent une quantité importante de vide, entraînant une baisse de la compacité du mélange.

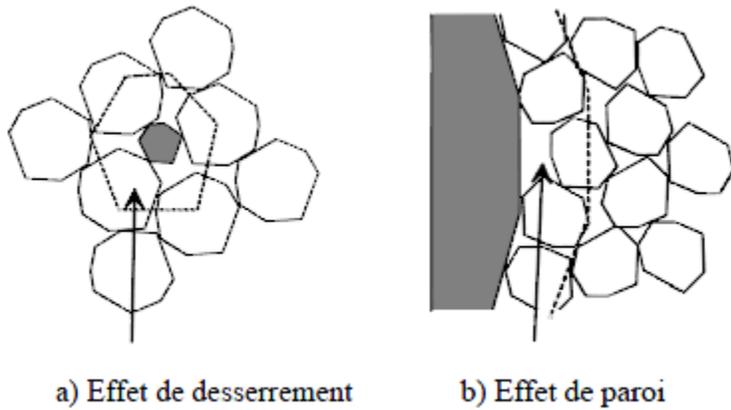


Figure 1-17: Effet d'interactions entre classes granulaires [42][43]

Le modèle de Power [44] par exemple ne considère que l'effet de desserrement. Par contre les modèles de Benaim et Goff [45] et Toufar et al. [46] prennent en compte l'effet de paroi. Des modèles de compacité plus récents comme le MEC [43] prennent en considération à la fois l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

La morphologie des grains est généralement présentée en fonction de l'élongation, de la convexité et de la circularité. L'élongation est un paramètre qui permet de donner une idée de l'allongement de la particule sans tenir compte des irrégularités de surface. La convexité est un paramètre qui permet de qualifier l'aspect de surface de la particule : si ce coefficient est proche de 1, cela veut dire que la particule est convexe et si elle se rapproche de 0 cela veut dire que la particule offre de fortes irrégularités de surface. La circularité représente la ressemblance de la particule à une sphère [47].

L'illustration schématique de la caractérisation de la morphologie des particules à l'aide de l'analyse d'image numérique 2D est présentée dans la figure 1-18. La circularité (eq.1-5) inscrit à l'intérieur de la particule (D_{inc}) et en ajustant les cercles possibles aux bords et coins de la particule (D_i). Afin de déterminer la convexité de la particule (eq.1-6), il convient de déterminer le diamètre du cercle circonscrit (D_{cc}). Enfin, pour l'élongation (eq.1-7), il faut déterminer la longueur (L) et la largeur (W) de la particule.

$$\text{Convexité} = \frac{\text{aire de la particule}}{\text{aire du cercle qui entoure la particule}} = \frac{\pi LW/4}{\pi D_{CC}^2/4} \dots\dots\dots(1-5)$$

$$\text{Circularité} = \frac{\frac{1}{x} \sum_{i=1}^x D_i}{D_{inc}} \leq 1 \dots \dots \dots (1-6)$$

$$\text{Elongation} = \frac{L}{W} = \frac{D_{max}}{D_{min}} \geq 1 \dots \dots \dots (1-7)$$

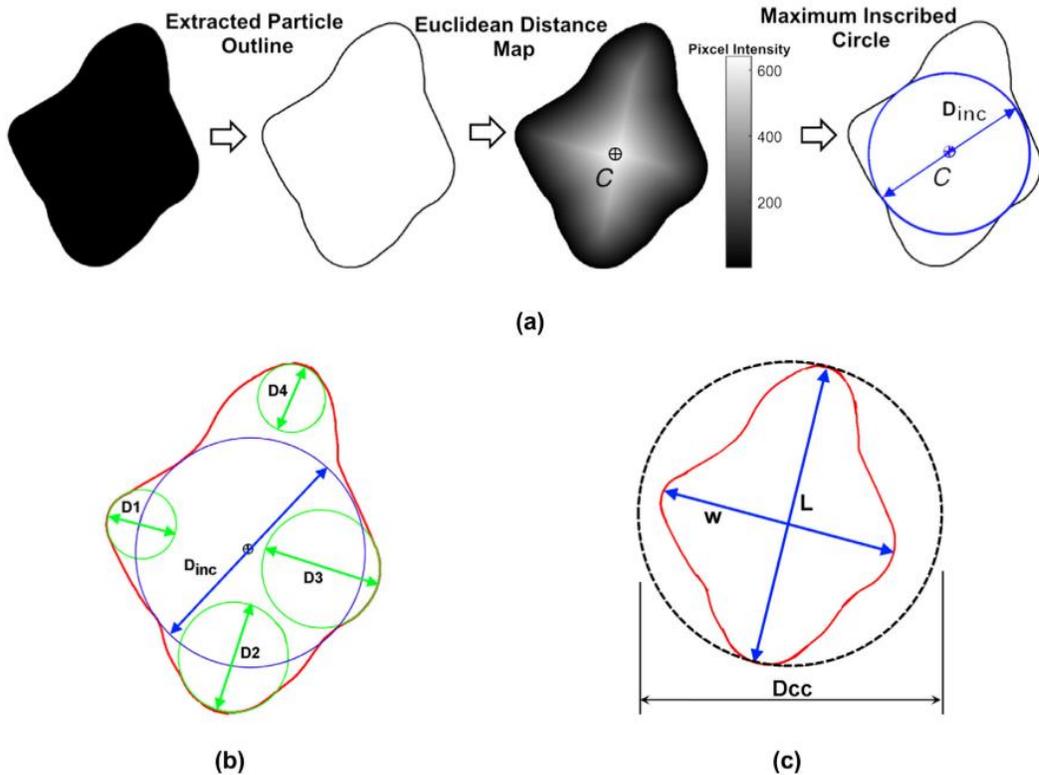


Figure 1-18 : Représentation schématique de l’analyse de la forme des particules [48]

Khayat et al. [49] ont montré que la forme des granulats (roulé ou concassé) ainsi que la granulométrie influencent significativement la rhéologie des bétons et des mortiers. Afin de prédire le comportement rhéologique en fonction de la compacité ou encore pour déterminer la fraction solide maximum qui peut être incorporée dans un mélange, des équations empiriques comme l’équation d’Einstein [50], Krieger-Dougherty [41] ou d’autres équations de la littérature peuvent être utilisées [51]. Ces formules relient généralement le seuil de cisaillement (grandeur fondamentale en rhéologie caractérisant la fluidité d’un matériau) de la pâte du ciment (τ_{pc}) ou encore celui du béton (τ_{pc}), au ratio du volume de la fraction solide à celle de sa compacité ($\frac{\phi}{\phi_m}$).

Toutou et Roussel [52] ont réalisé une étude sur mortier (où ils ont considéré que le sable était en suspension dans une pâte de ciment) et le béton (où ils ont considéré que les gravillons étaient en suspension dans le mortier). Ils ont remarqué que le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation de la fraction granulaire du sable. Par contre, pour les petits volumes de sable, le seuil de cisaillement était plus bas que celui de la pâte seule. Ce résultat a été expliqué par le phénomène de défloculation (décomposition des floccs dans la pâte de ciment en raison de la présence d'inclusions de sable lors du mélange de la suspension [53]). Par contre, lors de l'incorporation d'un volume de granulat plus important, le seuil de cisaillement augmente d'une manière significative (figure 1-19).

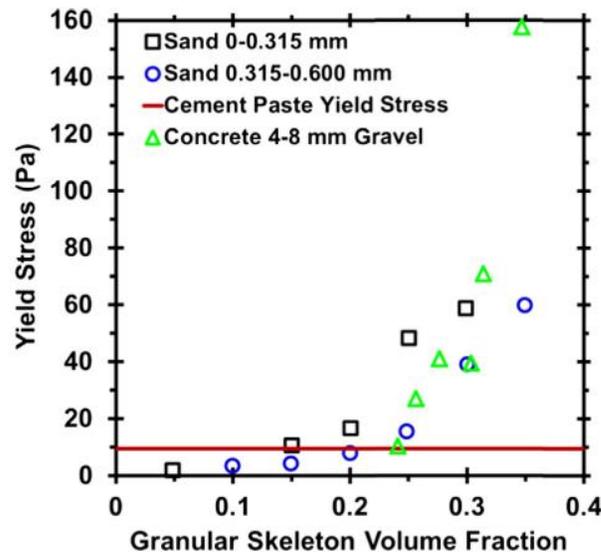


Figure 1-19 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la fraction volumique ajoutée de sable ou de gravillon [52]

Yammine et al. [54] ont prouvé qu'il existe une forte transition dans le comportement rhéologique d'un béton entre un régime dominé par les frottements entre les granulats et un régime dominé par les interactions hydrodynamiques. Les résultats de Yammine et al. [54] sont présentés dans la figure 1-20 en fonction de la variation du seuil de cisaillement et la fraction volumique des granulats. On peut distinguer trois zones différentes : Pour $\phi > 70\%$ le seuil de cisaillement est de l'ordre du 100 kPa, et cette valeur correspond à un béton traditionnel avec un affaissement inférieur à 150 mm; pour $\phi < 60\%$, le seuil de cisaillement est inférieur à 100 Pa, ce qui correspond à un béton auto-plaçant. Et enfin pour $60\% < \phi < 70\%$ il y a une forte transition entre un seuil de

cisaillement correspondant un béton auto-plaçant (fluide) à celui d'un béton ordinaire. Selon Yammine et al. [54], cette transition correspond à une fraction volumique de granulat critique ϕ_c .

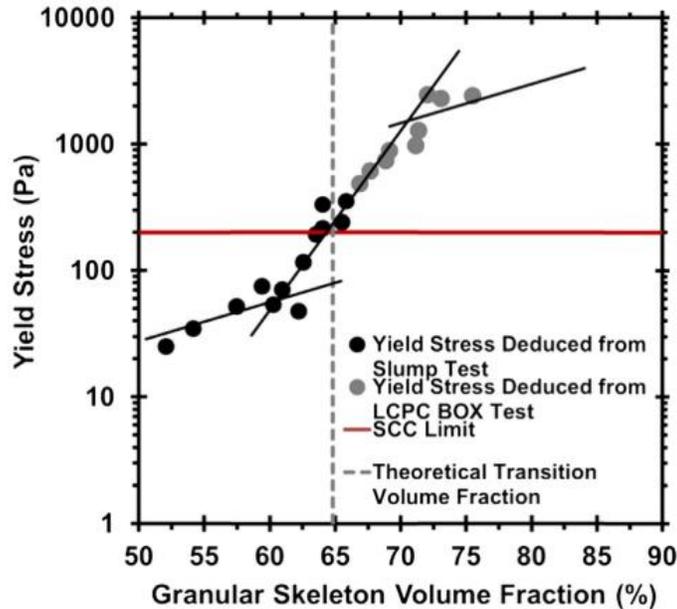


Figure 1-20 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du volume du squelette granulaire [54]

Hafid et al. [55] ont étudié l'effet de différents types de sables avec les différentes morphologies sur le comportement rhéologique d'un fluide modèle à seuil. La figure 1-21 montre qu'il existe une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement et la forme des grains de sable utilisé. Comme pour Toutou et Roussel [52], le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation de la fraction volumique du sable. Les particules irrégulières ayant des rapports de forme beaucoup plus élevés ont tendance à augmenter le seuil de cisaillement de la suspension. Sur la figure 1-19, selon la morphologie des particules, il existe une fraction volumique critique qui fait augmenter significativement le seuil de cisaillement. Cette fraction volumique critique est plus faible pour les particules avec des formes irrégulières (granulat concassé).

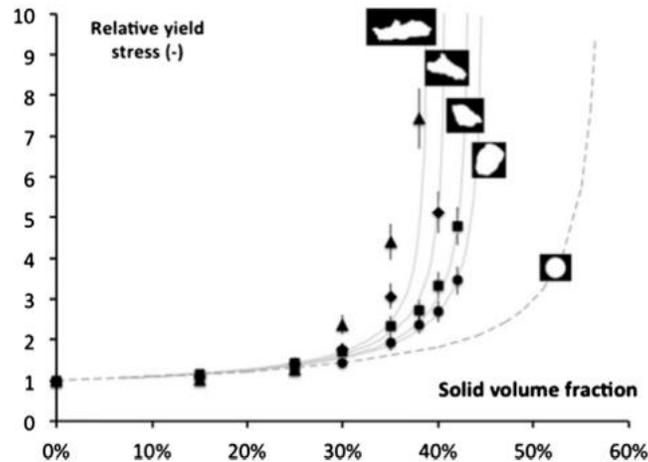


Figure 1-21 : Variation du seuil de cisaillement relatif en fonction des différents types de sables utilisés [55]

1.5 Caractéristiques des bétons et des mortiers réalisés avec des GBR

La première fabrication de béton et de mortier avec des déchets issus du béton date des années 1970 [56]. Dans la littérature, le comportement du béton ou du mortier réalisés avec les GBR est généralement comparé à celui d'un mortier ou d'un béton réalisé avec des matériaux naturels.

Vinay Kumar et al. [57] ont réalisé une étude sur l'utilisation des GBR issus des stations de tri pour la fabrication de béton auto plaçant. Un remplacement en volume à un taux de 20% du sable naturel et des gravillons naturels par des GBR a été réalisé. L'absorption d'eau du sable recyclé est de 10,4% et celle du gravillon recyclé est de 6,1%. Les auteurs n'ont pas indiqué l'état de saturation utilisé pour leur GBR lors de la fabrication du béton. Les résultats à l'état frais et à l'état durci ont montré qu'il était possible d'utiliser les GBR comme substitut des matériaux naturels pour la fabrication des bétons à taux de 20%.

Poon et al. [58] ont étudié l'influence de l'état de saturation et de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés à différents taux (20, 50 et 100%). L'absorption d'eau du granulat recyclé est de 7,4%. À fraction volumique identique de gravillons, l'eau de gâchage est ajustée dans le but de compléter l'eau absorbée par les GBR. Les résultats montrent que l'affaissement mesuré après 10 minutes augmente linéairement ($R^2=0,75$) avec le taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés. Ceci est dû au fait que les granulats recyclés n'absorbent pas toute l'eau qui devait être absorbée et ainsi l'eau en excès reste dans la

pâte et fluidifie le béton. Par ailleurs, l'affaissement diminue rapidement dans le temps, ce qui confirme l'hypothèse qu'il y a un transfert d'eau graduelle entre la pâte et les granulats. Les auteurs montrent une faible chute de la résistance mécanique et suggèrent que 50% de substitution permet de bien contrôler l'état frais et l'état durci du béton réalisé avec les granulats recyclés.

Des résultats similaires ont été obtenus par Kou et Poon [59] sur des bétons auto-plaçants fabriqués avec différents taux de remplacement du sable naturel par un sable recyclé. Les résultats montrent effectivement une augmentation linéaire de l'étalement avec l'augmentation du sable recyclé. Cette augmentation est certainement due au fait que, lors de l'ajout du sable recyclé, une quantité d'eau est ajoutée pour compenser l'absorption d'eau, cette quantité d'eau n'est pas absorbée en totalité par le sable recyclé et ainsi, elle reste dans la pâte, ce qui provoque une augmentation des étalements. Aussi, les essais d'étalement dans le temps montrent une diminution rapide de la maniabilité, ce résultat confirme les résultats de Poon et al. [58] sur le fait qu'il y a un transfert d'eau entre la pâte et le sable recyclé. Ils ont aussi mis en évidence une diminution de la résistance mécanique. Ils suggèrent que 20% de substitution correspond à l'optimum pour avoir des comportements à l'état frais et à l'état durci comparables à ceux d'un béton réalisé avec des matériaux naturels.

Evangelista et al. [60] se sont intéressés à l'incorporation des sables recyclés dans la fabrication des bétons ; ils ont réalisé une substitution en volume de 10%, 20%, 30%, 50% et 100% de sable naturel par un sable recyclé. Une diminution de 10% a été obtenue dans le cas d'une substitution totale du sable naturel par le sable recyclé. Ils ont aussi obtenu la même tendance pour la résistance en traction, le module d'élasticité ainsi que la résistance à l'abrasion. Ghorbel et al. [61] ont réalisé deux types de béton avec deux différentes classes de résistance: un C25/30 et un C35/45. Ils ont réalisé une substitution totale du sable naturel par un sable recyclé et le gravillon naturel par un gravillon recyclé. Les auteurs trouvent des résultats similaires aux résultats trouvés par Evangelista et al. [60]. Dans les deux recherches évoquées ici, les auteurs ne présentent pas l'état de saturation initiale de leurs matériaux.

La résistance mécanique d'un béton ou d'un mortier est fortement liée à la liaison entre les granulats et la pâte du ciment. Cette liaison est conditionnée en majeure partie par sa porosité qui est souvent plus importante que la porosité de la matrice cimentaire. Cette zone est souvent appelée Interfacial Transition Zone (ITZ) [62].

La formation de l'ITZ dans le béton est due à la présence d'une couche d'eau qui entoure les granulats. La distribution de l'eau dans la pâte du ciment est hétérogène, elle est plus abondante autour des granulats, ce qui engendre un rapport E/C plus élevé à cet endroit. La formation de l'ITZ est due à deux phénomènes principaux: l'effet de paroi et le micro-ressuage. L'effet de paroi correspond à un empilement moins compact du ciment autour du granulat que dans la matrice. Le micro-ressuage est dû à l'accumulation de l'eau autour du granulat lors de la mise en place du béton ou du mortier.

L'utilisation des GBR saturés permet d'obtenir une meilleure connaissance de l'eau efficace présente dans le mélange pour la fabrication de la pâte. Mais cela peut induire une baisse de la résistance mécanique à cause d'une mauvaise adhésion entre l'ancienne pâte présente dans les GBR et la nouvelle pâte. Zhao et al. [63] ont étudié l'interface entre la nouvelle pâte et l'ancienne pâte pour un sable recyclé. Un sable a été utilisé avec deux différents états de saturation (sec et humide). L'influence de l'état de saturation du sable recyclé (séché ou saturé) sur les propriétés des mortiers de compositions identiques a d'abord été étudiée. Les résultats ont montré que l'affaissement des mortiers contenant un sable recyclé sec est toujours plus important que celui des mortiers contenant le sable recyclé saturé. En effet, dans le cas d'un sable recyclé sec, la quantité théorique d'eau absorbée est ajoutée au début du mélange, ce qui entraîne une augmentation temporaire du rapport E/C efficace initial et du volume de pâte, conduisant à une meilleure ouvrabilité. A contrario, l'eau absorbée dans le sable recyclé saturé n'est pas disponible et ne peut donc pas contribuer à l'augmentation du rapport E/C efficace initial. De plus, la résistance à la compression des mortiers contenant du sable recyclé sec est toujours supérieure à celle des mortiers fabriqués avec du sable recyclé saturé, ce qui est attribué à une zone de transition interfaciale plus dense, ce qui améliore les propriétés mécaniques (Figure 1-22). Les auteurs ont aussi étudié l'influence de la fraction du sable recyclé et de la classe granulaire du sable recyclé sur les propriétés mécaniques des mortiers avec un sable recyclé saturé. Les résultats montrent que la résistance à la compression des mortiers diminue quasi linéairement à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du sable recyclé. De plus, il a été démontré que la fraction la plus fine du sable recyclé (0 / 0,63 mm) avait le plus mauvais effet sur les propriétés mécaniques des mortiers.

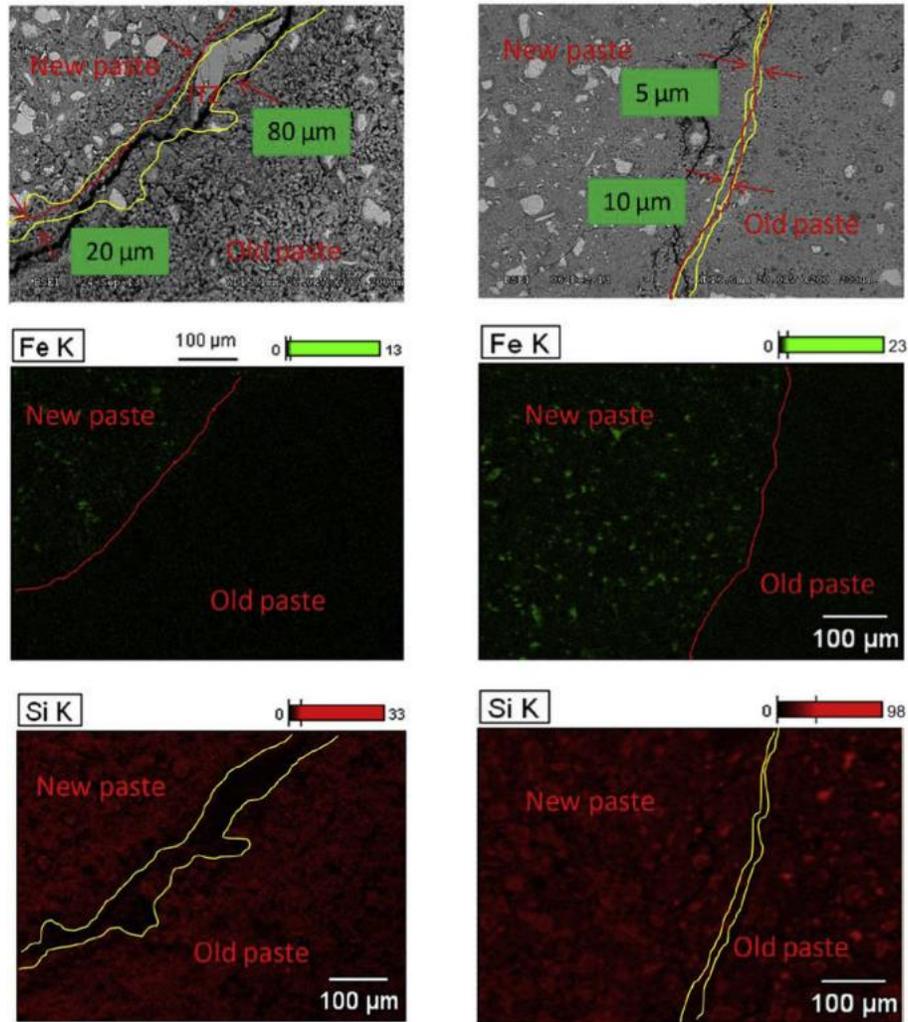


Figure 1-22 : Présentation de la zone interstitielle entre la nouvelle pâte et l'ancienne pâte lors de l'utilisation du sable saturé (à gauche) et sec (à droite) [63]

Dans une étude similaire, Le et al. [22] ont caractérisé par analyse d'image à 2 et 28 jours d'hydratation des mortiers réalisés avec un sable recyclé sec et saturé en comparaison avec des mortiers réalisés avec un sable naturel. Ils ont trouvé que l'interface des mortiers réalisés avec un sable recyclé à l'état sec ou à l'état saturé étaient identiques, mais ils ont trouvé que l'état de saturation influence significativement la répartition de la porosité dans la zone interstitielle. Cette porosité dans la zone interstitielle dans les mortiers contenant du sable recyclé est beaucoup plus grande que celle obtenue dans les mortiers à base de sable naturel. Cette différence peut être expliquée par un rapport E/C effectif plus élevé dans le mortier réalisé avec un sable recyclé. Cet excès peut être dû à une valeur d'absorption du sable recyclé inférieure à celle fournie par le test d'absorption d'eau réalisé sur le sable recyclé.

1.6 Utilisation des GBR comme addition minérale dans le domaine du Génie Civil

Le secteur industriel est responsable de 25% des émissions de CO₂ et la fabrication du ciment représente à elle seule 5% de la totalité des émissions [64]. Les émissions de CO₂ produites lors de la fabrication du ciment sont dues non seulement à l'énergie nécessaire à la calcination de la matière première (40%), mais surtout à la décarbonatation de la calcite. Le remplacement d'une partie du clinker par des produits industriels, tels que les laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes... peut être un bon moyen de réduire les émissions de CO₂. Une autre méthode permettant de réduire les émissions de CO₂ consiste à remplacer une partie du ciment par des produits industriels dans la fabrication du béton [65][66].

1.6.1 Utilisation des GBR dans la fabrication du clinker

Comme évoqué dans les paragraphes 1.3 et 1.5, la valorisation des fractions fines issues de GBR est beaucoup plus compliquée que les fractions grossières. Galbenis et al. [67] ont produit un clinker avec deux granulats de natures différentes issus de GBR et de maçonneries. Les deux granulats ont été broyés, et cuits à une température supérieure à 1350°C pendant une heure. Cette procédure a permis d'obtenir plusieurs clinkers. Les auteurs ont trouvé que la pâte de ciment, la brique ainsi que d'autres déchets présents dans les déchets de démolition ont permis d'améliorer la combustion, demandant moins d'énergie pour former les principales phases du clinker.

Dans une étude réalisée par Kulisek et al. [68], plusieurs échantillons de GBR prélevés dans différentes usines de traitement des déchets de démolition ont été caractérisés minéralogiquement et chimiquement. Des teneurs plus élevées en SiO₂ et plus faibles en CaO ont été relevées et prises en compte par la correction de la teneur en fer et un ajout de calcaire dans la formulation du cru pour la fabrication d'un clinker. Un clinker proche de celui présent dans un ciment portland a été obtenu. Les auteurs ont conclu qu'avec ce type de clinker, un ciment de type CEM I 42.5N peut être réalisé.

Diliberto et al. [69] ont étudié la possibilité d'utiliser du béton recyclé et des matériaux fins issus du processus de dépoussiérage de plate-forme de concassage du béton en tant que matière première alternative pour la fabrication du clinker. Après une caractérisation chimique complète, des sables

et des fines de béton recyclé (XRF, XRD, DTA-TGA ...), plusieurs mélanges de ciment ont été préparés en substituant partiellement ou totalement de l'argile ou de la marne. Le clinker obtenu a été caractérisé par différentes techniques analytiques (ATG/DTG, FX, DRX, MEM...). Les résultats ont montré qu'il était possible d'obtenir un clinker de bonne qualité comparable à celui obtenu avec des matériaux naturels. Cependant, il est très difficile de reproduire strictement la même composition de clinker à cause de l'hétérogénéité des GBR. Ainsi, l'utilisation des GBR implique une réadaptation de la composition du clinker.

1.6.2 Utilisation des GBR comme addition minérale dans la fabrication du béton ou du mortier

Le prétraitement thermique peut être une solution pour la valorisation des GBR. Cependant, cette solution est coûteuse, car il faut tout d'abord broyer la matière et par la suite réaliser le traitement thermique. La plupart des recherches vise à rendre les fines issues du recyclage réactives, mais peu d'études ont été réalisées dans le but de valoriser les fines de GBR sans un traitement thermique.

Florea et al. [70] ont réalisé une étude dans le but de quantifier le pourcentage de poudre de pâte du ciment et de poudre de granulats présents dans un sable recyclé issu de GBR. Les auteurs ont remarqué que, pour une granulométrie inférieure à 80 μ m, plus de 70% des constituants du matériau fin provenait de la pâte du ciment. Ainsi, la fine est composée principalement d'hydrates et de clinker anhydre. La mesure a été réalisée avec une méthode chimique (paragraphe 1.3.1).

Oksri-Nelfia et al.[71] ont broyé deux types de sable recyclé pour confectionner leur poudre recyclé. Le premier sable recyclé (FN 1) était issu d'un béton avec un rapport E/C=0,45 conservé pendant 8 ans dans une salle humide. Le second (FN 2) était issu d'une plateforme de recyclage, il contient 78,4% de produits à base du béton, 15,3% de pierres naturelles, 3,7% de matériaux bitumineux, 1,2% de brique et terre cuite et de tuile et 1,4% d'autres matériaux comme le bois, le plastique et le verre. Oksri-Nelfia et al. [72] ont réalisé des mortiers dans le but de vérifier l'influence de la fine sur la réactivité et surtout sur la résistance mécanique des mortiers. Un comportement similaire à celui d'un filler calcaire a été obtenu (figure 1-23). Ce résultat paraît logique vu la teneur en calcaire élevée dans la fine due à la présence de granulats calcaires présents dans le matériau avant broyage.

Avec des essais en micro calorimétrie, Oksri-Nelfia et al. [71] ont comparé l'hydratation du ciment avec l'hydratation du ciment anhydre issu de la pâte présente dans les deux fines (FN 1 et FN 2). La figure 1-24 présente les quantités cumulées de chaleur dégagée par les deux fines, rapportées à la masse sèche du matériau. Cette mesure permet d'observer une chaleur dégagée non nulle pour les fines.

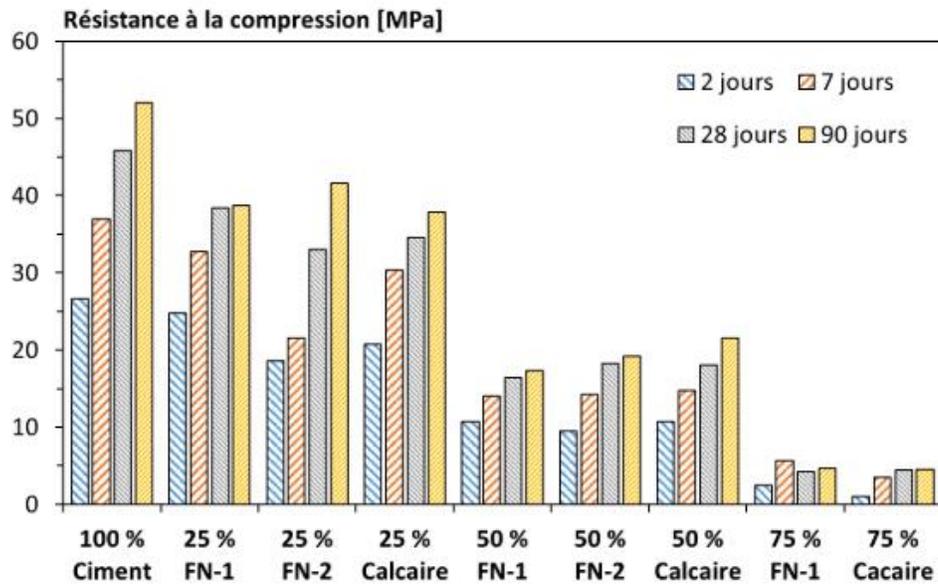


Figure 1-23 : Résistance en compression des différents mortiers réalisés avec un filler calcaire, FN 1 et FN 2 [71]

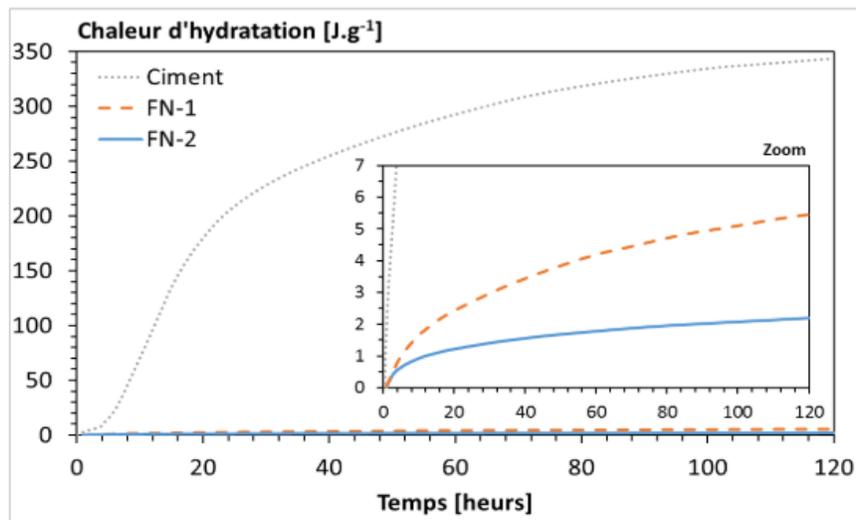


Figure 1-24 : Comparaison des chaleurs d'hydratation d'un ciment avec les fines recyclées (FN 1 et FN 2)[71]

Bordy et al. [73] ont utilisé une poudre de pâte de ciment fabriquée en laboratoire ($E/C=0,3$) et hydratée pendant 90 jours avant broyage. L'objectif de ce travail était d'étudier le rôle des anhydres résiduels présents dans la pâte de ciment. Pour cela, ils ont réalisé différents mortiers en substituant le ciment par 10%, 20%, 30%, 50%, 75% et 100% de pâte de ciment hydratée broyée. La figure 1-25 montre les résultats de résistance mécanique obtenus, on remarque une chute de résistance mécanique lors de la substitution du ciment par la pâte de ciment broyée ce qui est similaire au résultat obtenu par Okasri-Nelfia et al. [71]. Mais on remarque surtout une résistance mécanique de 8 MPa lors de l'utilisation de 100% de pâte de ciment hydratée. La figure 1-26 montre les résultats de la chaleur d'hydratation obtenus avec la méthode Langavant ; même si le mortier est réalisé avec 100% de pâte de ciment broyée, un léger dégagement de chaleur est obtenu, ce qui atteste d'une réactivité résiduelle.

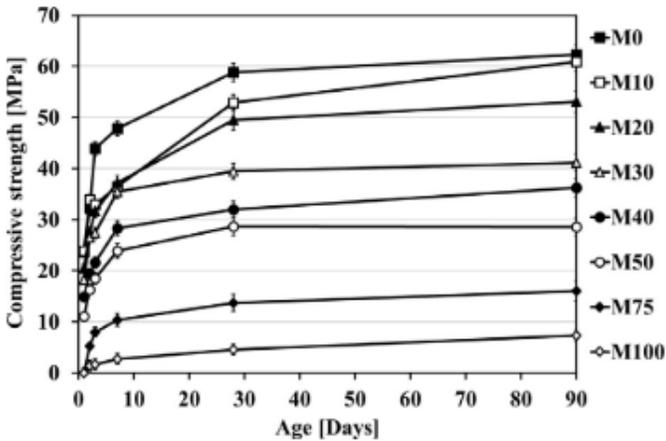


Figure 1-25 : Résultat de la résistance mécanique obtenue par Bordy et al. [73]

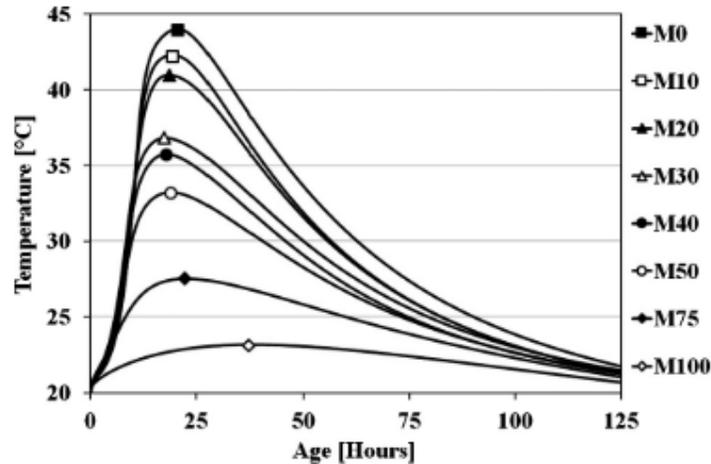


Figure 1-26 : Résultat de la chaleur d'hydratation obtenue par Bordy et al. [73]

1.7 Conclusion

1.7.1 Bilan des travaux antérieurs

La différence principale entre les GBR et les granulats naturels provient en grande partie de la présence de pâte de ciment adhérente qui conduit à une augmentation de l'absorption d'eau et à une diminution de la densité des GBR. Ainsi, la qualité d'un GBR est liée directement à la quantité de pâte de ciment adhérente présente. Dans la littérature, plusieurs recherches ont été réalisées dans le but de déterminer la quantité de pâte résiduelle, mais, malheureusement aucune des méthodes proposées ne permet d'obtenir une valeur précise.

L'absorption d'eau des GBR immergés dans de l'eau diffère de celle immergée dans une pâte (de ciment ou de filler calcaire par exemple). Peu de chercheurs se sont intéressés à l'absorption d'eau d'un GBR dans la pâte de ciment. Ainsi, il est très difficile d'estimer l'eau efficace dans le béton ou dans le mortier, ce qui rend difficile le contrôle des propriétés à l'état frais et à l'état durci des mortiers et des bétons.

Les GBR sont généralement incorporés dans une composition de béton ou de mortier à différents taux de substitution qui peuvent varier de 10% à 100%. Certains résultats montrent que l'utilisation d'un GBR pour la formulation d'un béton ou d'un mortier conduit à des comportements à l'état frais et à l'état durci identiques à ceux d'un béton ou d'un mortier réalisé avec des matériaux

naturels. D'autres résultats montrent le contraire et suggèrent qu'au-delà de 25%, les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton ou d'un mortier diminuent significativement.

Ainsi, une dispersion très importante est observée après analyse des résultats obtenus dans la littérature. En général, lors de la comparaison des mortiers ou des bétons réalisés avec un GBR et un granulats naturels, les différences dans les caractéristiques physiques des granulats ne sont pas prises en compte. L'identification rigoureuse des effets négatifs ou positifs de la substitution d'un granulats naturels par un GBR nécessiterait de pouvoir comparer les propriétés de bétons ou de mortiers contenant le GBR étudié à celles d'un béton ou d'un mortier contenant un granulats naturels "modèle" possédant des propriétés physiques très proches de celles du GBR.

La fraction fine des GBR est particulièrement délicate à valoriser, notamment en raison de sa très forte teneur en pâte de ciment adhérente. Une des méthodes alternatives qui permettrait de la réutiliser est de l'utiliser comme addition minérale. La majeure partie des recherches effectuées sur les poudres issues du recyclage se sont focalisées sur l'utilisation de ces poudres après un traitement thermique dans le but de les rendre réactives. Bordy et al. [73] et Nelfia Oksri et al. [71] ont toutefois étudié la possibilité d'utiliser ces fines comme additions minérales sans traitement thermique en considérant que le GBR broyé n'absorbe pas d'eau. Cependant, compte tenu de la dimension très réduite des pores de la pâte de ciment devant la taille des grains, il est très difficile d'imaginer que le broyage élimine toute la porosité. Ces poudres doivent donc probablement rester absorbantes. A notre connaissance, il n'existe néanmoins aucune méthode qui permette de mesurer l'absorption d'eau d'une poudre.

1.7.2 Objectifs fixés pour la thèse

Cette thèse est réalisée dans le cadre du projet Interreg VALDEM et vise à trouver des voies de valorisation à forte valeur ajoutée pour les GBR de dimensions inférieures à 4mm. Dans ce cadre, deux pistes de recherche sont explorées. La première piste consiste à utiliser les GBR de fraction 0/4mm comme granulats en substitution du sable naturel dans un mortier. La seconde consiste à utiliser le GBR broyé (fraction inférieure à 125 μ m), comme addition minérale en substitution partielle du ciment. Compte tenu de l'étude bibliographique, notre travail vise à répondre aux questions suivantes :

- Peut-on définir et réaliser un matériau naturel modèle ce qui permet d'étudier le comportement à l'état frais et à l'état durci d'un mortier réalisé avec un GBR (fraction inférieure à 4mm et 125 μ m) ?
- Peut-on estimer l'absorption d'eau des particules inférieures à 125 μ m ?
- Quelle est l'influence de l'absorption d'eau d'un GBR broyé sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier ?

Les trois chapitres qui suivent visent à trouver des réponses aux questions posées ci-dessus.

Dans le 2^{ème} chapitre, une méthode permettant d'obtenir un matériau naturel modèle possédant des caractéristiques physiques proches de celles d'un matériau recyclé est présentée. Par la suite, une comparaison des propriétés à l'état frais et à l'état durci de mortiers fabriqués avec les deux matériaux (naturel et recyclé) est réalisée. Les développements ont fait l'objet d'une publication «Materials and structures»

Dans le 3^{ème} chapitre, un modèle théorique et une méthode expérimentale permettant d'estimer la porosité d'une poudre sont présentés.

Enfin, le 4^{ème} chapitre compare les comportements rhéologique et mécanique d'un mortier fabriqué avec un filler calcaire à ceux d'un mortier fabriqué avec une pâte de ciment broyée.

Chapitre 2 : Utilisation d'un sable naturel modèle pour la compréhension du comportement à l'état frais et durci d'un mortier fabriqué avec un sable recyclé

2.1 Introduction.....	62
2.2 Méthodologie	63
2.3 Préparation des sables (recyclé et naturel)	65
2.3.1 Matériaux naturels utilisés	65
2.3.2 Préparation du béton.....	68
2.3.3 Préparation du sable recyclé.....	69
2.3.4 Préparation des sables naturels modèles	71
2.4 Caractérisation des sables (recyclé et naturel)	72
2.4.1 Etude morphologique	72
2.4.2 Mesure de l'absorption d'eau des SR et des SN	73
2.4.3 Mesure de compacité.....	78
2.5 Etude à l'état frais.....	80
2.5.1 Composition des mortiers de référence	80
2.5.2 Procédure de mesure du seuil de cisaillement.....	81
2.5.3 Conditions de pré-saturation et procédure de malaxage	82
2.5.4 Résultat de seuil de cisaillement des différents mortiers réalisés	84
2.6 Propriétés mécaniques	87
2.6.1 Composition des mortiers.....	88

2.6.2 Etude de l'effet limitant des propriétés mécaniques	89
2.6.3 Résultats et discussions	91
2.7 Conclusion	94

2. Utilisation d'un sable naturel modèle pour la compréhension du comportement à l'état frais et durci d'un mortier fabriqué avec un sable recyclé.

2.1 Introduction

La littérature fait ressortir des résultats contradictoires sur les effets néfastes (ou bénéfiques) d'une substitution d'un sable naturel par un sable recyclé dans une formulation de mortier ou béton. Cette variabilité pourrait être attribuée à la nature des granulats utilisés (naturels ou recyclés) provenant de multiples sources.

Pour savoir si la substitution d'un sable naturel (SN) par un sable recyclé (SR) diminue ou améliore les propriétés à l'état frais ou à l'état durci d'un béton ou d'un mortier, les paramètres de composition de deux mélanges doivent être aussi proches que possible, en particulier, le rapport eau efface sur ciment, le volume des granulats et les caractéristiques physiques du squelette granulaire (distribution granulométrique, morphologie des particules...) doivent être similaires.

Plusieurs travaux de recherche ont déjà comparé le comportement des mortiers contenant des sables recyclés à celui de mortiers fabriqués avec des granulats naturels (paragraphe 1.5). Mais, à notre connaissance, la comparaison de deux mortiers présentant des proportions de mélange et des caractéristiques physiques de matériaux très similaires n'a pas encore été effectuée.

Dans ce chapitre, les propriétés à l'état frais et à l'état durci de mortiers fabriqués avec un SR sont comparées à celles du mortier de composition identique fabriqué avec un SN possédant des caractéristiques physiques très similaires à celles du SR. L'objectif principal de ce chapitre est de vérifier si les propriétés rhéologiques d'un mortier fabriqué avec le SN et le SR sont sensiblement identiques afin d'appréhender ensuite les effets d'un sable recyclé sur le comportement à l'état durci d'un mortier.

Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'un article dans le journal *Materials and Structures* [74].

2.2 Méthodologie

Idéalement, le moyen le plus simple d'étudier l'effet d'une substitution d'un SN par un SR dans une composition de mortier serait de remplacer un volume donné de SN par le même volume de SR tout en maintenant la maniabilité des mortiers constante. Ensuite, les propriétés mécaniques des deux mortiers pourraient être comparées et l'effet de cette substitution (négatif ou même positif) pourrait être estimé. Cependant, le remplacement du SN par un SR entraîne généralement des modifications à la fois sur les propriétés à l'état frais et les propriétés à l'état durci du mortier. Dans cette étude, nous avons eu recours à des matériaux modèles naturels et recyclés. Nous considérons qu'un SN est un sable modèle pour un SR donné si, pour des compositions volumiques identiques, l'utilisation de ces deux matériaux conduit à des propriétés rhéologiques des mortiers identiques.

A cette fin, le comportement rhéologique doit être défini et peut être décrit approximativement par le modèle de Krieger et Dougherty [41] (Eq. 2-1).

$$\eta_c(\phi) = \eta_c(0) \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \dots \dots \dots (2-1)$$

Ou : $\eta_c(\phi)$ est la viscosité de la suspension, $\eta_c(0)$ est la viscosité du liquide interstitiel (ici la pâte de ciment), ϕ est la fraction volumique des particules en suspension (les grains de sable), ϕ_m est la compacité maximale des particules en suspension et $[\eta]$ est la valeur intrinsèque de la viscosité des particules (fonction de leur forme).

Plusieurs études [49][75] ont montré que les paramètres précédents sont les principaux paramètres qui contrôlent le comportement rhéologique des bétons. Ainsi, pour que deux mortiers réalisés avec un SN et un SR aient le même comportement rhéologique, les quatre paramètres du modèle de Krieger et Dougherty doivent être les mêmes, c'est-à-dire :

- La viscosité du fluide en suspension (la pâte du ciment) doit être la même dans les deux mortiers. Cela implique que les deux mortiers contiennent le même rapport eau/ciment efficace. Comme les SR possèdent généralement un coefficient d'absorption d'eau élevé, le seul moyen de contrôler avec précision l'eau efficace consiste à utiliser le SR à l'état pré-saturé de manière à éviter les mouvements d'eau entre la pâte de ciment et le SR ;

- La fraction volumique solide du sable dans les deux mortiers doit être identique. Cela nécessite l'utilisation d'un même volume enveloppe des particules (c'est-à-dire que le volume de particules solides plus la porosité interne des particules doivent être constants) ;
- La compacité maximale doit être identique, ce qui implique au moins que les distributions granulométriques et les morphologies des particules soient très similaires
- La viscosité intrinsèque des particules devrait également être la même. La viscosité intrinsèque des granulats fins est difficile à définir, toutefois, cette contrainte serait respectée si les particules des deux sables avaient approximativement la même géométrie et le même état de surface.

Sur la base de ces éléments, le SR et le SN utilisés dans cette étude ont été définis comme suit :

- Le SR a été réalisé à partir du concassage d'un béton de laboratoire de composition connue.
- Le SN a été produit en concassant les gros granulats naturels utilisés pour la fabrication du béton de base, selon le même procédé et avec le même concasseur que pour le SR.
- Le SN a ensuite été découpé en sept fractions granulaires et recomposé pour avoir la même distribution de taille de particules que le SR.

La figure 2-1 illustre la procédure suivie. Les propriétés physiques du SR et du SN sont déterminées et comparées afin de vérifier si la procédure de fabrication permet de produire deux granulats similaires (paragraphe 2.3). Ensuite, des mortiers de composition identique sont fabriqués avec les deux sables (recyclé et naturel) et leurs comportements rhéologiques sont comparés afin de vérifier si le SN peut être considéré comme un bon modèle comparé au SR (paragraphe 2.4). Enfin, des résistances à la compression des mortiers sont déterminées afin d'évaluer l'effet réel de la substitution d'un SN par un SR sur le comportement mécanique des mortiers (paragraphe 2.5).

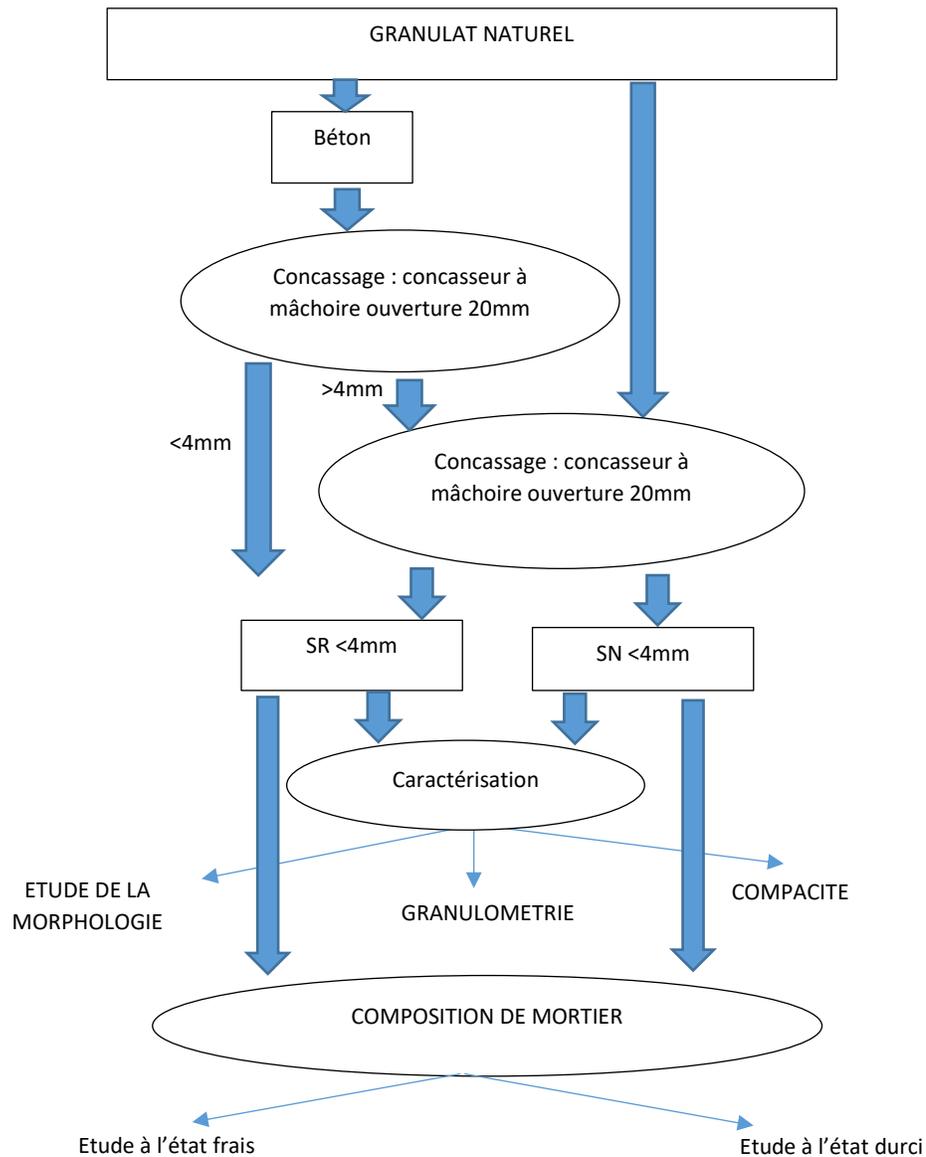


Figure 2-1 : Méthodologie suivie pour atteindre les objectifs visés du chapitre 2

2.3 Préparation des sables (recyclé et naturel)

2.3.1 Matériaux naturels utilisés

Le ciment utilisé est un CEM I 52,5N composé en moyenne de 97% de clinker et de 3% de filler calcaire de l'entreprise CBR en Belgique. La masse volumique mesurée au pycnomètre à hélium est de $3,1\text{g/cm}^3$. La surface spécifique, mesurée suivant la norme NF EN 196-6 est de $3850\text{cm}^2/\text{g}$. La granulométrie du ciment a été déterminée avec un granulomètre laser (Mastersize 2000) par

voie humide, l'essai a été réalisé avec du Propanol. Les diamètres $D_{10\%}$, $D_{50\%}$ et D_{90} sont respectivement de $2\mu\text{m}$, $11\mu\text{m}$ et $30\mu\text{m}$.

Le filler calcaire utilisé dans cette étude est un filler CALCITEC 2001S de l'entreprise Carmeuse. La masse volumique du filler a été mesurée avec un pycnomètre à hélium, elle est de $2,72\text{g/cm}^3$. La surface spécifique a été mesurée suivant la norme NF EN 196-6. Elle est égale à $3170\text{ cm}^2/\text{g}$. Les granulométries du ciment et du filler sont présentées dans la figure 2-2.

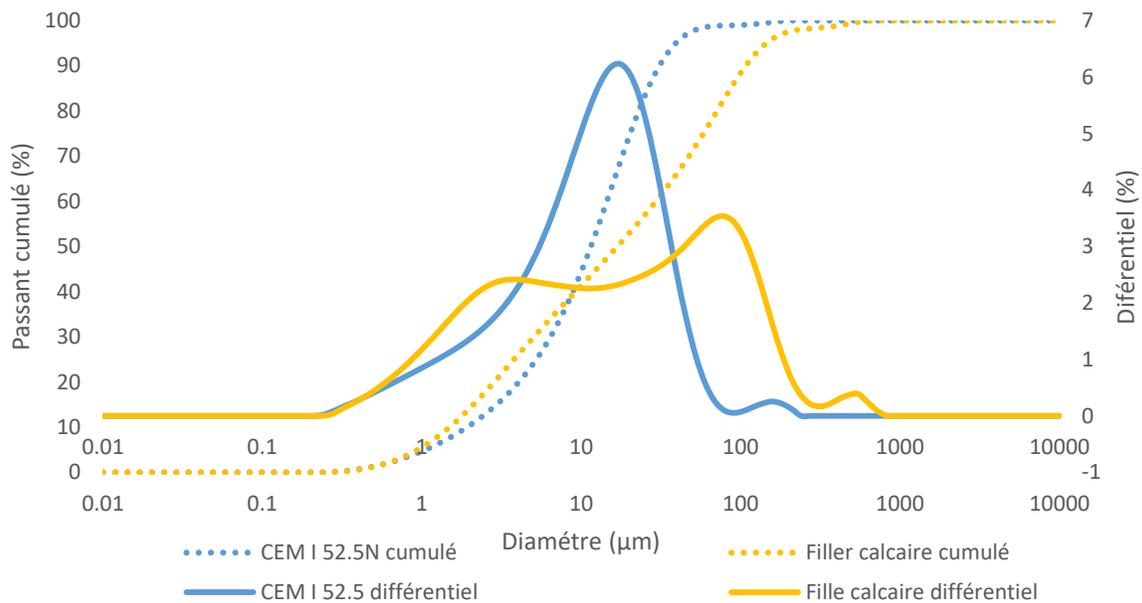


Figure 2-2 : Granulométries du ciment et du filler calcaire

L'adjuvant utilisé est un ViscoCrete-2700 de la société SIKA conforme à la norme EN 934 avec un extrait sec de 30% et une masse volumique de $1,1\text{g/cm}^3$.

Les granulats utilisés sont des granulats calcaires qui proviennent de l'entreprise LEVOMAT en Belgique. Leur masse volumique et leur coefficient d'absorption d'eau ont été mesurées suivant la norme EN 1097-6. Les granulats ont été préalablement immergés dans l'eau pendant 24h. À l'issue du trempage, de l'eau est ajoutée dans le pycnomètre jusqu'à ce qu'elle déborde afin de s'assurer que l'air ne soit pas piégé dans le récipient. La masse du pycnomètre contenant les granulats et l'eau équivaut à M_2 . Le pycnomètre uniquement rempli d'eau (M_3) est également pesé. Les granulats sont séchés à l'aide d'un papier absorbant en veillant à ce que les films d'eau aient disparus de la surface des granulats, mais que ceux-ci gardent un aspect humide, ce qui correspond

à l'état saturé surface sèche (M_4). Enfin, la masse de l'échantillon après séchage à l'étuve à 105°C est déterminée (M_1). Avec ces différentes masses, la masse volumique absolue, la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau peuvent s'obtenir via les équations suivantes :

$$\rho_{\text{absolue}} = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \dots\dots (2-2)$$

$$\rho_{\text{réelle}} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$WA_{24h} = 100 * \frac{M_1 - M_4}{M_4} \dots\dots\dots (2-4)$$

Le tableau 2-1 présente les masses volumiques, l'absorption et la porosité des différents matériaux naturels utilisés. La figure 2-3 présente la distribution granulométrique des différents granulats naturels.

Tableau 2-1 : Caractéristiques physiques des granulats naturels utilisés

	Gravillon (2/7mm)	Gravillon (7/14mm)	Gravillon (14/20mm)	Gravillon (20/32mm)	Sable (0/2mm)
ρ absolu (g/cm³)	2,773	2,724	2,752	2,763	2,66
ρ réelle (g/cm³)	2,677	2,642	2,664	2,689	2,564
WA_{24H}	1,30%	1,14%	1,20%	1%	0,75%

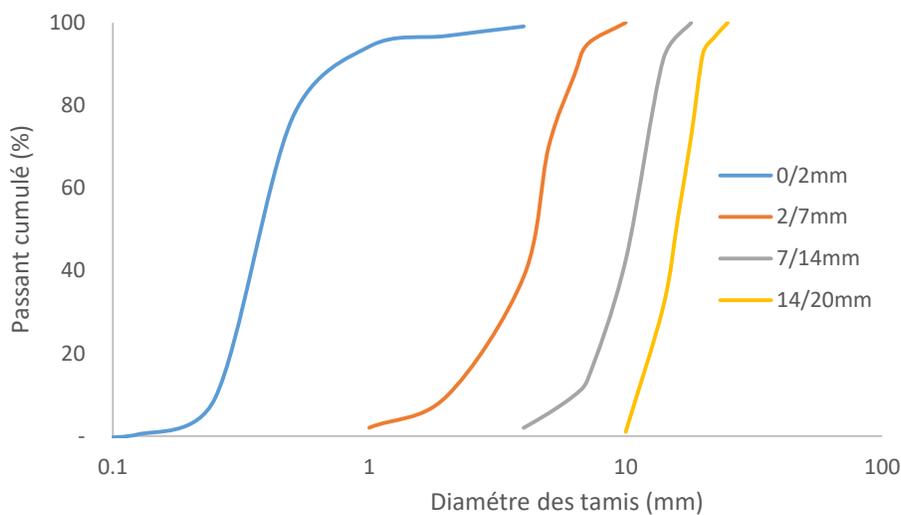


Figure 2-3 : Granulométrie des granulats naturels

2.3.2 Préparation du béton

Un béton a été confectionné dans le but d'obtenir un sable recyclé modèle. Un rapport E/C=0,5 et une classe de consistance S3 ont été choisis. La méthode de Dreux-Gorisse a été utilisée. La composition du béton élaboré est présentée dans le tableau 2-2. Afin de pouvoir réaliser l'étude sur les sables recyclés, au total 1000 Kg de béton ont été confectionnés, soit 8 gâchées de 50 litres.

Tableau 2-2: Composition du béton utilisé pour la production du sable recyclé modèle

Ciment (Kg/m³)	Eau (Kg/m³)	Gravillon 2/7 (Kg/m³)	Gravillon 7/14 (Kg/m³)	Gravillon 14/20 (Kg/m³)	Sable 0/2 (Kg/m³)	Superplastifiant (%)
350	175	216	658	436	612	0,4

Le protocole de malaxage utilisé est le suivant :

- Humidifier le malaxeur ;
- Introduire les granulats et le sable
- Malaxer pendant 30 secondes
- Ajouter la moitié de la quantité d'eau
- Malaxer pendant 120 secondes
- Laisser reposer pendant 120 secondes
- Ajouter le ciment et malaxer pendant 30 secondes
- Ajouter la deuxième moitié d'eau ainsi que la totalité du super plastifiant ;
- Malaxer pendant 90 secondes

Ainsi le malaxage dure 6 minutes et 30 secondes. Les essais utilisés pour caractériser les propriétés à l'état frais du béton sont les suivants :

- L'affaissement au cône d'Abram (slump-test) est mesuré selon la norme EN 12350-8
- La teneur en air occlus est mesurée via un aéromètre conformément à la norme EN 12350-7. Le principe est de remplir un récipient cylindrique normalisé de béton, de le fermer et de le mettre sous pression. La méthode est basée sur la compressibilité de l'air contenue dans le béton frais. La valeur de la pression résultante permet de déterminer la teneur en air du béton.

- La masse volumique à l'état frais est mesurée en pesant la masse d'un récipient dont le volume est connu (dans ce cas, les moules normalisés pour les essais de compression : cube de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ et cylindre $16 \times 32 \text{ cm}^3$) à vide et remplis de béton.
- A l'état durci, les résistances mécaniques sont mesurées sur des éprouvettes cubiques ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) à 90 jours suivant la norme EN 12390-3.

Tous les résultats de caractérisation réalisés sur les bétons sont présentés dans le tableau 2-3.

Tableau 2-3: Caractéristique du béton utilisé pour la production du sable recyclé modèle

Affaissement (cm)	teneur en air (%)	Masse volumique (Kg/m ³)	RC 90j (MPa)
12	5	$2,45 \pm 0,03$	42 ± 2

2.3.3 Préparation du sable recyclé

Une fois les bétons préparés, ils sont conservés pendant au moins 90 jours dans une pièce à une humidité constante de 95% et une température de 20°C afin d'atteindre un degré d'hydratation élevé pour les bétons.

Le concassage des bétons a été réalisé au CTP (centre terre et pierre) en Belgique avec un concasseur à mâchoire, en deux étapes. Dans un premier temps, les cubes $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ et cylindre $16 \times 32 \text{ cm}^3$ ont été concassés dans un concasseur industriel. L'ouverture des mâchoires était de 15mm. La totalité des 1000Kg de béton a été concassée, et la fraction inférieure à 4 mm a été séparée du reste du lot. Une quantité de 170Kg de sable a ainsi été obtenue. La figure 2-4 montre les granulats obtenus de taille supérieure à 4mm. On observe que ces derniers contiennent encore beaucoup de pâte de ciment adhérente. Un deuxième passage pour la fraction supérieure à 4mm dans un concasseur de plus petite taille avec une ouverture de mâchoire à 8mm a donc été réalisé. 200Kg de matière additionnelle (fraction <4mm) ont été obtenus après ce deuxième concassage. Ainsi, 370Kg de sable recyclé et 630Kg de gravillons (>4mm) ont été obtenus.



Figure 2-4 : Granulat supérieur à 4mm après le premier concassage

L'influence du broyage sur la quantité de pâte de ciment obtenue dans les sables a été évaluée en mesurant la perte de masse entre 105°C et 475°C d'échantillons issus des deux phases du concassage. Cette mesure permet de déterminer une grandeur proportionnelle à la teneur en pâte de ciment des granulats. Pour le premier et le deuxième lot, la perte de masse obtenue est respectivement $2,37\% \pm 0,06\%$ et $2,52\% \pm 0,04\%$. La figure 2-5 présente les courbes granulométriques mesurées sur les deux différents lots. Une différence peut être observée. Le deuxième lot de sable recyclé qui contient le plus de pâte de ciment adhérente possède une granulométrie plus fine que le premier.

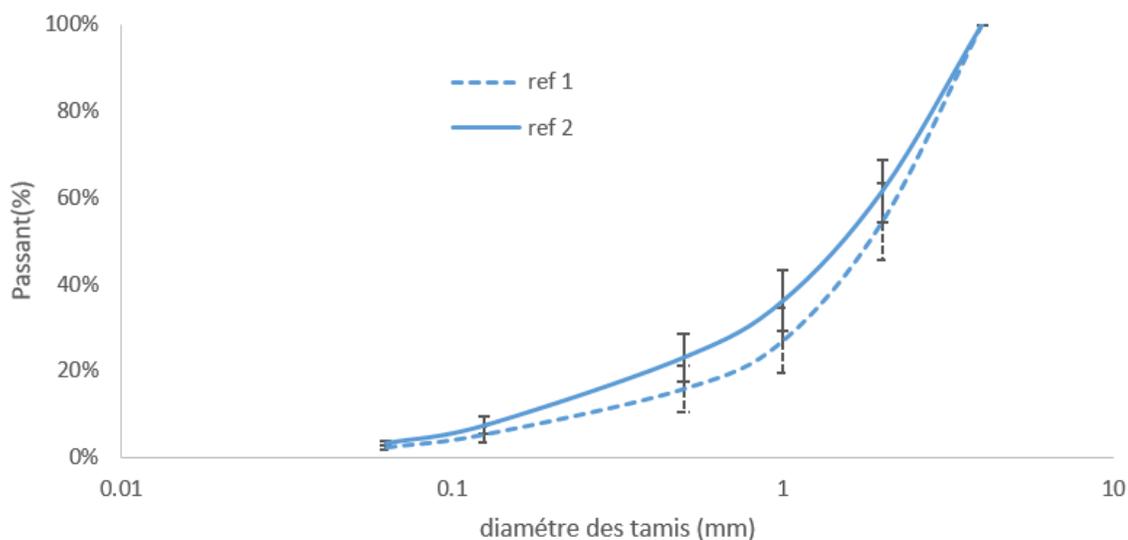


Figure 2-5 : Granulométrie des deux lots obtenus de sable recyclé

Une homogénéisation des deux lots a ensuite été réalisée. Pour ce faire, chaque lot a été homogénéisé seul et mis dans 4 sacs différents, par la suite les sacs provenant des deux différents lots ont été soigneusement mélangés pour en faire un seul lot homogène. Une fois cette étape terminée, la totalité des 370 Kg a été quartée pour assurer que les lots de sable recyclé obtenus sont bien homogènes. Enfin, 10 prélèvements de 1Kg ont été réalisés dans les 370Kg de sable dans le but de réaliser des essais de granulométrie et de perte de masse entre 105 et 475°C. Une différence très peu significative a été obtenue entre les 10 mesures.

2.3.4 Préparation des sables naturels modèles

Dans le but d'obtenir un sable naturel qui a la même granulométrie et la même morphologie que le sable recyclé, des granulats calcaire 20/32mm provenant de la même roche que les granulats qui ont servi à fabriquer le béton ont été concassés avec le même concasseur que celui utilisé pour le deuxième concassage des bétons. Le concassage s'est effectué avec une ouverture de 8mm (même ouverture que pour le second concassage du béton). Par la suite un tamisage à 4mm a été effectué pour ne retenir que la fraction 0/4mm.

La figure 2-6 montre la granulométrie du sable recyclé en comparaison avec celle du sable calcaire. Le sable calcaire contient beaucoup plus de fines que le sable recyclé. Ainsi, afin d'obtenir la même granulométrie, le sable calcaire a été séparé en différentes classes granulaires. La séparation a été réalisée avec un tamisage à sec pour obtenir les fractions suivantes : 4-2mm, 2-1mm, 1-0,5mm, 0,5-0,25mm, 0,25-0,125mm, 0,125-0,063mm et < 0,063mm. Le tamisage des fractions inférieures à 0,25mm a été réalisé avec une durée de tamisage plus importante pour assurer une bonne séparation des grains. Les différents lots ont été mis dans des bidons étanches. Avant chaque essai réalisé (caractérisation physique ou réalisation de mortier), le sable a été recomposé pour obtenir la même granulométrie que le sable recyclé.

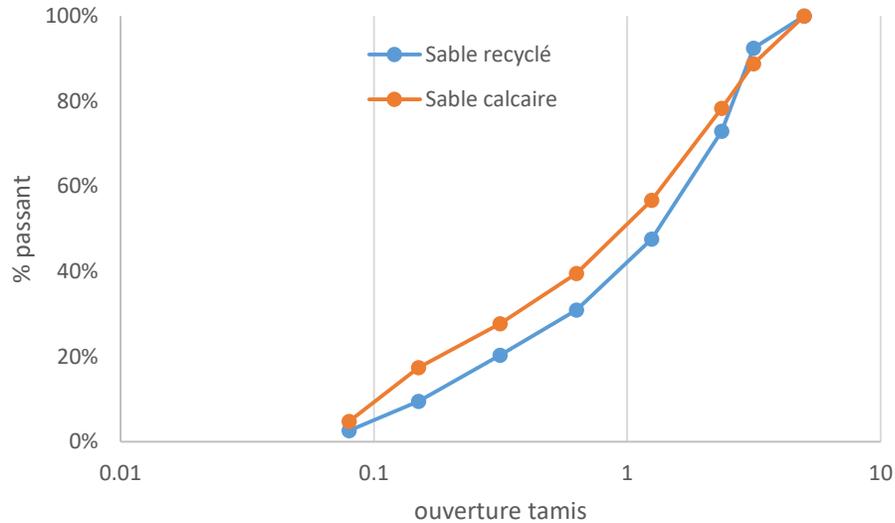


Figure 2-6 : Granulométrie des sables obtenus après concassage

2.4 Caractérisation des sables (recyclé et naturel)

2.4.1 Etude morphologique

L'étude morphologique est réalisée par analyse d'images. Le dispositif utilisé a été développée par des chercheurs au département ARGENCO à l'université de Liège (Pr. Eric Pirard et Mr Godefroid Dislaire). Cette mesure est réalisée pour la fraction supérieure à 250 μ m, avec une masse d'échantillon comprise entre 250 et 300g. Cet essai est réalisé afin d'identifier la forme des particules et de vérifier si la procédure de préparation présentée dans le paragraphe 2.3 permet d'obtenir une morphologie similaire entre un SR et un SN.

La procédure de l'essai est simple, l'échantillon est progressivement déposé sur un tapis roulant, chaque particule est évaluée individuellement. Dans cet essai entre 100 000 et 200 000 particules sont analysées. Ensuite, grâce à une caméra et une source de lumière, la longueur et la largeur de chaque particule sont enregistrées, la surface projetée de chaque grain est assimilée à une ellipse dont on détermine les 2 axes, l'analyse se fait en 2D. La morphologie est exprimée en termes d'élongation. Le paramètre d'élongation est calculé avec (eq.2-2) où L représente la longueur et l largeur d'un grain. La figure 2-7 montres les résultats obtenus pour les SR et les SN, les résultats sont présentés en fonction de chaque classe granulaire. Aucune différence significative n'est

observée pour les différentes fractions granulaires. Ainsi, la procédure suivie pour l'obtention des deux matériaux modèles (naturel et recyclé) permet d'obtenir une morphologie de grains proche.

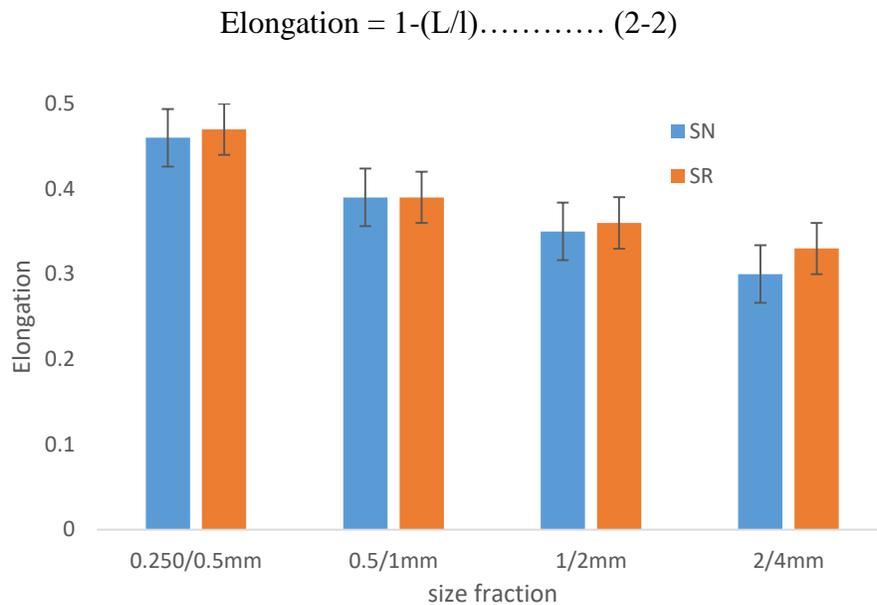


Figure 2-7 : Elongations obtenues pour les différentes fractions granulaires de SR et de SN

2.4.2 Mesure de l'absorption d'eau des SR et des SN

Trois méthodes ont été utilisées dans le but de mesurer le coefficient d'absorption de l'eau du SR : la norme EN 1097-6, la méthode IFSTTAR N°78 et la méthode par extrapolation [12] (paragraphe 1.3.2).

La norme EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR N°78 définissent deux méthodes différentes pour atteindre l'état saturé surface sèche (SSS). C'est dans cet état particulier que doit être déterminé le coefficient d'absorption d'eau, après avoir saturé les granulats pendant 24 heures. Dans la norme EN 1097-6, afin d'obtenir l'état SSS, l'échantillon est exposé à un flux d'air chaud pour évaporer l'eau présente à la surface des particules. L'état SSS est identifié à l'aide d'un test d'affaissement. Un cône est rempli, puis compacté avec 25 coups de pilon. L'état SSS est déterminé en fonction de la forme obtenue après levage du cône. Dans la méthode IFSTTAR, pour atteindre l'état SSS, l'échantillon est séché progressivement à l'aide d'un papier absorbant de couleur jusqu'à ne plus voir de traces d'eau sur le papier absorbant.

Dans les deux méthodes présentées, la masse d'échantillon à l'état SSS est enregistrée (M_{SSS}). Ensuite, l'échantillon est séché à l'étuve à 60°C jusqu'à masse constante (M_{sec}). Cette température a été choisie pour éviter l'altération des anhydres, et ainsi éviter une surestimation de l'absorption d'eau. L'absorption d'eau est calculée avec (eq.2-3).

$$WA = (M_{SSS} - M_{sec}) / M_{sec} \dots \dots \dots (2-3)$$

Le et al.[10] ont montré que la méthode EN 1097-6 sous-estime l'absorption d'eau des fractions granulaires les plus fines, alors que la méthode IFSTTAR la surestime. La méthode d'extrapolation développée par Zhao et al.[12] est donc également utilisée dans ce travail. Cette méthode est basée sur la relation entre l'absorption d'eau et la teneur en pâte de ciment. Pour déterminer l'absorption d'eau, l'échantillon est divisé en différentes classes granulaires et la teneur en pâte de ciment adhérente est mesurée pour chaque classe. (eq.2-4) montre qu'il existe une relation linéaire entre la teneur en pâte de ciment adhérente et l'absorption d'eau. Zhao et al. [12] ont montré que la mesure du coefficient d'absorption d'eau n'est fiable que pour les classes les plus grossières avec la norme EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR (jusqu'à 0.5mm), l'absorption d'eau de la fraction la plus fine est ensuite calculée par extrapolation avec (eq.2-4). Connaissant la proportion de chaque fraction du SR, il est possible de déterminer l'absorption d'eau de la totalité de la fraction 0/4mm.

$$WA_{SR} = WA_P X_P + WA_{NA}(1 - X_P) \dots \dots \dots (2-4)$$

WA_{SR} : coefficient d'absorption d'eau d'une classe granulaire donnée de SR.

WA_P : coefficient d'absorption d'eau de la pâte de ciment adhérente.

WA_{NA} : coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels dans le SR

X_P : teneur en pâte de ciment adhérente d'une classe granulaire donnée de SR.

Dans notre travail, le SR est divisé en 6 fractions granulaires : <0,063mm, 0,063/0,125mm, 0,125/0,5mm, 0,5/1mm, 1/2mm et 2/4mm. Les coefficients d'absorption d'eau des fractions de taille supérieure à 0,5mm sont déterminés par la méthode IFSTTAR, l'absorption d'eau des fractions inférieures à 0,5mm est ensuite déterminée par extrapolation. Le et al.[10] ont montré qu'en utilisant la méthode EN 1097-6 ou IFSTTAR, les résultats de WA sont très proches pour la fraction comprise entre 0,5 et 4mm.

Dans la méthode par extrapolation, la teneur en pâte de ciment adhérente peut être estimée soit par fraction soluble dans l'acide salicylique (SFSA), soit par perte de masse entre 105°C et 475°C, les deux méthodes sont utilisées ici.

La SFSA est déterminée en immergeant 0,5g d'échantillon représentatif sec broyé dans une solution d'acide salicylique et de méthanol (14g d'acide salicylique et 80ml de méthanol) pendant 1 heure afin de dissoudre les phases solubles de la pâte de ciment. Après cela, la solution est filtrée puis peser pour obtenir le résidu solide, la différence avec 0,5g de départ donne la SFSA. Cette méthode est appliquée sur 2 échantillons de chaque fraction granulaire.

La perte de masse entre 105°C et 475°C est déterminée en plaçant 10g d'échantillons broyés représentatifs pendant 24 heures à 105°C ($M_{105^\circ\text{C}}$), par la suite on place l'échantillon à 475°C pendant 24 heures ($M_{475^\circ\text{C}}$). La perte de masse est calculée par (eq.2-5).

$$ML_{105^\circ\text{C}-475^\circ\text{C}} = (M_{105^\circ\text{C}} - M_{475^\circ\text{C}}) / M_{105^\circ\text{C}} \dots \dots \dots (2-5)$$

Dans notre travail, l'absorption d'eau est déterminée dans les trois conditions de saturation suivantes :

- IM 24 heures : immersion totale dans l'eau pendant 24 heures (la porosité et la densité réelle sont calculées avec cette procédure de saturation correspondant à l'EN 1097-6) ;
- 7 jours WA+5% : conservation en bidon étanche pendant 7 jours avec une quantité d'eau égale à WA +5% de la masse de l'échantillon.
- 24 heures WA +5% : conservation dans des bidons étanche pendant 24 heures avec une quantité d'eau égale à WA+5% de la masse de l'échantillon.

Le et al. [10] ont montré que la conservation d'un SR pendant 7 jours dans une bouteille scellée avec une quantité d'eau égale à WA +5% permettait de saturer le SR.

Les figures 2-8 et 2-9 montrent l'évolution de l'absorption d'eau pour chaque fraction granulaire et pour les différentes conditions de saturation, avec la méthode par extrapolation, en utilisant respectivement la fraction soluble dans l'acide salicylique (SFSA) et la perte de masse entre 105 et 475°C (eq.2-5). Les résultats montrent une relation linéaire entre l'absorption d'eau et la perte de masse (ML) ou la (SFSA). Pour les différentes fractions, on observe une différence non significative entre les échantillons immergés dans l'eau et ceux saturés en bidons avec WA + 5%

pendant 7 jours. On peut également constater que l'échantillon saturé en bidons à WA +5% pendant 24 heures présente une absorption d'eau plus faible que les deux autres. Cela signifie également que, si la remontée capillaire n'est pas complétée après 24 heures, la saturation après 7 jours est identique à celle obtenue après immersion total du SR, ce résultat est similaire à celui présenté par Le et al [13].

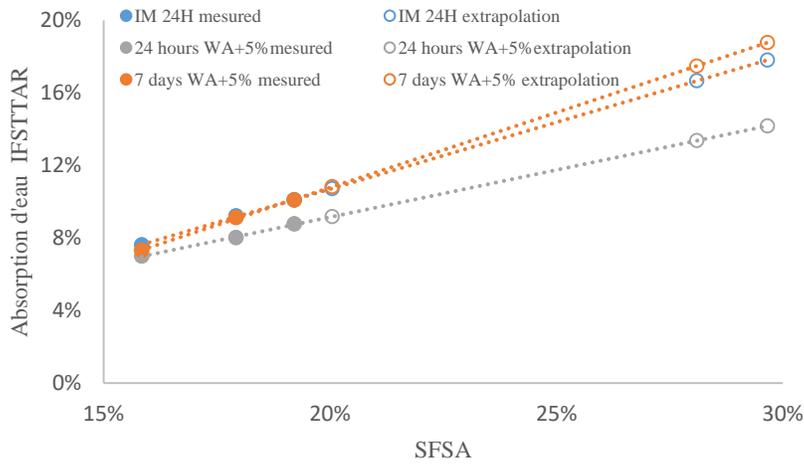


Figure 2-8 : Variation de WA en fonction de la SFSA [74]

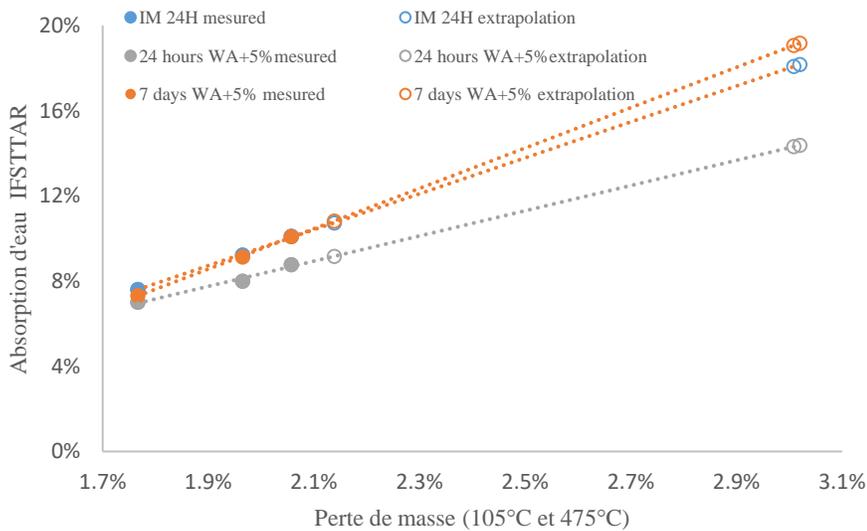


Figure 2-9 : Variation de WA en fonction de la perte de masse entre 105°C et 475°C [74]

Le tableau 2-4 présente les détails des différentes mesures d'absorption d'eau, effectuées dans les différentes conditions d'humidification. On remarque que le coefficient d'absorption d'eau obtenu avec la méthode par extrapolation en utilisant la perte de masse ou la SFSA est identique.

Tableau 2-4: Coefficients d'absorption d'eau mesurés dans les différents états de saturation du SR

	IM 24 heures	24 heures WA+5%	7 jours WA+5%
WA EN 1097-6 (%)	7,5	7,4	9
WA IFSTTAR (%)	10,8	10,4	12,6
WA IFSTTAR extrapolation SFSA (%)	9,7	8,4	9,6
WA IFSTTAR extrapolation LM (%)	9,8	8,5	9,7

Bordy et al.[73] ont montré que la pâte concassée anhydre résiduelle au contact avec de l'eau peut durcir et s'agglomérer. Pour vérifier si l'agglomération des particules plus fines peut se produire pendant les 7 jours de pré saturation en bidon étanche, une analyse granulométrique a été effectuée après séchage du matériau pré-saturé avec WA+5% pendant 7 jours à 60°C jusqu'à masse constante. La figure 2-10 montre la granulométrie du SR avant et après une saturation avec WA +5% pendant 7 jours. On observe que la granulométrie a beaucoup changé après 7 jours de pré-saturation en comparaison avec la courbe initiale, cela est dû à une agglomération du SR pré-saturé pendant 7 jours. Ceci peut certainement être attribué aux phases anhydres présentes dans le SR. Ainsi ce mode de saturation conduit à changer la granulométrie du sable, donc avoir un impact sur la maniabilité du mortier fabriqué avec ce mode de saturation.

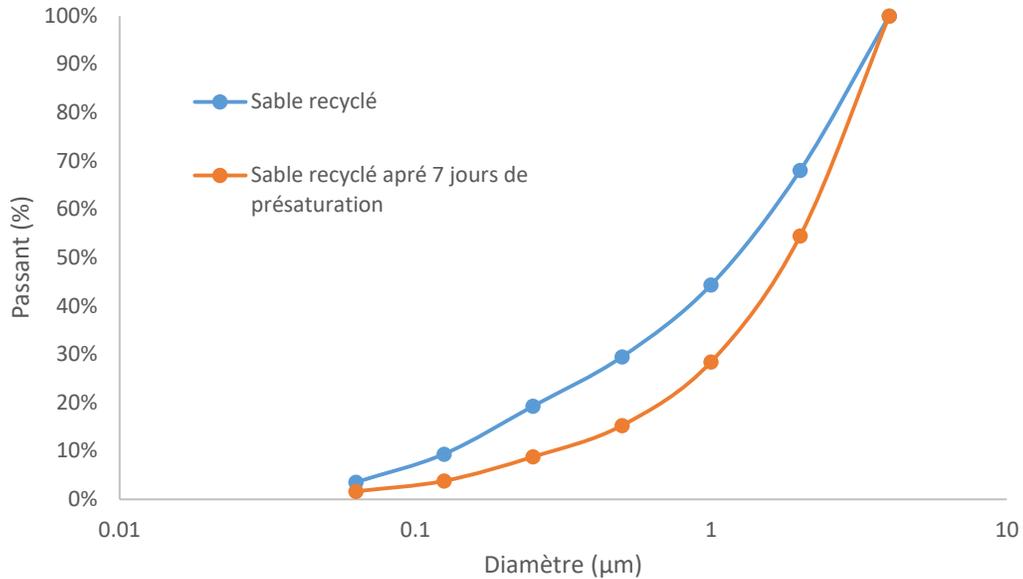


Figure 2-10 : Courbes granulométriques du SR avant et après une saturation préalable avec WA +5% pendant 7 jours.

L'absorption d'eau du SN a été mesurée sur les granulats 20/32mm avant concassage. Le tableau 2-5 présente les différents résultats de masse volumique absolue, réelle et l'absorption d'eau pour les deux sables étudiés. Dans cette étude, l'absorption d'eau prise en compte est celle obtenue avec la méthode par extrapolation, car c'est la méthode qui permet de se rapprocher le plus de la vraie valeur d'absorption.

Tableau 2-5: Masse volumique absolue, réelle et absorption d'eau du SR et du SN

	Masse volumique absolu	Masse volumique réelle	Absorption d'eau
SR	2,4g/cm ³	1,94 g/cm ³	9,80%
SN	2,72 g/cm ³	2,69 g/cm ³	1%

2.4.3 Mesure de compacité

La compacité a un impact sur le comportement rhéologique du mortier et du béton. Le SR et le SN ont la même granulométrie et des morphologies de grains semblables. S'ils ont le même état de surface, la compacité doit ainsi être proche.

Le protocole LCPC [76] est utilisé pour la mesure de la compacité. Ce test est réalisé en plaçant un échantillon sec de 7 Kg dans un cylindre de 160mm de diamètre et d'une hauteur de 600mm fixé à

une table vibrante. Un piston plat de 20 Kg est placé sur le cylindre afin d'exercer une pression de 10 KPa. Le cylindre vibre pendant 1 minute et le volume apparent après vibration est mesuré. Φ_m est calculé avec (eq.2-8) ou ρ_{app} est la densité apparente mesurée après les tests et ρ est la densité réelle présentée dans le paragraphe 2.4.2.

$$\phi_m = (\rho_{app}) / (\rho) \dots\dots\dots(2-8)$$

La figure 2-11 présente la granulométrie avant et après l'essai de compacité. Le résultat montre qu'il y a une augmentation significative de la quantité de particules fines. C'est la raison pour laquelle la valeur obtenue avec cette méthode n'est pas prise en compte par la suite.

La génération de particules fines est certainement due à l'intensité trop importante de la compaction au cours de l'essai qui conduit à la fragmentation du SR. Un protocole légèrement modifié a donc été utilisé en supprimant le cylindre de 20Kg et en gardant la vibration. Les résultats avec ce second protocole montrent que les compacités du SR et du SN sont respectivement de 80% et 75%. Une analyse granulométrique a été aussi réalisée et a démontré qu'il n'y avait pas de fines générées avec ce second protocole.

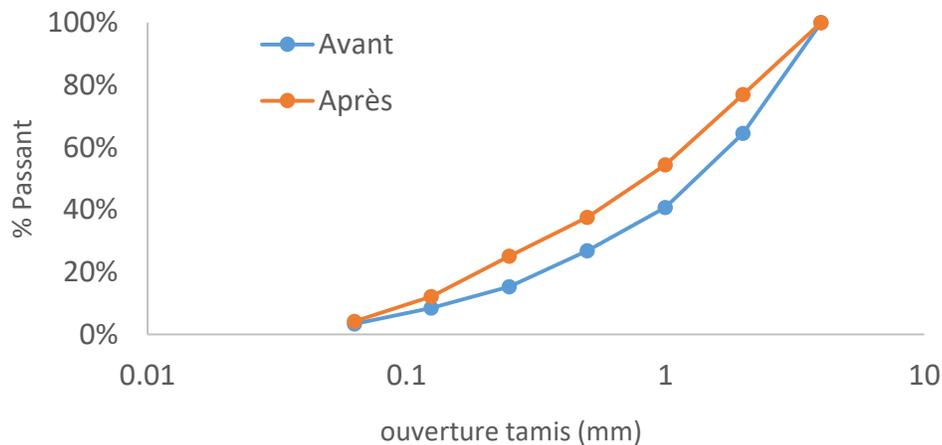


Figure 2-11 : Courbe granulométrique avant et après le test de compacité

Malgré une morphologie et une granulométrie identique, une différence de 5% a été obtenue, cette différence peut être expliquée par une différence d'état de surface des grains de SR et SN.

Compte tenu de la procédure utilisée pour la production du SR et SN, on peut considérer que les

caractéristiques enveloppe des deux sables sont très similaires (même granulométrie, morphologie des particules similaire, et compacité proche).

2.5 Etude à l'état frais

2.5.1 Composition des mortiers de référence

Le tableau 2-6 présente la composition des mortiers de référence réalisés avec le SR et le SN. Le ciment utilisé pour la fabrication des différents mortiers est le même que celui utilisé pour la fabrication du béton. Le filler calcaire présenté dans le paragraphe 2.3.1 a été utilisé pour la fabrication des mortiers. Une substitution en volume réel du SN par le SR est réalisée et la même quantité d'eau efficace est utilisée. La quantité d'eau de gâchage est calculée en tenant en compte de l'absorption d'eau après immersion totale dans l'eau du SR ou du SN, différents état de saturation ont été utilisés pour le SR.

Tableau 2-6: Composition des mortiers pour l'étude du comportement à l'état frais

	Ciment (g)	Filler calcaire (g)	Sable (g)	Eau efficace (g)	Eeff/C	Eeff/P
Naturel	1344	895	3968	1209	0,9	0,54
Recyclé	1344	895	2943	1209	0,9	0,54

Dans le but de justifier si la différence de compacité mesurée précédemment entre les 2 sables peut avoir une incidence significative ou pas dans le comportement à l'état frais des mortiers, le modèle de Krieger-Dougherty (eq.2-1) a été utilisé. Mehdipour et khayat [48] ont montré que le terme ϕ_m utilisé dans la formule de Krieger-Dougherty pour les sables est celui obtenu avec le protocole du LCPC. Les valeurs de ϕ_m utilisé sont présentées dans le paragraphe 2.4.3.

Le tableau 2-7 présente les viscosités relatives obtenues avec le modèle de Krieger-Dougherty sur la base des résultats de caractérisation et de la composition des mortiers. Comme observé dans le tableau 2-7, la fraction volumique solide des granulats dans le mortier est identique pour le SR et le SN, mais leurs compacités sont différentes (75% et 80% respectivement pour SN et SR). Ainsi, une faible différence de viscosité relative dans les mortiers fabriqués avec un SN ou un SR est obtenue, ceci est dû au fait que la fraction volumique utilisée est beaucoup plus faible que la compacité.

En raison des faibles différences entre les propriétés des sables (SR et SN) et des faibles différences obtenues pour les viscosités relatives prédites, les comportements rhéologiques des mortiers à base de SN et de SR saturés devraient être très proches.

Tableau 2-7: Comparaison des viscosités relatives des mortiers de SR et de SN

	Φ	Φ_m	$\eta_c(\phi)/\eta_c(0)$
SN	43%	75%	5,032
SR	43%	80%	4,798

2.5.2 Procédure de mesure du seuil de cisaillement

L'étalement des mortiers est mesuré par un essai avec un mini cône de dimensions 70X100X60mm³ (Figure 2-12) [8]. Pour chaque mortier, la masse volumique apparente, l'affaissement (H) et l'étalement (D) sont mesurés trois fois pour assurer une bonne répétabilité des essais.

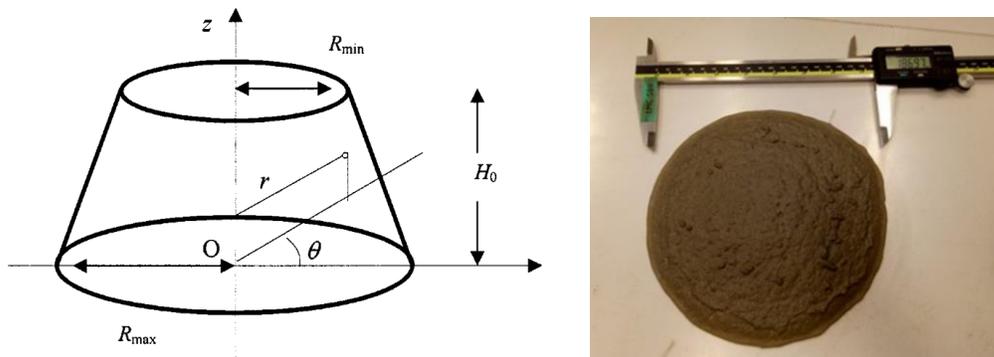


Figure 2-12 : Mini cône pour mesurer la maniabilité du mortier.

Comme la masse volumique du SN est beaucoup plus élevée que celle du SR, la masse volumique apparente du mortier fabriqué avec du SN doit être plus importante que celle du mortier fabriqué avec le SR. L'étalement dépend de la masse volumique du mortier, ainsi pour comparer les différents comportements rhéologiques des mortiers réalisés, le seuil de cisaillement (τ) avec le modèle de Roussel [9] a été déterminé. Pour appliquer ce modèle, le rayon d'affaissement doit être supérieur à la hauteur de l'affaissement ($D/2 > H$), la condition a été rempli pour tous les mélanges. Le seuil de cisaillement peut ensuite être calculé avec (eq. 2-9).

$$\tau = \frac{225\rho g\Omega^2}{128\pi^2 R^5} \dots\dots\dots (2-9)$$

- ρ : Masse volumique du mortier à l'état frais (g/cm³)
- R : Rayon de l'étalement (mm)
- g : Gravité 9.8m/s²
- Ω : Volume du mini cone (mm³)

2.5.3 Conditions de pré-saturation et procédure de malaxage

Plusieurs états de saturation du SR ont été étudiés. Le sable recyclé est tout d'abord séché à 60°C jusqu'à une masse constante. Les mortiers sont ensuite produits avec 6 conditions différentes de pré-saturation du SR, et cela dans le but d'étudier les mouvements d'eau entre la pâte et le SR :

- SR sec : le SR est d'abord mélangé avec le ciment et le filler calcaire et ensuite toute l'eau est ajoutée.
- Pâte + SR sec : la pâte (ciment+ filler calcaire + eau) est tout d'abord préparée et par la suite le SR sec est ajouté.
- 5min WA +5% : Le SR est d'abord malaxé avec une quantité d'eau égale à WA+5% pendant 5 minutes, par la suite le filler, le ciment et l'eau de gâchage sont ajoutés.
- 24 heures WA+5% : Le SR est malaxé avec une quantité d'eau égale à WA+5% pendant 24 heures. Par la suite le filler, le ciment et l'eau de gâchage sont ajoutés.
- 24 heures IM : Le SR est malaxé avec toute la quantité d'eau nécessaire à la préparation du mortier ($E_{eff} + WA$), dans le but de s'assurer que toutes les particules sont dans l'eau. Par la suite le ciment et le filler sont ajoutés.
- 7 jours WA+5 : Le SR est malaxé avec une quantité d'eau égale à WA+5% pendant 7 jours et par la suite le filler, le ciment et l'eau de gâchage sont ajoutés.

La saturation est réalisée en stockant les sables recyclés avec la quantité d'eau nécessaire dans des récipients étanches. Les conteneurs sont conservés dans une salle climatisée à 20°C.

Le SN est utilisé après une saturation avec WA+5% pendant 5 minutes, selon le protocole présenté par Schwartzentruber et Catherine [77].

Une immersion complète du SR dans l'eau pendant 24 heures devrait permettre de saturer le SR et devrait réduire les mouvements d'eau dans le mortier. Les autres modes de saturation devraient générer une maniabilité plus grande pour le mortier [13]. Dans le but de quantifier l'eau efficace et

d'estimer ainsi l'absorption d'eau pour une condition de saturation donnée, des quantités d'eau égales à 20, 40 et 60% de l'absorption d'eau de SR, sont ajoutées à l'eau efficace dans les mortiers fabriqués avec un SR saturé (24heure IM) [33].

La même quantité d'eau a été utilisée pour le mortier avec du SN. La figure 2-13 illustre la procédure utilisée pour réaliser les différents mortiers.

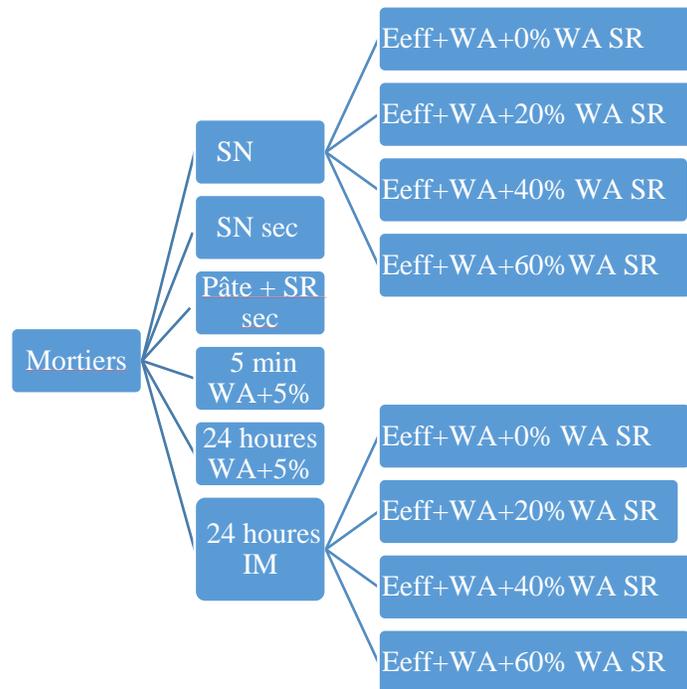


Figure 2-13 : Préparation des différents mortiers pour étudier les mouvements d'eau entre la pâte et le SR.

Le ciment, le filler calcaire, le SR ou le SN et l'eau sont tout d'abord stockés à 20°C. Selon le mode de saturation du SR, le ciment, le filler calcaire, le sable et l'eau totale sont mélangés à petite vitesse pendant 90 secondes, par la suite 60 secondes de mélange manuel sont réalisées. Enfin 90 secondes de mélange à grande vitesse sont effectuées.

Pour le mélange (Pâte + SR sec), le ciment, le filler calcaire et l'eau sont ajoutés en premier et malaxés pendant 60 secondes, par la suite le SR sec est ajouté et un malaxage pendant 60 secondes est effectué. Ensuite, un malaxage manuel de 60 secondes est réalisé, et enfin, 90 secondes de malaxage à grande vitesse sont effectuées.

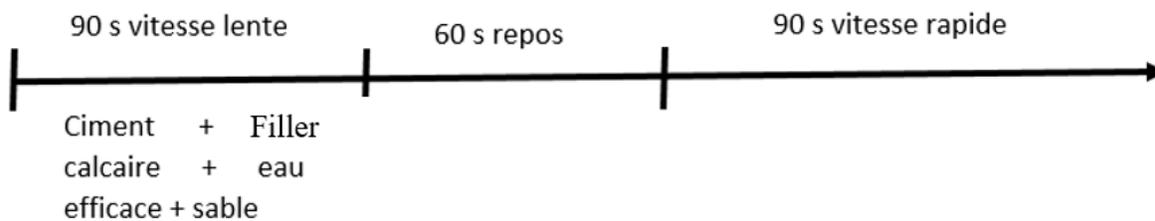


Figure 2-14: Procédure de malaxage des mortiers

2.5.4 Résultat de seuil de cisaillement des différents mortiers réalisés

Le tableau 2-8 présente la densité apparente, l'affaissement et le seuil de cisaillement calculés avec le modèle de Roussel pour l'ensemble des mortiers étudiés. Le mortier fabriqué avec un SR immergé a les résultats les plus proches de ceux obtenus avec le SN. Le mortier fabriqué avec un SR saturé avec WA+5% pendant 24 heures présente une ouvrabilité meilleure que celle mesurée avec le SR immergé dans l'eau. Ce résultat confirme que la conservation du SR avec WA + 5% pendant 24 heures ne permet pas d'atteindre une saturation complète. L'étude réalisée précédemment sur les coefficients d'absorption d'eau (tableau 2-2) avait mis en évidence une différence de 1.3% entre cette condition de saturation et l'immersion totale dans l'eau du SR ; ceci peut expliquer l'amélioration de la maniabilité observée pour le mortier fabriqué avec un SR avec WA+5% pendant 24 heures.

L'utilisation du SR à l'état sec ou saturé avec WA +5% pendant 5 minutes donne des comportements similaires à l'état frais et conduit à une plus grande maniabilité. Ce résultat est dû à l'absorption incomplète de l'eau par le SR sec (ou saturé seulement pendant 5 minutes), ce qui conduit à une quantité maximale d'eau efficace pour fluidifier le mélange. Ajouter le SR à l'état sec dans la pâte donne une ouvrabilité inférieure à celle des deux autres conditions de saturation précédentes, ce résultat est inattendu, car il sous-entend que le SR sec absorbe plus dans la pâte que dans l'eau.

Comme évoqué dans le paragraphe 2.3. La saturation du SR avec WA+5% pendant 7 jours permet de saturer le SR mais ce mode de saturation conduit à changer la granulométrie du sable. Ce changement de granulométrie peut expliquer la chute de maniabilité obtenue pour le SR.

Tableau 2-8: Résultats obtenus à l'état frais pour les différents états de saturation du SR ainsi que pour le SN

	Densité (g/cm ³)	Étalement (mm)	Seuil de cisaillement (Pa)
SN	2,22	163	124
SR sec	1,88	210	32,1
Pâte +SR sec	1,88	193	47,7
5 min WA+5%	1,87	205	34,1
24 heures + WA+5%	1,92	172	79,3
24 heures IM	1,95	158	130
7 jours + WA+5%	1,93	131	326

Le mode de saturation du SR qui réduit les mouvements d'eau entre la pâte et le SR est l'immersion totale du SR dans l'eau pendant 24 heures. La figure 2-15 montre une comparaison de l'étalement et du seuil de cisaillement entre les mortiers réalisés avec un SR immergé 24h dans l'eau avec le SN pour différents rapports E_{eff}/C (comme expliqué dans la Figure 2-14). Les résultats montrent une très faible différence de seuil de cisaillement entre ces deux mortiers. Ainsi on peut conclure que le SN est un bon matériau modèle pour le SR.

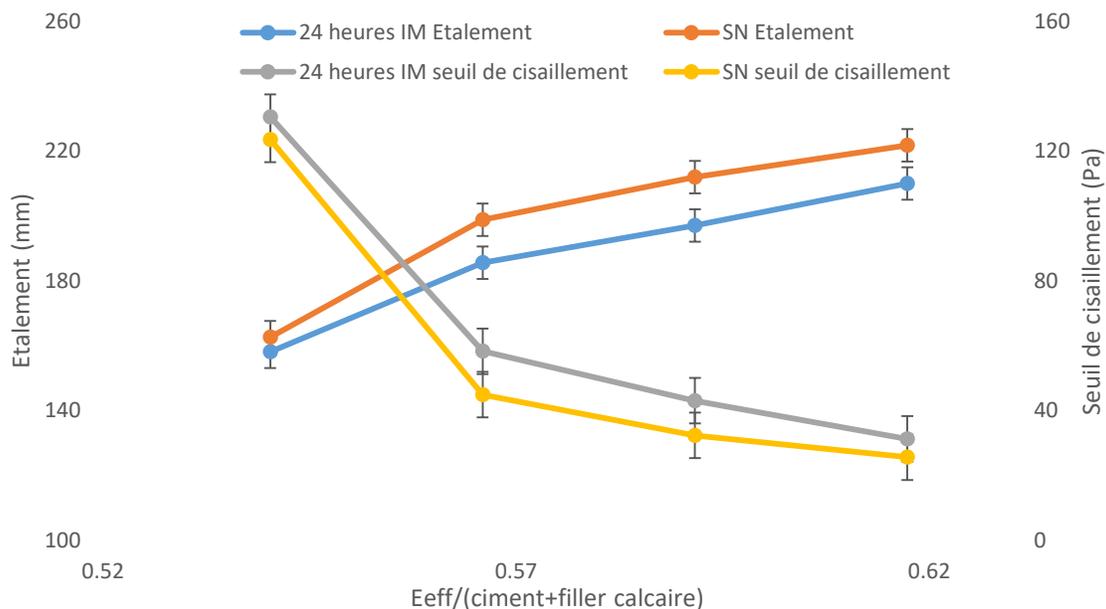


Figure 2-15 : Maniabilité des mortiers réalisés avec le SN ou le SR immergé dans l'eau pendant 24 heures.

L'ajout de 20, 40 et 60% de la quantité d'eau absorbée par le SR permet de calculer le pourcentage d'eau non absorbée pour les différents états de saturation. La figure 2-16 présente la variation du seuil de cisaillement en fonction du rapport E_{eff}/C pour les différents mortiers réalisés avec les différents états de saturation du SR.

Le seuil de cisaillement diminue si le rapport E_{eff}/C augmente [78]. Pour les cas des pâtes de ciment pures, la diminution est exponentielle. Dans notre recherche, l'utilisation d'une équation parabolique donne une meilleure régression ($R^2=0,97$) que l'utilisation d'une tendance exponentielle. Les seuils de cisaillement obtenus avec le modèle de Roussel présentés dans le tableau 2-7 sont utilisés pour calculer les quantités d'eau en excès et ainsi pouvoir remonter à l'absorption d'eau pour les différents états de saturation [33]. Dans cette partie les paramètres de composition des mortiers sont identiques, seule la quantité E_{eff} change et peut donc avoir un impact sur le seuil de cisaillement pour les différents états de saturation.

Le mortier réalisé avec un SR saturé à WA +5% pendant 24 heures présente un seuil de cisaillement de 79 Pa. Sur la base de ce résultat, l'absorption d'eau peut être calculée avec la relation parabolique présentée dans la figure 2-16 et correspond à 8,33%. L'absorption d'eau présentée dans le tableau 2-2 avec un état de saturation WA +5% pendant 24 heures, présente une valeur similaire, ce qui signifie que la cinétique d'absorption d'eau est quasi identique pour les deux essais. Ces résultats confirment qu'une étude rhéologique peut être utilisée pour calculer l'eau absorbée dans les différents états de saturation.

L'utilisation du SR sec ou après 5 minutes de saturation avec WA+5% donne des seuils de cisaillement proches. Sur la base de ces valeurs, l'absorption d'eau calculée est de 5.3% et 5.7% respectivement. Le degré de saturation, qui est calculé avec le rapport entre l'eau absorbée et l'absorption d'eau à 24h, est d'environ 54%.

Ajouter le SR sec à la pâte de ciment donne une valeur inférieure au seuil de cisaillement, l'eau absorbée calculée pour cette procédure est de 6,81%, ce qui signifie que le degré de saturation du SR est alors de 70%. Dans cette procédure, le SR absorbe plus d'eau que si le SR est utilisé sec ou saturé avec WA +5% pendant 5 minutes. Maimouni et al [33] ont montré qu'après 5 minutes de mélange, le degré de saturation du SR sec dans une pâte de ciment avec un rapport E/C égale à 0,5

est d'environ 70%. Ce résultat est similaire au résultat obtenu pour le mortier fabriqué avec du SR dans les mêmes conditions de préparation.

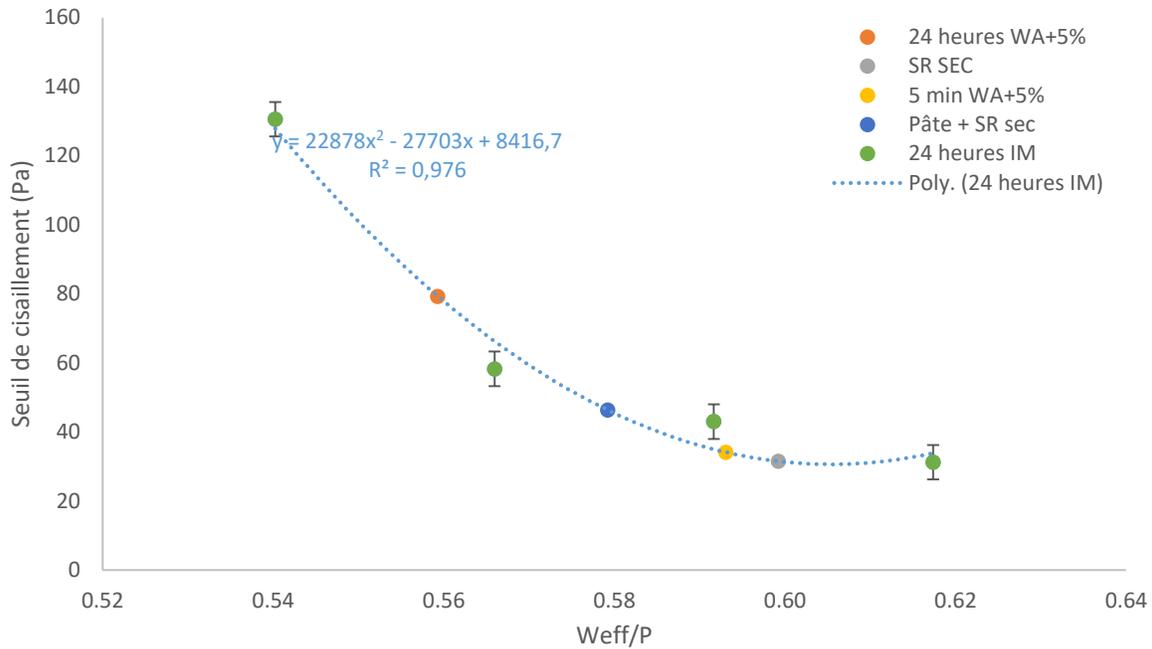


Figure 2-16: Variation du seuil de cisaillement en fonction du rapport E_{eff}/P pour les différents mortiers réalisés avec les différents états de saturation du SR.

2.6 Propriétés mécaniques

Dans le paragraphe 2.3, il a été démontré que le SR et le SN avaient des caractéristiques très proches. Dans le paragraphe 2.4, il a été trouvé que le mortier réalisé avec un SR immergé dans l'eau donne des caractéristiques rhéologiques similaires à celles du mortier réalisé avec le SN. Ainsi, le SN constitue un bon matériau modèle pour notre SR saturé et il peut être utilisé pour étudier l'effet sur le comportement à l'état durci d'une substitution totale du SN par le SR.

Les différentes études présentées dans le chapitre 1 montrent qu'il peut exister une zone de pâte en périphérie des granulats (ITZ) qui possède des propriétés différentes par rapport à la matrice cimentaire. Zhao et al. [63] ont montré que l'état d'humidité des SR influence l'interface entre la nouvelle et l'ancienne pâte de ciment, ainsi cette différence a un impact sur les résistances mécaniques. Cependant, dans une recherche similaire, Le et al. [13] n'ont pas trouvé de différence significative dans la résistance mécanique entre les mortiers réalisés avec un SR sec ou saturé. Afin de mieux comprendre l'influence de l'état d'humidité du SR sur la résistance à la compressions des

mortiers, différents mortiers ont été fabriqués avec du SR sec ou saturé et comparés au mortier fabriqué avec le SN.

2.6.1 Composition des mortiers

Le tableau 2-9 présente les mélanges de mortier étudiés. L'étude rhéologique réalisée dans le paragraphe 2.5 a permis de quantifier l'eau absorbée par le SR à l'état sec. Afin de garantir la même eau efficace pour les différents mélanges de mortier, l'eau absorbée par le SR en immersion totale ou sèche est prise en compte dans le calcul de l'eau de gâchage. L'absorption d'eau du SN est prise égale à 1%, et pour le SR sec ou saturé est prise respectivement à 5,3% et 9,8%.

Des éprouvettes ($40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$) ont été préparées conformément à la norme EN 196-1 avec du SN, du SR sec et du SR saturé immergé 24h dans l'eau. Les résistances à la compression ont été mesurées suivant la norme EN 196-1. La procédure suivie pour le malaxage est identique à celle présentée dans le paragraphe 2.5.3.

Tableau 2-9: Compositions des mortiers pour réaliser l'étude à l'état durci

	Ciment (g)	Filler calcaire (g)	Sable (g)	Eau efficace (g)	Eau absorbé (g)	Eeff/ (Ciment+filler calcaire)
SN WA+0%	1344	895	3968	1 209	39,7	0,54
SN WA + 40%	1344	895	3968	1 325	39,7	0,59
SN WA + 60%	1344	895	3968	1 382	39,7	0,62
SR sec WA + 0%	1344	895	2943	1 209	156	0,54
SR sec WA + 40%	1344	895	2943	1 325	156	0,59
SR sec WA + 60%	1344	895	2943	1 382	156	0,62
24 heures IM WA+ 0%	1344	895	2943	1 209	288	0,54
24 heures IM WA+ 40%	1344	895	2943	1 325	288	0,59
24 heures IM WA+ 60%	1344	895	2943	1 382	288	0,62

2.6.2 Etude de l'effet limitant des propriétés mécaniques

Dans le but de comprendre d'où peut venir la différence de résistance mécanique lors de l'utilisation d'un SN et d'un SR, le modèle de De Larrard [79] a été utilisé. Cette approche est basée sur la relation entre la résistance à la compression d'un mortier, la résistance de la matrice de ciment et les paramètres intrinsèques des granulats utilisés.

Selon De Larrard [79], la résistance en compression d'un mortier ou d'un béton peut être exprimée avec (eq.2-10)

$$R_c = \frac{p \times R_{cm}}{q \times R_{cm} + 1} \dots \dots \dots (2-10)$$

R_{cm} : Résistance mécanique de la matrice cimentaire.

R_c : Résistance mécanique du mortier ou du béton

p : paramètre qui caractérise la qualité de la liaison mécanique entre la matrice du ciment et les granulats.

p/q : paramètre qui caractérise l'effet plafond des granulats.

La résistance mécanique de la matrice cimentaire est exprimée par (eq.2-11).

$$R_{cm} = 13,4 \times R_{c28} \times \left(\frac{V_p}{V_p + V_w + V_a} \right)^{2,85} \times MPT^{-0,13} \dots \dots \dots (2-11)$$

R_{c28} : représente la résistance à la compression d'un mortier standard fabriqué avec du ciment et du filler calcaire dans les mêmes proportions que celles indiquées dans le tableau 2-9 à 28 jours.

V_p , V_w , V_a : représentent le volume de la poudre, de l'eau et de l'air. Le volume d'air est mesuré avec CONTROLS/1L (appareil de mesure de la teneur en air).

MPT : paramètre présentant l'épaisseur de pâte maximale entre deux granulats (Eq. 2-12).

$$MPT = D_{max} \times \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \dots \dots \dots (2-12)$$

D_{max} : diamètre maximal du granulat

g : le volume total des granulats par unité de volume du mortier.

g^* : la compacité calculée avec (Eq. 2-13).

$$g^* = 1 - 0,45 \times \left(\frac{d_{min}}{d_{max}} \right)^{0,19} \dots \dots \dots (2-13)$$

d_{\min} : diamètre correspondant à 10% de passant dans la granulométrie du granulat.

d_{\max} : diamètre correspondant à 90% de passant dans la granulométrie du granulat.

D'après (eq.2-10), pour les fortes résistances de la matrice, la résistance du mortier est égale à $R_c = p/q$; mais pour les faibles résistances de la matrice, la résistance du mortier est égale à $R_c = p \times R_{cm}$. La figure 2-17 illustre les effets des paramètres p et q sur la résistance mécanique d'un mortier ou d'un béton. Dans notre travail, un rapport eau sur poudre élevé est utilisé pour assurer une immersion totale du SR sous l'eau. Le rapport E/P élevé utilisé conduit ainsi à une faible résistance de la matrice. Ainsi, on va s'intéresser principalement au paramètre d'adhérence (p) et son effet sur la résistance mécanique.

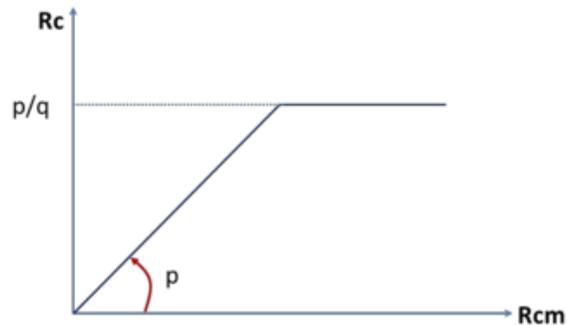


Figure 2-17: Illustration des paramètres p , q

2.6.3 Résultats et discussions

Le tableau 2-10 présente la résistance en compression à 28 jours des différents mortiers. Les mortiers réalisés avec le SN présentent une résistance en compressions plus élevée que ceux fabriqués avec le SR, quel que soit l'état de saturation du SR. Aussi, la résistance en compression du mortier fabriqué avec le SR à l'état sec est supérieure à celle du mortier fabriqué avec le SR saturé.

Un des paramètres qui influence la résistance mécanique et qui peut expliquer une partie de la différence de résistance mécanique obtenue entre les mortiers fabriqués avec un SN et un SR est la teneur en air, qui est plus importante pour les mortiers réalisés avec le SR que le SN. Cette différence pourrait être attribuée à la rugosité de surface qui est plus importante pour le SR comparé au SN.

Une teneur en air plus élevée pour les mortiers réalisés avec un SR sec comparé à ceux réalisés avec un SR saturé est observée. Cette différence peut être attribuée au fait qu'il y a beaucoup plus de particules non saturées lors de l'utilisation du SR sec, et/ou il peut être attribué à l'état de surface du SR sec qui entraîne plus d'air.

Dans le paragraphe 2.4, une différence de 4,5% d'absorption a été observée entre le SR sec et le SR saturé. Cette différence d'eau absorbée pourrait faire augmenter de 3,5% la teneur en air des mortiers réalisés avec un SR sec, à cause de la porosité non remplie d'eau du SR. Selon la mesure de la teneur en air présentée dans le tableau 2-7, une différence de 2,5 % entre le mortier fabriqué avec le SR sec ou saturé est observée. Ce résultat confirme que l'utilisation du SR sec augmente la teneur en air des mortiers à cause de l'air toujours présent dans les pores qui ne sont pas remplis d'eau (pores non saturés du SR). Ainsi, pour l'application du modèle De Larrard [79] la quantité d'air dans la pâte est nécessaire, donc la même teneur en air pour le SR sec et saturé est utilisée, car la teneur en air obtenu pour le mortier avec le SR saturé est considéré comme la teneur en air de la pâte.

Tableau 2-10: Résultats de résistances mécaniques ainsi que détails du calcul pour obtenir le paramètre p illustrant l'adhésion entre le granulat et la matrice cimentaire

	SN			SR SEC			IM 24H SR		
Eeff/P	0,54	0,59	0,62	0,54	0,59	0,62	0,54	0,59	0,62
Vair/Vtotal mortier (%)	1	1	1	7	7	7	4,5	4,5	4,5
Vair de la pâte/Vtotal (%)	1	1	1	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
g	0,43	0,42	0,41	0,41	0,39	0,39	0,42	0,40	0,40
g*	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
EMP	0,68	0,73	0,75	0,76	0,80	0,83	0,73	0,77	0,79
R_{c28}(MPa)	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03
R_{cm}(MPa)	22,34	18,88	17,42	18,73	15,90	14,69	18,73	15,90	14,69
R_c(MPa)	26,99	24,42	20,29	17,37	15,55	14,89	14,35	13,03	10,34
p		1,222			0,948			0,766	

Comme expliqué ci-dessus, le modèle de De Larrard est présenté uniquement avec le paramètre p en raison de la faible résistance de la matrice. L'adhérence entre le SN et la pâte est meilleure que celle entre le SR et la pâte. L'utilisation du SR sec permet d'obtenir une meilleure adhérence que s'il est utilisé saturé. Ce résultat est similaire au résultat obtenu par Zhao et al [80].

Ainsi, la différence de résistance mécanique entre le mortier de SR et de SN est due à deux paramètres :

- Une teneur en air plus élevée dans la pâte pour le mortier réalisé avec le SR
- Une meilleure adhérence entre le SN et la nouvelle pâte

Le tableau 2-11 compare le paramètre p obtenu pour le sable recyclé avec ceux obtenus dans la littérature. On remarque que le paramètre p est plus faible pour le SR utilisé dans notre étude que celui utilisé dans l'étude de Le et al. [22] dans les mêmes conditions de saturation. Il est aussi remarqué que certains matériaux naturels possèdent une plus faible adhérence entre la pâte et le granulat.

Tableau 2-11: Comparaison du paramètre p du SR avec les différents résultats obtenus de la littérature

Nature du granulat		p	Références
SN	Calcaire	1,222	Notre étude
SR sec	Sable recyclé	0,948	
SR saturé	Sable recyclé	0,766	
Sable recyclé	Sable recyclé	1,298	Le et al. [22]
Crotoy	Silex roulé	0,583	Lecompte et al. [81]
Boulonnais	Calcaire dur concassée	1,111	
Arlaut	Calcaire semi dur concassé	0,96	
Raon	Basalte concassé	0,651	
Cherbourg	Quartzite	1,145	Dao et al. [82]
G 1	Sable naturels	1,344	
G2	Sable naturels	1,157	
G2 (B1- 35M)	Sable recyclé	1,088	
G2 (B1 -65M)	Sable recyclé	1,225	
G2 (B1-35S)	Sable recyclé	1,078	
G2 (B1-65s)	Sable recyclé	1,061	
G2 (B1-35C)	Sable recyclé	1,072	
G 2 (B1-65C)	Sable recyclé	1,356	
G 3 (B2-35-GS)	Sable recyclé	0,704	
G3 (b2-35-A-GS)	Sable recyclé	0,837	
G 3 (B2-65-A-GS)	Sable recyclé	0,569	
GADP	Sable recyclé	1,951	

2.7 Conclusion

Une méthode originale permettant de préparer un sable naturel modèle avec des caractéristiques comparables avec un sable recyclé est présentée. La caractérisation physique spécifique effectuée sur les deux sables montre qu'ils présentent des caractéristiques granulaires très similaires (distribution granulométrique, élongation et compacité). La comparaison des mortiers fabriqués avec le SN et les SR saturés montre que ces deux mortiers présentent des propriétés rhéologiques

proches, ce qui confirme que le SR est un bon sable modèle recyclé pour faire une comparaison rigoureuse avec le SN.

En utilisant les deux sables précédents, les propriétés mécaniques des mortiers fabriqués avec du SR dans diverses conditions de saturation sont comparées à celles des mortiers fabriqués avec le SN de composition identique (même rapport Eeff / C et même volume de pâte). Les résultats montrent que les résistances à la compression des mortiers fabriqués avec le SN sont systématiquement supérieures à celles des mortiers correspondants fabriqués avec du SR. La différence de résistances à la compression peut être attribuée à une qualité moindre de la liaison entre les granulats et la matrice du ciment et à une plus grande teneur en air dans les mortiers fabriqués avec du SR. Les résultats montrent également que les mortiers contenant du SR saturé présentent des teneurs en air inférieures à celles des mortiers SR sec, en raison de l'air contenu dans les vides non remplis de ces derniers. Cependant, les résistances à la compression des mortiers fabriqués avec du SR sec sont systématiquement supérieures à celles du SR saturé, en raison d'une meilleure adhérence entre le granulat et la matrice de ciment dans le premier.

Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'un article dans le journal *Materials and Structures* [74].

Chapitre 3 : Mesure de porosité et d'absorption d'eau d'une pâte de ciment broyée (>125 μ m)

3.1 Introduction	99
3.2 Méthodologie	99
3.3 Fabrication et caractérisation des matériaux	100
3.3.1 Fabrication des matériaux	100
3.3.2 Protocole de caractérisation.....	101
3.3.3 Résultats et discussion.....	102
3.4 Approche théorique	105
3.4.1 Présentation du modèle théorique	105
3.4.2 Vérification statistique du modèle théorique.....	109
3.4.3 Application du modèle théorique sur PCB et BP	112
3.5 Approche expérimentale	113
3.5.1 Test de porosité au mercure réalisée sur la poudre non poreuse (FC)	113
3.5.2 Le test de porosité au mercure réalisée sur PCB et BP	116
3.6 Absorption et cinétique d'absorption d'une poudre	119
3.6.1 Absorption d'eau d'une poudre	120
3.6.2 Cinétique d'absorption d'une poudre	121
3.7 Demande en eau de PCB et FC	123
3.7.1 Mélanges réalisés et mesure de la maniabilité	123

3.7.2 Résultats et discussions	125
3.8 Conclusion.....	128

3. Mesure de porosité et d'absorption d'eau d'une pâte de ciment broyée (>125 μ m)

3.1 Introduction

Il existe plusieurs méthodes permettant de mesurer la porosité des matériaux granulaires grossiers. Par exemple, la porosimétrie au mercure (MIP) permet de connaître la porosité et la distribution de la taille des pores de dimensions supérieures à 0,01 μ m. De plus, plusieurs méthodes expérimentales existent pour mesurer la porosité accessible à l'eau des granulats. Les méthodes de la norme européenne EN 1097-6 [16], de la norme américaine ASTM C 128-04 [83] ou encore la méthode IFSTTAR N°78 [21] peuvent être appliquées pour mesurer la porosité des granulats. Zhao et al. [12] ont montré que l'utilisation de la norme EN 1097-6 [16] ou de la méthode IFSTTAR N°78 [21] ne permet pas de mesurer précisément la porosité intra granulaire pour les particules inférieures à 0,5mm. La taille des grains rend leur séparation difficile, ce qui ne permet pas de distinguer la porosité intra de la porosité inter granulaire. De plus, dans le cas des poudres, la mesure est compliquée en raison de la rapidité de l'absorption d'eau [84]. Stromme Mattson et al. [85] ont développé une méthode basée sur la mobilité ionique dans des systèmes diélectriques pour la mesure de la porosité des billes de verre et des poudres d'agglomérats de cellulose. Cette méthode peut être utilisée pour des poudres contenant des phases insolubles dans l'eau, mais elle ne s'applique pas aux poudres minérales partiellement solubles. L'objectif principal de ce chapitre est de développer une méthode alternative permettant l'estimation de la porosité restante dans une poudre broyée.

3.2 Méthodologie

Pour déterminer la porosité d'une poudre, deux approches alternatives sont proposées dans ce chapitre. La première approche est basée sur un modèle théorique qui estime la porosité des matériaux poreux broyés en se basant sur la distribution de la taille des pores du matériau monolithique initial (matériau avant broyage) et sur la granulométrie de la poudre poreuse (matériau après broyage). Pour la seconde approche, la porosité de la poudre poreuse est estimée grâce à un essai de porosimétrie au mercure (MIP) sur poudre. Cet essai permet de distinguer les porosités inter et intra granulaires de la poudre poreuse.

Les matériaux utilisés dans l'étude sont présentés dans la partie 3.3. Le modèle théorique est présenté dans le paragraphe 3.4. L'approche expérimentale est décrite dans le paragraphe 3.5. Par la suite, l'absorption d'eau et la cinétique d'absorption d'eau d'une pâte de ciment broyée et d'une brique broyée sont étudiées dans le paragraphe 3.6. Les conclusions sont formulées dans le paragraphe 3.7.

3.3 Fabrication et caractérisation des matériaux

3.3.1 Fabrication des matériaux

Dans cette partie, trois poudres ont été utilisées. La première poudre est un filler calcaire (FC) commercial fourni par Carmeuse, en Belgique. Selon le fabricant, la porosité du calcaire d'origine à partir duquel la poudre a été produite est de 1%. La seconde poudre est une poudre issue d'une pâte de ciment durcie broyée (PCB), et la troisième poudre est issue du broyage d'une brique (BP).

La pâte de ciment durcie (PCD) est fabriquée avec un ciment CEM I 52,5N de chez CBR en Belgique conforme à la norme EN 197-1. Le rapport eau sur ciment est de 0,5. Pour assurer une bonne homogénéisation lors de la fabrication de la pâte de ciment, la moitié de la quantité de ciment est d'abord ajoutée à l'eau et mélangée pendant 90 secondes ; l'autre moitié est ajoutée et le processus de mélange est poursuivi pendant 90 secondes supplémentaires. Ensuite, la pâte de ciment fraîche est versée dans des bouteilles en plastique hermétiques de 1 litre. La pâte de ciment est soumise progressivement à des vibrations afin de minimiser la présence de bulles d'air. A la fin, la pâte de ciment fraîche est scellée et mise en rotation pendant 6 heures (jusqu'à la prise) à l'aide d'une machine rotative appropriée, afin d'éviter toute ségrégation. La PCD est stockée à 20°C dans des bouteilles scellées pendant 90 jours pour assurer un degré d'hydratation élevé.

Les briques sont fournies par l'usine de la division Barry de la société Ploegsteert en Belgique.

Le broyage de la PCD ainsi que la brique est réalisé en trois étapes. La première étape consiste à concasser les éléments de PCD issus des bouteilles hermétiques dans un concasseur à mâchoires avec une ouverture de 8 mm dans le but d'obtenir une taille de particules comprise entre 4 et 20mm. Ces particules sont utilisées afin de caractériser la PCD (matériau monolithique). Dans une deuxième étape, le matériau est broyé à l'aide d'un broyeur à boulets afin d'obtenir une poudre fine (PCB et BP) de dimension inférieure à 300µm. Enfin, pour obtenir la même distribution

granulométrique entre le FC et la PCB, un broyage supplémentaire est réalisé à l'aide d'un broyeur à disques, jusqu'à ce que les deux granulométries (FC et PCB) soient similaires. Cette méthode est longue car elle ne permet de broyer que 200 à 300 grammes de matériau à la fois. Pour la BP, un tamisage à 200µm a été réalisé afin d'obtenir un d_{90%} similaire à celui du FC.

3.3.2 Protocole de caractérisation

Tout d'abord, une porosité au mercure est réalisée sur la PCD et la brique avant broyage (matériau monolithique). Cette mesure consiste à introduire le mercure liquide sous pression dans la porosité d'un échantillon. Le mercure est un fluide non mouillant, il est nécessaire d'appliquer une pression croissante afin qu'il puisse pénétrer dans la porosité de plus en plus petite. L'essai suppose que les pores aient une forme cylindrique de diamètre D, l'équation de Washburn permet de donner une relation entre la pression (P) et le diamètre des pores (eq.3-1), où γ est la tension superficielle du mercure (0,485N/m) et θ l'angle de contact (130°). En fonction du volume de mercure injecté, la distribution de la taille de pores de l'échantillon peut ainsi être obtenue.

$$D = -4\gamma\cos\theta/P \dots (3-1)$$

Pour réaliser cet essai, un porosimètre Mecrometitics Autopore IV avec une pression de mercure comprise entre 0 et 200 MPA est utilisé. Cinq tests sont effectués sur des échantillons d'environ 1×1×1cm³. 5 échantillons sont prélevés dans différentes parties du matériau, ce qui permet également de vérifier que la pâte de ciment durcie est homogène.

Pour les poudres broyées, la distribution granulométrique est déterminée avec un granulomètre laser (Mastersizer 2000). En raison de la présence éventuelle d'anhydres dans la pâte de ciment broyée (PCB), l'essai est réalisé avec de l'éthanol pour les 3 poudres. La surface spécifique (SS) a été mesurée de trois manières différentes : conformément à la norme EN 196-6, avec la méthode BET et calculée avec (eq.3-2), où γ_i est la fraction volumique de taille des grains, ρ_{abs} la densité absolue obtenue au pycnomètre à hélium, et D_i est le diamètre du grain. Le calcul de la surface spécifique suppose que les poudres ne sont pas poreuses.

$$SS_{calculée} = \sum_{i=0}^n \left[\frac{\frac{\gamma_i}{\rho_{abs}}}{\left(\frac{4}{3}\right) \times \pi \times (D_i/2)^2} \right] \times \pi \times D_i^2 \dots \dots (3-2)$$

La forme des particules a été analysée par imagerie 2D [47]. La même quantité de matériau est utilisée pour les poudres (FC, BP et PCB) car les résultats de l'analyse morphologique pourraient dépendre de la quantité du matériau ajoutée. Plus de 100 000 grains sont analysés pour obtenir le volume, la largeur et la longueur des particules. Les résultats sont présentés avec le paramètre d'élongation calculé avec (eq.3-3).

$$\text{Elongation} = 1 - (\text{width/length}) \dots \dots \dots (3-3)$$

3.3.3 Résultats et discussion

Le tableau 3.1 présente la porosité, la densité absolue et la densité apparente obtenues avec l'analyse MIP effectuée sur les matériaux monolithiques. La porosité du calcaire monolithique est beaucoup plus petite que celle de la brique et de la PCD et peut être négligée. Le test MIP effectué sur divers échantillons de PCD et de brique (monolithes) a montré que la PCD et la brique sont homogènes. La figure 3.1 présente les distributions de la taille des pores de la PCD et de la brique. Le diamètre du pore médian de PCD est d'environ 0.07µm, et celui du plus grand est d'environ 0.7µm. Le diamètre critique des pores ou l'intrusion de mercure commence à augmenter fortement est d'environ 0.18µm. Pour la brique, le pore médian est d'environ 3µm et le plus grand d'environ 4 µm. Le diamètre critique des pores ou l'intrusion de mercure commence à augmenter fortement est d'environ 1 µm. Une différence importante dans la taille des pores est observée entre la brique et la PCD.

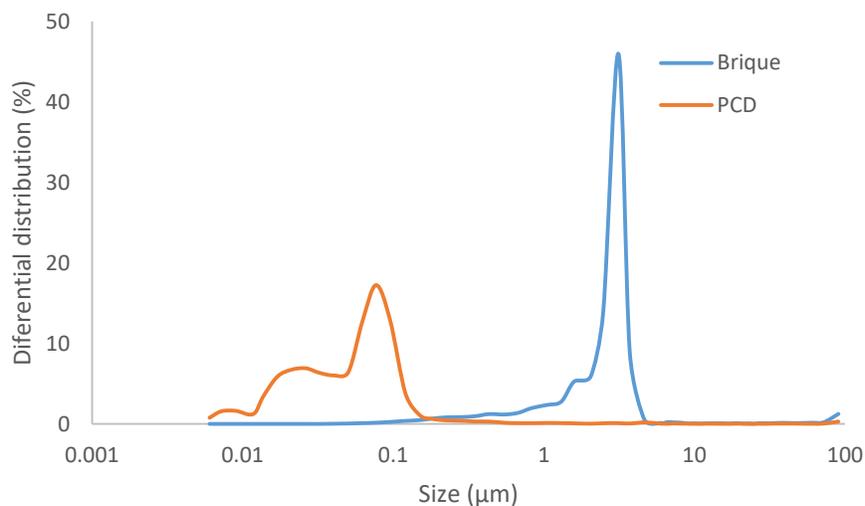


Figure 3-1 : Distribution de la taille des pores des monolithes PCD et brique

Tableau 3-1 : Porosité mesurée en utilisant le MIP sur les deux monolithes. * Résultat obtenu sur le monolithe LP selon la fiche technique

	Test	$\rho_{\text{abs MIP}}$ (g/cm ³)	Porosité MIP (%)	ρ MIP (g/cm ³)
PCD	1	2.1	24.81	1.58
	2	2.12	27.43	1.54
	3	2.13	25.15	1.59
	4	2.11	26.1	1.56
	5	2.12	26.22	1.57
	Moyenne	2.12 ±0.01	25.9 ±0.8	1.57
Brique	1	2.76	30.14	1.93
	2	2.85	31.05	1.96
	3	2.85	30.3	1.98
	4	2.88	31.32	1.97
	5	2.82	30.01	1.98
	Moyenne	2.82 ±0.01	30 ± 0.6	1.98
LP*		2.72*	1*	2.72*

Les résultats d'élongation obtenus pour la PCB, BP et le FC sont présentés dans la figure 3.2. De faibles différences sont observées pour les différentes fractions de taille des deux poudres. La distribution granulométrique des poudres est présentée dans la figure 3.3. Compte tenu de la procédure de broyage utilisée pour la BP et la PCB, la PCB et le FC ont une distribution granulométrique proche. De plus, une faible différence est obtenue entre la BP et le FC.

Les résultats de surface spécifique avec les différentes méthodes et pour les trois poudres sont présentés dans le tableau 3.2. La SS calculée pour le FC est similaire à celle de la PCB, car les deux poudres présentent la même granulométrie. En revanche, il existe une différence importante entre les SS obtenues avec les méthodes BET et Blaine, la PCB possédant une SS nettement plus grande que celle du FC. Cette différence obtenue avec ces deux méthodes (BET et Blaine) peut être attribuée à la porosité présente dans la PCB, conduisant à une SS plus importante.

Une petite différence de surface spécifique est observée (calculée, Blaine et BET) entre le FC et BP. Cela peut probablement être attribué à l'ouverture de la porosité de la brique lors du broyage, le SS étant dans ce cas essentiellement lié à la taille des particules.

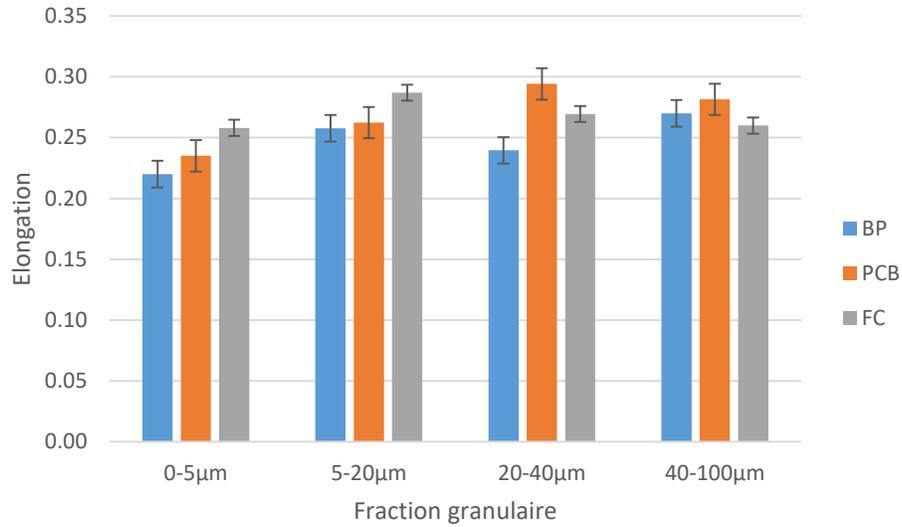


Figure 3-2: Comparaison des résultats d'élongation pour le FC, BP et la PCB

Tableau 3-2: Résultats de surface spécifique obtenus pour les trois poudres

	FC	BP	PCB
SSA Blaine (cm²/g)	3180	3282	9499
SSA BET (cm²/g)	7720	10000	9011
SSA Calculé (cm²/g)	4614	4572	4529

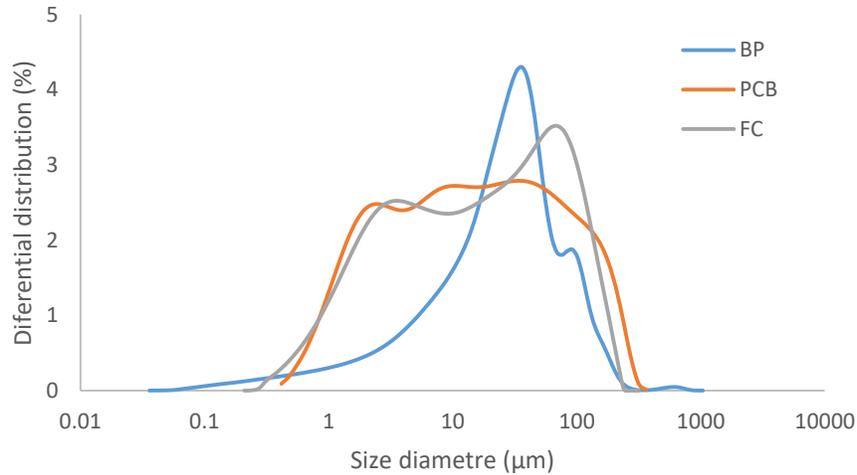


Figure 3-3: Distribution granulométrique de la PCB, BP et de FC

3.4 Approche théorique

3.4.1 Présentation du modèle théorique

Le modèle présenté dans cette partie permet d'estimer la porosité restante d'un matériau poreux après broyage. Ce modèle est alimenté par la distribution de la taille des pores du matériau poreux monolithique initial et par la distribution de la taille des particules du matériau poreux broyé. Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

- I. Le réseau poreux est considéré comme homogène et isotrope ;
- II. Les grains sont considérés comme sphériques ;
- III. Les pores sont décomposés en un ensemble de pores individuels, chacun étant caractérisé par un centre, une dimension caractéristique r et un volume caractéristique V_{cp} (figure 3.4)
- IV. Le pore est considéré comme ouvert s'il est coupé à la surface de la particule et s'il est plus grand qu'un diamètre qui correspond au plus petit pore inter granulaire (cette hypothèse est discutée ci-dessous).

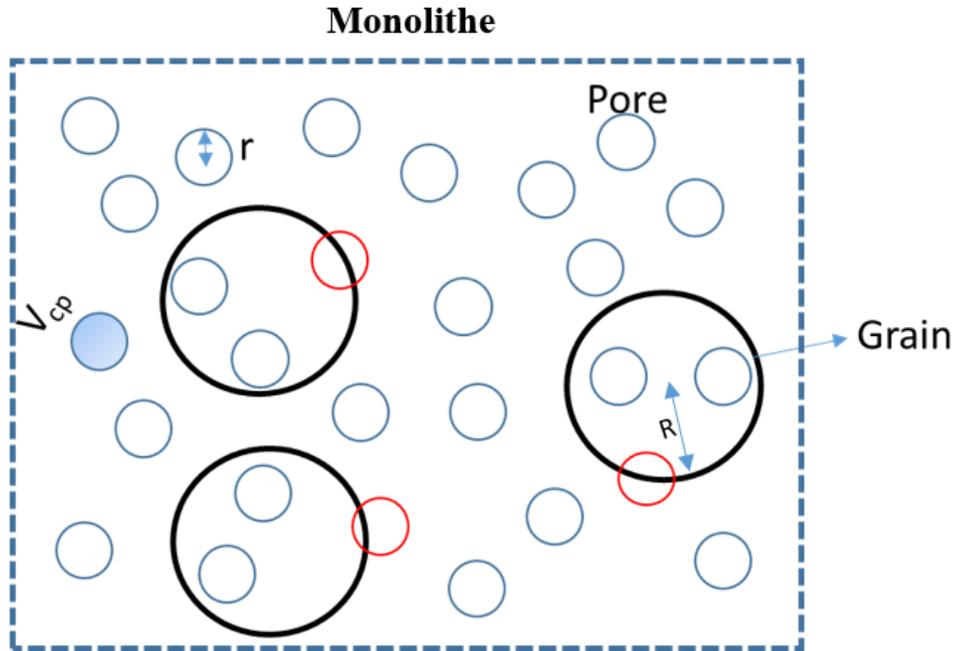


Figure 3-4: Illustration du réseau de pores et de la procédure de broyage. R est la dimension caractéristique du pore et V_{cp} est le volume du pore.

Afin de calculer la porosité restante de la poudre, la distinction entre la porosité inter granulaire et intra granulaire doit être faite dans le modèle théorique. Un pore situé à la surface d'une nouvelle particule broyée sera en contact direct avec la porosité inter granulaire. La question de savoir si ce pore doit être considéré comme un vide inter granulaire ou intra granulaire est arbitraire. Dans ce qui suit, nous considérons qu'un pore dont le diamètre est plus grand ou égal au plus petit vide inter granulaire de l'empilement appartient à la porosité inter granulaire. Au contraire, les pores plus petits que les plus petits vides inter granulaires sont comptés avec la porosité intra granulaire. La figure 3.5 illustre 3 particules voisines dans un empilement de grains sphériques de rayon R . Le plus petit pore de l'empilement granulaire correspond à des goulots d'étranglement entre trois particules en contact, dont le rayon est égal à $0,1547 \times R$. Ainsi, tous les pores présents à la surface des particules broyées avec des rayons supérieurs à $0,1547 \times R$ seront considérés, dans le modèle, comme de nouveaux pores inter granulaires.

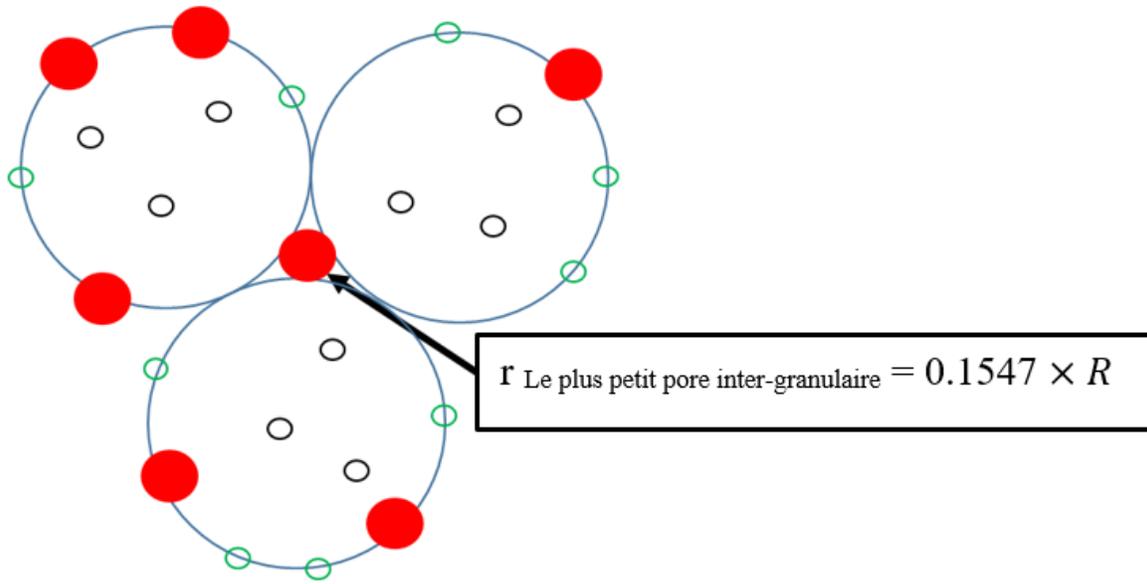


Figure 3-5 : Illustration du plus petit pore inter granulaire dans un empilement de particules sphériques mono dimensionnées. Les pores en rouge sont plus grands que le plus petit pore inter granulaire, ils ne sont donc pas pris en compte dans le calcul de la porosité intra granulaire

En premier lieu, nous considérons une seule taille de grain sphérique de rayon R et une taille unique de pore sphérique de rayon r plus grande que le rayon du plus petit pore inter granulaire ($0.1547 \times R$). La densité de centres de pores ρ_c peut être définie avec (eq.3-4), où dN_c représente le nombre de centres de pores contenus dans un volume élémentaire dV et ϕ la porosité initiale.

$$\rho_c = cste = \frac{dN_c}{dV} = \frac{\phi dV}{V_{cp}} \times \frac{1}{dV} = \frac{\phi}{V_{cp}} \dots \dots \dots (3-4)$$

Le volume élémentaire de pores dV_p dans un volume de particules dV peut-être calculé avec (eq. 3-5) lorsque $dV \gg V_{cp}$.

$$dV_p = dN_c V_{cp} = \rho_c V_{cp} dV \dots \dots \dots (3-5)$$

$dV \gg V_{cp}$ signifie que le volume sur lequel est calculé la porosité est très grand devant le volume élémentaire du pore. Mais cela ne signifie pas qu'il s'agit du volume d'un unique grain, il peut s'agir du volume cumulé d'un très grand nombre de petites particules.

Le volume de porosité restant (V_p) dans une particule de rayon R correspond à la porosité de tous les pores dont les centres sont situés à une distance du centre du grain inférieure à $R-r$ (Figure 3.6), à l'exclusion de tous les pores qui sont coupés à la surface du grain. (eq.3-7) présente le volume de pores restant dans la particule après broyage.

$$V_p = \int_0^{R-r} dV_p = \int_0^{R-r} \rho_c V_{cp} dV \dots \dots \dots (3-6)$$

$$V_p = \int_0^{R-r} \frac{\phi}{V_{cp}} V_{cp} dV = \int_0^{R-r} \phi dV = \phi \frac{4\pi}{3} (R^3 - 3R^2r + 3Rr^2 - r^3) \dots \dots \dots (3-7)$$

Si un pore est plus grand que la taille des grains, la porosité correspondante est éliminée par le broyage. Pour calculer la porosité restante, le volume des pores restant dans le grain après broyage est divisé par le volume total du grain. (eq.3-8) présente la porosité restante (ϕ_r) du matériau après broyage.

$$\phi_r = \frac{V_p}{V_{grain}} = \phi \times \left(1 - 3 \left(\frac{r}{R} \right) + 3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right) \dots \dots \dots (3-8)$$

(eq.3-8) permet de calculer la porosité restante lorsque seule une taille de pores et une taille de particules sont prises en compte (si $r \geq 0,1547 R$). Les pores inférieurs à $0,1547 \times R$ peuvent également être «divisés» en deux parties lors du broyage, mais dans ce cas, ils seront toujours considérés comme des pores intra-granulaires, il n'y aura donc pas de réduction de la porosité intra-granulaire de la poudre par rapport au matériau monolithique. Afin de calculer la porosité restante d'une taille de grain en tenant compte de toutes les tailles de pores (ou rayons r_i), (eq.3-8) doit être cumulée sur toutes les tailles de pores (eq.3-9), en tenant compte de la fraction volumique de chaque taille des pores (x_i). Si un pore a un rayon supérieur à $0,1547 \times R$, la porosité est éliminée par broyage.

$$\phi_r = \phi \times \left\{ \sum_{i=0}^m x_i + \sum_{i=m+1}^n x_i \times \left(1 - 3 \left(\frac{r_i}{R} \right) + 3 \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 - \left(\frac{r_i}{R} \right)^3 \right) \right\} \dots \dots \dots (3-9)$$

Avec $r_i < r_{i+1}$, pour $i = 1$ to $i = n$
 $r_m < 0.1547 \times R$ et $r_{m+1} \geq 0.1547 \times R$

Enfin, pour calculer la porosité restante dans tout le matériau, (eq.3-9) doit être sommée sur toutes les tailles de grains en multipliant la contribution de chaque taille de grain par sa fraction volumique (y_j) (eq. 3-10).

$$\phi_r = \phi \times \sum_{j=0}^k y_j \times \left\{ \sum_{i=0}^m x_i + \sum_{i=m+1}^n x_i \times \left(1 - 3 \left(\frac{r_i}{R_j} \right) + 3 \left(\frac{r_i}{R_j} \right)^2 - \left(\frac{r_i}{R_j} \right)^3 \right) \right\} \dots \dots \dots (3-10)$$

Avec $r_i < r_{i+1}$, pour $i = 1$ to $i = n$
 $r_m < 0.1547 \times R_{5\%}$ et $r_{m+1} \geq 0.1547 \times R_{5\%}$

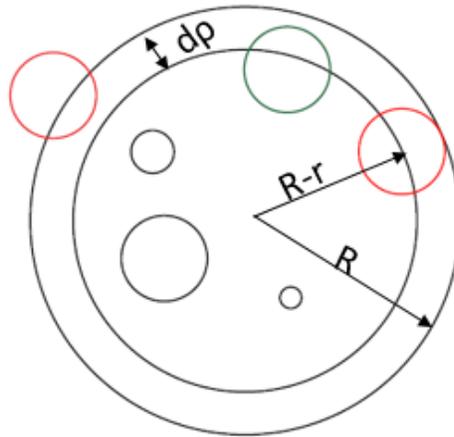


Figure 3-6: Illustration des pores qui sont exclus en raison de la procédure de broyage. Les pores en rouge sont des pores exclus

3.4.2 Vérification statistique du modèle théorique

Les limites statistiques que peuvent présenter le modèle théorique décrit précédemment sont étudiées par simulation numérique. Cette dernière est réalisée comme suit :

- Un matériau poreux monolithique infini est d'abord généré par adsorption séquentielle [86]. Des pores sphériques de rayons spécifiés sont distribués de manière aléatoire dans un conteneur parallélépipédique avec des conditions aux limites périodiques. Un emplacement aléatoire est généré pour chaque sphère, de la plus grande à la plus petite et le chevauchement avec toutes les sphères déjà placées est vérifié. Si aucun chevauchement n'est détecté, la sphère est placée et une nouvelle sphère est générée, sinon, une nouvelle position est générée jusqu'à ce qu'une place libre puisse être trouvée ;
- Ensuite, les particules sphériques de rayon spécifié sont "découpées" dans le matériau monolithique. Pour chaque particule, un emplacement aléatoire est généré et le volume de

tous les pores entièrement inclus dans la particule est calculé. Avec cette procédure, tous les pores qui sont coupés par la surface de la particule sont considérés comme ouverts.

Le tableau 3-3 présente les simulations réalisées pour la validation des équations (eq.3-8) et (eq.3-9). Premièrement, des particules de taille unique de rayon R ont été découpées dans un matériau poreux composé de pores sphériques de taille unique de rayon r . Le rapport entre la taille des pores et la taille des particules (r/R) varie entre 0,025 et 0,8. Par la suite, la même procédure a été utilisée avec un matériau monolithique composé de 3 tailles de pores de rayon r_1 , r_2 et r_3 , chaque fraction de pore représentant 33,33% du volume poreux initial. L'objectif de ces simulations est de vérifier la validité statistique du modèle théorique quand la taille des pores est proche de la taille des grains. Le nombre de grains ainsi que le nombre de pores générés dans cette simulation sont considérés comme représentatifs (statistiquement), car lors d'un essai de granulométrie laser ou de porosité au mercure, une faible quantité de matière est utilisée. Cette quantité de matière représente un nombre de grains et de pores proche que celui généré dans cette simulation. Par exemple, 1 gramme de poudre correspond à 73928405860 de grains, et a plus de 1000000 de pores.

Tableau 3-3: Simulations numériques effectuées pour la validation des équations 3-5 et 3-6. La porosité initiale du monolithe prise égale à 30%.

	Nombre de pores	Nombre de particules	r/R	Porosité finale
Validation (eq.3-8)	572958	100000000	0,8	0,2%
	572958	10000000	0,66	1,2%
	572958	10000000	0,5	3,8%
	572958	61115	0,4	6,5%
	572958	7639	0,2	15,4%
	572958	955	0,1	21,9%
	572958	120	0,05	25,7%
	572958	15	0,025	27,9%
Validation (eq.3-9)	221932	1000	0,1, 0,2, 0,3	15,8%
	221932	120	0,05, 0,1, 0,15	22,0%
	221932	20	0,025, 0,05, 0,075	25,8%
	221932	10	0,016, 0,033, 0,05	27,2%

Les figures 3-7 et 3-8 montrent la comparaison entre la porosité restante calculée avec le modèle théorique (eq.3-8) et (eq.3-9) et celle obtenue avec la simulation numérique. Dans cette simulation, les résultats obtenus avec le modèle théorique et avec les simulations numériques sont identiques, ce qui confirme la validité statistique des (eq.3-8) et (eq.3-9) pour un grand nombre de particules.

Les résultats montrent que la porosité restante tend vers 0 lorsque la taille des particules se rapproche de celle des pores. De plus, il est montré qu'au-delà d'un rapport de taille de 0,025, la porosité du matériau broyé correspond à 95% de la porosité du matériau monolithique.

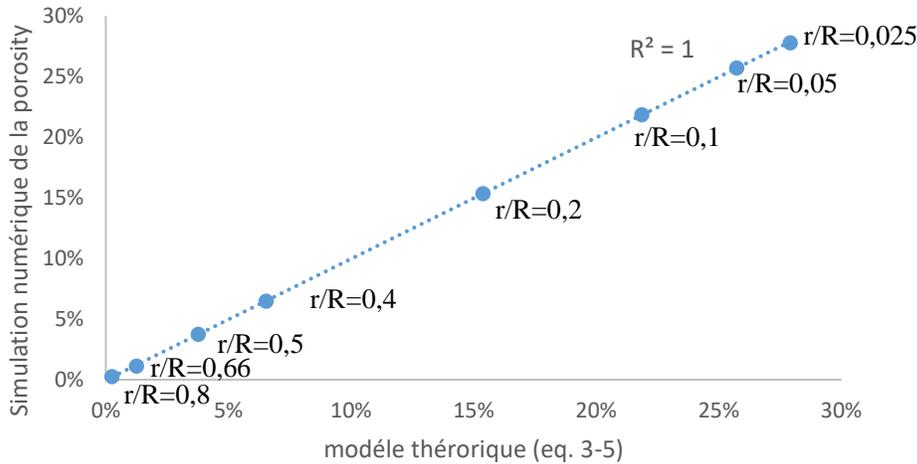


Figure 3-7 : Comparaison entre le calcul avec eq.3-8 le modèle numérique

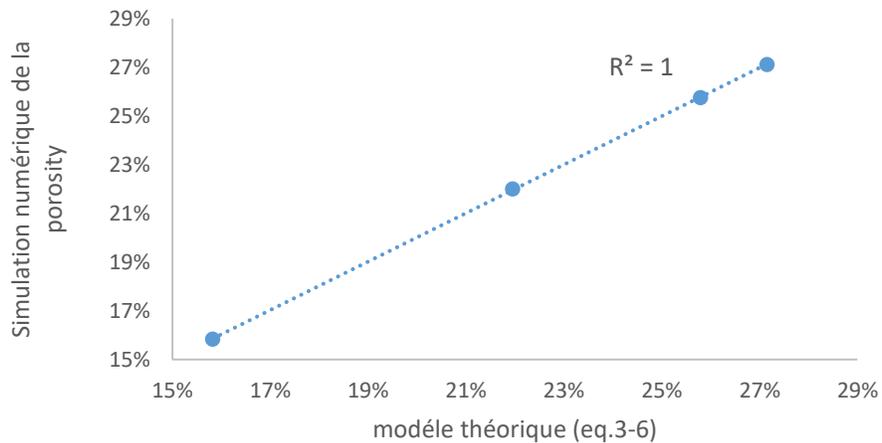


Figure 3-8 : Comparaison entre le calcul avec eq.3-9 et le modèle numérique

3.4.3 Application du modèle théorique sur PCB et BP

Le modèle théorique a d'abord été appliqué à BP et à PCB. Les granulométries des poudres et les distributions de taille des pores des monolithes sont considérés comme des données d'entrée pour le modèle. Le test de porosité au mercure effectué sur divers échantillons de PCD et de briques (monolithes) a montré que les PCD et les briques sont homogènes. Les éventuelles fissures

initialement présentes dans les monolithes (PCD et brique) sont considérées comme des pores, et elles sont prises en compte dans la porosité initiale. Cependant, il n'est pas possible d'estimer la porosité supplémentaire causée pendant la procédure de broyage, nous devons donc négliger cette porosité dans le modèle.

Afin d'obtenir la porosité finale après broyage de la PCD et de la brique, (eq.3-10) est utilisée. Le plus petit pore inter granulaire de chaque matériau doit être défini. Dans ce qui suit, la valeur correspondant à $0,1547 \times R_{5\%}$ a été choisie, où $R_{5\%}$ correspond au rayon de 5% du passant de la courbe granulométrique. Ce rayon est considéré comme le plus petit rayon des grain de PCB et BP.

La porosité restante de la PCB est de 24,7%. Une différence de 1,2% dans la porosité entre PCD et PCB est observée. La porosité restante de la BP est de 2%. On obtient une différence de 28% dans la porosité entre la brique monolithique et BP. Cette différence de porosité du monolithe et de la poudre est due à l'ouverture des pores lors du broyage. La différence de porosité restante entre la PCB et la BP est attribuée à la différence de la taille des pores du monolithe PCD et de la brique (figure 3-1).

3.5 Approche expérimentale

3.5.1 Test de porosité au mercure réalisée sur la poudre non poreuse (FC)

Plusieurs Auteurs ont déjà utilisé le test de porosité au mercure pour étudier la compaction des poudres [87][88]. Selon Guérin et al. [89], il existe deux zones distinctes sur la courbe obtenue avec le test de porosité de mercure. La première zone correspond à la compaction de l'empilement granulaire sous l'action de l'augmentation de pression, passant d'un empilement lâche à un empilement dense [90]. La seconde zone correspond au remplissage progressif du mercure dans le volume poreux inter granulaire.

La figure 3-9 présente la variation de la compacité (γ_{total}) en fonction du diamètre des pores pour le FC. La compacité (γ_{total}) est exprimée avec (eq.3-11), où V_s est le volume solide de poudre, V_0 est le volume initial, V_{inject} est le volume de mercure injecté et $V_0 - V_{inject}$ est le volume total de l'empilement pour une pression donnée du mercure.

$$\gamma_{total} = \frac{V_s}{V_0 - V_{inject}} \dots \dots \dots (3-11)$$

Pour identifier la première zone où seule la compaction a lieu, un modèle de dynamique de compaction est utilisé. La dynamique de compaction des matériaux granulaire a été largement étudiée dans la littérature [91][92]. Il a été démontré que la compacité d'un matériau granulaire soumis à une succession de chocs évolue en fonction du nombre de secousses selon (eq.3-12) :

$$\gamma(t) = \gamma_{\infty} - \Delta\gamma_{\infty} \times \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta}\right) \dots\dots\dots (3-12)$$

Où γ_{∞} est la compacité infinie, $\Delta\gamma_{\infty}$ correspond à la variation de la compacité lors du tassement, t est le nombre de secousses appliquées sur la poudre, τ est un temps caractéristique et β un paramètre d'ajustement. Il a été montré que cette relation peut généralement être utilisée pour décrire la dynamique de compaction de matériaux granulaires [93]. Cette relation est utilisée dans la suite pour caractériser la première zone de compaction dans l'essai MIP sur poudres, en remplaçant le nombre de secousses t par la pression de mercure (exprimée en diamètre de pore sur la figure 3-9). L'application du modèle de dynamique de compaction nécessite l'utilisation du volume enveloppe de grains ($V_{\text{enveloppe}}$), en tenant compte de la porosité intra granulaire. Le LP étant quasi non poreux, le volume solide V_s est considéré égal à $V_{\text{enveloppe}}$.

(eq.3-12) est utilisée ici pour identifier la fin de la zone de compaction de la courbe de porosité au mercure. Ainsi, ce modèle a été adapté aux résultats de la courbe de porosité au mercure depuis le début du test jusqu'à une certaine pression (ou rayon de pores) correspondant à la fin de la compaction. Tant que (eq.3-12) permet un bon ajustement des résultats de la courbe de porosité au mercure. avec des paramètres d'ajustement significatifs, nous pouvons considérer que la zone de compaction n'est pas terminée. Le tableau 3-4 présente les paramètres d'ajustement obtenus pour différentes pressions appliquées lors de l'utilisation du modèle de compaction. On peut voir que, pour un rayon de pore de 2,46 μm , γ_{∞} est supérieur à 1, ce qui n'a aucune signification physique. Au contraire, les paramètres d'ajustement obtenus pour un rayon de pore de 3,08 μm sont cohérents et l'ajustement du modèle est bon ($R^2=0,98$). On peut donc considérer que la fin de la première zone correspond à 3 μm . Dans cette zone, la compacité de la poudre LP augmente de 0,52 (empilement lâche) à 0,56 (empilement dense).

Comme le montrent Guérin et al. [89], la deuxième zone correspond au remplissage progressif du volume des pores inter granulaires. La porosité du LP est inférieure à 1% (tableau 3-2), le diamètre

des pores correspondant à cette porosité ($\gamma_{total}=0,99$) est de $0,18\mu\text{m}$, de sorte que le plus petit pore inter granulaire dans l'empilement de LP est de l'ordre de $0,18\mu\text{m}$.

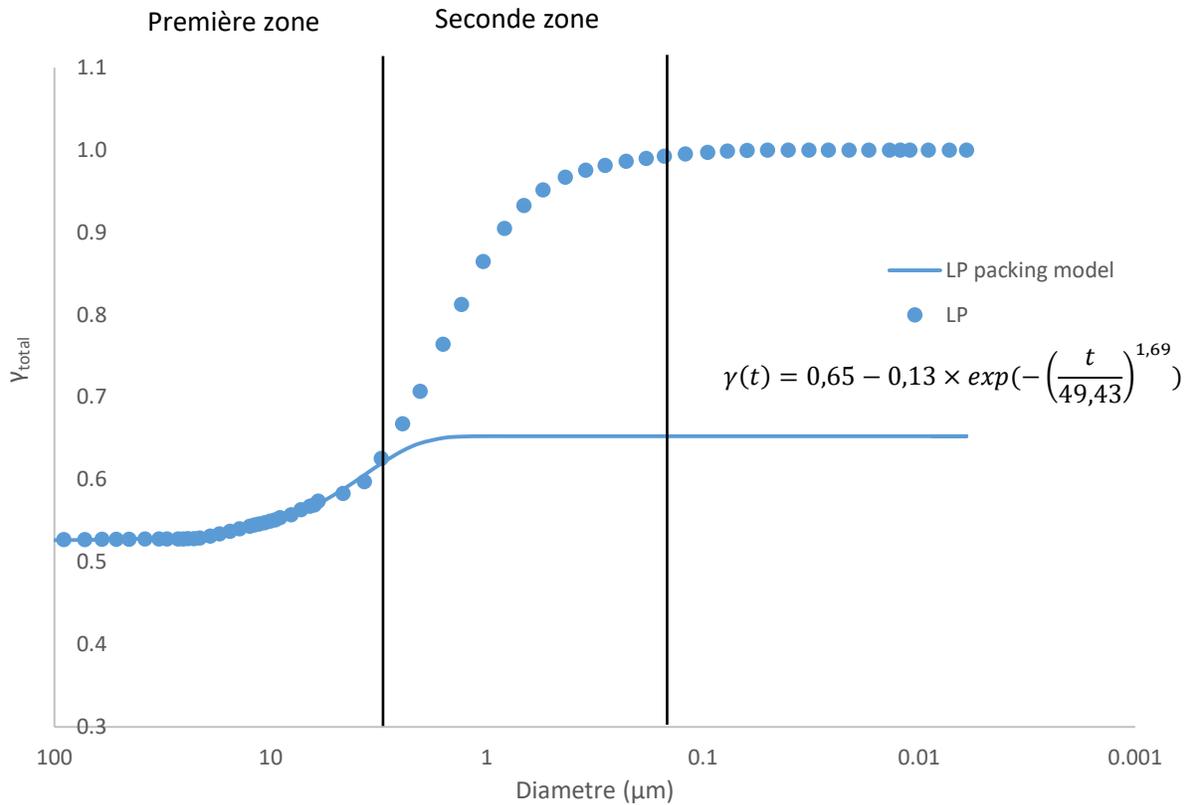


Figure 3-9 : Variation de γ_{total} en fonction du diamètre des pores pour FC

Tableau 3-4: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de (eq.11) pour identifier la zone de compactage pour LP

Pression (MPa)	Diamètre de pore (μm)	γ_{∞}	τ	b	R^2
0,268	4,63	0,59	24,88	2,34	0,994
0,337	3,69	0,60	29,61	2,09	0,993
0,399	3,08	0,65	49,43	1,69	0,986
0,503	2,46	1,53	293,01	1,39	0,993

3.5.2 Le test de porosité au mercure réalisée sur PCB et BP

La figure 3-10 illustre les différents volumes considérés lors de l'utilisation de la MIP pour analyser une poudre poreuse. V_s est le volume solide de particules obtenu avec la MIP. V_0 est le volume apparent initial de la poudre, V_{injected} est le volume de mercure injecté, V_{comp} correspond au volume compacté obtenu lors du passage d'un empilement lâche à un empilement dense (première zone) et V_{inter} correspond au volume inter granulaire (deuxième zone). Dans le cas d'une poudre poreuse, il faut ajouter un volume supplémentaire correspondant à la porosité intra granulaire accessible au mercure V_{intra} .

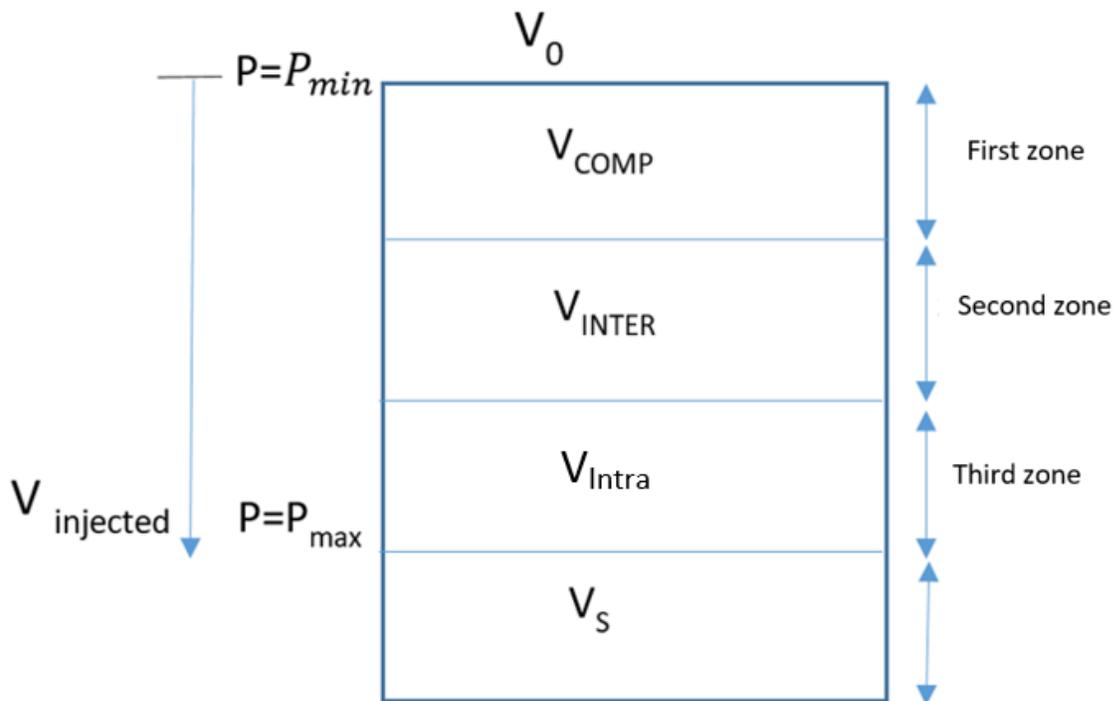


Figure 3-10: Illustration des différents volumes lors de l'utilisation d'analyses MIP sur une poudre poreuse. Les différents volumes correspondent à des tailles de pores décroissantes

La figure 3-11 présente la variation de γ_{total} en fonction du diamètre des pores pour FC, BP et PCB. Le diamètre du plus petit pore inter granulaire est égal à 0,18 pour BP et 0,17 pour PCB.

L'équation 12 (eq.12) a été utilisée pour identifier la première zone correspondant à la compaction des particules BP et PCB. Le volume enveloppe doit être calculé selon (eq.14). Ensuite, la dynamique de compactage (éq. 12) doit être ajustée en prenant en compte le volume enveloppe des grains (éq. 15).

$$V_{enveloppe} = V_s + V_{intra} \dots \dots \dots (3-13)$$

$$\gamma_{R5\%} = \frac{V_s}{V_s + V_{intra}} \dots \dots \dots (3-14)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{envelop} &= \frac{V_{envelop}}{V_0 - V_{inject}} = \frac{V_s + V_{intra}}{V_0 - V_{inject}} = \gamma_{total} + \frac{V_{intra}}{V_0 - V_{inject}} \\ &= \gamma_{total} + \frac{V_s}{V_0 - V_{inject}} \times \left(\frac{1}{\gamma_{R5\%}} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$\gamma_{envelop} = \frac{\gamma_{total}}{\gamma_{R5\%}} \dots \dots \dots (3-15)$$

Le tableau 3-5 présente les paramètres d'ajustement pour différentes pressions appliquées pour la PCB lors de l'utilisation du modèle de compaction. Pour un diamètre de pore de 1,59µm, la description de la première partie de la courbe n'est pas satisfaisante ($R^2 = 0,94$), et on considère donc que la fin de la zone de compaction est atteinte pour un diamètre de pore de 2µm ($R^2 = 0,989$). Ce diamètre est proche de celui obtenu pour LP (3µm).

Le tableau 3-6 présente les paramètres d'ajustement pour différentes pressions appliquées pour BP lors de l'utilisation du modèle de compaction. Pour un rayon de pore de 4,66 µm, γ_{∞} est plus grand que l'unité, ce qui n'a aucun sens physique. Au contraire, les paramètres d'ajustement obtenus pour un rayon de pore de 6,03 µm sont cohérents et l'ajustement du modèle est bon ($R^2 = 0,99$).

La compacité obtenue avec (eq.13) de PCB augmente de 0,607 à 0,76, et pour BP augmente de 0,433 à 0,51.

L'évolution de γ_{total} dans la deuxième zone (porosité inter granulaire) diffère significativement entre FC et PCB. La différence peut être attribuée à la compacité plus élevée de PCB par rapport à celle de LP. Il y a une petite différence dans l'évolution de γ_{total} dans la deuxième zone (porosité inter

granulaire) entre FC et BP, cette différence peut être causée par le fait que le remplissage de la porosité inter-granulaire commence à 4µm pour BP, et celle du FC commence à 2µm.

Enfin, la troisième zone nous permet de calculer la porosité intra granulaire de BP et PCB. Cette valeur peut être calculée avec (eq.16) et est égale à 16,5% pour PCB et 2,1% pour BP.

$$\text{Intra granular porosity} = 1 - \gamma_{R_{5\%}} \dots \dots \dots (16)$$

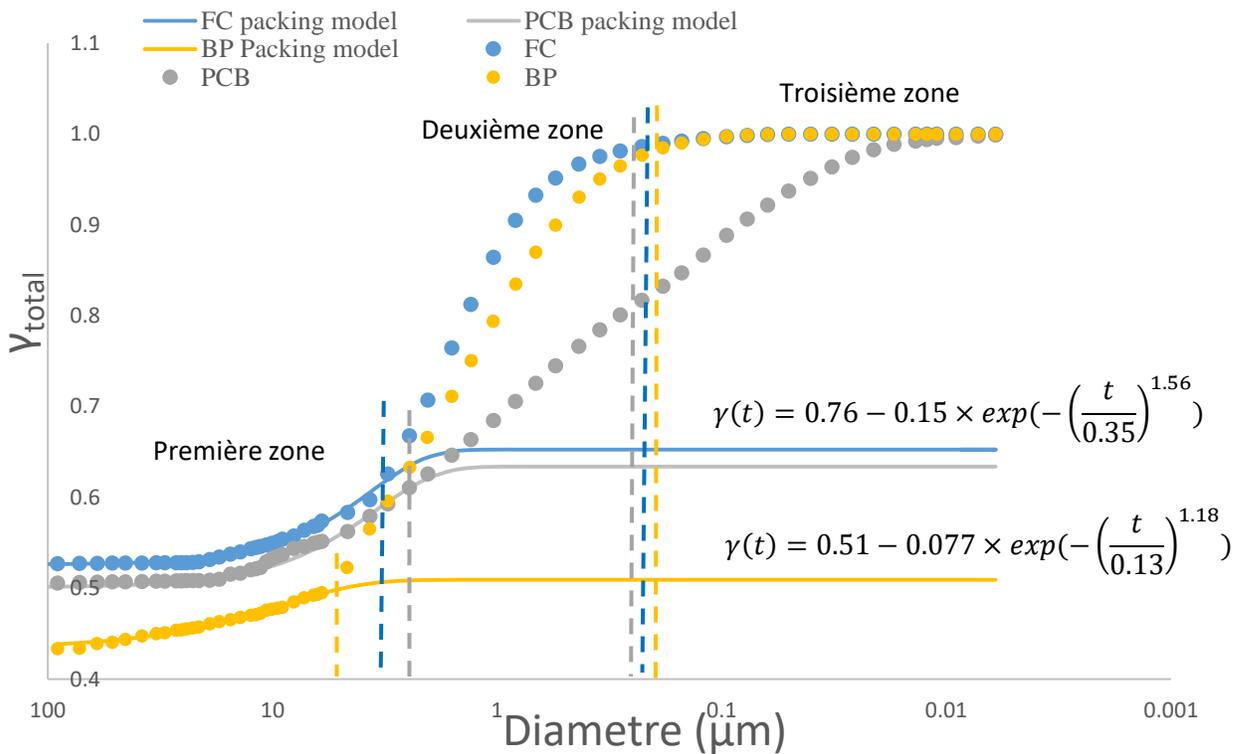


Figure 3-11: Variation de γ_{total} en fonction du diamètre des pores pour FC, BP et PCB

Tableau 3-5: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de l'équation 11 pour identifier la zone de compaction du PCB

Pression (MPa)	Diamètre de pore (µm)	γ_{∞}	τ (MPa)	β	R^2
0.399	3.08	0.71	0.24	1.89	0.983
0.503	2.46	0.74	0.29	1.67	0.985
0.606	2.04	0.76	0.35	1.56	0.988
0.779	1.59	0.79	0.43	1.44	0.949

Tableau 3-6: Paramètres d'ajustement obtenus lors de l'utilisation de l'équation 11 pour identifier la zone de compaction pour BP

Pression (MPa)	Diameter de pore (μm)	γ_{∞}	τ (MPa)	β	R^2
0.18	6.58	0.50	0.12	1.21	0.99
0.19	6.29	0.51	0.13	1.19	0.99
0.2	6.03	0.51	0.13	1.18	0.99
0.26	4.66	1.13	2.73	0.89	0.98

Pour la PCB, la porosité obtenue par l'approche expérimentale est de 16,7%, ce qui est bien inférieur à celle obtenue avec le modèle (24,7%). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que, pour la PCB, la taille des pores est nettement inférieure à la taille des particules. Le réseau poreux de PCB n'est donc pas profondément affecté par la procédure de broyage. En particulier, les pores sont encore très connectés à l'intérieur des particules. Lorsque la pression de mercure est suffisamment grande pour pouvoir pénétrer dans des pores de rayon $R_{5\%}$, le mercure pénètre plus profondément dans les particules tant que le rayon de pore est supérieur ou égal à $R_{5\%}$. La quantité correspondante de mercure sera considérée, dans l'approche expérimentale, comme un volume inter granulaire, alors qu'elle est considérée comme un volume intra granulaire dans l'approche théorique.

Au contraire la porosité de la BP obtenue avec l'approche expérimentale est de 2,1% ce qui est très proche de la valeur prédite par la théorie (2%). Dans ce cas, la taille des pores est beaucoup plus proche de la taille des particules, par conséquent, le broyage élimine beaucoup de pores et la porosité résultante à l'intérieur des particules BP est essentiellement déconnectée. Dans ce cas, l'approche expérimentale conduit à des résultats très comparables aux résultats théoriques.

Quelle que soit la méthode utilisée, la porosité de la PCB est toujours élevée. Ainsi, il est clair que le broyage d'un matériau poreux monolithique n'élimine pas toute la porosité si la taille des particules est beaucoup plus grande que la taille des pores.

3.6 Absorption et cinétique d'absorption d'une poudre

L'utilisation de la brique broyée a permis l'utilisation du modèle théorique ainsi que l'approche expérimentale sur un n'autre type de matériau broyé initialement poreux. Pour la suite de ce manuscrit on s'intéressera principalement au filler calcaire (FC) et à la pâte de ciment broyée.

La mesure de porosité de la poudre a été réalisée sur des essais de porosité au mercure. Ainsi pour pouvoir l'utiliser dans une formulation de mortier, il faut déterminer un coefficient d'absorption d'eau. Dans cette partie de l'étude, on s'intéresse à la porosité à l'eau.

3.6.1 Absorption d'eau d'une poudre

Le coefficient d'absorption d'eau (WA) est mesuré selon la norme EN 1097-6 sur la fraction grossière de la PCD. La pâte de ciment durcie (4/20mm) est immergée dans l'eau pendant 24 heures, par la suite l'eau en surface est éliminée avec du papier sec et la masse à l'état saturé surface séchée est prise (M_{SSS}). L'ensemble est placé à 60°C jusqu'à une masse constante (M_{sec}). L'essai est réalisé 5 fois pour assurer une bonne répétabilité. Tout comme le sable recyclé, la température de séchage a été prise égale à 60°C (au lieu de 105°C), afin d'éviter un séchage excessif entraînant une déshydratation partielle des hydrates dans la pâte de ciment durcie, et ainsi une surestimation de l'eau absorbée.

$$WA = \frac{M_{SSS} - M_{sec}}{M_{sec}} \dots \dots \dots (3-17)$$

Le tableau 3-7 présente une comparaison entre la porosité, la masse volumique absolue et la masse volumique réelle, obtenue avec l'eau et au mercure. La masse volumique absolue et la porosité mesurée à l'eau sont supérieures à celles déterminées avec la porosité au mercure, l'eau pouvant accéder à une porosité plus fine que le mercure. Une différence de 16,5% de porosité est obtenue entre la méthode de mesure à l'eau et au mercure. Comme évoqué plus haut, le mercure ne peut pénétrer dans des pores plus petits que 0,01µm, ainsi la différence obtenue correspond uniquement aux pores de diamètres inférieurs à 0,01µm.

Tableau 3-7: Absorption d'eau, masse volumique et porosité obtenues à l'eau et au mercure.

	pab helium (g/cm³)	pab water (g/cm³)	WA EN 1097-6 (%)	Porosité (%)	ρ water (g/cm³)	pab MIP (g/cm³)	Porosité MIP (%)	ρ MIP (g/cm³)
PCB	2,4 ±0,01	2,39 ±0,02	30 ±0,4	42 ±1,1	1,4	2,12 ±0,01	25,9 ±0,8	1,57
FC	2,72±0,01	2,69±0,01	0,4 ±0,2	1 ±0,1	2,72	X	X	X

Ainsi, pour obtenir la porosité accessible à l'eau pour la poudre, il faut ajouter, à la porosité restante obtenue avec les deux méthodes, la différence de porosité obtenue entre le mercure et l'eau sur le monolithe (16,1%). Ainsi, une porosité égale à 40,8% et 32,8% est obtenue respectivement pour la

méthode théorique et expérimentale. Cette porosité correspond à 28,5% et 20,2% respectivement en absorption d'eau.

3.6.2 Cinétique d'absorption d'une poudre

3.6.2.1 Protocole expérimental

Bendimerad et al. [27] ont développé une méthode permettant de mesurer l'absorption d'eau des granulats de béton recyclé de dimensions supérieures à 4mm. L'essai développé dans cette partie a été inspiré de ce travail (figure 3-12) [27]. Cet essai a été réalisé suivant les étapes ci-après :

- L'échantillon de poudre est tout d'abord séché jusqu'à masse constante.
- Un pycnomètre est rempli à moitié d'eau distillée
- L'eau distillée est dégazée sous vide pendant 15 minutes
- La poudre est rajoutée dans le pycnomètre et mis sous agitation
- Par la suite, le pycnomètre est rempli d'eau distillée dégazée jusqu'au trait puis le tout est mis sous vide.

L'essai a été réalisé dans une pièce conditionnée à 20°C et le remplissage du pycnomètre ne dure pas plus d'une minute. Cet essai ne peut être considéré comme un essai d'absorption d'eau, car la mesure est impossible à faire pendant la première minute. Après un certain temps (10 minutes et 24 heures), si le niveau d'eau baisse par rapport au niveau du trait, une quantité d'eau est rajoutée. Cette quantité d'eau ($M_{ajoutée}$) correspond à la quantité d'eau absorbée par la poudre, et l'absorption d'eau est calculée avec (eq.3-18). Le test a été réalisé après 10 minute et 24 heures pour la pâte de ciment broyée ainsi que le filler calcaire, 3 fois pour assurer une bonne répétabilité.

$$WA = \frac{M_{ajoutée}}{M_{sec}} \dots \dots \dots (3-18)$$

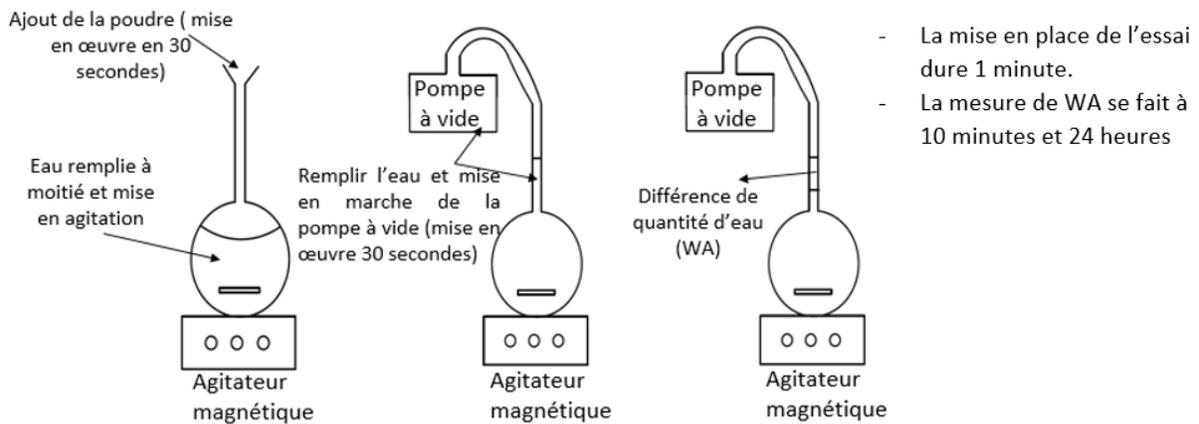


Figure 3-12: Procédure de détermination de la cinétique d'absorption d'une poudre

3.6.2.2 Résultats et discussion

Durant le test, une quantité très importante de bulles a été observée. Ces bulles d'air sont dues à l'air entraîné par la poudre lorsqu'elle est introduite dans l'eau mais aussi à l'air contenu dans la porosité intra granulaire de la poudre qui s'évacue au fur et à mesure de l'absorption. Le test sur le filler calcaire a été réalisé dans le but de vérifier si la diminution de la quantité d'eau initiale est due à l'évacuation de l'air et/ou à l'absorption d'eau. Le résultat a montré qu'après 10 minutes et 24 heures le niveau d'eau n'a pas changé pour le filler calcaire, ainsi la diminution de la quantité d'eau observée pour la PCB vient principalement de l'absorption d'eau.

Le tableau 3-8 présente les résultats obtenus après 10 minutes et 24 heures pour les deux poudres (PCB et FC). On remarque que la pâte de ciment broyée a absorbé de l'eau, ainsi on confirme qu'une poudre même après broyage absorbe toujours de l'eau. On remarque aussi qu'il n'y a pas de différence entre le test réalisé après 10 minutes et 24 heures, cela est sûrement dû au fait que l'absorption d'eau se fait très vite (en moins de 10 minutes), ainsi on ne peut mesurer la bonne absorption d'eau, d'où tout l'intérêt du modèle théorique.

Tableau 3-8 : Résultats d'absorption d'eau obtenus pour les poudres

	Pâte de ciment broyée	Filler calcaire
10 minutes	8,8% ± 0,3%	0%
24 heures	8,8% ± 0,3%	0%

3.7 Demande en eau de PCB et FC

Au chapitre 2, il a été démontré que la substitution volumique d'un sable naturel par un sable recyclé saturé de même caractéristiques physiques (granulométrie et morphologie des particules) conduit à un comportement rhéologique très proche pour deux mortiers de compositions identiques. Dans cette partie, la PCB et le FC utilisés ont une granulométrie et une morphologie proche. On peut donc se demander si la demande en eau du FC est comparable à celle de la PCB.

3.7.1 Mélanges réalisés et mesure de la maniabilité

Le tableau 3-9 présente les différents mélanges réalisés dans le but de comparer le comportement rhéologique entre les différentes pâtes contenant du FC et de la PCB (en volume absolu et en volume réel). Dans les mélanges PCB WA, le volume réel (enveloppe) ainsi que l'absorption d'eau de la poudre sont pris en compte. Les mélanges PCB et FC sont réalisés en considérant le volume solide du grain et sans prise en compte de l'absorption d'eau. Le FC est considéré comme non poreux, donc le volume réel (enveloppe) est égal au volume absolu.

Tableau 3-9: Compositions des différents mélanges réalisés avec la PCB (en volume absolu et en volume réel) et le FC

	Masse de poudre (g)	Eau totale (g)	Eau efficace (g)	VE_{eff}/V_p	VE_{total}/V_p
FC	100	32	32	0,87	0,87
	100	34	34	0,92	0,92
	100	36	36	0,97	0,97
	100	38	38	1,03	1,03
PCB WA	100	54	26,5	0,37	0,77
	100	58	30,5	0,43	0,82
	100	60	32,5	0,46	0,85
	100	62	34,5	0,49	0,88
PCB	100	54	54	1,30	1,30
	100	58	58	1,40	1,40
	100	60	60	1,45	1,45
	100	62	62	1,50	1,50

La figure 3-13 illustre la démarche suivie pour les mesures de maniabilité. Les mélanges sont réalisés avec un mini malaxeur d'une capacité totale de 150 ml dans le but d'assurer une bonne

homogénéisation de la pâte, et ainsi pour travailler avec de faibles volumes. La durée du malaxage des différentes pâtes est d'une minute. Les tests de maniabilité sont réalisés avec un mini cône de dimension $20 \times 40 \times 57 \text{mm}^3$. Avant chaque test, la surface interne du mini cône ainsi que la plaque en verre sont initialement humidifiées. Le remplissage du cône dure approximativement 30 secondes. Enfin, le test est réalisé en soulevant verticalement le cône et 4 diamètres ainsi que l'épaisseur de la pâte sont mesurés avec un pied à coulisse

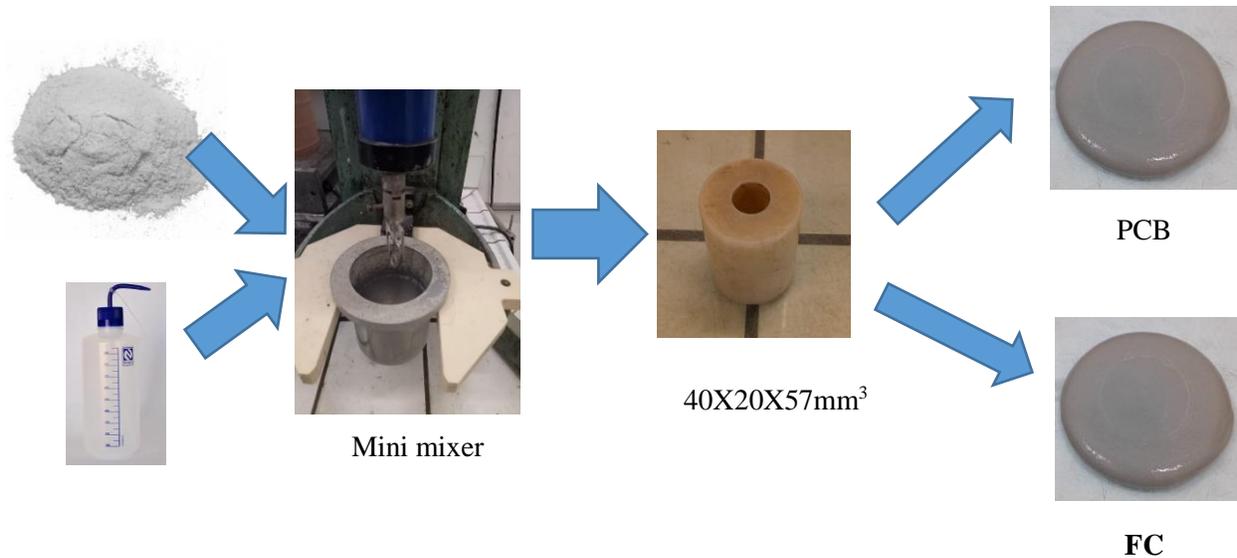


Figure 3-13: Démarche expérimentale suivie pour l'étude rhéologique sur pâtes

Les tests de maniabilité ont été réalisés à $T_0+3\text{min}$, $T_0+10\text{min}$, $T_0+30\text{min}$ et $T_0+60\text{min}$. T_0 correspond à l'instant où la poudre est mise en contact avec l'eau. Pour assurer une bonne répétabilité, le test d'étalement est réalisé 3 fois à 3 et 30 minutes, et 2 fois à 10 et 60 minutes.

La masse volumique de la PCB est beaucoup plus faible que celle du FC, ainsi, pour pouvoir comparer les pâtes réalisées avec la PCB et celles réalisées avec le FC, le seuil de cisaillement est calculé à partir du modèle de Roussel [95] (eq.3-19).

$$\text{Seuil de cisaillement} = \frac{225\rho g\Omega^2}{128\pi^2 R^5} \dots\dots\dots (3-19)$$

- ρ : Masse volumique du fluide (g/cm^3)
- g : gravité $9,8\text{m/s}^2$
- Ω : volume du mini cône (mm^3)

- R : rayon de l'étalement (mm)

La masse volumique apparente des pâtes réalisées avec la PCB est de $1,2 \text{ g/cm}^3$ et celle obtenue pour le FC est de $1,5 \text{ g/cm}^3$.

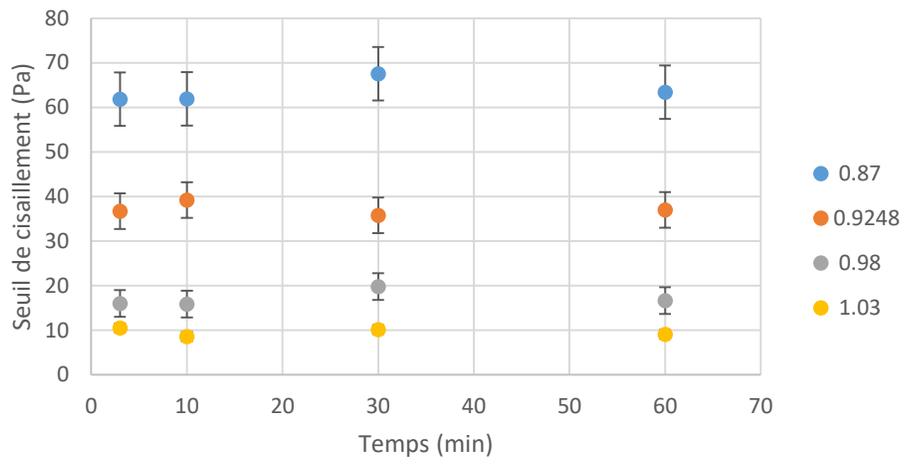
3.7.2 Résultats et discussions

La figure 3-14 présente les seuils de cisaillement obtenus avec le modèle de Roussel en fonction du temps pour les pâtes fabriquées avec le FC et la PCB (en volume absolu et en volume réel) pour un rapport V_E/V_{Poudre} défini.

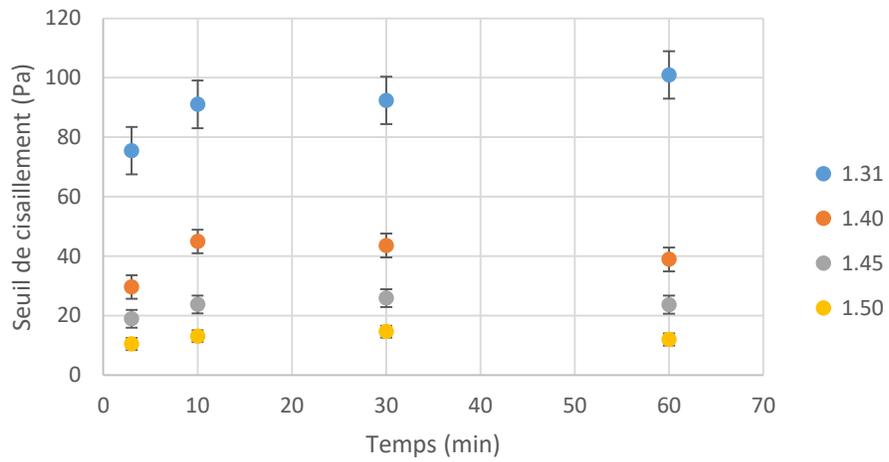
Pour le FC, il n'y a pas de changement significatif pour le seuil de cisaillement en fonction du temps. Par contre, pour la PCB (en volume absolu et en volume réel), on remarque une augmentation du seuil de cisaillement entre 3 et 10 minutes pour les différents rapports V_E/V_{Poudre} . Après 10 minutes, le seuil de cisaillement reste constant. Ce résultat peut être expliqué par le fait que l'absorption d'eau se fait très rapidement pour les poudres (comme évoqué dans le paragraphe 3.6). Pour les résultats du FC il n'y a pas de changement car le FC est considéré comme non absorbant.

Maimouni et al. [33] ont étudié les mouvements d'eau entre un sable recyclé (fraction 0/4mm) et une pâte de ciment ou une pâte de filler calcaire, ils ont conclu qu'un granulats recyclés (rapport $E/C= 0,5$) est saturé à 70% après 5 minutes de saturation. Comme observé sur la figure 3-13, la PCB peut être considérée comme saturée après 10 minutes d'immersion dans l'eau. Ce résultat est comparable au résultat obtenu avec le pycnomètre présenté dans le paragraphe 3.6. Probablement l'absorption d'eau obtenue entre 3 et 10 minutes pour la PCB est en réalité beaucoup plus rapide. Ainsi, l'absorption d'eau de PCB doit certainement se produire en grande majorité dans les 3 premières minutes.

FC



PCB



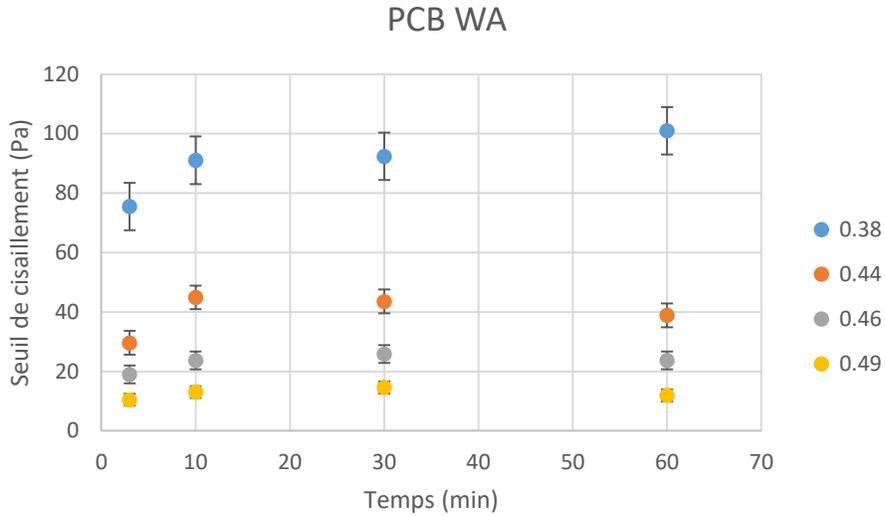


Figure 3-14 : Seuil de cisaillement en fonction du temps pour les pâtes fabriquées avec le FC et la PCB pour les différents rapports V_E/V_{Poudre}

La figure 3-15 montre la variation du seuil de cisaillement à 30 minutes de saturation en fonction du rapport V_E/V_{poudre} . [96][78] ont montré que le seuil de cisaillement diminue en fonction du rapport V_E/V_{Poudre} d'une manière exponentielle. Ainsi, [96][78] expriment les résultats en fonction de (eq.3-20), où V_E/V_{Poudre} présente le rapport volumique de l'eau sur la poudre. B et α dépendent des interactions entre les particules en suspension, ce paramètre est lié à la concentration du matériau, à la forme des grains, à la rugosité de surface, à la granulométrie et à la nature minéralogique.

$$\tau_c = B \exp(-\alpha V_E/V_{\text{Poudre}}) \dots \dots \dots (3-20)$$

La figure 3-14 montre que la PCB présente une demande en eau très importante si on venait à ne pas considérer l'absorption d'eau. Afin d'obtenir des résultats de seuil de cisaillement similaires entre PCB et FC l'absorption d'eau doit être égale à 10%. Compte tenu des différences minéralogiques et d'état de surface des particules, on suppose que WA est plus élevé que cela. Aussi, une absorption d'eau de 10% pour PCB correspond à une porosité de 19%, cette valeur ne peut être correcte car elle est légèrement plus élevée que la porosité au mercure obtenue pour la PCB avec la démarche expérimentale (paragraphe 3.4), et il a été démontré que la porosité à l'eau de PCD est beaucoup plus importante que la porosité au mercure.

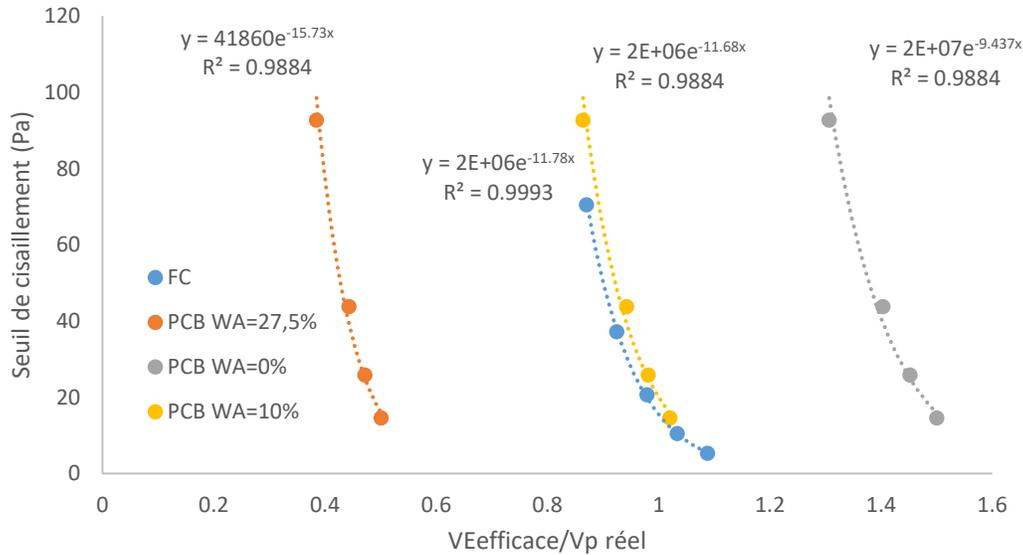


Figure 3-15 : Variation du seuil à 30 minutes en fonction du rapport V_E/V_P pour les pâtes fabriquées avec les deux poudres (FC et PCB)

Ainsi, la définition d'un matériau modèle présentée dans le chapitre 2 ne peut être appliquée pour les poudres. En effet, malgré le fait que le FC a une granulométrie et une morphologie de grains proches de PCB, le FC n'est pas un matériau modèle naturel pour la PCB.

3.8 Conclusion

Deux approches, théorique et expérimentale, ont été présentées dans ce chapitre pour estimer la porosité restante d'un matériau monolithique poreux après le broyage.

Un modèle théorique a été mis au point pour calculer la porosité restante des poudres poreuses. Ce modèle est basé sur la distribution de taille des pores du matériau monolithique poreux et sur la distribution de la taille des particules obtenues après broyage. Ces deux résultats expérimentaux sont considérés comme des données d'entrée du modèle théorique.

Une procédure expérimentale a également été développée pour estimer les porosités inter et intra-granulaires des poudres. Des essais de porosité au mercure ont été effectués sur les différentes poudres. La première zone est identifiée avec un modèle de dynamique de compaction. L'extrémité de la zone intergranulaire est identifiée avec le plus petit pore intergranulaire. La zone de porosité intra granulaire a pu être détectée pour la poudre poreuse en faisant la distinction avec la zone inter granulaire.

Les deux approches ont été appliquées sur une pâte de ciment durcie et une brique. Il a été constaté qu'après broyage, la majeure partie de la porosité de la BP est éliminée, ce qui n'est pas le cas pour la PCB. Une différence de porosité a également été obtenue par les deux méthodes pour la PCB. Cette différence est attribuée à la sous-estimation de la porosité restante lors de l'utilisation de l'approche expérimentale du fait que la porosité de la PCB est toujours connectée, ce qui n'est pas le cas de la BP (où les approches théorique et expérimentale donnent des résultats proches).

Grâce à l'essai au pycnomètre, il a été prouvé expérimentalement que la poudre absorbe de l'eau même après broyage. Il a été aussi démontré que la poudre avait une capacité d'absorption d'eau rapide, et après 10 minutes la majeure partie de l'eau est absorbée. L'essai de demande en eau a montré que le FC n'est pas un matériau modèle pour la PCB et ce malgré le fait que FC et PCB ont une granulométrie et morphologie de grain proche.

Chapitre 4 : Utilisation d'une pâte de ciment broyée comme addition minérale

4.1	Introduction	131
4.2	Méthodologie.....	131
4.3	Etude de l'hydratation et de la porosité d'une matrice cimentaire fabriquée avec la PCB et le FC.....	133
4.3.1	Composition et préparation des pâtes.....	133
4.3.2	Estimation du degré d'hydratation	134
4.3.3	Mesure de porosité des différents mélanges	140
4.4	Etude du comportement mécanique et rhéologique des mortiers.....	141
4.4.1	Composition des mortiers et protocole de malaxage	142
4.4.2	Procédure expérimentale	143
4.4.3	Comportement des mortiers à l'état frais	143
4.4.4	Comportement des mortiers à l'état durci	145
4.5	Conclusion	151

4. Utilisation d'une pâte de ciment broyée comme addition minérale

4.1 Introduction

L'incorporation des fillers calcaires dans la fabrication de bétons ou de mortiers a été longuement étudiée [97]. Cette incorporation peut être utilisée dans la fabrication du ciment ou lors de la formulation d'un béton, notamment pour les bétons auto-plaçant [42].

Au chapitre 1, il a été montré que les particules fines issues du recyclage de béton sont très peu utilisées dans le domaine de la construction. Les voies de valorisation de ce type de matériau sont plus spécifiquement orientées vers la fabrication du clinker ou leur utilisation après calcination (pour les rendre réactifs). A notre connaissance, seuls Bordy et al. [73] et Oksri-Nelfia et al. [72] ont étudié la possibilité d'utiliser les fines issues du recyclage du béton comme filler. Ils ont montré que les fines issues du recyclage pourraient être utilisées comme filler dans un mortier. Toutefois, dans leurs travaux, l'absorption d'eau par les fines recyclées n'a pas été prise en compte, suggérant ainsi que le broyage pourrait éliminer la porosité du matériau monolithique initial.

Au chapitre 3, il a été montré que si la taille des pores était significativement inférieure à la taille des grains, la poudre restait poreuse. Dans ce chapitre, l'objectif est de comparer l'incorporation d'une pâte de ciment broyée (PCB) en tant que filler dans une composition de mortier en tenant compte de la porosité résiduelle de la PCB et de son absorption d'eau à celle d'un mortier fabriqué avec un filler calcaire (FC).

4.2 Méthodologie

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'utilisation de la PCB dans une composition de mortier. Ainsi, des mortiers normalisés dans lesquels le ciment a été substitué à hauteur de 10, 20, 30 et 40% en volume par le FC et la PCB sont réalisés. Pour les mortiers fabriqués avec la PCB, la substitution a été réalisée de deux façons différentes. Tout d'abord, la substitution volumique a été entamée en considérant la masse volumique réelle de la poudre et en tenant compte de l'absorption d'eau. Ensuite, la substitution a été réalisée en volume absolu sans prendre en compte l'absorption d'eau. Ce dernier mélange a été préparé pour se placer dans des conditions similaires à Bordy et

al. [73] et Oksri-Nelfia et al. [72]. La figure 4-1 présente un schéma récapitulatif des mélanges réalisés. Cette démarche a été suivie pour identifier l'effet de la porosité apportée par la PCB sur le comportement d'un mortier.

Pour identifier l'influence de la PCB sur l'hydratation du ciment en comparaison avec le FC, une étude sur pâtes de ciment durcies dans lesquelles le ciment a été substitué à 50% en volume par le FC ou par la PCB est effectuée. Cette étude a été réalisée sur pâte afin de simplifier le système étudié. La substitution de la PCB est réalisée avec les deux substitutions volumiques décrites précédemment (volume réel + correction de l'absorption d'eau ou volume absolu). Des analyses thermiques différentielles (ATG) ont été réalisées sur les différentes pâtes à différentes échéances (1, 2, 7 et 28 jours) afin d'identifier le degré d'hydratation du ciment et de comparer les pâtes réalisées avec le FC à celles réalisées avec la PCB. Des essais de porosité au mercure ont également été mis en œuvre sur les différentes pâtes aux mêmes échéances.

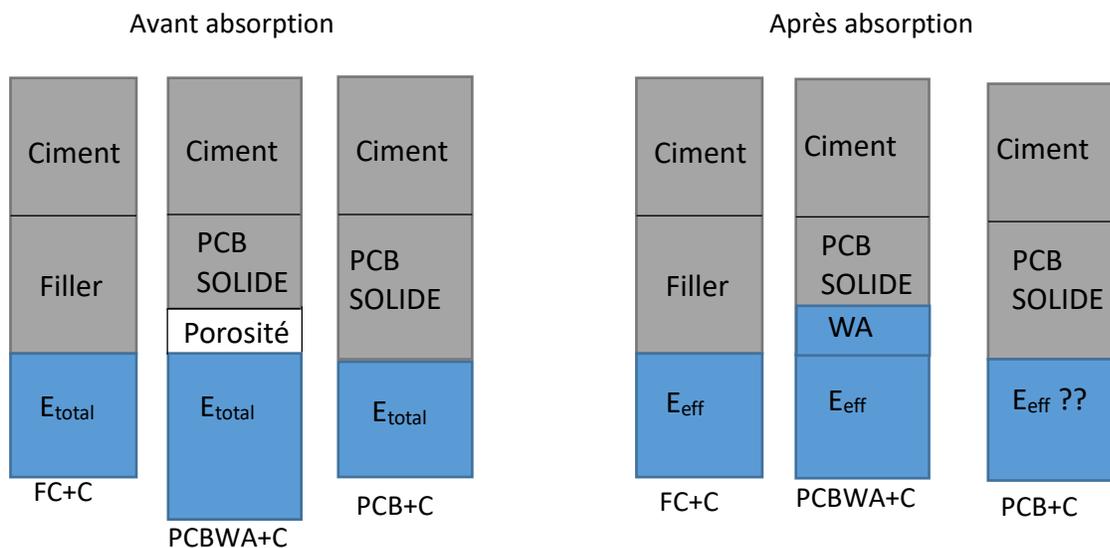


Figure 4-1 : Illustration schématique des mélanges réalisés

4.3 Etude de l'hydratation et de la porosité d'une matrice cimentaire fabriquée avec la PCB et le FC

Pour comprendre l'effet de l'ajout d'une PCB dans une matrice cimentaire et pouvoir la comparer à celle fabriquée avec du FC, on doit s'intéresser à la mesure du degré d'hydratation ainsi qu'à la porosité des différents mélanges à différents âges.

4.3.1 Composition et préparation des pâtes

Le tableau 4-1 présente les compositions des pâtes étudiées dans cette partie. Un premier mélange (référence) a été réalisé avec du ciment seul. Par la suite, trois mélanges dans lesquels le ciment a été remplacé à 50% en volume par le FC et la PCB ont été étudiés. Le mélange (FC+C) est réalisé en tenant compte de la masse volumique absolue du FC obtenue à l'hélium (2.72g/cm^3). Le deuxième mélange (PCB+C) est réalisé avec la masse volumique absolue de la PCB sans tenir compte de l'absorption d'eau. Enfin, le dernier mélange (PCB WA+C) est réalisé avec la masse volumique réelle en tenant compte de l'absorption d'eau de la PCB.

Tableau 4-1 : Composition des pâtes réalisées

	Ciment (g)	Poudre (g)	E totale (g)	E absorbée (g)	E_{eff}	E_{eff}/C
C	155	0	77,5	0	77,5	0,5
FC+C	77,50	68,00	38,75	0	38,75	0,50
PCB+C	77,50	60,00	38,75	0	22,25	0,29
PCB WA+C	77,50	36,25	48,75	9,97	38,78	0,50

Pour que le malaxage soit efficace et assurer une bonne homogénéité des pâtes, un mini malaxeur a été utilisé. Pour la fabrication des pâtes, les étapes suivantes ont été suivies :

- Ajouter toute la quantité d'eau dans le malaxeur,
- Ajouter la première moitié de la masse de la poudre (ciment + addition).
- Malaxer pendant 90 secondes
- Arrêter le malaxeur pendant 30 secondes, ajouter la deuxième part du ciment.
- malaxer pendant 90 secondes.

Par la suite, les pâtes sont versées dans des petits conteneurs hermétiques de 15 millilitres. Chaque conteneur est mis en rotation pendant 6 heures, jusqu'à la fin de la prise du ciment. Les pâtes ainsi obtenues sont conservées à 20°C pendant 1, 2, 7 et 28 jours. Ensuite, les pâtes durcies sont coupées en petits morceaux (1×1× 1cm³) puis immergées dans de l'isopropanol pendant 1 semaine pour arrêter l'hydratation. Après 1 semaine, les pâtes sont séchées à 40°C jusqu'à masse constante et mises dans des flacons hermétiques pour éviter toute éventuelle carbonatation ou réhydratation.

4.3.2 Estimation du degré d'hydratation

Pour estimer le degré d'hydratation des différents mélanges cimentaires, la quantité de Portlandite produite à une échéance donnée ainsi que la quantité maximale de Portlandite qui peut être produite lors de l'hydratation complète du ciment ont été quantifiées.

4.3.2.1 Quantification de la Portlandite maximale produite pour une hydratation totale du ciment utilisé

L'hydratation des ciments a été longuement étudiée. D'après [98][99][100][101], les réactions simplifiées qui produisent la Portlandite sont présentées dans les équations 4-1, 4-2 et 4-3.



L'hydratation des C₃S et des C₂S est la plus rapide. Ces deux phases anhydres vont former de la Portlandite (CH) et des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Le tableau 4-2 présente la composition de bogue du ciment utilisé obtenue par fluorescence X. La masse de Portlandite pour chaque composant anhydre est calculée à partir des équations :4-1, 4-2 et 4-3.

Enfin, la masse en pourcentage de Portlandite produite pour chaque phase est calculée. La quantité totale de Portlandite obtenue pour l'hydratation totale du ciment est obtenue par la somme de tous les constituants, elle est égale à 0,29.

Tableau 4-2 : Quantité de Portlandite produite pour une hydratation complète du ciment utilisé

Composant anhydre	Teneur massique dans le ciment	Masse de CH par unité de composant anhydre (g/g ciment)	Masse de CH pour 1 gramme de ciment anhydre (g/g ciment)
C3S	61,9%	0,41	0,26
C2S	11,2%	0,12	0,014
C3A	6%	0	0
C4AF	12%	0,15	0,02

4.3.2.2 Quantification de la Portlandite produite pour les différents mélanges

La quantification de la Portlandite pour les différents mélanges est obtenue suite à une analyse ATG. Cette analyse ATG consiste à chauffer un échantillon en suivant sa variation de masse en continu. La vitesse de la montée en température est de 10°C/min, de 100°C jusqu'à 1000°C. Les variations de masse sont généralement dues à la déshydratation des hydrates et à la décarbonatation de la calcite.

La figure 4-2 présente les résultats obtenus pour la pâte de ciment broyée (PCB), ainsi que pour les mélanges C, FC+C, PCB+C et PCB WA+C à 1 jour. Le premier pic correspond à la déshydratation des C-S-H. Le deuxième pic correspond à la déshydratation de la Portlandite et le dernier pic correspond à la décarbonatation de CaCO₃. On remarque que la PCB présente les pics les plus élevés par rapport aux autres mélanges. Les mélanges PCB+C ainsi que PCB WA+C ont une intensité de pic de Portlandite plus élevée que le mélange FC+C. Un pic de CaCO₃ est obtenu aussi pour les différents mélanges. Le mélange FC+C présente le pic de CaCO₃ le plus important en comparaison à la PCB et au mélange PCB WA+C et PCB+C.

La PCB présente le pic de Portlandite le plus haut car elle représente la pâte avec le degré d'hydratation le plus élevé (90 jours de cure). Les mélanges PCB WA+C ainsi que PCB+C ont des pic de Portlandite plus élevés que le mélange FC+C, cela s'explique par le fait qu'une partie de la Portlandite est apportée par l'ancienne pâte de ciment (PCB). Le mélange FC+C présente le pic de CaCO₃ le plus important car ce mélange contient une quantité très importante de CaCO₃ puisque FC est un filler calcaire. Les résultats d'ATG montrent que la PCB a été partiellement carbonatée, cela explique les pics de CaCO₃ présent dans les mélanges PCB WA+C et PCB+C.

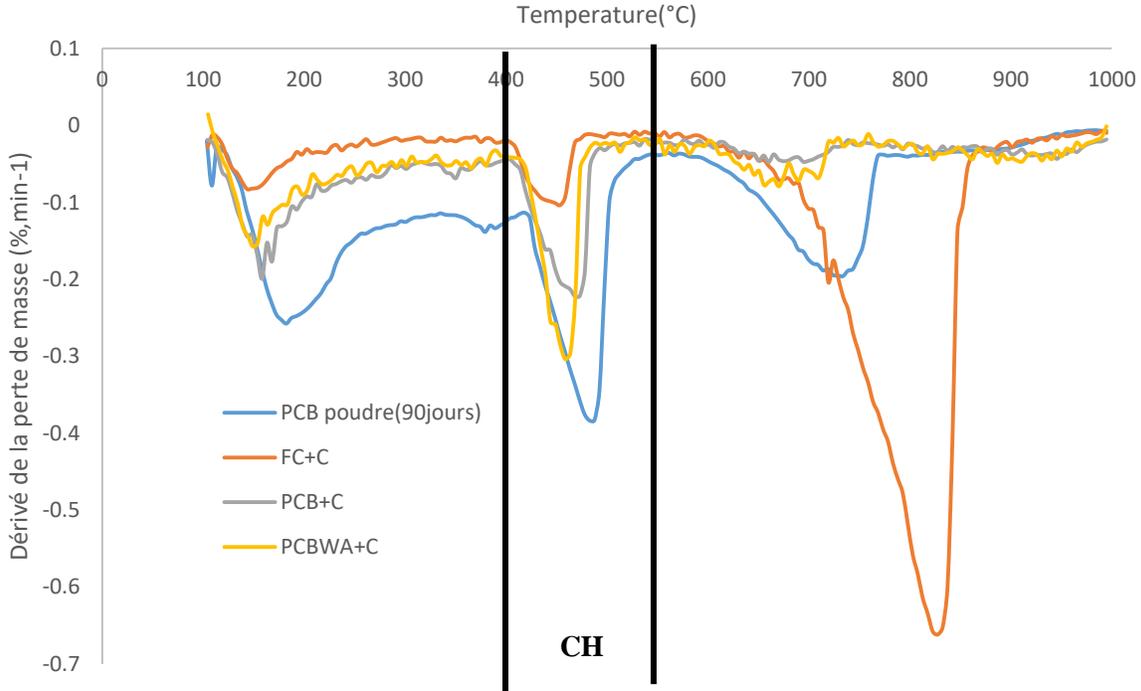


Figure 4-2 : ATG des différents mélanges étudiés à 1 jour

La quantité de Portlandite produite ($CH(t)_{\text{totale}}$) dans le mélange peut être calculée avec (eq.4-4), où $\Delta m_{405^{\circ}C-560^{\circ}C}$ (g) est la perte de masse de l'échantillon entre $405^{\circ}C$ et $560^{\circ}C$ (figure 4-2) ; M_{CH} la masse molaire de la Portlandite (74,09 g/mol), et M_{H_2O} est la masse molaire de l'eau (18 g/mol).

$$CH(t)_{\text{totale}} = \frac{\Delta m_{400^{\circ}C-560^{\circ}C} \times M_{CH}}{M_{H_2O}} \dots \dots (4-4)$$

Le tableau 4-3 présente les quantités de Portlandite produites à 1, 2, 7 et 28 jour pour les différents mélanges en utilisant (eq.4). Les résultats ainsi obtenus sont présentés en gramme de Portlandite par rapport à un gramme de poudre (ciment + addition). Pour les mélanges PCB+C et PCB WA+C, la quantité de Portlandite apportée par la PCB a été soustraite de la quantité totale afin de ne prendre en compte que la Portlandite néoformée (eq.4-5). Où $CH(t)_{\text{néoformée}}$ est la quantité de Portlandite en déduisant la Portlandite apportée par la PCB, $CH(t)_{\text{totale}}$ est la quantité de Portlandite totale calculée à partir de (eq.4-4), CH_{PCB} est la quantité de Portlandite apportée par la PCB, et m_{PCB} et m_C correspondent respectivement à la masse de PCB et à la masse du ciment.

$$CH(t)_{\text{néoformée}} = CH(t)_{\text{totale}} - CH_{\text{PCB}} \times \frac{m_{\text{PCB}}}{m_{\text{PCB}} + m_C} \dots \dots (4-5)$$

Après correction de la Portlandite néoformée, (eq.4-6) est utilisée pour obtenir la quantité de Portlandite produite pour 1 gramme de ciment ($CH(t)_{g/g \text{ ciment}}$).

On remarque que les quantités de Portlandite obtenues pour les mélanges fabriqués avec la PCB (PCB+C et PCB WA+C) à 1 jours sont plus élevées que celles obtenues pour le mélange FC+C et pour le mélange de référence C. Mais, à 2, 7 et 28 jours la quantité de portlandite produite pour le mélange FC+C est plus importante que les mélanges fabriqués avec la PCB. Aussi, pour le mélange PCB+C à différents âges (1, 2,7 et 28 jours) une quantité de Portlandite similaire est obtenue. On remarque aussi, qu'à un jeune âge les mélanges fabriqués avec la PCB et le FC ont une quantité de Portlandite plus importante que le mélange réalisé avec du ciment seul.

$$CH(t)_{g/g\text{ciment}} = CH(t)_{\text{néoformée}} \times \frac{M_C + M_{\text{addition}}}{M_C} \dots\dots\dots(4-6)$$

Tableau 4-3: Quantité de Portlandite (CH) présente dans les différentes pâtes

		CH avant correction (g/g poudre)	CH après correction (g/g poudre)	CH après correction (g/g ciment)
1 Jour	PCB POUDRE	0,230	0,230	0,230
	C	0,140	0,140	0,140
	FC+C	0,080	0,080	0,150
	PCB+C	0,193	0,092	0,164
	PCB WA+C	0,184	0,111	0,162
2 Jours	C	0,160	0,160	0,160
	FC+C	0,100	0,100	0,188
	PCB+C	0,194	0,093	0,166
	PCB WA+C	0,193	0,119	0,175
	7 Jours	C	0,190	0,190
FC+C		0,120	0,120	0,225
PCB+C		0,199	0,099	0,175
PCB WA+C		0,214	0,141	0,206
28 Jours		C	0,209	0,209
	FC+C	0,130	0,130	0,244
	PCB+C	0,205	0,104	0,185
	PCB WA+C	0,217	0,144	0,212

4.3.2.3 Calcul du degré d'hydratation pour les différents mélanges

Le calcul du degré d'hydratation (α) est présenté en fonction de la masse de ciment ajouté dans le mélange et il est calculé avec (eq.4-7), où $CH(t)_{g/gciment}$ correspond à la quantité de Portlandite produite à un instant t pour un gramme de ciment (1, 2, 7 et 28 jours). CH_{Ctotal} est la quantité de Portlandite totale qui peut être produite pour 1 g de ciment si le ciment est hydraté à 100%.

$$\alpha = \frac{CH(t)_{g/gciment}}{CH_{Ctotal}} \dots\dots\dots(4-7)$$

Les résultats des degrés d'hydratation sont présentés dans le tableau 4-4, figure 4-3. Le mélange réalisé avec le ciment seul offre un degré d'hydratation plus faible à jeune âge par rapport au mélange réalisé avec PCB et FC : ainsi l'ajout de PCB et FC accélère l'hydratation des pâtes cimentaires [102]. Les mélanges PCB+C présentent des degrés d'hydratation plus faibles que ceux obtenus pour les mélanges FC+C et PCB WA+C à 1, 2, 7 et 28 jours. Aussi à partir de 7 jours, on remarque que le degré d'hydratation du ciment seul est plus élevé que celui du mélange PCB+C : ceci peut être expliqué par le fait que le mélange PCB+C a un rapport E_{eff}/C plus faible (0.27) que celui du ciment seul [44][103]. Le mélange PCB WA+C présente un degré d'hydratation plus important que le mélange FC+C à 1 jour, mais à 2 et 7 jours, le degré d'hydratation est plus faible.

Tableau 4-4: Degré d'hydratation des différents mélanges réalisés

	C	FC+C	PCB+C	PCB WA+C
1 Jour	0,48	0,52	0,56	0,56
2jours	0,55	0,65	0,57	0,60
7 jours	0,65	0,78	0,60	0,71
28 jours	0,72	0,84	0,64	0,73

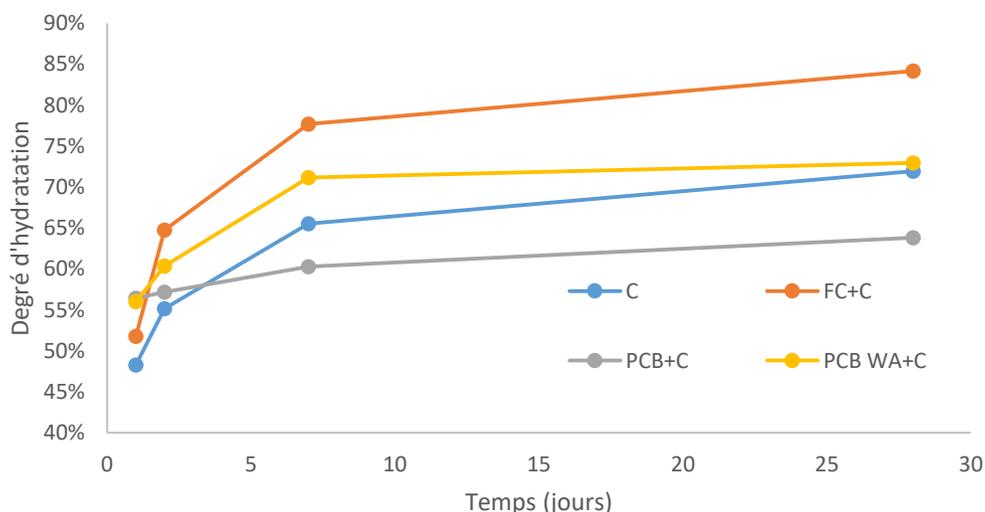


Figure 4-3 : Degré d'hydratation des différents mélanges obtenus en fonction du temps

4.3.3 Mesure de porosité des différents mélanges

La porosité des différentes pâtes réalisées à 1, 2, 7 et 28 jours a été mesurée au porosimètre à mercure. Dans une pâte cimentaire, on distingue deux types de porosité ; la porosité capillaire et la porosité des C-S-H. Les résultats de porosité obtenus sont présentés dans le tableau 4-5, et la figure 4-4. Des corrections de porosité pour les mélanges PCB+C et PCB WA +C ont été réalisées en prenant en compte la porosité apportée par la PCB. L'équation 4-8 a été utilisée pour apporter les corrections de porosité, et ainsi obtenir la porosité néoformée de la nouvelle pâte de ciment ($P_{\text{néoformé}}$), où P_{totale} correspond à la porosité totale du mélange mesurée en MIP, P_{Poudre} est la porosité au mercure calculée sur la poudre après application du modèle théorique (chapitre 3), et V_{Poudre} , V_C et V_{Eff} correspondent au volume réel de la poudre, au volume du ciment et à l'eau efficace.

$$P_{\text{néoformé}} = (P_{\text{totale}} - P_{\text{Poudre}} \times \frac{V_{\text{Poudre}}}{V_{\text{Poudre}} + V_C + V_{\text{Eff}}}) \times \frac{(V_{\text{poudre}} + V_C + V_{\text{Eff}})}{(V_{\text{poudre}} + V_C)} \dots \dots \dots (4-8)$$

On remarque, pour les mélanges avant correction, que le mélange de référence (ciment seul) et le PCB WA+C présentent la porosité la plus élevée quelle que soit l'échéance. La porosité la plus faible est obtenue pour la PCB+C à 1 et 2 jours, par contre, à 7 jours la porosité la plus faible est celle de FC+C.

Après correction de la porosité des mélanges, le mélange PCB+C présente la porosité la plus faible car ce mélange correspond au rapport E_{eff}/C le plus faible ($E_{\text{eff}}/C=0,27$) [44]. Le mélange PCB WA +C a des porosités similaires au mélange FC+C pour les différents âges. Cela s'explique par le fait que le rapport E_{eff}/C est similaire entre les deux matériaux. Les mélanges fabriqués avec du ciment seul présentent des porosités plus élevées que le mélange PCB WA+C et FC+C malgré le fait qu'ils ont le même rapport E_{eff}/C : cela peut être expliqué par le fait que les degrés d'hydratation des mélanges fabriqués avec PCB et FC sont plus importants que ceux du mélange fabriqué avec du ciment seul.

Tableau 4-5: Porosités obtenues pour les différents mélanges à différentes échéances

	Avant correction				Après correction			
	C	FC+C	PCB+C	PCB WA+C	C	FC+C	PCB+C	PCB WA+C
1 Jour	40%	28%	24,40%	35,50%	40,0%	38,8%	24,1%	39,8%
2 Jours	38,2%	23,50%	22,20%	28,20%	38,2%	32,7%	20,0%	29,6%
7 Jours	26,8%	14,70%	19%	23,70%	26,8%	20,5%	14,0%	23,3%
28 Jours	24,2%	12,2%	18%	18,3%	24,2%	17,0%	12,1%	15,8%

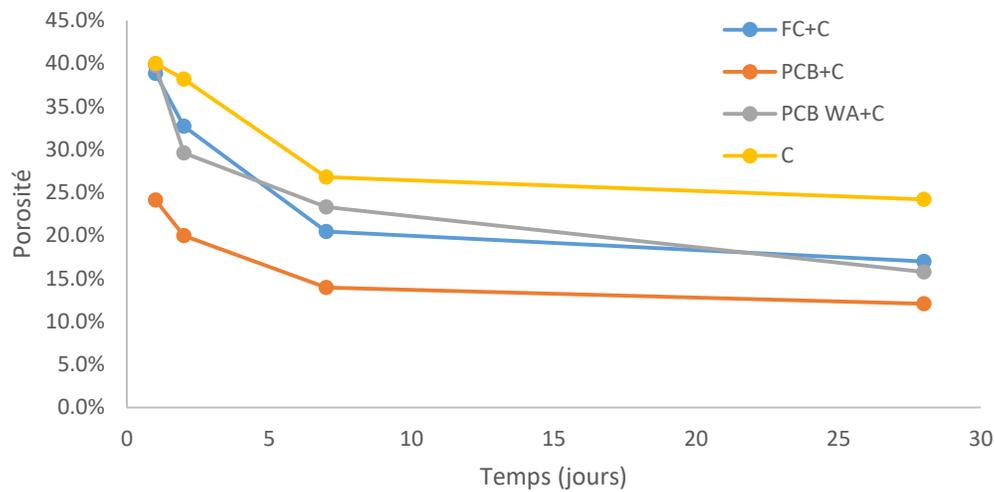


Figure 4-4 : Porosité au mercure obtenue après correction des mélanges PCB+C et PCB WA+C à différentes échéances

Ainsi, on peut conclure que l'ajout d'une pâte de ciment broyée dans un mélange cimentaire peut accélérer l'hydratation du ciment. Dans le cas où le mélange cimentaire est réalisé en substituant une partie du ciment en volume par une poudre poreuse, la porosité finale du mélange augmente, donc la résistance mécanique peut ainsi chuter en comparaison avec un mélange réalisé avec une poudre non poreuse. Ainsi, la porosité d'une poudre influence d'une manière significative la porosité d'un mélange cimentaire.

4.4 Etude du comportement mécanique et rhéologique des mortiers

Au chapitre 3, il est montré que la demande en eau d'une PCB dans laquelle on prend en compte le volume réel ainsi que l'absorption d'eau est bien plus faible que celle du FC. Ainsi, des mortiers fabriqués avec la PCB dans les mêmes conditions devraient présenter une meilleure maniabilité en

comparaison avec les mortiers réalisés avec le FC. Le paragraphe 4.3 de ce chapitre a aussi montré que le degré d'hydratation pour les mélanges réalisés avec le FC sont comparables à ceux réalisés avec la PCB quand on considère l'absorption d'eau. Aussi, la porosité apportée par la PCB a une influence sur la porosité finale du mélange, donc peut influencer les résistances mécaniques. Dans cette partie, une étude sur les mortiers est effectuée.

4.4.1 Composition des mortiers et protocole de malaxage

La composition des mortiers fabriqués avec la PCB et le FC est présentée dans le tableau 6. La formule de référence est celle de la norme EN 196-1 dans laquelle le ciment a été substitué par l'une des deux poudres. Les séries de mortier suivantes ont été réalisées :

- FC+C : Substitution en volume absolu du ciment par du FC à 10, 20, 30 et 40%.
- PCB WA+C : Substitution en volume réel du ciment par la PCB à 10, 20, 30 et 40% en tenant compte de l'absorption d'eau.
- PCB+C : Substitution en volume absolu du ciment par la PCB à 10, 20, 30 et 40% sans tenir compte de l'absorption d'eau.

Tableau 4-6: Composition des mortiers étudiés

	Pourcentage de substitution	Ciment (g)	Addition (g)	Sable (g)	E_{total} (g)	E_{abs} (g)	E_{eff} (g)	E_{eff}/C
Mélange de référence	0%	450	-	1 350	225,0	-	225,0	0,50
FC+C	10%	405	39,5	1 350	225,0	-	225,0	0,56
	20%	360	79,0	1 350	225,0	-	225,0	0,63
	30%	315	118,5	1 350	225,0	-	225,0	0,71
	40%	270	157,9	1 350	225,0	-	225,0	0,83
PCB WA+C	10%	405	21,1	1 350	230,8	5,8	225,0	0,56
	20%	360	42,2	1 350	236,6	11,6	225,0	0,63
	30%	315	63,2	1 350	242,4	17,4	225,0	0,71
	40%	270	84,3	1 350	248,2	23,2	225,0	0,83
PCB+C	10%	405	35,1	1 350	225,0	0	215,3	0,53
	20%	360	70,3	1 350	225,0	0	205,7	0,57
	30%	315	105,4	1 350	225,0	0	196,0	0,62
	40%	270	140,5	1 350	225,0	0	186,4	0,69

Le malaxage des différents mélanges dure 4 minutes. Le ciment, la poudre ainsi que la totalité de l'eau sont tout d'abord malaxés à petite vitesse pendant 30 secondes ; par la suite le sable est introduit progressivement pendant 30 secondes. Un malaxage supplémentaire de 30 secondes à petite vitesse est ensuite effectué. Par la suite, le bol est raclé pendant 15 secondes suivies de 1 minute 15 secondes de repos. Enfin, un malaxage à grande vitesse pendant 1 minute est effectué.

4.4.2 Procédure expérimentale

La maniabilité des mortiers a été mesurée par le cône MBE. Le mode de mise en place pour réaliser l'essai d'affaissement suit la procédure décrite par [77]. Le cône est rempli en 3 couches de volume équivalent et chaque couche est piquée 15 fois. La surface supérieure du cône est arasée pour éliminer le mortier en excès. Le cône est soulevé verticalement en 3 secondes. Avec un pied à coulisse, l'affaissement est mesuré en considérant le point le plus haut.

La figure 4-5 présente le cône MBE. Le temps de mise en place du matériau est de 2 minutes, ainsi tous les essais de maniabilité sont réalisés à $T_0+10\text{min}$. T_0 correspond au moment où le ciment et l'eau sont mélangés.

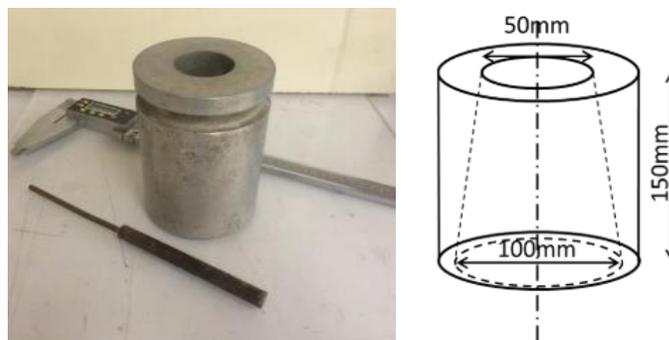


Figure 4-5 : Mesure de maniabilité avec le cône MBE

La mesure de la teneur en air est effectuée sur tous les mortiers avec CONTROLS/1L. Pour chaque mortier, trois séries de trois éprouvettes sont réalisées. Les éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été démoulées après 24h, puis stockées sous eau à 20°C jusqu'à la date de l'essai (2, 7 et 28 jours).

4.4.3 Comportement des mortiers à l'état frais

La figure 4-6 illustre les résultats de maniabilité pour les 3 séries de mortier réalisées en fonction du pourcentage de substitution par rapport au ciment. Pour FC+C, l'affaissement est quasi constant

quel que soit le pourcentage de substitution du ciment par du filler calcaire. Pour la PCB WA+C, l'affaissement augmente avec le pourcentage de substitution. Enfin, pour la PCB+C, l'affaissement diminue très rapidement avec le taux de substitution et s'annule à partir d'un taux de substitution de 30%. Ainsi, les résultats obtenus sur le mortier sont parfaitement cohérents avec les résultats de demande en eau présentés dans le paragraphe 3.7.

La figure 4-7 présente les résultats de teneur en air obtenus pour les différents mélanges réalisés. Il est remarqué que la teneur en air est légèrement plus élevée pour les mortiers réalisés avec la PCB comparés à ceux réalisés avec le FC. Cette différence peut être due à une différence de rugosité de surface entre le FC et la PCB : ainsi la PCB pourrait entraîner plus d'air dans les mortiers que le FC. Au chapitre 2, il a été aussi remarqué que la teneur en air des mortiers réalisés avec le sable recyclé (contenant de la pâte de ciment) était plus importante que celle réalisée avec le sable calcaire.

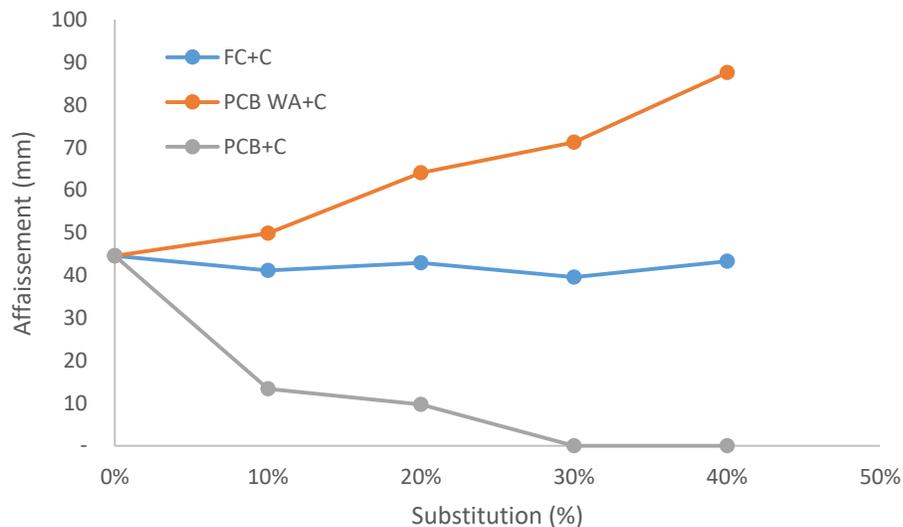


Figure 4-6 : Variation de la maniabilité des différents mortiers en fonction du pourcentage de substitution

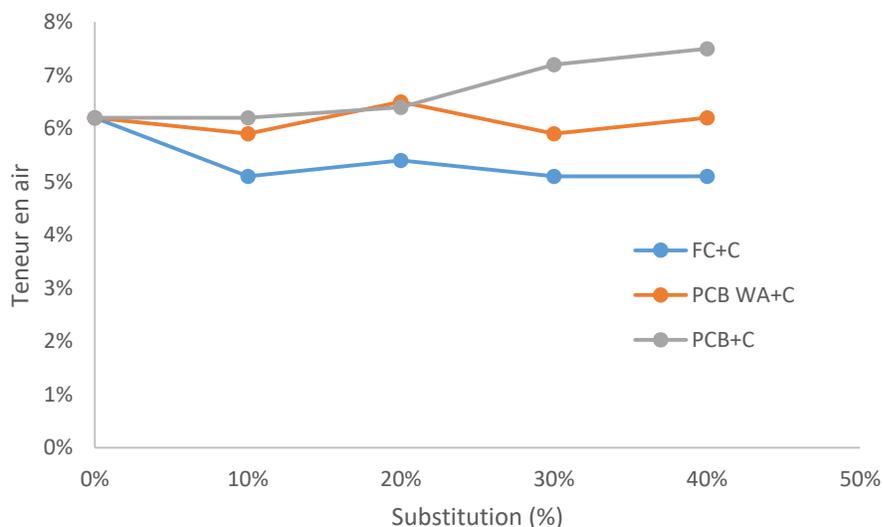


Figure 4-7 : Teneur en air des différents mortiers réalisés

4.4.4 Comportement des mortiers à l'état durci

Les figures 4-8, 4-9 et 4-10 présentent les résistances mécaniques obtenues pour les différentes séries en fonction du dosage en poudre à 2, 7 et 28 jours. Une chute de résistance mécanique est observée en fonction du remplacement du ciment par le FC ou la PCB. Des résistances proches pour une substitution à 10 et 20% sont obtenues entre le mélange FC+C et PCB WA+C, au-delà de ce taux de substitution, une meilleure résistance mécanique est obtenue pour le mélange FC+C en comparaison à PCB WA+C. Une meilleure résistance mécanique est également obtenue pour le mélange FC+C en comparaison au mélange PCB+C, et ce, pour tous les taux de substitution étudiés. Enfin, le mélange PCB WA+C présente une résistance mécanique plus importante pour un taux de substitution de 10 et 20% en comparaison avec le mélange PCB+C, par contre, pour un taux de substitution à 30 et 40% la résistance mécanique est proche à 2 jours, mais elle est plus faible à 7 et 28 jours.

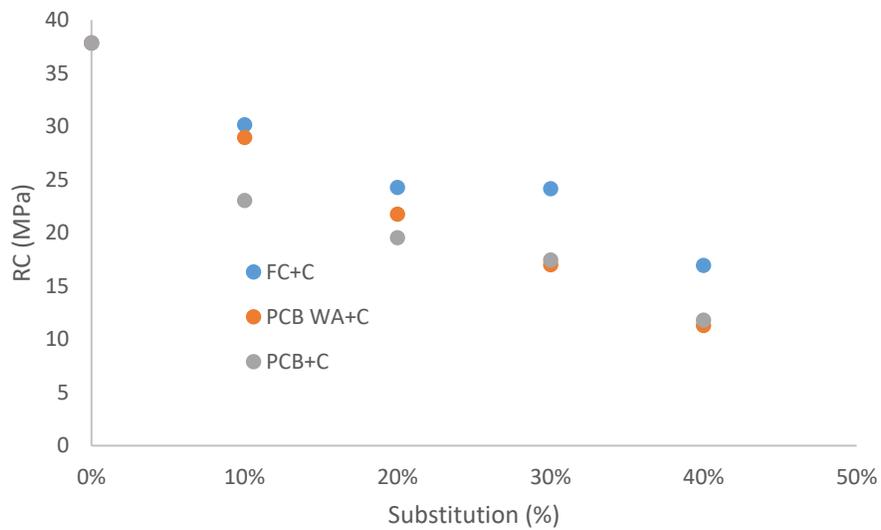


Figure 4-8 : Résistance en compression à 2 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés

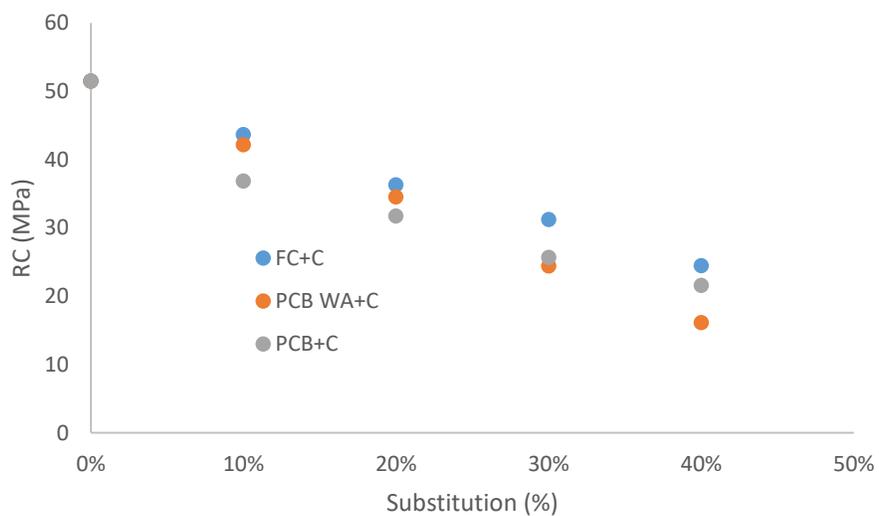


Figure 4-9 : Résistance en compression à 7 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés

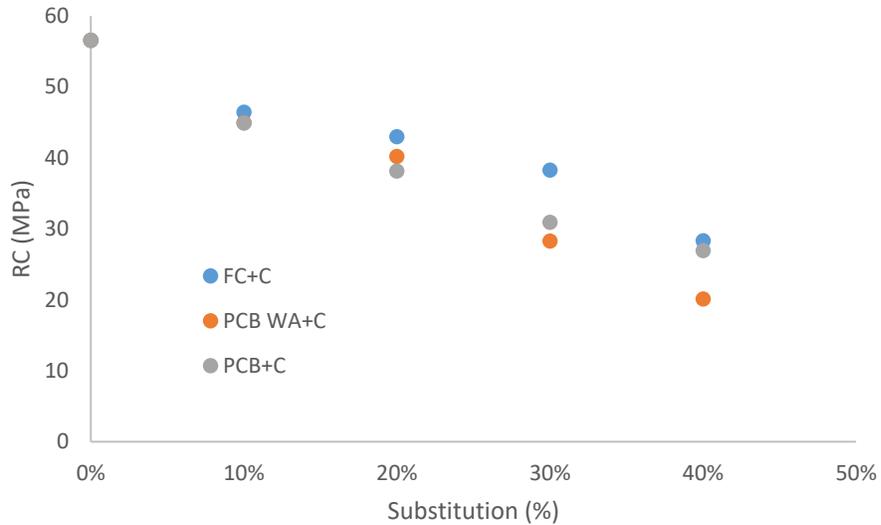


Figure 4-10: Résistance en compression à 28 jours en fonction du taux de substitution pour les différents mélanges réalisés

Il a été démontré que la PCB était poreuse et qu’il y avait une différence significative lors de la prise en compte de la masse volumique absolue (qui ne prend en compte que le volume solide) ou la masse volumique réelle (qui prend en compte le volume enveloppe du grain) lors de la substitution d’un ciment. D’après Féret, la porosité initiale d’un matériau est directement liée à la résistance mécanique. Donc, dans le cas où une poudre poreuse est utilisée, cette formule est exprimée suivant (eq.4-9), où le coefficient K_{FERET} est fonction du type de ciment utilisé ainsi que du granulat, et P_0 est la porosité initiale du mélange. La porosité initiale du mélange est exprimée suivant (eq.4-10) dans laquelle E_{eff} , V_{pore} , V_{poudre} , V_{air} et V_C correspondent respectivement à l’eau efficace, la porosité de la poudre, le volume réel de la poudre (volume enveloppe solide + pore), le volume d’air occlus et le volume du ciment.

$$RC_{28} = K_{FERET} \times (1 - P_0)^2 \dots \dots \dots (4-9)$$

$$P_0 = \frac{V_{vide}}{V_{total}} = \frac{E_{eff} + V_{pore} + V_{air}}{E_{eff} + V_{poudre} + V_C + V_{air}} \dots \dots \dots (4-10)$$

Ainsi, si on voulait comparer les résultats du mélange PCB+C avec ceux du FC+C, les substitutions doivent être présentées en volume réel. Les figures 4-11, 4-12 et 4-13 présentent les résultats du mélange PCB+C en tenant compte du volume réel (volume enveloppe) en comparaison avec le mélange FC+C. Une très bonne corrélation entre les résistances mécaniques du mélange du FC+C

avec celles du PCB+C, et ce, pour les différents âges (2, 7 et 28 jours), est obtenue. Il est aussi à noter que l'eau totale utilisée est la même pour les deux mélanges, donc la porosité initiale des deux séries est identique ($P_0=0,61$). Comme indiqué dans l'étude réalisée sur la pâte (partie 4), la porosité totale d'un mélange cimentaire fabriqué avec la PCB prend en compte la porosité de PCB et la porosité de la pâte néoformée. Ainsi, travailler avec une porosité totale constante permet d'obtenir des résistances mécaniques équivalentes entre les mélanges fabriqués avec le FC et la PCB. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus dans le paragraphe 4.4.

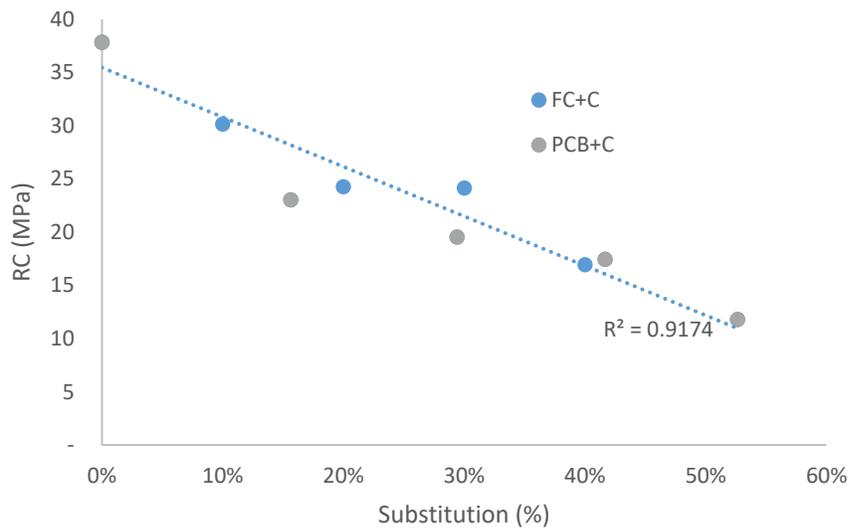


Figure 4-11: Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 2 jours

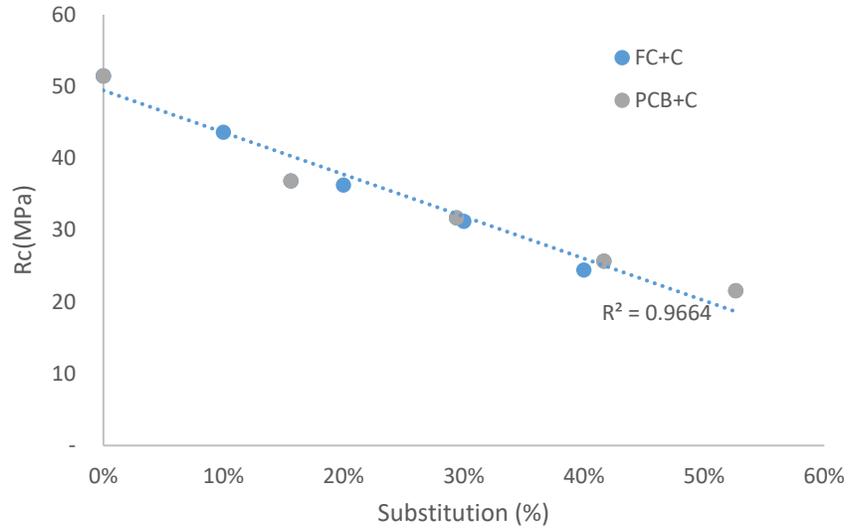


Figure 4-12 : Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 7 jours

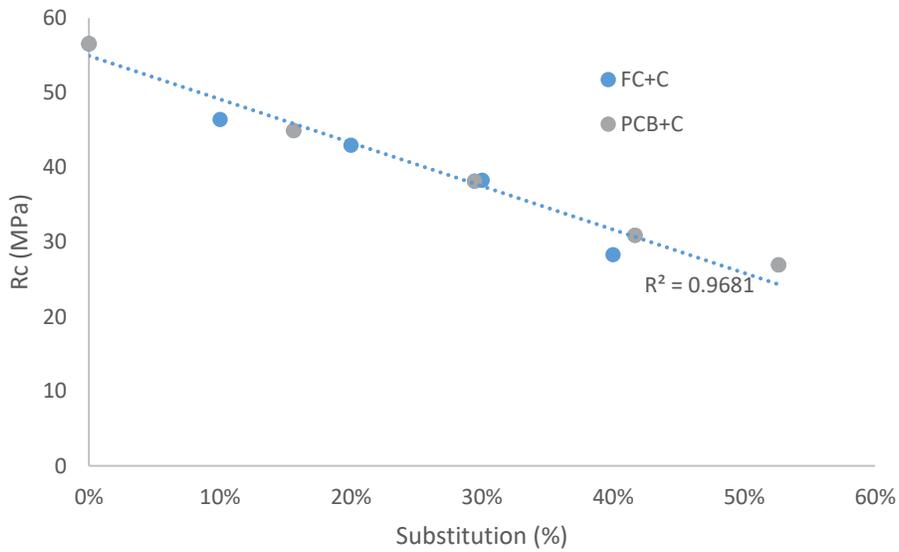


Figure 4-13: Résistance mécanique du mélange FC+C et PCB+C en fonction du taux de substitution en volume réel à 28 jours

Dans cette partie, on considère que le FC et la PCB sont des matériaux non réactifs. Le modèle de Féret est utilisé afin de comparer les résistances mécaniques obtenus des mélanges FC+C et PCB WA+C. Pour se faire, la porosité initiale (P_0) de chaque mélange est calculée, par la suite le coefficient $K_{\text{Féret}}$ pour chaque pourcentage de substitution est calculé pour les mélanges FC+C et

PCB WA+C. Le détail du calcul pour les différents âges (2,7 et 28 jours) est présenté au tableau 4-7.

Tableau 4-7: Détail du calcul réalisé sur les mélanges FC+C et PCB WA+C avec la méthode de Férét

	Substitution (%)	P0	RC 28	K Feret
FC+C	10%	0,61	30,1	200,02
	20%	0,61	24,3	160,75
	30%	0,61	24,1	159,61
	40%	0,61	16,9	111,77
	10%	0,61	43,6	287,15
	20%	0,61	36,3	240,25
	30%	0,61	31,2	206,29
	40%	0,61	24,4	161,23
	10%	0,61	46,5	305,68
	20%	0,61	43	284,56
	30%	0,61	38,3	252,84
	40%	0,61	28,3	186,77
PCB WA+C	10%	0,63	28,9	208,26
	20%	0,64	21,7	170,28
	30%	0,66	17,0	145,28
	40%	0,67	11,3	105,92
	10%	0,63	42,2	303,15
	20%	0,64	34,5	270,04
	30%	0,66	24,4	208,61
	40%	0,67	16,1	151,00
	10%	0,63	44,9	323,27
	20%	0,64	40,2	314,58
	30%	0,66	28,3	241,54
	40%	0,67	20,15	188,60

La figure 4-14 présente une comparaison du coefficient K_{Feret} calculé à partir des résistances mécaniques obtenues expérimentalement à différents âges (2, 7 et 28 jours) pour les mélanges PCB WA+C ainsi que FC+C. Les résultats montrent une très bonne corrélation. Donc, si on procède à des substitutions en volume réel avec la même quantité d'eau efficace, des chutes de résistance mécanique dans les mortiers fabriqués avec la PCB ne peuvent venir que du fait que la PCB est poreuse, et qui fait augmenter la porosité totale du mélange.

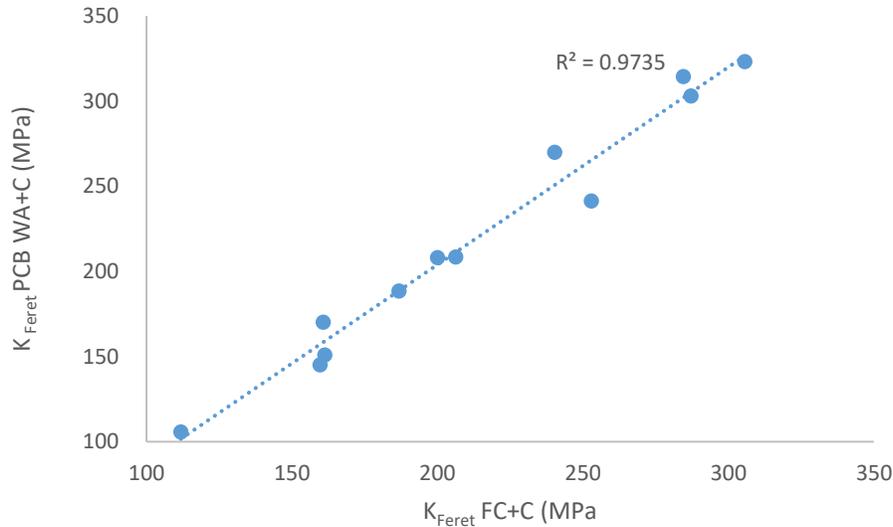


Figure 4-14 : Comparaison des coefficients K_{Ferret} obtenus, par calcul sur les mélanges PCB WA+C et FC+C

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une comparaison entre des mortiers réalisés avec la PCB et ceux réalisés avec le FC a été effectuée.

Les mesures à l'état frais obtenues sur les mortiers fabriqués avec la PCB et le FC ont montré que si la PCB est utilisée en considérant le volume réel et l'absorption d'eau, une meilleure maniabilité est obtenue. Ainsi, la demande en eau du PCB semble beaucoup plus faible que celle de FC.

Les chutes des résistances mécaniques des mortiers fabriqués avec la PCB sont principalement dues au fait que la PCB est poreuse. Ainsi, pour avoir le même comportement mécanique dans un mortier fabriqué avec le FC, il est nécessaire de :

- Procéder à une substitution en volume réel et utiliser la même eau totale entre le mélange réalisé avec le FC et celui réalisé avec la PCB. Mais, dans ce cas, le comportement à l'état frais risque d'être moins bon que celui fabriqué avec le FC.
- Procéder à une substitution en volume réel, corriger l'absorption d'eau et ne pas dépasser une substitution à 20%.

Dans la norme EN 206-1, le filler calcaire peut être utilisé comme une addition minérale en remplacement du ciment. Cette dernière peut être utilisée à un taux de substitution maximum à

20% en masse, ce qui correspond à 23% en substitution volumique. Ainsi, l'utilisation de la PCB en substitution volumique et en tenant compte de l'absorption d'eau peut être utilisée.

En réalité, les fines de GBR ne contiennent pas 100% de pâte cimentaire, d'autres matériaux non poreux (granulat calcaire) qui peuvent diminuer d'une manière significative la porosité sont présents. Ainsi, si les fines de GBR sont bien caractérisées, elles peuvent facilement être incorporées comme addition minérale et le comportement à l'état frais et à l'état durci du béton ou du mortier peut être facilement contrôlable.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Deux pistes de valorisation de la fraction 0/4 des GBR ont été explorées dans ce travail à savoir, leur utilisation au tant que sable ou en tant qu'addition minérale dans différentes compositions de mortiers.

L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence les difficultés liées à la valorisation de la fraction 0/4 des GBR en raison de leur teneur élevée en pâte de ciment. Une dispersion très importante a été observée lors des recherches réalisées sur les GBR. Certaines de ces recherches montrent que l'utilisation d'un GBR dans une formulation de béton ou de mortier conduit à des comportements à l'état frais et à l'état durci comparables à ceux d'un béton ou d'un mortier fabriqué avec un granulats naturel, et d'autres montrent le contraire et suggèrent qu'au-delà de 25%, le GBR ne peut être utilisé dans une formulation de béton ou de mortier. Ainsi, on relève qu'il est nécessaire d'avoir un matériau naturel modèle possédant des propriétés physiques très proches de celles d'un GBR afin d'identifier d'une manière rigoureuse les effets de la substitution d'un granulats naturel par un GBR.

De nombreux chercheurs se sont focalisés sur la mesure de l'absorption d'eau des GBR. La norme EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR N78 proposent des protocoles plutôt satisfaisants pour la quantification de l'absorption d'eau des GBR de grande taille (supérieurs à 4mm) après immersion dans l'eau pendant 24 heures. Par contre, ces méthodes ne sont pas du tout satisfaisantes pour les sables recyclés (GBR inférieurs à 4 mm). Lors des travaux réalisés par Le et al. et Zhao et al. il a été prouvé que la norme EN 1097-6 sous-estime cette absorption d'eau alors que la méthode IFSTTAR N78 la surestime pour la fraction inférieure à 0,5mm. A ce jour, il n'existe aucune méthode normalisée nous permettant de mesurer cette absorption d'eau pour les sables recyclés. Une méthode alternative a été proposée par Zhao et al. pour mesurer l'absorption d'eau des sables recyclés, cette méthode est basée sur la proportionnalité de la pâte de ciment et l'absorption d'eau des différentes fractions granulométriques. A notre connaissance, il n'existe aucune méthode qui permet de mesurer l'absorption d'eau des poudres.

Les poudres issues des GBR sont la fraction la plus compliquée à utiliser. Ainsi l'utiliser comme addition minérale peut être une manière de la valoriser. Bordy et al.[73] et Oksri-Nelfia et al. [72] ont étudié la possibilité d'utiliser les fines issues des GBR comme addition minérale dans le mortier ou le béton. Leurs résultats montrent qu'il est possible de l'utiliser comme addition minérale, toutefois, dans leur recherche, ils n'ont pas pris en compte l'absorption d'eau.

Au chapitre 2, une méthode originale permettant de préparer un matériau naturel modèle avec des caractéristiques physiques proches de celles d'un sable recyclé a été présentée. Dans un premier temps, une étude à l'état frais a été réalisée. La comparaison des mortiers fabriqués avec le sable naturel modèle et avec le sable recyclé saturé montre un comportement rhéologique proche. Cette comparaison permet de confirmer que le sable naturel modèle est un bon modèle pour faire une comparaison rigoureuse avec le sable recyclé. L'étude à l'état durci montre que la résistance mécanique des mortiers fabriqués avec un sable naturel est systématiquement supérieure à celle réalisée avec le sable recyclé dans des états de saturation différents. Cette différence est attribuée à une qualité moindre de la liaison entre le granulat et la nouvelle pâte ainsi qu'à une teneur en air beaucoup plus importante lors de l'utilisation d'un sable recyclé. Les résultats montrent aussi que l'utilisation d'un sable recyclé saturé dans un mortier présente des teneurs en air plus faibles que celles obtenues avec un sable sec en raison de l'air contenu dans les vides non saturés. Enfin, les résistances mécaniques des mortiers fabriqués avec le sable recyclé sec sont supérieures à celles des mortiers fabriqués avec le sable recyclé saturé, ce résultat étant attribué à une meilleure adhérence entre la nouvelle pâte et le granulat lors de l'utilisation du sable recyclé sec.

Au chapitre 3, une approche théorique et une approche expérimentale sont proposées dans le but d'estimer l'absorption d'eau d'une poudre. La première approche considère que le monolithe poreux est composé de pores sphériques partiellement éliminés lors du broyage. La porosité restante après broyage est calculée à partir de la distribution de la taille des pores du matériau monolithique et de la distribution de la taille des particules de la poudre. L'approche expérimentale est basée sur la comparaison entre les tests de porosimétrie à intrusion de mercure (MIP) réalisés sur la poudre poreuse étudiée et sur une poudre non poreuse ayant une distribution granulométrique et une morphologie similaire. Cela permet de séparer la porosité inter et intra granulaire de la poudre poreuse lors de l'intrusion de mercure.

Les deux approches ont été appliquées sur une pâte de ciment broyée. Les résultats ont montré que la pâte de ciment restait poreuse après broyage. Une différence significative a été obtenue pour les résultats de porosité par les deux approches. Cette différence a été attribuée à une sous-estimation de la porosité des gros pores pour les résultats de porosité au mercure sur monolithe. L'approche théorique est un moyen le plus simple d'estimer la porosité d'une poudre, compte tenu du temps et de l'énergie nécessaire pour mettre en place l'approche expérimentale, et du fait que l'approche expérimentale ne peut être appliquée pour tous les matériaux.

La cinétique d'absorption d'eau des poudres a aussi été étudiée. Il a été montré expérimentalement que la poudre atteint un état proche de la saturation en moins de 10 minutes.

Malgré le fait que la pâte de ciment broyée a une granulométrie ainsi qu'une morphologie proche de celle du FC, les résultats de demande en eau ont montré que le FC n'est pas un bon matériau modèle pour le PCB. Ainsi, obtenir une poudre naturelle modèle pour une poudre recyclée s'avère être difficile à cause de la différence minéralogique et des phénomènes d'agglomération qui sont difficile à contrôler.

Au chapitre 4, une comparaison a été réalisée entre des mortiers fabriqués avec la pâte de ciment broyée et ceux réalisés avec le FC. La substitution a été réalisée en prenant en compte le volume enveloppe de la poudre ainsi que l'absorption d'eau. Les résultats à l'état frais ont montré une meilleure maniabilité des mortiers fabriqués avec la PCB en comparaison avec ceux fabriqués avec le FC. Les mortiers fabriqués avec la PCB ont une résistance mécanique plus faible que ceux fabriqués avec le FC. Cette différence dans le comportement mécanique est attribuée au fait que la PCB est poreuse, ce qui augmente d'une manière considérable la porosité totale du mélange. Cependant, dans la réalité, les fines de recyclage ne contiennent pas 100% de pâte de ciment, elles contiennent d'autres matériaux non poreux (granulat) qui vont diminuer d'une manière significative l'absorption d'eau. Ainsi, si les fines issues du recyclage sont bien caractérisées (porosité, absorption d'eau ...), elles peuvent être facilement incorporées comme addition minérale dans une formulation de béton ou de mortier, et le comportement à l'état frais et à l'état durci peut être aussi contrôlé.

Perspectives

Au vu des résultats obtenus lors de ces travaux de recherche, quelques perspectives peuvent être envisagées :

- Nous avons présenté une méthode qui permet d'obtenir un sable naturel modèle qui sert à étudier le comportement à l'état durci d'un mortier fabriqué avec un sable recyclé. Il serait nécessaire de généraliser cette méthode aux gravillons et ainsi obtenir des gravillons naturels modèles qui permettront d'étudier le comportement à l'état durci d'un béton fabriqué avec des gravillons recyclés. Ainsi, il sera possible d'estimer la limite à laquelle un granulat naturel peut être substitué par un GBR.
- Les résultats de demande en eau obtenus sur une poudre ont montré que malgré une granulométrie et une morphologie proche entre la poudre naturelle et la poudre recyclée, la poudre naturelle n'est pas un matériau modèle pour la poudre recyclée. Ainsi, cette étude doit être complétée par une étude comparative sur l'agglomération des poudres.
- Dans la littérature, il est montré que 60 à 80% de l'absorption d'eau d'un granulat se produit dès les 10 premières minutes. Dans nos travaux de recherche, il a été démontré que la poudre absorbe la majeure partie de l'eau en moins de 10 minutes. Ainsi, il serait intéressant d'étudier la cinétique d'absorption en fonction de la fraction granulaire d'un GBR en allant des fractions grossières aux poudres.
- Les méthodes de formulation utilisées jusqu'à maintenant sont utilisées pour des matériaux non poreux et donc non absorbants. Afin de pouvoir réaliser des mortiers et des bétons avec des matériaux poreux, il serait nécessaire de revoir les méthodes de formulation et les réadapter pour des GBR.

Références bibliographiques

- [1] Recybeton. PN, Complete recycling of concrete, (2012). <http://www.pnrecybeton.fr/>.
- [2] UNICEM, Carrières de roches massives potentialités écologiques, 2008.
- [3] UNICEM, L'industrie Française des granulats, 2018 (2018) 3–4.
- [4] UEPG, EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION, 2017.
- [5] Direction générale de la recherche et de l'innovation, HORIZON 2020 en bref, 2013. doi:10.2777/80602.
- [6] P. Villoria Saez, European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste, *Open Constr. Build. Technol. J.* 5 (2011) 156–161. doi:10.2174/1874836801105010156.
- [7] P. Villoria Saez, European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste, *Open Constr. Build. Technol. J.* 5 (2011) 156–161. doi:10.2174/1874836801105010156.
- [8] R. Sato, I. Maruyama, T. Sogabe, M. Sogo, Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams, *J. Adv. Concr. Technol.* 5 (2007) 43–61. doi:10.3151/jact.5.43.
- [9] Z. Zhao, Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars, 072 (2013) 188.
- [10] T. LE, Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers, 2015.
- [11] M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 872–877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [12] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates, *J. Sustain. Cem. Mater.* 2 (2013) 186–203. doi:10.1080/21650373.2013.812942.
- [13] T. Le, S. Rémond, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz, Fresh behavior of mortar based on recycled sand - Influence of moisture condition, *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 35–42. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071.
- [14] S. Nagataki, A. Gokce, T. Saeki, M. Hisada, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 965–971. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.008.
- [15] A. Abbas, G. Fathifazl, B. Fournier, O.B. Isgor, R. Zavadil, A.G. Razaqpur, S. Foo, Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Mater. Charact.* 60 (2009) 716–728. doi:10.1016/j.matchar.2009.01.010.
- [16] E. 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption ., 2013.

- [17] M.-H. Zhang, O.E. Gjørsv, PENETRATION OF CEMENT PASTE LIGHTWEIGHT AGGREGATE, 22 (1992) 47–55.
- [18] F. Rodrigues, M.T. Carvalho, L. Evangelista, J. De Brito, Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *J. Clean. Prod.* 52 (2013) 438–445. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.023.
- [19] A. Bordy, A. Younsi, B. Fiorio, S. Aggoun, Influence of drying conditions on hydration of cement pastes with substitution of Portland cement by a recycled cement paste fine, in: *ICOME'16 Int. Conf. Mater. Energy*, 2016: pp. 1–6.
- [20] S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh, Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, *Constr. Build. Mater.* 108 (2016) 163–174. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.
- [21] IFSTTAR. Test Methode No.78, Tests on granulats in concrete: measurement of total water absorption of crushed sand, 2011.
- [22] T. Le, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz, D. Betrancourt, S. Rémond, Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales, *Constr. Build. Mater.* 141 (2017) 479–490. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.035.
- [23] M. Mechling, A. Lecomte, K. Merriaux, Mesure de l'absorption d'eau des additions minérales des bétons par vaporométrie, *Matériaux Constr.* 36 (2003) 32–39.
- [24] P. Gentilini, O. Yazoghli-Marzouk, V. Delmotte, Y. Descantes, Determination of the water content of fillerised fine aggregates in the saturated surface dry state, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 662–670. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.131.
- [25] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, C.H. Chan, New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 364–369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009.
- [26] A.D. Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 112–116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
- [27] A.Z. Bendimerad, E. Roziere, A. Loukili, Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 3557–3569. doi:10.1617/s11527-014-0421-5.
- [28] A.D. Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 112–116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
- [29] J. Mills-beale, Z. You, R.C. Williams, Q. Dai, Determining the specific gravities of coarse aggregates utilizing vacuum saturation approach, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1316–1322. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.025.
- [30] D. Zhang, Z. Li, J. Zhou, K. Wu, Development of thermal energy storage concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 927–934. doi:10.1016/j.cemconres.2003.10.022.
- [31] E. Khoury, B. Cazacliu, S. Remond, Impact of the initial moisture level and pre-wetting

- history of recycled concrete aggregates on their water absorption, *Mater. Struct. Constr.* 50 (2017) 1–12. doi:10.1617/s11527-017-1093-8.
- [32] L. Bello, E. Garcia-Diaz, P. Rougeau, An original test method to assess water absorption/desorption of lightweight aggregates in presence of cement paste, *Constr. Build. Mater.* 154 (2017) 752–762. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.236.
- [33] H. Maimouni, S. Remond, F. Huchet, P. Richard, V. Thiery, Y. Descantes, Quantitative assessment of the saturation degree of model fine recycled concrete aggregates immersed in a filler or cement paste, *Constr. Build. Mater.* 175 (2018) 496–507. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.211.
- [34] E. Khoury, *Maîtrise de l'eau efficace dans les bétons de granulats recyclés*, IMT LILLE DOUAI, 2018.
- [35] NF EN 12620+A1, *Granulats pour béton*, 2008.
- [36] N. 206/CN EN, *Béton — Spécification, performance, production et conformité*, 2014.
- [37] E. Khoury, W. Ambrós, B. Cazacliu, C.H. Sampaio, S. Remond, Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability, *Constr. Build. Mater.* 175 (2018) 705–713. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163.
- [38] F.M. Khalaf, A.S. DeVenny, Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review, *J. Mater. Civ. Eng.* 16 (2004) 331–340. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(331).
- [39] J.F. Lamond, Removal and Reuse of Hardened Concrete - ACI 555-01, *ACI Comm.* 555. (2001) 1–26.
- [40] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, R. Degeimbre, Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 421–426. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004.
- [41] I.M. Krieger, T.J. Dougherty, A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres, *Trans. Soc. Rheol.* 3 (1959) 137–152.
- [42] T. Sedran, *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, 1999.
- [43] F. De Larrard, Structures granulaires et formulation des bétons, *Etudes Rech. Des Lab. Des Ponts Chaussées.* OA 34 (2000) 414 p. http://www.concretonline.com/pdf/00hormigon/art_tec/docu_ref01.pdf.
- [44] H.J.H. Brouwers, The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1697–1716. doi:10.1016/j.envpol.2008.11.024.
- [45] R. Ben Aïm, P. Le Goff, Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application à la porosité de mélanges binaires, *Powder Technol.* 1 (1968) 281–290. doi:10.1016/0032-5910(68)80006-3.
- [46] T. W, K. E, B. M, Calculating the Packing Density of Grain Mixtures, *Aufbereit. Process.* 18. 18 (1977) 603–608.

- [47] H. Huan, L. Courard, E. Pirard, Fr. Michel, SHAPE ANALYSIS OF FINE AGGREGATES USED FOR CONCRETE, *Image Anal Stereol.* 35 (2016) 159–166. 105566/ias.1400.
- [48] I. Mehdipour, K.H. Khayat, Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 340–353. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147.
- [49] K.H. Khayat, C. Hu, J.M. Laye, Influence of aggregate Grain-Size Distribution on Workability of Self-Consolidating Concrete, *Int. Symp. High Perform. Concr. - Work. Strength Durab.* 1 (2000) 641–658.
- [50] H. Hafid, Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles, 2012.
- [51] F. Mahaut, S. Mokéddem, X. Chateau, N. Roussel, G. Ovarlez, Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1276–1285. doi:10.1016/j.cemconres.2008.06.001.
- [52] Z. Toutou, N. Roussel, Multi scale experimental study of concrete rheology: From water scale to gravel scale, *Mater. Struct. Constr.* 39 (2006) 189–199. doi:10.1617/s11527-005-9047-y.
- [53] David A. Williams, Aaron W. Saaka, Hamlin M. Jennings, The influence of mixing on the rheology of fresh cement, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1491–1496. http://ac.els-cdn.com/S0008884699001246/1-s2.0-S0008884699001246-main.pdf?_tid=d9f48a7c-0663-11e7-9dc7-00000aab0f6c&acdnat=1489241338_4d6e1856aebc29186355c15f537b973b.
- [54] M. Guerinet, N. Roussel, M. Moranville, J. Yammine, M. Chaouche, From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 890–896. doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.011.
- [55] H. Hafid, G. Ovarlez, F. Toussaint, P.H. Jezequel, N. Roussel, Assessment of potential concrete and mortar rheometry artifacts using magnetic resonance imaging, *Cem. Concr. Res.* 71 (2015) 29–35. doi:10.1016/j.cemconres.2015.01.009.
- [56] P.J. Nixon, Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review. First state-of-the-art report RILEM TC-37-DRC., *Matériaux Constr.* 11 (1978) 371–378. doi:10.1007/BF02473878.
- [57] B.M. Vinay Kumar, H. Ananthan, K.V.A. Balaji, Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes, *J. Build. Eng.* 9 (2017) 100–108. doi:10.1016/j.job.2016.11.013.
- [58] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou, Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 31–36. doi:10.1016/s0008-8846(03)00186-8.
- [59] S.C. Kou, C.S. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.

- [60] L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 397–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
- [61] C. Paper, S.O. Universit, G.W. Universit, E.G. Universit, Influence de l' incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fluides Influence de l' incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons flu, (2015).
- [62] P.R. Rangaraju, J. Olek, S. Diamond, An investigation into the influence of inter-aggregate spacing and the extent of the ITZ on properties of Portland cement concretes, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 1601–1608. doi:10.1016/j.cemconres.2010.07.002.
- [63] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 179–186. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037.
- [64] R. Kajaste, M. Hurme, Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 4041–4052. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.055.
- [65] G. Habert, N. Roussel, Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 397–402. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001.
- [66] G. Habert, N. Roussel, Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental, XXVIèmes Rencontres Univ. Génie Civ. AUGC 2008, Jun 2008, Fr. (2008).
- [67] C.-T. Galbenis, S. Tsimas, Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production, *China Particuology.* 4 (2007) 83–85. doi:10.1016/s1672-2515(07)60241-3.
- [68] K. Kulisek, M. Fridrichova, J. Brauner, Utilización de hormigones reciclados en la industria del cemento, *Cem. Hormigón.* (2006) 26–50.
- [69] C. Diliberto, A. Lecomte, J.-M. Mechling, L. Izoret, A. Smith, Valorisation of recycled concrete sands in cement raw meal for cement production, *Mater. Struct.* 50 (2017) 127. doi:10.1617/s11527-017-0996-8.
- [70] M.V.A. Florea, Z. Ning, H.J.H. Brouwers, Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 1–12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.012.
- [71] L. Oksri-Nelfia, Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques, (2015).
- [72] L. Oksri-Nelfia, P. Mahieux, O. Amiri, P. Turcry, J. Lux, Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials, *Mater. Struct.* 49 (2016) 3239–3251. doi:10.1617/s11527-015-0716-1.
- [73] A. Bordy, A. Younsi, S. Aggoun, B. Fiorio, Cement substitution by a recycled cement paste

- fine: Role of the residual anhydrous clinker, *Constr. Build. Mater.* 132 (2017) 1–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.080.
- [74] M.E. Bouarroudj, S. Remond, F. Michel, Z. Zhao, D. Bulteel, L. Courard, Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate, *Mater. Struct.* (2019).
- [75] A. Lecomte, The Measurement of Real and Virtual Packing Density of Soft Grains, *Mater. Struct.* 39 (2007) 63–80. doi:10.1617/s11527-005-9029-0.
- [76] F. De Larrard, M. Buil, Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil, *Mater. Struct.* 20 (1987) 117–126.
- [77] A. Schwartzentruber, C. Catherine, La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d ' aide à la formulation des bétons adjouvantés, *Mater. Struct.* 33 (2000) 475–482.
- [78] M. Fourmentin, P. Faure, S. Rodts, U. Peter, D. Lesueur, D. Daviller, P. Coussot, NMR observation of water transfer between a cement paste and a porous medium, *Cem. Concr. Res.* 95 (2017) 56–64. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.027.
- [79] F. de Larrard, A. Belloc, The influence of Aggregate on the compressive Strength of Normal- and high-Strength Concrete, *ACI Mater. J.* 99 (1997).
- [80] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 179–186. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037.
- [81] A. Lecomte, F. De Larrard, J.M. Mechling, Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé, *Bull. Des Lab. Des Ponts Chaussees.* (2001).
- [82] D.-T. Dao, “(Multi-)recyclage du béton hydraulique, 2012.
- [83] ASTM C 128–04, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate., 2004.
- [84] P. Hedenus, M. Strømme Mattsson, G.A. Niklasson, O. Camber, R. Ek, Characterisation of instantaneous water absorption properties of pharmaceutical excipients, *Int. J. Pharm.* 202 (2000) 141–149. doi:10.1016/S0378-5173(00)00436-1.
- [85] M. Strømme Mattsson, P. Hedenus, G.A. Niklasson, R. Ek, A new method of characterising liquid uptake within particles over short time periods, *Int. J. Pharm.* 199 (2000) 179–185. doi:10.1016/S0378-5173(00)00381-1.
- [86] B. Widom, Random Sequential Addition of Hard Spheres to a Volume, *J. Chem. Phys.* 44 (1966) 7. doi:10.1063/1.1726548.
- [87] S. Westermarck, Use of Mercury Porosimetry and Nitrogen Adsorption in Characterisation of the Pore Structure of Mannitol and Microcrystalline Cellulose Powders, Granules and Tablets, 2000. <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/farma/vk/westermarck/useofmer.pdf>.
- [88] S. Westermarck, A.M. Juppo, L. Kervinen, J. Yliruusi, Pore structure and surface area of

- mannitol powder, granules and tablets determined with mercury porosimetry and nitrogen adsorption, *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 46 (1998) 61–68. doi:10.1016/S0939-6411(97)00169-0.
- [89] E. Guerin, P. Tchoreloff, B. Leclerc, D. Tanguy, M. Deleuil, G. Couarraze, Rheological characterization of pharmaceutical powders using tap testing, shear cell and mercury porosimeter, *Int. J. Pharm.* 189 (1999) 91–103. doi:10.1016/S0378-5173(99)00243-4.
- [90] S. Rémond, Compaction of confined mono-sized spherical particle systems under symmetric vibration: A suspension model, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 337 (2004) 411–427. doi:10.1016/j.physa.2004.02.014.
- [91] K. El Cheikh, S. Rémond, P. Pizette, Y. Vanhove, C. Djelal, Discrete Element study of granular material - Bumpy wall interface behavior, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 457 (2016) 526–539. doi:10.1016/j.physa.2016.03.053.
- [92] K. El Cheikh, S. Rémond, Effect of wall bumpiness on the behavior of sheared dry bidisperse granular material, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 472 (2017) 1–12. doi:10.1016/j.physa.2016.12.049.
- [93] S. Rémond, J.L. Gallias, Simulation of periodic mono-sized hard sphere systems under different vibration conditions and resulting compaction, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 369 (2006) 545–561. doi:10.1016/j.physa.2006.01.071.
- [94] S. Rémond, J.L. Gallias, A. Mizrahi, Characterization of voids in spherical particle systems by Delaunay empty spheres, *Granul. Matter.* 10 (2008) 329–334. doi:10.1007/s10035-008-0092-4.
- [95] N. Roussel, P. Coussot, “Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: From slump to spreading flow, *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*. 49 (2005) 705–718. doi:10.1122/1.1879041.
- [96] V.H. Nguyen, S. Remond, J.L. Gallias, Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 292–300. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.015.
- [97] P. Diederich, Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Université de TOULOUSE III- Paul Sabatier, 2010. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [98] W. Chen, HYDRATION OF SLAG CEMENT, University of Twente, 2007.
- [99] A. Bordy, Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l’hydratation de matériaux cimentaires à base d’une fine recyclée, Université de Cergy-Pontoise, 2016.
- [100] V. Baroghel-Bouny, Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, L’ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, 1994. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00523299>.
- [101] A. Younsi, Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales Akli Younsi To cite this version, UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE, 2012.
- [102] D.P. Bentz, Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 124–129.

doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.10.006.

- [103] D.P. Bentz, P.E. Stutzman, Curing, hydration, and microstructure of cement paste, *ACI Mater. J.* 103 (2006) 348–356.

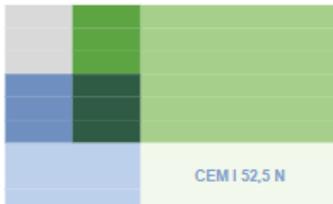
Annexes

Annexes A : Fiche technique ciment

Ciment Portland

CEM I 52,5 N

Fevrier 2017 CEM I



CEM I 52,5 N

Cimenteries CBR
Assistance Technique
Chaussée de La Hulpe 155 Tervuren/overijp
1170 Brussels
Tel : + 32 2 675 25 10
Fax : + 32 2 675 23 91
communication@cdr.be
www.cdr.be

ENCI
Assistance Technique
Postbus 3233
5203 DG 't Hartogenbosch
Tel : + 31 73 940 12 20
Fax : + 31 73 940 12 18
tr@enci.nl
www.enci.nl



1. Normes et certificats

Désignation	Marque	Norme	Certificat N°
CEM I 52,5 N CE	CE	NBN EN 197-1	0965-CPR-C0019
CEM I 52,5 N CE BENOR	BENOR	NBN B12	17/02/019
CEM I 52,5 N CE	KOMO	BRL 2601	1118-16-1020

2. Composition déclarée

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires					
Clinker (K)	%	-	97	95	100
Laitier (S)	%	-	-	-	-
Cendres volantes (V)	%	-	-	-	-
Calcaire (LL)	%	-	-	-	-
Filler	%	-	3	0	5
Ajouts en % du ciment fini					
Régulateur de prise	%	-	5	-	-
Agent de mouture	%	-	0.14	-	-
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 et minéralogiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
CaO	%	EN 196-2	63.4	-	-
SiO ₂	%	EN 196-2	20.4	-	-
Al ₂ O ₃	%	EN 196-2	4.8	-	-
Fe ₂ O ₃	%	EN 196-2	3.4	-	-
C ₃ A	%	EN 196-2	7.2	-	-
SO ₃	%	EN 196-2	3.2	-	≤ 4.0
Résidu insoluble	%	EN 196-2	0.6	-	≤ 5.0
Porte au feu	%	EN 196-2	1.6	-	≤ 5.0
Chlorures	%	EN 196-2	0.08	-	≤ 0.10
Chrome (VI) *	%	EN 196-10	< 0.0002	-	≤ 0.0002
Na ₂ Oeq**	%	EN 196-2	0.74	-	-
Sulfures	%	EN 196-2	-	-	-

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

** Valeur moyenne + 1,06 s'écart-type.



Usine de Lierre

4. Caractéristiques physiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Blancheur	%	CIE 1931	0	-	-
Clarté L	%	CIE Lab	59	-	-
Eau de consistance normale	%	EN 196-3	29,6	-	-
Début de prise	min	EN 196-3	200	≥ 45	-
Fin de prise	min	EN 196-3	260	-	≤ 720
Stabilité	mm	EN 196-3	< 1	-	≤ 10
Surface spécifique (Blaine)	cm ² /g	EN 196-6	3800	-	-
Refus au tamis de 200 µm	%	EN 196-6	0,02	-	≤ 3,0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	J/g	EN 196-8	-	-	-
Masse volumique - Absolue	kg/m ³	-	3100	-	-
Masse volumique - Apparente	kg/m ³	-	1100	-	-

5. Caractéristiques mécaniques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
A 1 jour	MPa	EN 196-1	20,5	-	-
A 2 jours	MPa	EN 196-1	37	≥ 20	-
A 7 jours	MPa	EN 196-1	55	-	-
A 28 jours	MPa	EN 196-1	66,5	≥ 52,5	-
28/28d	-	-	0,56	-	-

6. Production et conditionnement

Ce ciment est disponible dans les conditionnements suivants :

Vrac batteux	Vrac camion	Bao
X	X	X

7. Système de management certifié de l'usine.



8. Déclaration de performance

Déclaration de performance CPR(EU) Nr. 305/2011

Identification : 0965-CPR-C0019

Site internet : www.cbr.be

Les valeurs reprises ci-dessus sont des valeurs moyennes qui sont données à titre indicatif.

Les limites garanties figurent dans la colonne exigences.

Annexes B : Fiche technique filler calcaire



CARMEUSE

FICHE TECHNIQUE

CALCITEC 2001 S

FILLER CALCAIRE

DESCRIPTION DU PRODUIT

Le **Calcitec 2001 S** est une poudre de calcaire d'origine naturelle.

INGREDIENT DE BASE

Carbonate de calcium - CaCO₃
Poudre gris-blanc, inodore.

APPLICATION

Granulat (filler) pour béton et mortier.
Calcitec 2001 S est aussi idéal pour les bétons autoplaçants.

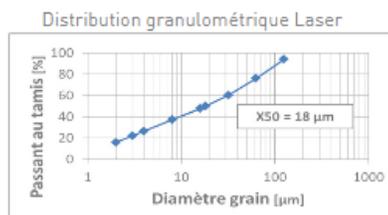
ANALYSE CHIMIQUE TYPE (valeurs moyennes sur sec)

	Exigence absolue	Exigence	Intervalle de 90%	Moyenne
Carbonates	≥87	≥90	94-100	99 %
CaCO ₃	≥72	≥75	94-100	97,8 %
MgO				0,42 %
SiO ₂				0,67 %
Al ₂ O ₃				0,19 %
Fe ₂ O ₃				0,07 %

	Cat.	
Réactivité aux alcalins		non réactif
Na ₂ O _{eq}		0,03 %
S		0,041 %
SO ₃	AS0,2	0,101 %
Cl- solubles dans l'eau		31 ppm
Matières organiques		pas de m. o.
Methylene blauw waarde MBF	MBF10	0,67 g / Kg
pH		9,4

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES & DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (valeurs moyennes)

	CALCAIRE VISEEN
Origine géologique	
Masse volumique réelle	2740 Kg / m ³
Densité apparente non tassé	1043 Kg / m ³
Densité apparente tassée	1725 Kg / m ³
Surface spécifique blaine	317 m ² /Kg
Surface spécifique BET	900 m ² /Kg
H ₂ O	0,09 %
blancheur	50,2
Dureté	3 Mohs



Tamis à aspiration d'air	Exigence individuelle	Intervalle 90%	Moyenne
Passant à 2,00 mm	100	100	100 %
Passant à 0,500 mm	-	99,5-100	100 %
Passant à 0,125mm	85-100	90-100	96,9 %
Passant à 0,063mm	70-100	74-84	77,2 %

REFERENCES / NORMES

EINECS 215-279-6
CAS 471-34-1

ISO 9001:2008
ISO 14001:2004

KOMO :



1351-16-K

CE :

EN 12620 : 2002
EN 13139 : 2002
DoP : 0785-CPR-31214-13-
En-42-1306



0785-CPR-31214-13

Exempté de REACH



SECURITE

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

STOCKAGE

Stocker à l'abri de l'humidité.

LIEU DE PRODUCTION

B - 4480 Engis
N°EDITION
301B.BEEN.S.03.Fr

MISE A JOUR
4/09/2017

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

Annexe C: Fiche technique du calcaire d'origine pour la fabrication du filler calcaire

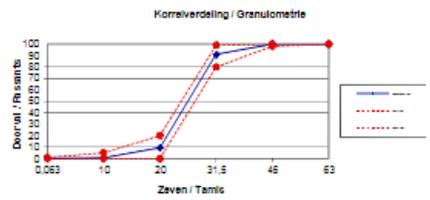
Prestatieverklaring – Déclaration de performance (DoP)
 Technische fiche – Fiche technique

Grof gebroken Kalksteengranulaat
 Gravillons concassés calcaire
20/32 Cb5 II f1 NG Lavé



Productcode Code produit	Identificatiecode Code d'identification	CE 2+ - certificaatnummer Numéro du certificat CE 2+
130290	2418.3	0333-CPR-041075

Norm van toepassing / Norme applicable
 EN 12620:2002 + A1 (2005) : Toeslagstoffen voor beton / Granulats pour bétons
 EN 13242:2002 + A1 (2007) : Toeslagstoffen voor ongebonden en hydraulisch gebonden materialen / Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.



Indicatief permeabiliteit *	Zeeft Tams utilisés	Grenzen waar de producent zich toe engageert Valeurs sur lesquels le producteur s'engage	
		Min. (%)	Max. (%)
Moyenne indicative *			
Gem./Moy (%)	mm		
100	63	100	100
100	45	99	100
91	31,5	80	99
9	20	0	20
1	10	0	5
0,1	0,063	0	1

	EN 12620	EN 13242	EN 13043	EN 13139	PTV 411
Korrelverdeling Granularité	G ₂ 80/20	G ₂ 80/20			
Tolerantie van de korrelverdeling Tolérance de granulats	NPD	NPD			
Gehalte aan fijne delen (%) Teneur en fines (%)	f _{0,2}	f ₀		0,1	f ₀
Vorm van het granulaat Forme des grains	Fl ₁₀₀	Fl ₁₀₀		11	II
Percentage gebroken materiaal % des grains concassés	C _{100,0}	C _{100,0}			
Weerstand tegen verrijzeling Résistance à la fragmentation	LA ₁₀₀	LA ₁₀₀		24	Cb5
Weerstand tegen afschuiven Résistance à l'usure	MDE ₁₀	MDE ₁₀		11	Cb5
Reële Volumieke Massa (10 ¹⁴) Masse volumique réelle (10 ¹⁴)	2,72 T/m ³	2,72 T/m ³			Tolérance : 2,72 +/- 0,07 T/m ³
Waterabsorptie (10 ¹⁴) Absorption d'eau (10 ¹⁴)	0,4% _(max/100)	0,4% _(max/100)			Tolérance : 0,4 +/- 0,3 %
Volumieke massa in bulk Masse volumique en vrac	NPD	NPD			
Organische stoffen Matières organiques	Negatief	Negatief	Negatief		
Gehalte aan conventioneel organisch materiaal volgens NBN 11-256					
Teneur conventionnelle en matières organiques selon NBN 11-256	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	0,1	
Bestandheid tegen verschoorverval Bétabilité au peul-égal	F2	F2			NG
Andere eigenschappen BC : AAV / AN : C Autres caractéristiques	NPD	NPD			

* Gemiddelde indicatieve minder dan 6 maanden oud *betreft dat deze waarden ter indicatie worden gegeven en vormt geen garantie van de fabrikant / Moyennes indicatives datant de moins de 6 mois *signifie que ces valeurs sont données à titre indicatif et ne constituent en aucun cas une garantie de la part du fabricant.

De BENOR-certificatie van het product geeft aan dat op basis van een periodieke externe controle een voldoende mate van vertrouwen bestaat dat de leverancier in staat is om doorlopend de overeenstemming van het product, zoals vastgelegd in technische referentiespecificaties, te waarborgen. Voorliggende BENOR-fiche bevat de prestaties van kenmerken die door de fabrikant verklaard worden en wordt door de certificatie-instelling geverifieerd.

De aangemelde instantie (Notified Body) AFNOR met nr. 0333 heeft op 24/05/05 in de fabriek met nr. 0333-CPR-041075 een productieconformiteitsattest afgeleverd volgens systeem 2+. Hiervoor baseert zij zich op het initieel type-onderzoek van de productieplaats en de interne fabrieksproductiecontrole (FPC), alsook op het toezicht en de permanente evaluatie van deze fabrieksproductiecontrole.

Ik, ondergetekende, Joris Schoon, kwaliteitsverantwoordelijke Sagrex, verklaar dat de prestaties van het product met Code 2418.3 conform zijn aan de eisen van de Bouwproductenverordening 305/2011/CE en aan de EN normen hierboven beschreven.

Deze prestatieverklaring werd opgesteld onder de verantwoordelijkheid van de fabrikant.

La certification BENOR du produit indique que, sur base d'un contrôle externe périodique, il existe une confiance suffisante dans la capacité du producteur à garantir la conformité du produit de façon permanente, comme définie dans les spécifications de référence technique. La présente fiche BENOR contient les performances des caractéristiques déclarées par le producteur et est vérifiée par l'organisme de certification.

L'organisme notifié AFNOR n° 0333 a délivré le 24/05/05 un certificat de conformité de la production en usine n° 0333-CPR-041075 selon le système 2+.

Il s'appuie sur l'inspection initiale du site de production, le contrôle de la production en usine, la surveillance et l'appréciation permanente de ce contrôle de production en usine.

Je soussigné, Joris Schoon, responsable qualité Sagrex, déclare que les performances du produit Code 2418.3, sont conformes aux exigences du Règlement Produits de

Résumé

Les granulats de béton recyclé (GBR) ne sont pas suffisamment utilisés dans le secteur de la construction, principalement en raison de leur grande capacité d'absorption d'eau. Ces matériaux sont en effet composés de granulats naturels concassés et de pâte de ciment durcie adhérente qui possède une forte porosité. La première partie de ce travail de recherche s'intéresse à la valorisation des GBR de dimensions inférieures à 4 mm (sables recyclés) dans une formulation de mortier. Les comportements à l'état frais et durci de mortiers fabriqués soit avec un sable recyclé soit avec un sable naturel modèle sont comparés. Le sable naturel modèle est conçu dans le but d'obtenir des caractéristiques physiques proches de celles du sable recyclé. Cette démarche permet de mettre en évidence l'influence de la substitution d'un sable naturel par un sable recyclé de caractéristiques voisines. La seconde partie de ce travail consiste à trouver une piste de valorisation pour les particules de GBR inférieures à 125 μ m. L'objectif est ici d'utiliser la poudre issue du broyage de GBR comme addition minérale. Un travail de caractérisation de la poudre recyclée permet de mettre en évidence que la fine recyclée reste poreuse après broyage. Un modèle théorique et une méthodologie expérimentale permettant d'estimer cette porosité sont développés. Enfin, des mortiers fabriqués avec un filler calcaire et une fine recyclée sont comparés, les résultats montrent que la fine recyclée peut être utilisée comme addition minérale.

Abstract

Recycled concrete aggregate (RCA) are not enough used in the construction sector, mainly because of their high water absorption capacity. These fine particles are composed of crushed natural aggregate and adherent hardened cement paste. The first part of this work consists in valuing particles smaller than 4mm of an RCA in a mortar composition. Thus, the fresh and hardened behavior of mortar performed with recycled fine aggregate and model natural aggregate have been compared. The natural model fine aggregate has been performed to have an equivalent physical characteristics with the recycled one. This approach helped to understand the hardened behavior of the mortar made with recycle fine aggregate. The second part of this work consists in finding a recovery track for particles smaller than 125 μ m if RCA, the goal is to use them as mineral addition. A characterization work show that the recycled powder is porous, thus a theoretical model and an experimental methodology allowing to estimate this porosity are developed. Finally, a comparison between mortar made with a limestone powder, and a recycled powder are compared. The results show that the recycled powder can be used as mineral additive in mortar composition.