



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific
Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Abdelhamid Ibn Badi's University of
Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Department of Civil Engineering



N° d'ordre : M/GC/2022

Mémoire de Master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Élaboration d'un liant à base des fines recyclées

Présenté par :

- BENMENAOUER Bouasria
- BENSALIAH Tahar El amine

Présidente : BELAS Nadia Professeure UMAB Mostaganem.

Examineur : BELARIBI Omar M.C. A UMAB Mostaganem.

Encadrant : MEBROUKI Abdelkader Professeur UMAB Mostaganem.

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Un grand merci à notre encadrant, le Professeur MEBROUKI Abdelkader. Nous lui adressons toute notre reconnaissance pour ses réflexions scientifiques et ses nombreux conseils qui ont contribué au bon avancement de ce travail. Nous avons particulièrement apprécié sa disponibilité son soutien.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à chacun des membres du jury, Professeure BELAS et Docteur BELARIBI pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions sincèrement Monsieur, Monsieur KHLIFA Belkacem Responsable du laboratoire sol et géotechnique ainsi que Monsieur EDEBI Brahim Responsable du laboratoire matériaux pour leur disponibilité et conseils.

Nous remercions Mademoiselle GUERZOU Torkia et Mademoiselle MOSTEFA Fouzia qui nous ont conseillé et orienté par leurs remarques au cours du déroulement de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier tous les Enseignants du Département de Génie civil qui ont contribué à notre formation.

Résumé

Ce travail entre dans le cadre de préparation d'un Master académique en Génie civil.

Les granulats des bétons recyclés ont fait l'objet de plusieurs études, ils sont utilisés pour diminuer la consommation des ressources naturels (sables et graviers).

Le présent travail concerne l'utilisation des fines de granulats de bétons recyclés (FGBR) en substitution au ciment pour constituer un liant hydraulique, les taux choisis sont 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50% et 60%. Des mortiers sont confectionnés sur lesquels des essais à l'état durci sont effectués (Résistances mécaniques, pertes de masses et absorption capillaires).

Les résultats obtenus ont montré que les mortiers à base (FGBR) peuvent être substitués au ciment et le liant ainsi obtenu produit des résistances équivalentes à celles des mortiers de référence composé de 100% de ciment.

Mots clés : (FGBR) – substitution – Résistances – absorption – Perte de masse.

Abstract

This work is part of the preparation of an academic Master in Civil Engineering.

Recycled concrete aggregates have been tested the subject of several studies, they are used to reduce the consumption of natural resources (sand and gravel).

The present work concerns the use of the fines of recycled concrete aggregates (FRCA) in substitution of cement to constitute a hydraulic binder, the chosen rates are 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50% and 60%. Mortars are made on which tests in the hardened state are carried out (mechanical resistances, losses of masses and capillary absorption).

The results obtained showed that base mortars (FGBR) can be substituted for cement and the resulting binder produces resistance equivalent to that of reference mortars composed of 100% cement.

Key words: (FRCA) - substitution - resistances - absorption - mass loss.

ملخص

هذا العمل جزء من إعداد ماجستير أكاديمي في الهندسة المدنية.

كانت نواعم الخرسانة المعاد تدويرها موضوع العديد من الدراسات، وهي تستخدم لتقليل استهلاك الموارد الطبيعية (الرمل والحصى).

يتعلق العمل الحالي بتحليل نواعم الخرسانة المعاد تدويرها (FGBR) وجعله كبديل للأسمنت لتشكيل رابط هيدروليكي، اعتمدت الدراسة التجريبية على عدة معدلات الاستبدال وهي 5%، 10%، 15%، 20%، 25%، 30%، 40%، 50% و60%. يتم إجراء الاختبارات الملاط في الحالة الصلبة (المقاومة الميكانيكية وفقدان الكتلة والامتصاص الشعري).

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن نواعم الخرسانة المعاد تدويرها (FGBR) يمكن استبدالها بالإسمنت وأن الرابط الذي تم الحصول عليه ينتج ما يعادل مقاومة الملاط المرجعية المكونة من 100% من الأسمنت.

الكلمات المفتاحية: نواعم الخرسانة المعاد تدويرها - معدل الاستبدال - المقاومة الميكانيكية - الامتصاص الشعري - فقدان الكتلة.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	15
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	17
<hr/>	
1 INTRODUCTION :.....	18
2 RECYCLAGE DES GRANULATS DE BETON	18
2.1 CARACTERISTIQUES DES GBR.....	21
2.2 TENEUR EN PATE DE CIMENT DANS LES GBR	22
3 MASSE VOLUMIQUE, POROSITE ET ABSORPTION D’EAU :	24
3.1 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE (PABS) D’UN MATERIAU :	24
3.2 LE COEFFICIENT D’ABSORPTION D’EAU (WA) DES GRANULATS EST DETERMINE SUIVANT LA NORME EN 1097-6(E. 1097-6, 2013) :	25
3.3 LA VALEUR DE L’ABSORPTION DE L’EAU (WA).....	25
3.4 SATURATION ET CINETIQUE D’ABSORPTION DANS L’EAU ET DANS LA PATE DES GBR	31
4 EFFET DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRANULATS SUR L’ETAT FRAIS DES BETONS ET DES MORTIERS :	33
5 UTILISATION DES GBR COMME ADDITION MINERALE DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL :	33
6 UTILISATION DES GBR COMME ADDITION MINERALE DANS LA FABRICATION DU BETON OU DU MORTIER :	34
7 UTILISATION D’UN SABLE NATUREL MODELE POUR LA COMPREHENSION DU COMPORTEMENT A L’ETAT FRAIS ET DURCI D’UN MORTIER FABRIQUE AVEC UN SABLE RECYCLE :	35
7.1 PREPARATION DES SABLES (RECYCLE ET NATUREL) :	35
7.1.1MATERIAUX NATURELS UTILISES :	35
7.1.2PREPARATION DU BETON :	38
7.1.3PREPARATION DU SABLE RECYCLE	39
7.1.4PREPARATION DES SABLES NATURELS MODELES	41
8 CARACTERISATION DES SABLES (RECYCLE ET NATUREL) :	42
8.1 ETUDE MORPHOLOGIQUE :	42
8.2 MESURE DE L’ABSORPTION D’EAU DES SR ET DES SN :	44
8.3 MESURE DE COMPACITE :	50
9 ÉTUDE A L’ETAT FRAIS	51
9.1 COMPOSITION DES MORTIERS DE REFERENCE	51

9.2	PROCEDURE DE MESURE DU SEUIL DE CISAILLEMENT :.....	53
9.3	CONDITIONS DE PRE-SATURATION ET PROCEDURE DE MALAXAGE :	53
9.4	RESULTAT DE SEUIL DE CISAILLEMENT DES DIFFERENTS MORTIERS REALISES :....	56
10	PROPRIETES MECANIQUES	60
11	COMPOSITION DES MORTIERS	60
12	CONCLUSION :	61
	PROBLEMATIQUE & AXES DE RECHERCHE	63
	CHAPITRE II : MATERIAUX & METHODES	65

1	INTRODUCTION :.....	66
2	MATERIAUX :.....	66
2.1	LE CIMENT :	66
2.1.1	COMPOSITION DU CIMENT :	67
2.1.2	CARACTERISTIQUES DU CIMENT :	67
2.2	LES SABLES :	68
2.2.1	ESSAIS SUR GRANULAT :.....	69
3	METHODES :.....	84
3.1	GRANULAT DE BETON RECYCLE :	84
3.2	LE MORTIER :	85
3.2.1	DEFINITION :	85
4	FORMULATION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES :	86
4.1	FORMULATION :	86
5	LE MALAXAGE :.....	86
5.1	LE MODE DE MALAXAGE :.....	86
6	PREPARATIONS DES EPROUVETTES ET DEROULEMENT DES ESSAIS :.....	87
6.1	CONFECTION DES EPROUVETTES :.....	88
6.2	MALAXAGE DU MORTIER :.....	88
6.3	REPLISSAGE ET CONSERVATION DES MOULES :	89
7	ABSORPTION CAPILLAIRE :.....	91
8	DISPOSITIF DE L'ESSAI DE TRACTION PAR LA FLEXION :	93
8.1	TRACTION PAR LA FLEXION TROIS POINTS :	93
8.2	RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION (NF P 15-471) :.....	94
8.2.1	DISPOSITIF DE L'ESSAI	94
9	CONCLUSION :	95

CHAPITRE III : RESULTATS ET ANALYSE..... 96

1	INTRODUCTION :.....	97
2	RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS	97
2.1	TEMPS DE DEBUT ET FIN DE PRISE :.....	97
3	RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS A L'ETAT DURCI :	98
3.1	RESISTANCES MECANQUES (Rc, Rt) :	98
3.1.1	L'EFFET DU GRANULAT RECYCLE DE BETON SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION Rc :	98
3.1.2	L'EFFET DU GRANULAT RECYCLE DE BETON SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION Rt :	110
3.2	EVOLUTION DES RESISTANCES :.....	121
3.3	PERTES DE MASSE :.....	122
3.4	ABSORPTION CAPILLAIRE :.....	123
4	CONCLUSION :.....	129
	CONCLUSION GENERALE.....	131

Liste des Figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

FIGURE I - 1 : PRODUCTION DES GRANULATS DANS LES CARRIERES (HORS RECYCLAGE DIRECT SUR CHANTIER)	19
FIGURE I - 2 : TAUX DE RECYCLAGE DES DECHETS DE CONSTRUCTION ET DEMOLITION EN EUROPE..	21
FIGURE I - 3 : EXEMPLE DE GRANULAT DE BETON RECYCLE (GBR).....	22
FIGURE I - 4 : TENEUR EN MORTIER EN FONCTION DE LA TAILLE DES PARTICULES.....	23
FIGURE I - 5 : TENEUR EN MORTIER EN FONCTION DE L'ABSORPTION D'EAU.	24
FIGURE I - 6 : FORME DU CONE DE SABLE POUR LES DIFFERENTS ETATS (HUMIDE, LEGEREMENT HUMIDE, SATURE SURFACE SECHE ET SEC).....	27
FIGURE I - 7 : ILLUSTRATION DE LA METHODE IFSTTAR.....	28
FIGURE I - 8 : ABSORPTION D'EAU DES FRACTIONS GRANULAIRES DU SABLE RECYCLE.	29
FIGURE I - 9 : COURBE DE SECHAGE D'UN MATERIAU POREUX ; EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU ET DU GRADIENT D'EVAPORATION DE/DT EN FONCTION DU TEMPS	30
FIGURE I - 10 : METHODE HYDROSTATIQUE POUR ETUDIER LA CINETIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GBR.).....	31
FIGURE I - 11 : CINETIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS RECYCLES ET NATURELS.).	32
FIGURE I - 12 : RESISTANCE EN COMPRESSION DES DIFFERENTS MORTIERS REALISES AVEC UN FILLER CALCAIRE.).	35
FIGURE I - 13 : GRANULOMETRIES DU CIMENT ET DU FILLER CALCAIRE.).	36
FIGURE I - 14 : GRANULOMETRIE DES GRANULATS NATURELS.).	37
FIGURE I - 15 : GRANULAT SUPERIEUR A 4MM APRES LE PREMIER CONCASSAGE.).....	40
FIGURE I - 16 : GRANULOMETRIE DES DEUX LOTS OBTENUS DE SABLE RECYCLE.).....	41
FIGURE I - 17 : GRANULOMETRIE DES SABLES OBTENUS APRES CONCASSAGE.).....	42
FIGURE I - 18 : ELONGATIONS OBTENUES POUR LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULAIRES DE SR ET DE SN.).....	43
FIGURE I - 19 : VARIATION DE WA EN FONCTION DE LA SFSA.).....	47
FIGURE I - 20 : VARIATION DE WA EN FONCTION DE LA PERTE DE MASSE ENTRE 105°C ET 475°C.....	47
FIGURE I - 21 : COURBES GRANULOMETRIQUES DU SR AVANT ET APRES UNE SATURATION PREALABLE AVEC WA +5% PENDANT 7 JOURS.).....	49

FIGURE I - 22 : COURBE GRANULOMETRIQUE AVANT ET APRES LE TEST DE COMPACTE.).	51
FIGURE I - 23 : MINI CONE POUR MESURER LA MANIABILITE DU MORTIER.	53
FIGURE I - 24 : PREPARATION DES DIFFERENTS MORTIERS POUR ETUDIER LES MOUVEMENTS D'EAU ENTRE LA PATE ET LE SR.).	55
FIGURE I - 25 : PROCEDURE DE MALAXAGE DES MORTIERS.).	56
FIGURE I - 26 : MANIABILITE DES MORTIERS REALISES AVEC LE SN OU LE SR IMMERGE DANS L'EAU PENDANT 24 HEURES.).	58
FIGURE I - 27 : VARIATION DU SEUIL DE CISAILLEMENT EN FONCTION DU RAPPORT E _{EFF} /P POUR LES DIFFERENTS MORTIERS REALISES AVEC LES DIFFERENTS ETATS DE SATURATION DU SR.	59

Chapitre II : Matériaux & Méthode

FIGURE II - 1 : ÉCHANTILLON DE CIMENT (CPJ CEM II 42.5).	66
FIGURE II - 2 : ÉCHANTILLON DE SABLE MER.	69
FIGURE II - 3 : ÉCHANTILLON DE SABLE CARRIERE.	69
FIGURE II - 4 : TAMISEUSE ELECTRIQUE.	70
FIGURE II - 5 : COURBE D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE SABLE DE MER.	74
FIGURE II - 6 : COURBE D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE SABLE DE CARRIERE.	74
FIGURE II - 7 : COURBE D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE MELANGE DE SABLE.	75
FIGURE II - 8 : FUSEAUX PROPOSES POUR LA GRANULARITE DES SABLES A MORTIERS.	75
FIGURE II - 9 : EPROUVETTES DE L'ESSAI EQUIVALANT DE SABLE.	77
FIGURE II - 10 : ESSAI BLEU METHYLENE.	81
FIGURE II - 11: LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DE SABLE DE MER + DE CARRIERE.	83
FIGURE II - 12 : EXEMPLE D'UN MORTIER.	85
FIGURE II - 13 : MALAXEUR ELECTRIQUE UTILISEE DANS LA FABRICATION DU MORTIER [LABO DE FST GENIE CIVIL MOSTAGANEM].	87
FIGURE II - 14 : LES ETAPES DE MALAXAGE DU MORTIER NORMALISE.	89
FIGURE II - 15 : REMPLISSAGE ET CONSERVATION DES EPROUVETTES DU MORTIER NORMALISE [PHOTOS PRISES AU LABORATOIRE DE RECHERCHE DE FST GENIE CIVIL MOSTAGANEM].	90
FIGURE II - 16 : MONTAGE EXPERIMENTAL POUR L'ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE.	92
FIGURE II - 17 : DISPOSITIF DE L'ESSAI MECANIQUE DE RUPTURE PAR FLEXION.	93
FIGURE II - 18 : DISPOSITIF DE L'ESSAI MECANIQUE DE RUPTURE PAR FLEXION (3 POINTS)	94

CHAPITRE III : RESULTAT & ANALYSE.

FIGURE III - 1 : DEBUT ET FIN DE PRISE DES CIMENTS COMPOSES.	98
FIGURE III - 2 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER TEMOIN HISTOGRAMME.	99
FIGURE III - 3 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER TEMOIN COURBE.	99
FIGURE III - 4 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 5% FGBR HISTOGRAMME.	100
FIGURE III - 5 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 5% FGBR COURBE.	100
FIGURE III - 6 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 10 % FGBR HISTOGRAMME.	101
FIGURE III - 7 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 10 % FGBR COURBE.	101
FIGURE III - 8 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIERS 15% DE FGBR HISTOGRAMME.	102
FIGURE III - 9 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 15 % DE FGBR COURBE.	102
FIGURE III - 10 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIERS 20% DE FGBR HISTOGRAMME.	103
FIGURE III - 11 : : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 20 % DE FGBR COURBE.	104
FIGURE III - 12 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 25 % DE FGBR HISTOGRAMME	105
FIGURE III - 13 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 25 % DE FG BR COURBE.	105
FIGURE III - 14 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 30 % DE FGBR HISTOGRAMME.	106
FIGURE III - 15 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 30 % DE FGBR COURBE.	106
FIGURE III - 16 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 40 % DE FGBR HISTOGRAMME.	107
FIGURE III - 17 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 40 % DE FGBR COURBE.	107
FIGURE III - 18 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DE MORTIER 50 % DE FGBR HISTOGRAMME.	108

FIGURE III - 19 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION R_C DE MORTIER 50 % DE FGBR GRAPHE.	108
FIGURE III - 20 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION R_C DE MORTIER 60 % DE FGBR HISTOGRAMME.	109
FIGURE III - 21 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION R_C DE MORTIER 60 % DE FGBR COURBE.	109
FIGURE III - 22 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER TEMOIN HISTOGRAMME.	110
FIGURE III - 23 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER TEMOIN COURBE.	110
FIGURE III - 24 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 5% FGBR HISTOGRAMME.	111
FIGURE III - 25 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 5% FGBR COURBE.	111
FIGURE III - 26 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 10% FGBR HISTOGRAMME.	112
FIGURE III - 27 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 10% FGBR COURBE.	112
FIGURE III - 28 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIERS 15% DE FGBR HISTOGRAMME.	113
FIGURE III - 29 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 15 % DE FGBR COURBE.	113
FIGURE III - 30 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIERS 20% DE FGBR HISTOGRAMME.	114
FIGURE III - 31 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 20 % DE FGBR COURBE.	114
FIGURE III - 32 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 25 % DE FGBR HISTOGRAMME	115
FIGURE III - 33 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 25 % DE FGBR COURBE.	115
FIGURE III - 34 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 30 % DE FGBR HISTOGRAMME.	116
FIGURE III - 35 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION R_T DE MORTIER 30 % DE FGBR COURBE.	116

FIGURE III - 36 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 40 % DE FGBR HISTOGRAMME.	117
FIGURE III - 37 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 40 % DE FGBR COURBE.	118
FIGURE III - 38 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 50 % DE FGBR HISTOGRAMME.	119
FIGURE III - 39 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 50 % DE FGBR GRAPHE.	119
FIGURE III - 40 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 60 % DE FGBR HISTOGRAMME.	120
FIGURE III - 41 : LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION RT DE MORTIER 60 % DE FGBR COURBE.	120
FIGURE III - 42 : ÉVOLUTIONS DES RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MORTIERS.	121
FIGURE III - 43 : PERTES DES MASSES DES MORTIERS (LOT 1).	122
FIGURE III - 44 : PERTES DES MASSES DES MORTIERS (LOT 2).	123
FIGURE III - 45 : CA DES MORTIERS DE REFERENCE.	124
FIGURE III - 46 : CA DES MORTIERS AVEC 5% DE FGBR.	124
FIGURE III - 47 : CA DES MORTIERS AVEC 10% DE FGBR.	125
FIGURE III - 48 : CA DES MORTIERS AVEC 15% DE FGBR.	125
FIGURE III - 49 : CA DES MORTIERS AVEC 20% DE FGBR.	126
FIGURE III - 50 : CA DES MORTIERS AVEC 25% DE FGBR.	126
FIGURE III - 51 : CA DES MORTIERS AVEC 30% DE FGBR.	127
FIGURE III - 52 : CA DES MORTIERS AVEC 40% DE FGBR.	127
FIGURE III - 53 : CA DES MORTIERS AVEC 50% DE FGBR.	128
FIGURE III - 54 : CA DES MORTIERS AVEC 60% DE FGBR.	128

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

TABLEAU I - 1 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRANULATS NATURELS UTILISES.	37
TABLEAU I - 2 : COMPOSITION DU BETON UTILISE POUR LA PRODUCTION DU SABLE RECYCLE (MODELE).	38
TABLEAU I - 3 : CARACTERISTIQUE DU BETON UTILISE POUR LA PRODUCTION DU SABLE RECYCLE (MODELE).	39
TABLEAU I - 4 : COEFFICIENTS D'ABSORPTION D'EAU MESURES DANS LES DIFFERENTS ETATS DE SATURATION DU SR).....	48
TABLEAU I - 5 : MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE, REELLE ET ABSORPTION D'EAU DU SR ET DU SN.).	50
TABLEAU I - 6 : COMPOSITION DES MORTIERS POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT A L'ETAT FRAIS).	52
TABLEAU I - 7 : COMPARAISON DES VISCOSITES RELATIVES DES MORTIERS DE SR ET DE SN.).	52
TABLEAU I - 8 : RESULTATS OBTENUS A L'ETAT FRAIS POUR LES DIFFERENTS ETATS DE SATURATION DU SR AINSI QUE POUR LE SN.).	57
TABLEAU I - 9 : COMPOSITIONS DES MORTIERS POUR REALISER L'ETUDE A L'ETAT DURCI. ...	61

Chapitre II : Matériaux & Méthode.

TABLEAU II - 1 : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE DU CIMENT.	67
TABLEAU II - 2 : CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU CIMENT.....	68
TABLEAU II - 3 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE DE CARRIERE.....	71
TABLEAU II - 4 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE SABLE DE MER.	72
TABLEAU II - 5 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE MELANGE DE SABLE.	73
TABLEAU II - 6 : RESULTAT ET QUALITE DE SABLE.....	79
TABLEAU II - 7 : ESSAI D'EQUIVALANT DE SABLE DE CARRIERE + SABLE DE MER.	80
TABLEAU II - 8 : ESSAI AU BLEU DE METHYLENE DE SABLE DE MER.	82
TABLEAU II - 9 : ESSAI AU BLEU DE METHYLENE DE SABLE DE CARRIERE.	83
TABLEAU II - 10 : RESULTAT D'ESSAI DE LA MASSE VOLUMIQUE SABLE DE MER + DE CARRIERE.	84
TABLEAU II - 11 : : RESULTAT D'ESSAI DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (MVA) ET ABSOLUE OU REELLE (MVR) DES FINES BROYEES.	84
TABLEAU II - 12 : LA FORMULATION DES MORTIERS.	86
TABLEAU II - 13 : EXPLICATION POUR METTRE UN MALAXAGE ENTRE CIMENT ET SABLE.....	87

Introduction générale

Le recours à des matériaux de remplacement tels que les déchets naturels ou industriels, aux matériaux de construction conventionnel est devenu nécessaire. La préservation des ressources naturelles, la diminution des émissions de CO₂ dans l'air sont des objectifs souhaitables à atteindre dans toutes les études de valorisation de déchets dans les constructions actuelles.

Dans ce contexte, plusieurs études ont été faites sur l'intégration des granulats issus des bétons de démolition qui sont recyclés et sont utilisés en remplacement d'une partie des granulats entrant dans la confection des bétons ordinaires ou spéciaux.

Le présent travail vient compléter les rares travaux sur les fines de granulats de bétons recyclé (FGBR) utilisées comme remplacement d'une partie de sable (effet physique de remplissage). Notre recherche se démarque par l'utilisation des fines n remplacement d'une partie de ciment et savoir s'il est possible de fabriquer un liant avec lequel seront confectionnés des mortiers (mini-bétons) de résistances acceptables dans le domaine de la construction.

Ce mémoire sera composé de trois principaux chapitres pour répondre à la possibilité d'intégrer les (FGBR) de finesse équivalente à celle du ciment, comme liant.

Au premier chapitre seront données les principales sur les granulats recyclés, leur utilisation et leurs caractéristiques. On en parlera aussi des capacités des granulats recyclés à absorber l'eau ainsi que leur intégration comme substitution à différents taux aux granulats naturels. Quelques études sur ces granulats seront montrées ainsi que leur influence sur les caractéristiques des bétons.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des matériaux utilisés pour la confection des mortiers qui vont servir à la détermination des caractéristiques à l'état frais puis à l'état durci. A la suite de l'identification des matériaux, les méthodes des essais à entreprendre seront présentées, suivies de la composition des différents mortiers à confectionner au laboratoire ainsi que le programme expérimental à faire.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation de l'ensemble des essais effectués sur les différents mortiers. Dans ce chapitre, les résultats seront affichés sous forme de courbes et d'histogrammes afin de montrer clairement l'influence des fines de granulats recyclés utilisées avec le ciment pour préparer le liant. Les caractéristiques des mortiers à l'état frais et à état durci seront analysées et discutées.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.

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). (Bouarroudj.M, 2020) et (UNICEM, 2008).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Selon une étude de l'UNICEM (UNICEM,2018), 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 I -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.

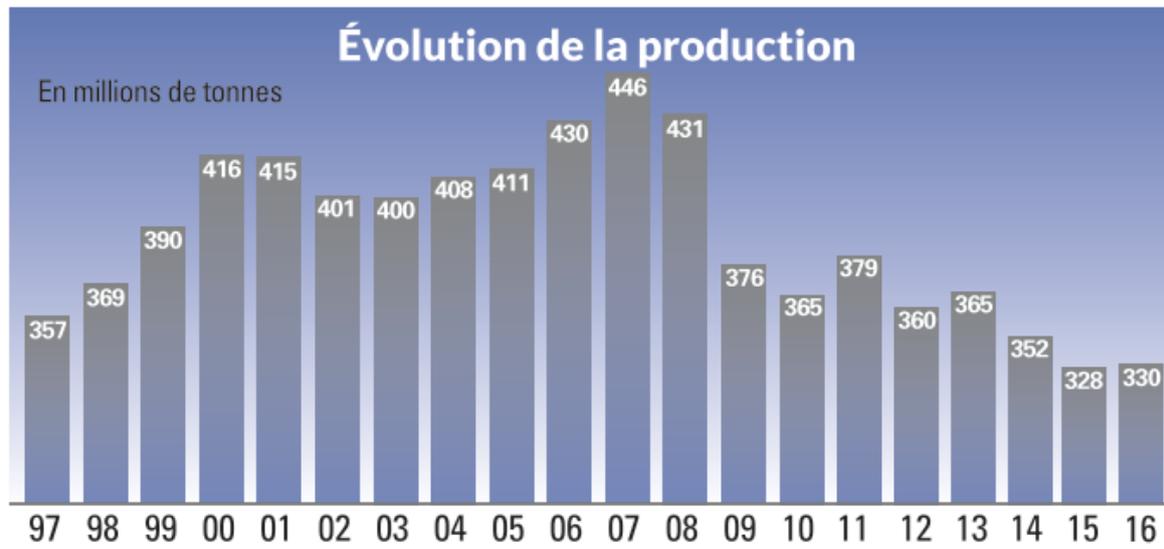


Figure I - 1: Production des granulats dans les carrières (hors recyclage direct sur chantier) (UNICEM , 2018).

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 (UEPG , 2017) 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 (Direction générale de la recherche et de l'innovation, 2013). En Europe, il n'y a que 50% de ces

Chapitre I : Synthèse bibliographique

déchets qui sont valorisés (Villoria Saez .P , 2011).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% (Villoria Saez .P , 2011). (Figure I-2).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

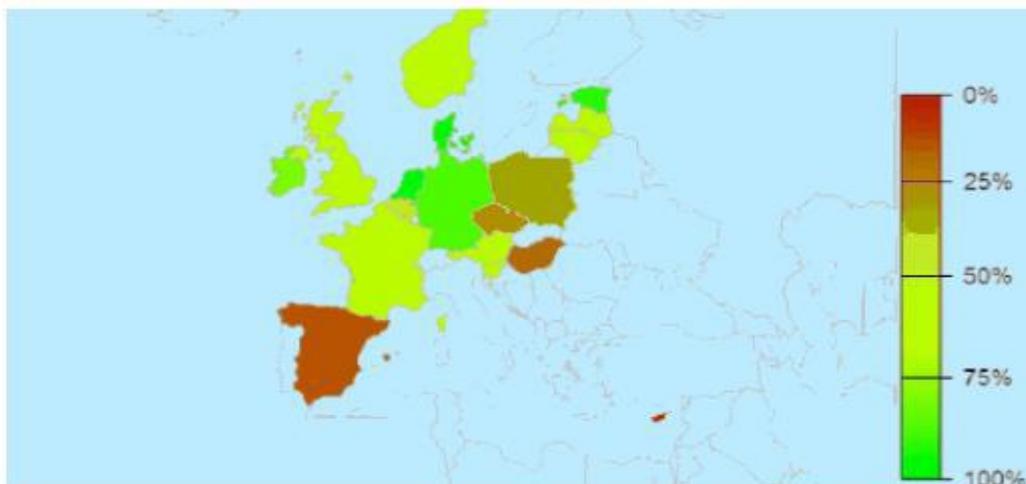


Figure I - 2 : Taux de recyclage des déchets de construction et démolition en Europe.
(Villoria Saez .P , 2011).

En Asie, le Japon est le pays qui recycle le plus avec un taux de recyclage de 96% des déchets de C&D (Sato .R et al, 2007), contrairement à la Chine où la notion de recyclage en général est très peu présente (Zhao .Z, 2013).

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 granulats qui met en péril les ressources naturelles. En 2002, aux États-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 (Le .T, 2015).

2.1 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 I -3). La différence entre un GBR et un granulats naturels réside essentiellement dans cette pâte adhérente (Figure I - 3).

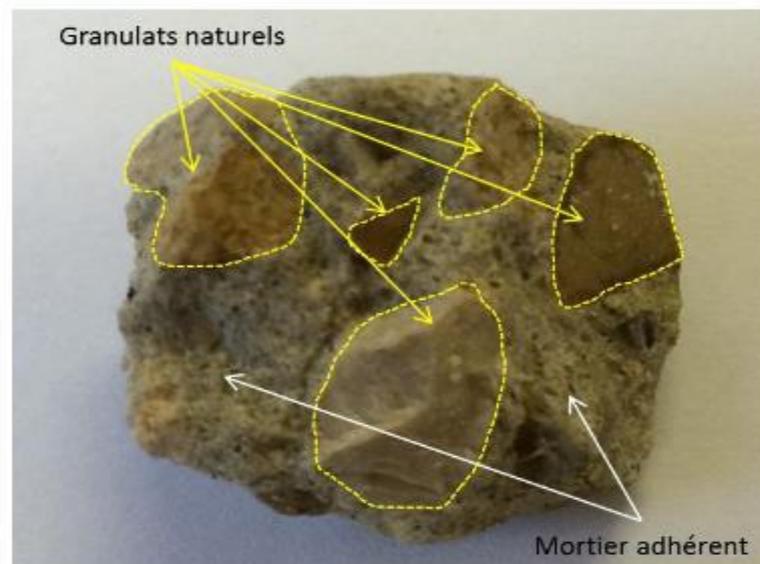


Figure I - 3 : Exemple de granulats de béton recyclé (GBR). (Bouarroudj.M, 2020)

2.2 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 (www.pnrecybeton.fr, 2012).

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 (De Juan .M.S & Gutiérrez P.A, 2009) 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 granulats recyclés d'origine et le granulats grossier obtenu. Pour les sables recyclés, (Zhao .Z et al, 2013) et (Le et al, 2016) Ont développé une méthode thermique qui consiste à mesurer la différence de perte

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 (Nagataki .S et al, 2004) : 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 (Abbas .A et al, 2009) : 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 .M.S & Gutiérrez P.A, 2009) 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).

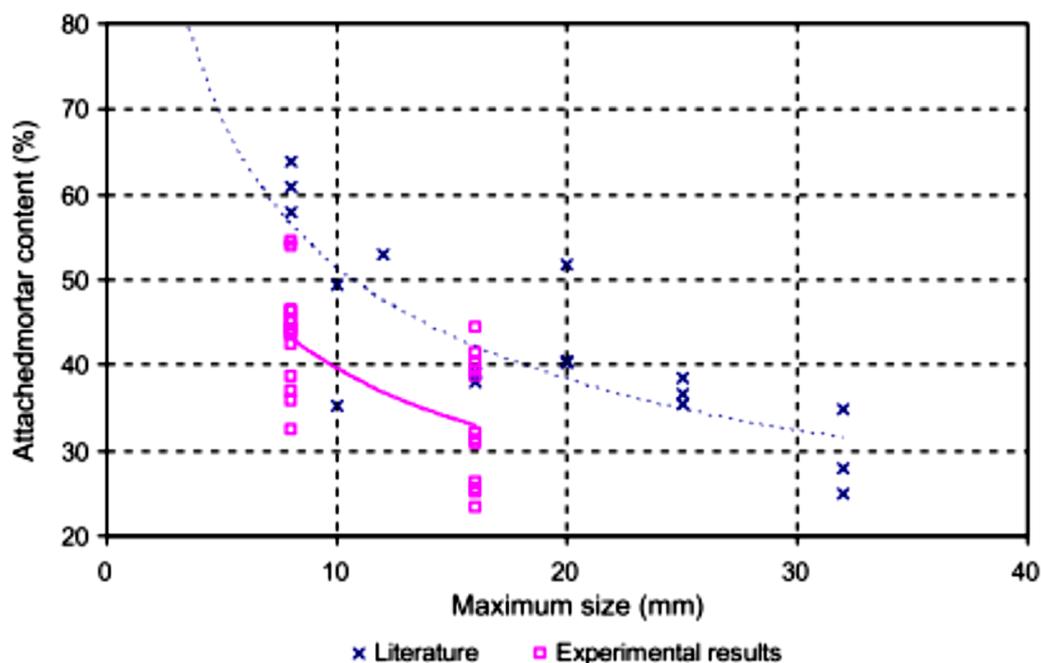


Figure I - 4 : Teneur en mortier en fonction de la taille des particules. (De Juan .M.S & Gutiérrez P.A, 2009).

La pâte de ciment adhérente dans le GBR est responsable de l'absorption d'eau élevée, comparée à celle des granulats naturels. (De Juan .M.S & Gutiérrez

Chapitre I : Synthèse bibliographique

P.A, 2009) 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 I -5).

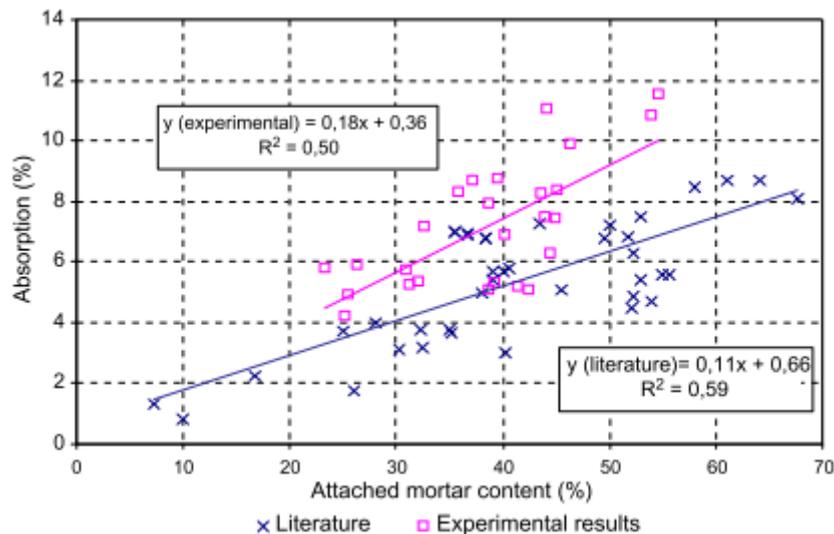


Figure I - 5 : Teneur en mortier en fonction de l'absorption d'eau. **(De Juan .M.S & Gutiérrez P.A, 2009)**

(Zhao .Z et al, 2013) 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.

3 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.

3.1 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans les grains ; cette valeur est obtenue suivant la norme européen NF EN 1097-6 (E. 1097-6, 2013).

(Zhang et al, 1992) 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 (Rodrigues .F et al, 2013).

3.2 Le coefficient d'absorption d'eau (WA) des granulats est déterminé suivant la norme EN 1097-6(E. 1097-6, 2013) :

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 (Bordy . A et al, 2016). Le coefficient d'absorption d'eau (WA) est calculé suivant (eq.1-1).

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

3.3 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 :

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

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 (Omary .S et al, 2016). Il a été prouvé que la pâte de ciment est plus concentrée dans les particules fines que dans les particules grossières (Zhao .Z et al, 2013) : 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(E. 1097-6, 2013) 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 I -6).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

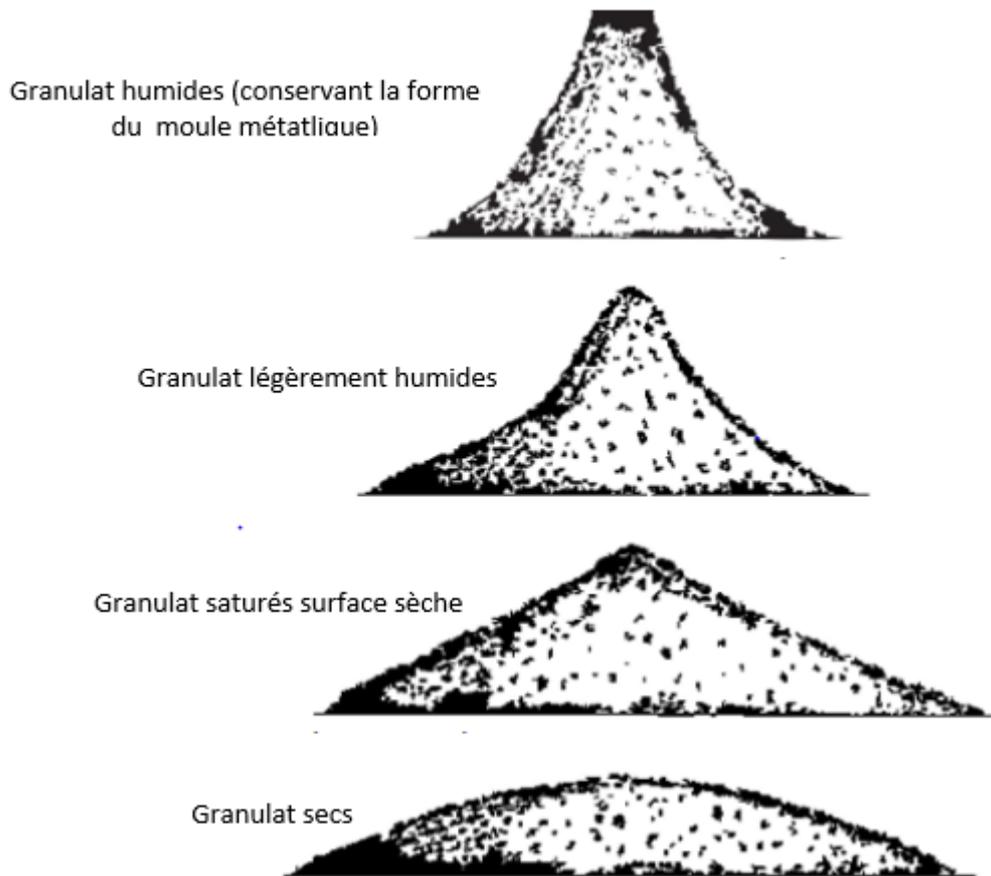


Figure I - 6 : Forme du cône de sable pour les différents états (humide, légèrement humide, saturé surface sèche et sec) (E. 1097-6, 2013).

Une deuxième méthode existe. Elle est connue sous le nom de méthode IFSTTAR N78 (IFSTTAR, 2011), 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 I -7).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

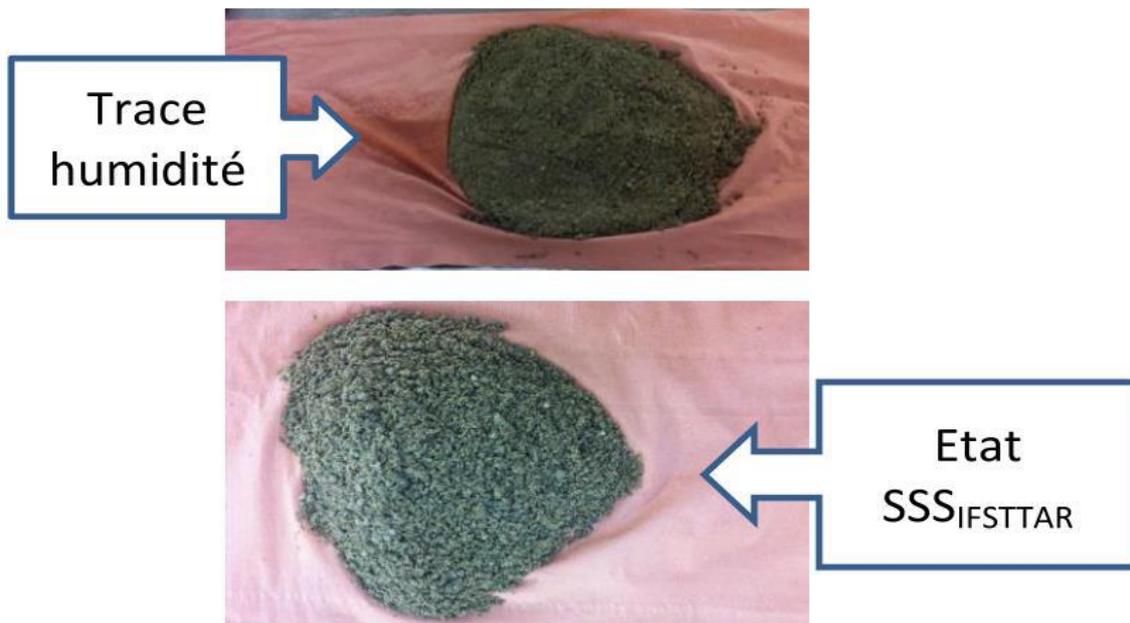


Figure I - 7 : Illustration de la méthode IFSTTAR. (Le .T, 2015)(IFSTTAR, 2011).

(Le .T et al, 2017) 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 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 0,5mm a été remarquée (Figure I -8). (Le .T et al, 2017) ont conclu que, pour les particules inférieures à 0,5mm, 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 0,5mm tient au fait qu'il n'est pas possible d'individualiser les grains de cette taille.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

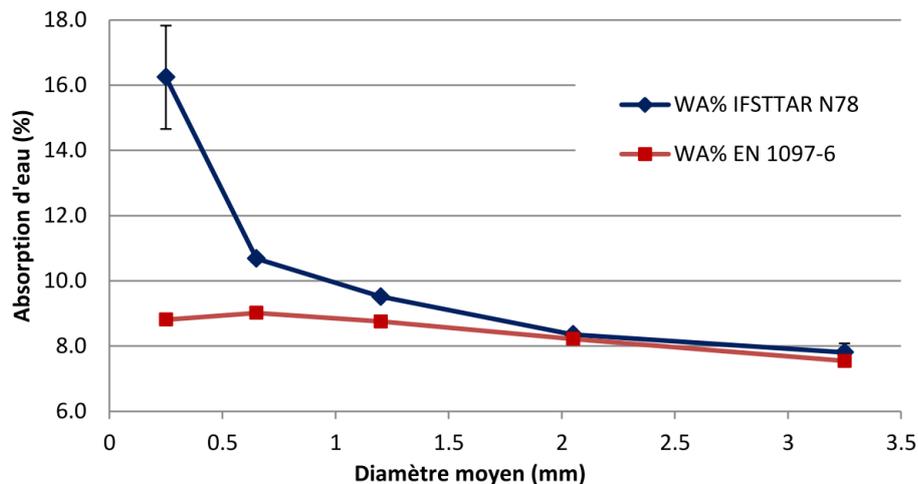


Figure I - 8 : Absorption d'eau des fractions granulaires du sable recyclé. (Le .T, 2015) .

Afin de remédier à cette problématique, (Zhao .Z et al, 2013) 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 .Z et al, 2013) 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 présents.(Mechling .M et al, 2003) 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 régulée 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 I -9) illustre les différentes phases obtenues, ainsi que la manière avec laquelle le point critique peut être déterminé.

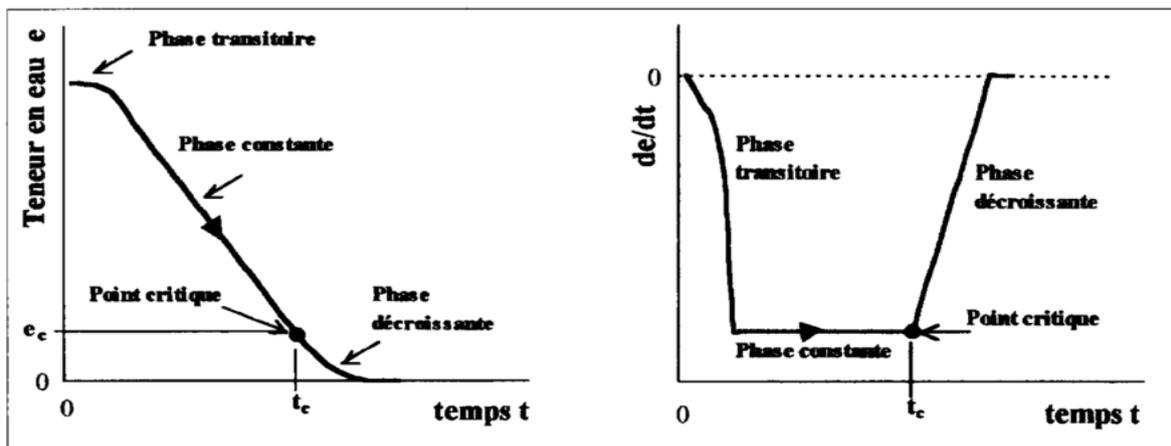


Figure I - 9 : Courbe de séchage d'un matériau poreux ; évolution de la teneur en eau et du gradient d'évaporation de/dt en fonction du temps (Mechling .M et al, 2003) .

(T. Le et al, 2015) 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.

(P. Gentilini et al , 2015) proposent une méthode basée sur la thermodynamique 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 intergranulaire 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

(Tam .V.W.Y et al, 2008) 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 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.

(Tegguer .A.D, 2012) développé une méthode basée sur une pesée hydrostatique pour suivre l'absorption d'eau au cours du temps d'un GBR (Figure I -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 .V.W.Y et al, 2008) 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 .V.W.Y et al, 2008) et (Tegguer .A.D, 2012) sont plus applicables pour les GBR de taille supérieure à 4mm qu'aux GBR de plus petites dimensions.

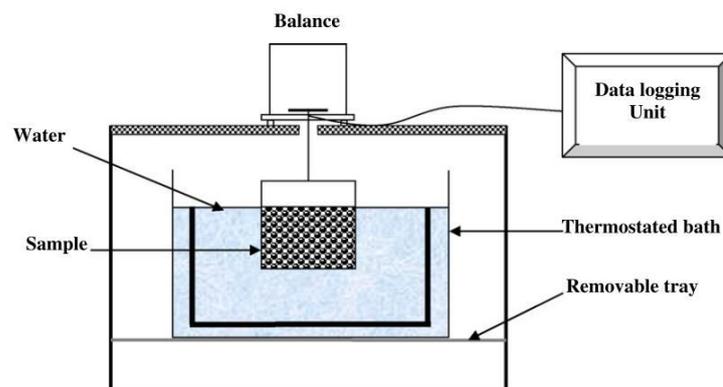


Figure I - 10 : Méthode hydrostatique pour étudier la cinétique d'absorption d'eau des GBR.). (Bouarroudj.M, 2020).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

(Bendimerad .A.Z et al, 2015) ont combiné les méthodes de (Tam .V.W.Y et al, 2008) et de (Tegguer .A.D, 2012) pour suivre la cinétique d'absorption d'eau des GBR. Ils ont étudié deux types de GBR issus d'un béton de démolitions (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 I -11). (Bendimerad .A.Z et al, 2015) ont montré 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.

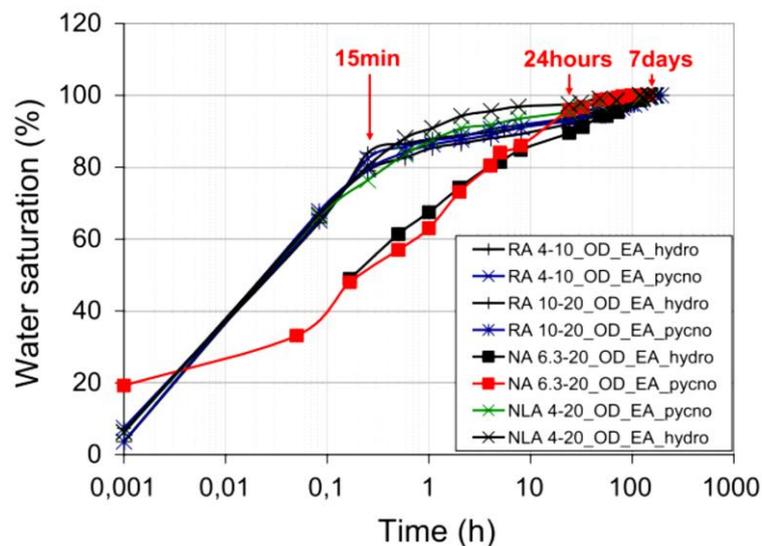


Figure I - 11 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés et naturels.). (Bouarroudj .M, 2020).

(Mills-Beale .J et al, 2009) ont suggéré au lieu de l'immersion sous eau pendant 24 heures, de réaliser une immersion sous vide partiel de 30 mm. Hg (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 .M.-H et al, 1992) 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 dans une étude réalisée sur une fraction de GBR 6,3/10mm trouvent des résultats similaires à ceux de (Mills-Beale .J et al, 2009) et (Zhang .M.-H et al, 1992) .

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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. (Bouarroudj.M, 2020).

5 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 (Kajaste .R et Hurme .M, 2016). 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. (Habert .G et Roussel .N, 2009)(Habert .G et Roussel .N , 2008).

6 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 M.V.A et al, 2014) a 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.

(Oksri-Nelfia .L et al, 2015) a broyé deux types de sable recyclé pour confectionner leur poudre recyclée. 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 .L et al, 2015) a ainsi 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 I - 12). 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.

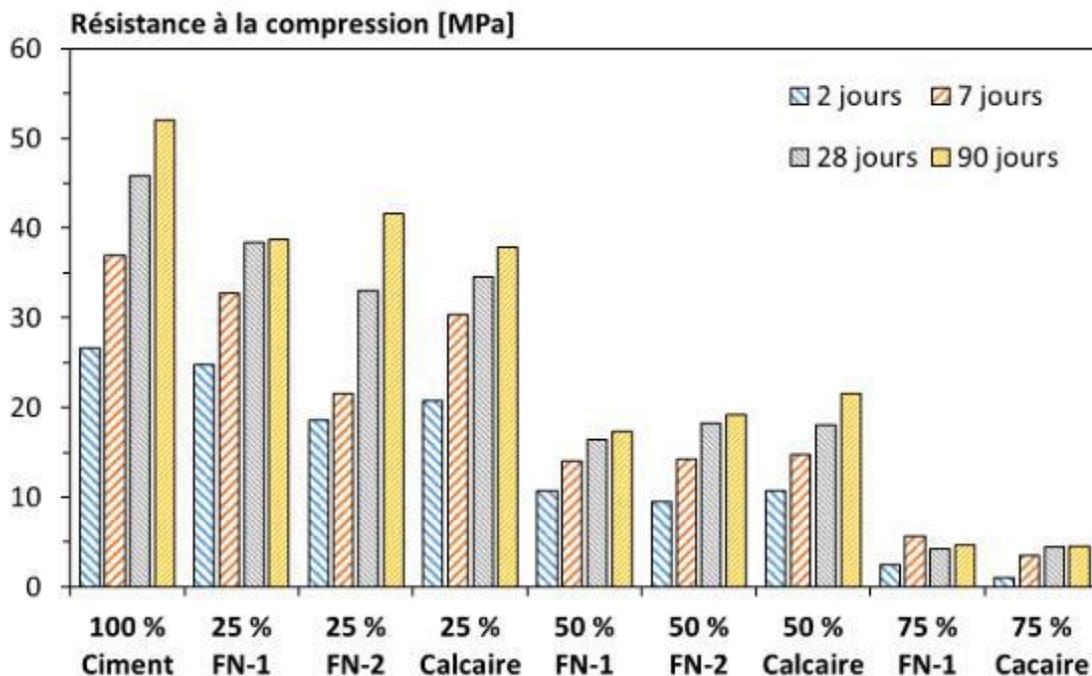


Figure I - 12 : Résistance en compression des différents mortiers réalisés avec un filler calcaire.). (Bouarroudj .M , 2020).

7 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 :

7.1 Préparation des sables (recyclé et naturel) :

7.1.1 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 3,1g/cm³. La surface spécifique, mesurée suivant la norme NF EN 196-6 est de 3850cm²/g. La granulométrie du ciment a été déterminée avec un granulomètre laser (Masterizez 2000) par voie humide, l'essai a été réalisé avec du Propèrol. Les diamètres D10%, D50% et D90 sont respectivement de 2µm, 11µm et 30µm.

Le filler calcaire utilisé dans cette étude est un filler CALCITEC 2001S de l'entreprise Charmeuse. La masse volumique du filler a été mesurée avec un pycnomètre à hélium, elle est de 2,72g/cm³. La surface spécifique a été mesurée

Chapitre I : Synthèse bibliographique

suivant la norme NF EN 196-6. Elle est égale à 3170 cm²/g. Les granulométries du ciment et du filler sont présentées dans la (Figure I – 13).

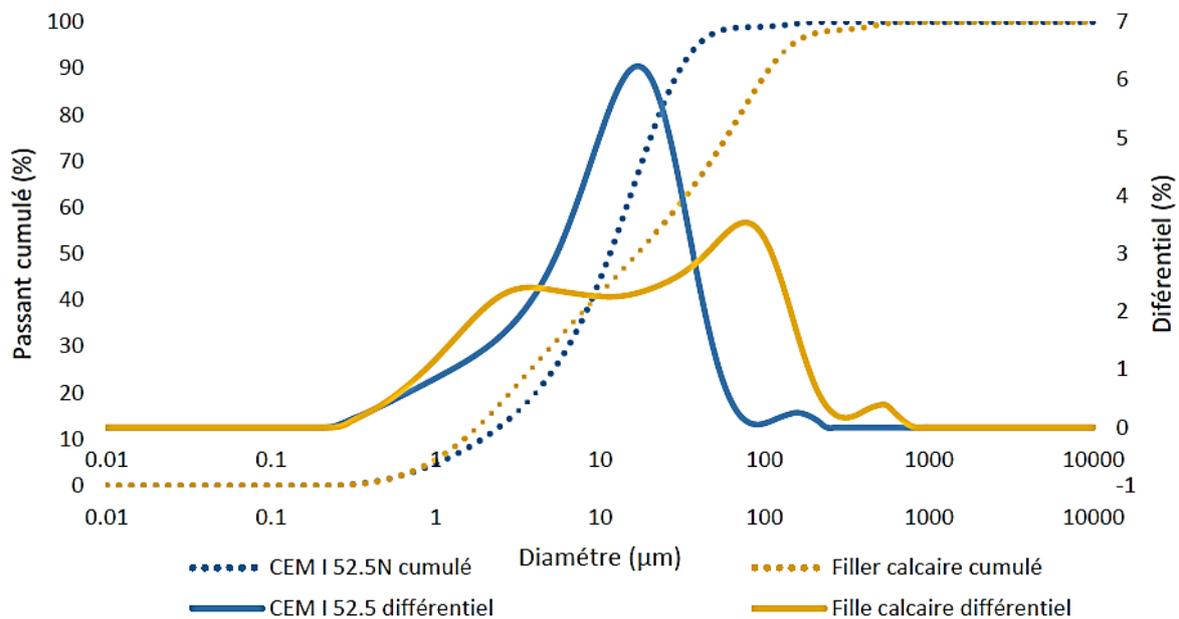


Figure I - 13 : Granulométries du ciment et du filler calcaire.). (**Bouarroudj .M , 2020**).

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 1,1g/cm³.

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 M₂. Le pycnomètre uniquement rempli d'eau (M₃) 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 (M₄).

Enfin, la masse de l'échantillon après séchage à l'étuve à 105°C est déterminée (M₁). 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 :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

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

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

Le tableau I-1 présente les masses volumiques, l'absorption et la porosité des différents matériaux naturels utilisés. La (Figure I-14) présente la distribution granulométrique des différents granulats naturels.

Tableau I - 1 : Caractéristiques physiques des granulats naturels utilisés. (**Bouarroudj .M , 2020**)

	Gravillon (2/7mm)	Gravillon (7/14mm)	Gravillon (14/20mm)	Sable (0/2mm)
ρ absolu (g/cm ³)	2,773	2,724	2,763	2,66
ρ absolu (g/cm ³)	2,677	2,642	2,689	2,564
WA24H	1,30%	1,14%	1%	0,75%

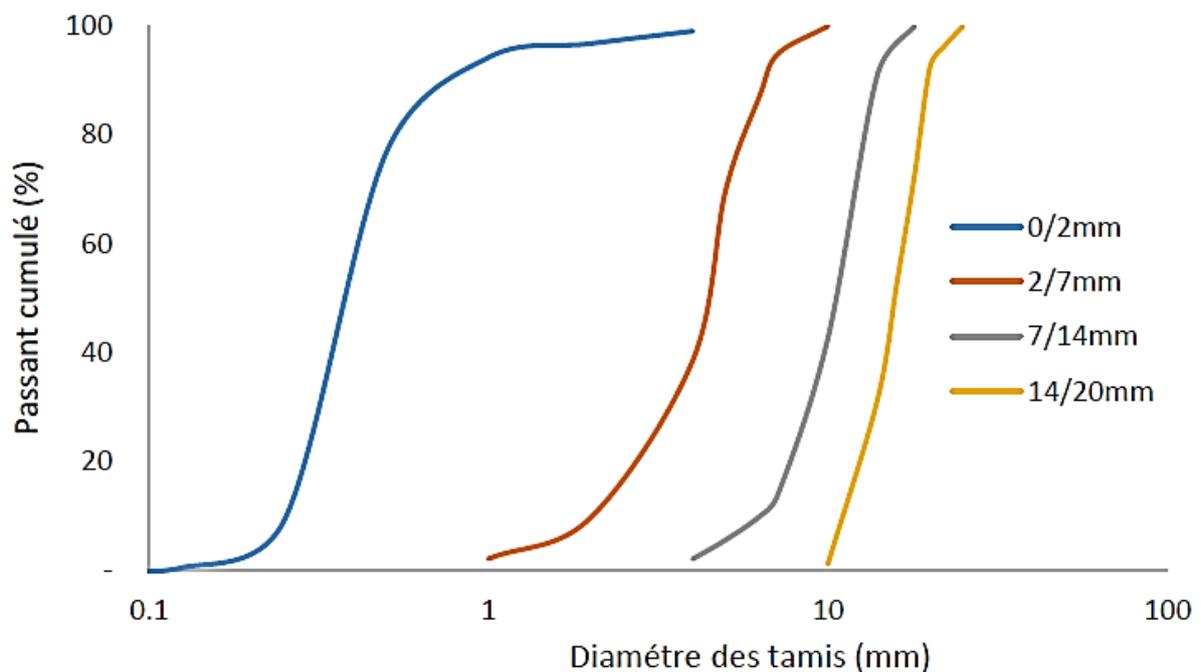


Figure I - 14 : Granulométrie des granulats naturels.). (**Bouarroudj .M , 2020**)

Chapitre I : Synthèse bibliographique

7.1.2 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 I-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 I - 2 : Composition du béton utilisé pour la production du sable recyclé modèle). (**Bouarroudj .M , 2020**)

Ciment (Kg/m ³)	Eau (Kg/m ³)	Gravillon 2/7 (Kg/m ³)	Gravillon 7/14 (Kg/m ³)	Gravillon 14/20 (Kg/m ³)	Sable 0/2 (Kg/m ³)	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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 15×15×15 cm³ et cylindre 16×32 cm³) à vide et remplis de béton.

- A l'état durci, les résistances mécaniques sont mesurées sur des éprouvettes cubiques (15×15×15 cm³) à 90 jours suivant la norme EN 12390-3.

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

Tableau I - 3 : Caractéristique du béton utilisé pour la production du sable recyclé (modèle). (**Bouarroudj .M , 2020**)

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

7.1.3 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 15x15x15 cm³ et cylindre 16×32 cm³ 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 (Figure I - 15) 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure I - 15 : Granulat supérieur à 4mm après le premier concassage.).

(Bouarroudj.M, 2020)

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 I - 16) 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.

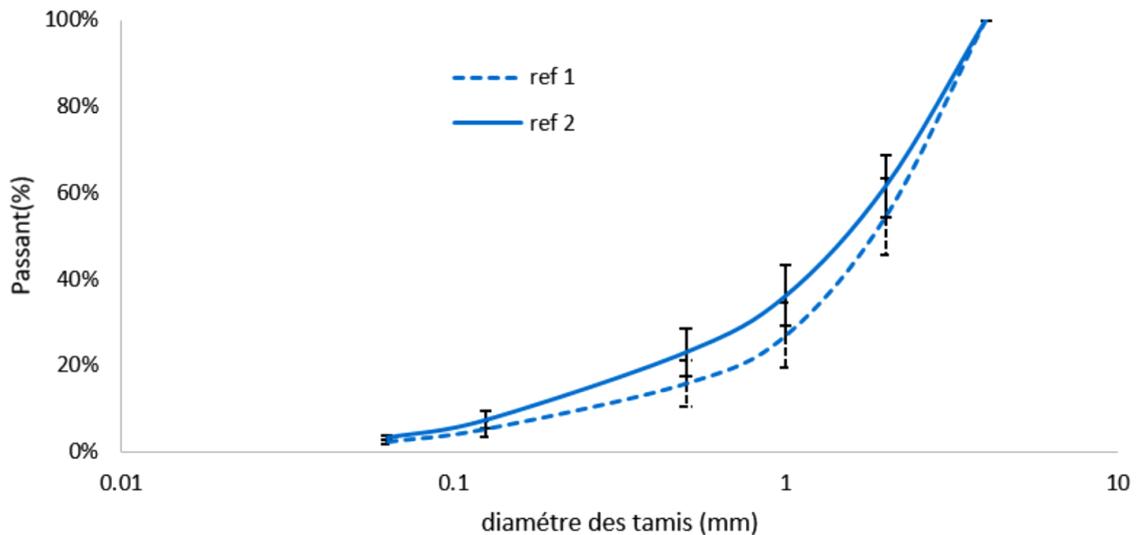


Figure I - 16 : Granulométrie des deux lots obtenus de sable recyclé.). (**Bouarroudj.M , 2020**)

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.

7.1.4 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 I – 17) montre la granulométrie du sable recyclé en comparaison avec celle du sable calcaire. Le sable calcaire contient beaucoup plus de fines que le

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 : 4-2 mm, 2-1 mm, 1-0,5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,125 mm, 0,125-0,063 mm et < 0,063 mm. 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.

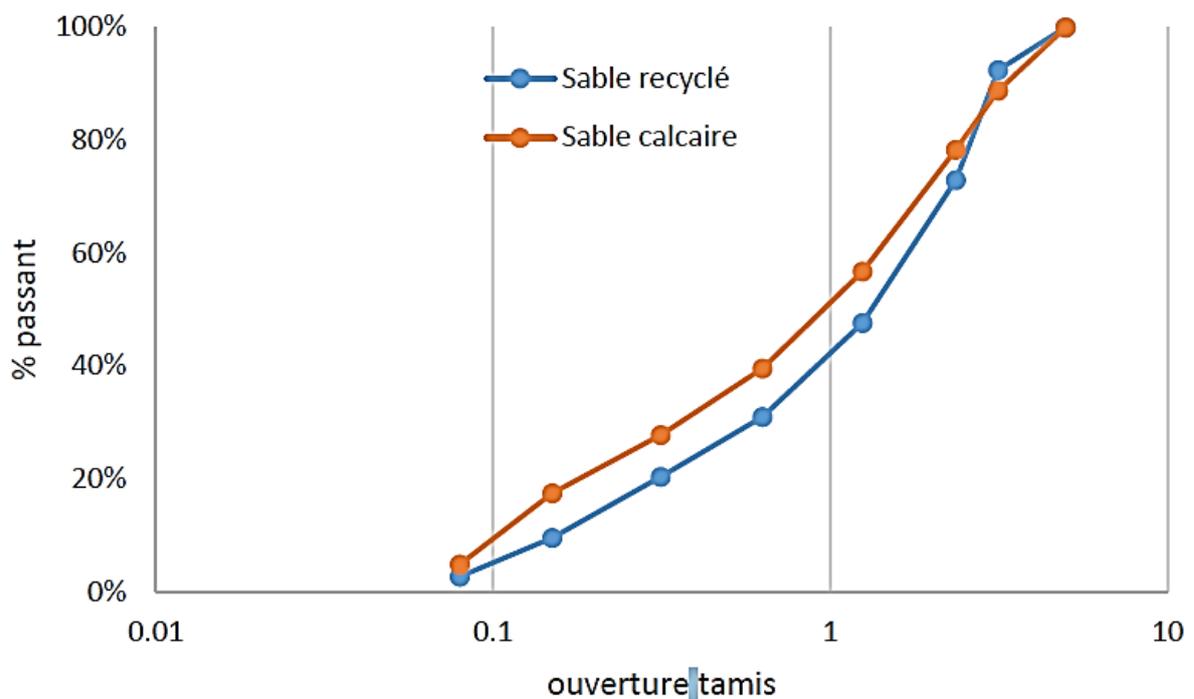


Figure I - 17 : Granulométrie des sables obtenus après concassage.). (Bouarroudj.M , 2020)

8 Caractérisation des sables (recyclé et naturel) :

8.1 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

procédure de préparation 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 la largeur d'un grain. La (Figure I – 18) montre 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.

$$\text{Elongation} = 1 - (L/l) \dots \dots \dots (2-2)$$

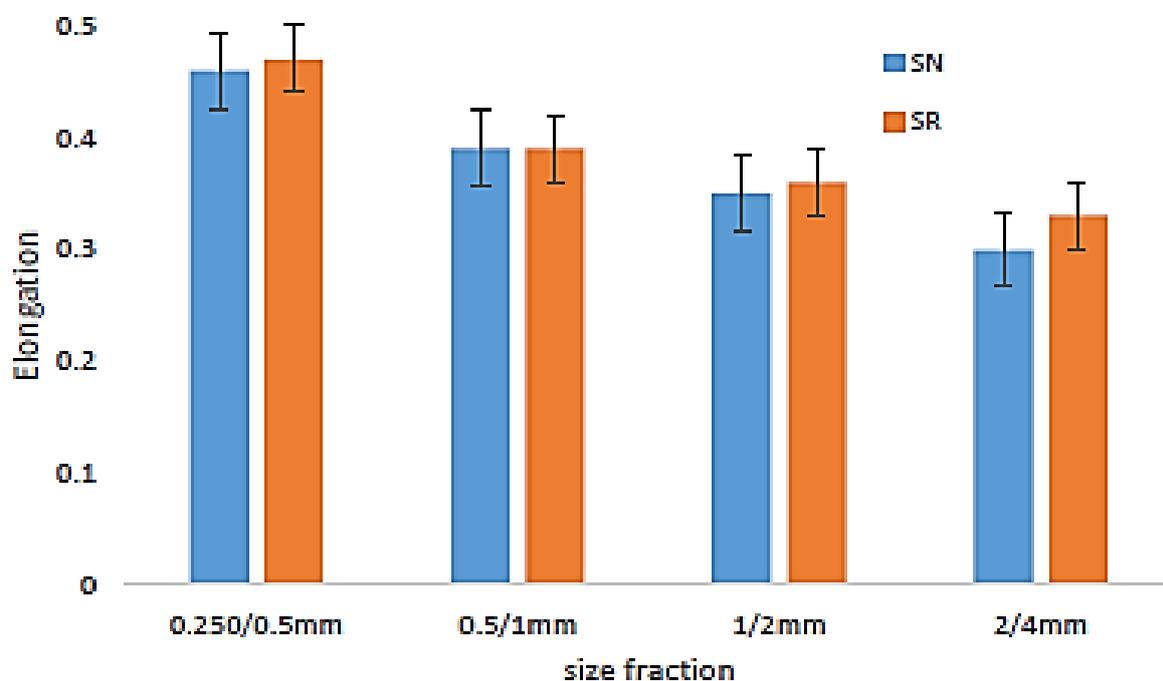


Figure I - 18 : Elongations obtenues pour les différentes fractions granulaires de SR et de SN.). (Bouarroudj.M , 2020)

Chapitre I : Synthèse bibliographique

8.2 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.

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).

$$WA = \frac{(M_{SSS} - M_{Sec})}{M_{Sec}} \dots \dots \dots (2 - 3)$$

(Le .T et al, 2015) 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 .Z et al, 2013) 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 .Z et al, 2013) ont montré que la mesure du coefficient d'absorption d'eau n'est fiable que pour les classes les plus grossières avec la norme

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.

$$WA_{SR} = WA_p \times X_p + WA_{NA}(1 - X_p) \dots \dots \dots (2 - 4)$$

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

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

W_{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. 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 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° (M_{105°C}), par la suite on place l'échantillon à 475°C pendant 24 heures (M_{475°C}). La perte de masse est calculée par (eq.2-5).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

$$ML_{105^{\circ}C475^{\circ}C} = \frac{M_{105^{\circ}C} - M_{475^{\circ}C}}{M_{105^{\circ}C}}$$

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.

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 (Figure I – 19) et (Figure I -20) 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 obtenu après immersion total du SR, ce résultat est similaire à celui présenté.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

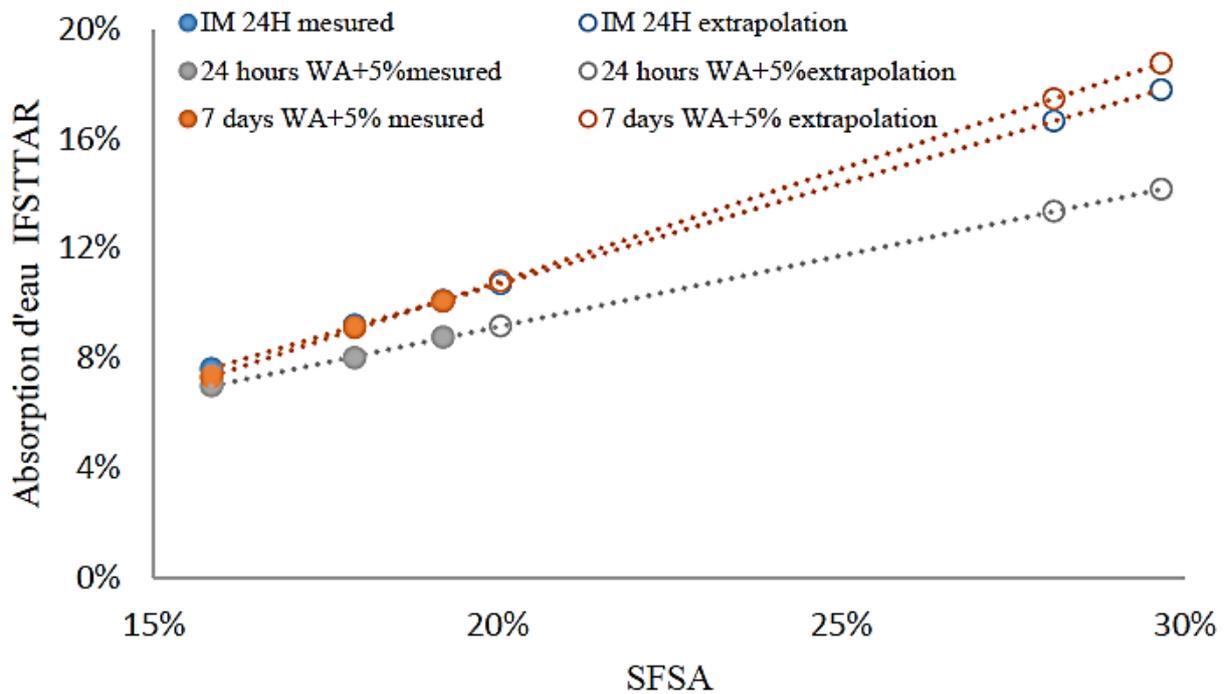


Figure I - 19 : Variation de WA en fonction de la SFSA.). (Bouarroudj.M , 2020)

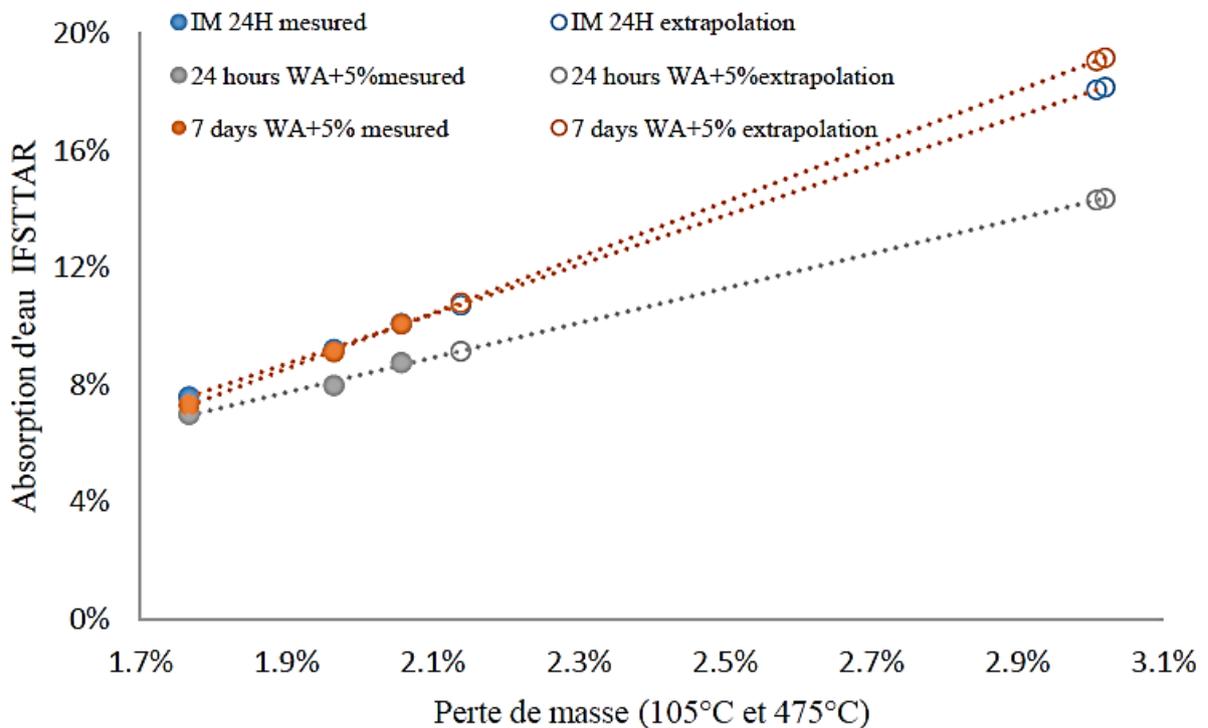


Figure I - 20 : Variation de WA en fonction de la perte de masse entre 105°C et 475°C. (Bouarroudj.M , 2020).

Le tableau I-4 présente les détails des différentes mesures d'absorption d'eau, effectuées dans les différentes conditions d'humidification. On remarque que le

Chapitre I : Synthèse bibliographique

coefficient d'absorption d'eau obtenu avec la méthode par extrapolation en utilisant la perte de masse ou la SFSA est identique.

Tableau I - 4 : Coefficients d'absorption d'eau mesurés dans les différents états de saturation du SR). (Bouarroudj.M , 2020)

	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 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 I -21) 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

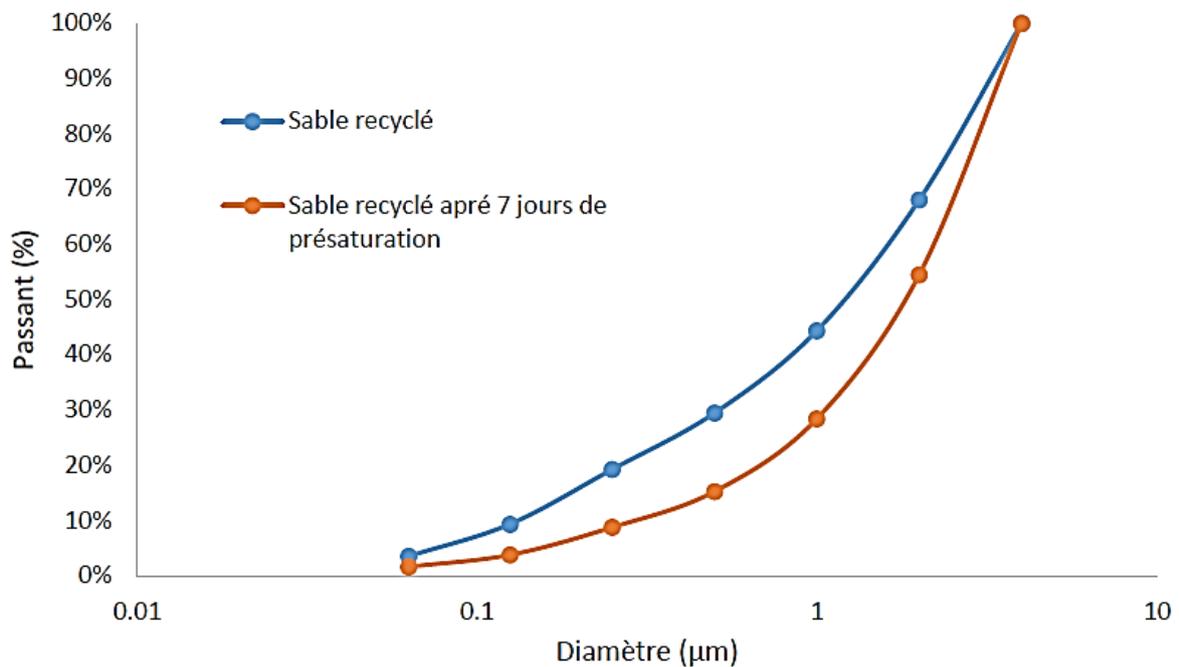


Figure I - 21 : Courbes granulométriques du SR avant et après une saturation préalable avec WA +5% pendant 7 jours.). (Bouarroudj.M , 2020)

L'absorption d'eau du SN a été mesurée sur les granulats 20/32mm avant concassage. Le tableau I-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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

(Bouarroudj.M , 2020)

	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%

8.3 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 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.

$$\Phi_m = \frac{(\rho_{app})}{(\rho)} \dots \dots \dots (2 - 8)$$

La (Figure I -22) 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

granulométrique a été aussi réalisée et a démontré qu'il n'y avait pas de fines générées avec ce second protocole.

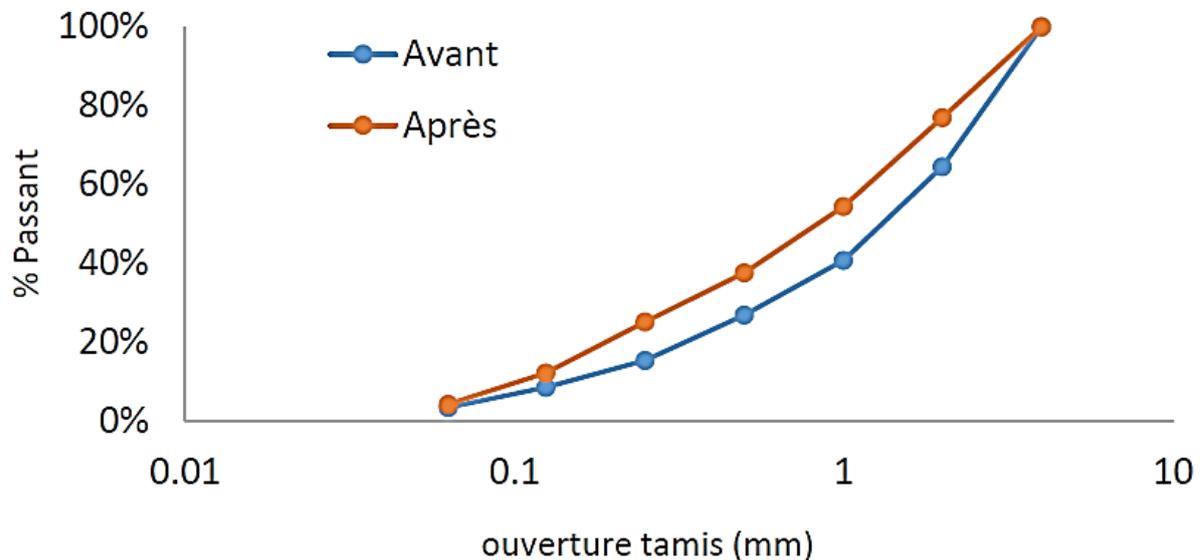


Figure I - 22 : Courbe granulométrique avant et après le test de compacité.).

(Bouarroudj .M , 2020)

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).

9 Étude à l'état frais

9.1 Composition des mortiers de référence

Le tableau I-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 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 états de saturation ont été utilisés pour le SR.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

(Bouarroudj.M , 2020)

	Ciment (g)	Filler calcaire	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 .I et khayat .K.H , 2018) 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.

Le tableau I-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 I - 7 : Comparaison des viscosités relatives des mortiers de SR et de SN.).

(Bouarroudj.M , 2020)

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

9.2 Procédure de mesure du seuil de cisaillement :

L'étalement des mortiers est mesuré par un essai avec un mini cône de dimensions 70X100X60mm³ (Figure I – 31). 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.

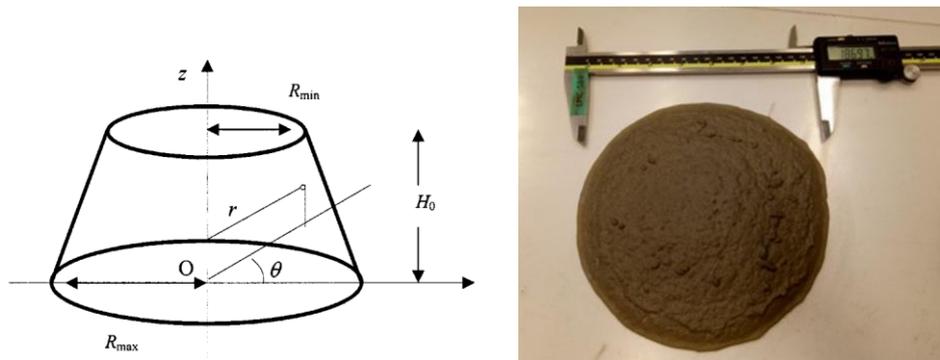


Figure I - 23 : Mini cône pour mesurer la maniabilité du mortier.

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 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 cône (mm³)

9.3 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 .A et Catherine.C , 2000)** .

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. 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).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

La même quantité d'eau a été utilisée pour le mortier avec du SN. La (Figure I - 32) illustre la procédure utilisée pour réaliser les différents mortiers.

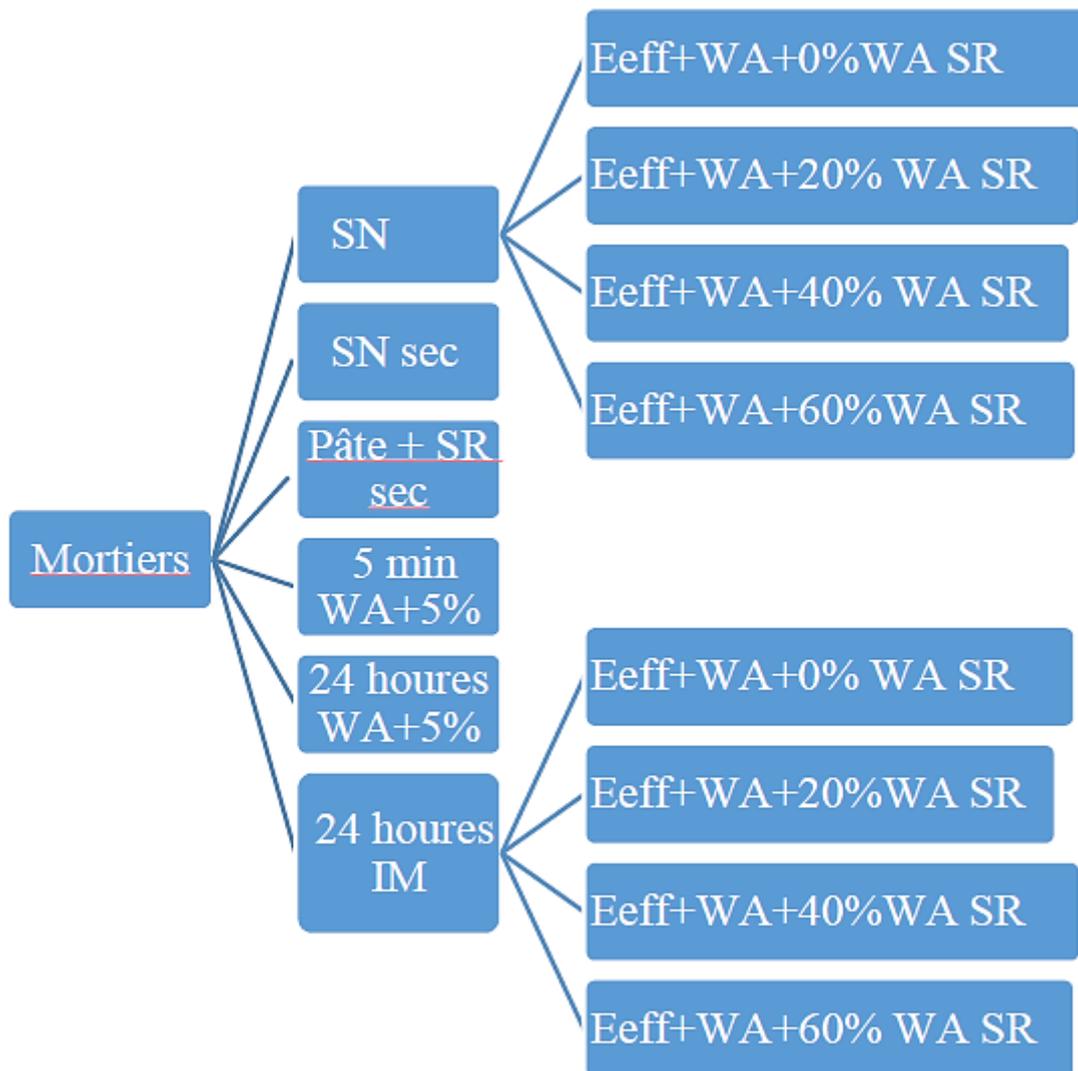


Figure I - 24 : Préparation des différents mortiers pour étudier les mouvements d'eau entre la pâte et le SR.). (Bouarroudj.M , 2020)

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

60 secondes est réalisé, et enfin, 90 secondes de malaxage à grande vitesse sont effectuées. Celui-ci ce qu'affiché dans la (Figure I -25) suivant :

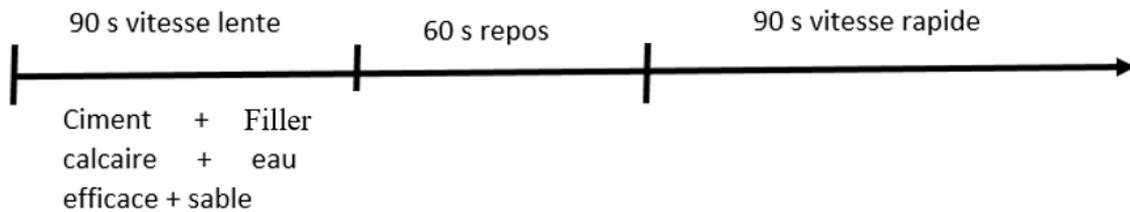


Figure I - 25 : Procédure de malaxage des mortiers.). (Bouarroudj .M . 2020).

9.4 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.

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

changement de granulométrie peut expliquer la chute de maniabilité obtenue pour le SR.

Tableau I - 8 : Résultats obtenus à l'état frais pour les différents états de saturation du SR ainsi que pour le SN.). (Bouarroudj.M , 2020)

	Densité (g/cm ³)	Etalement (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 I -25) 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 I -26)). 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

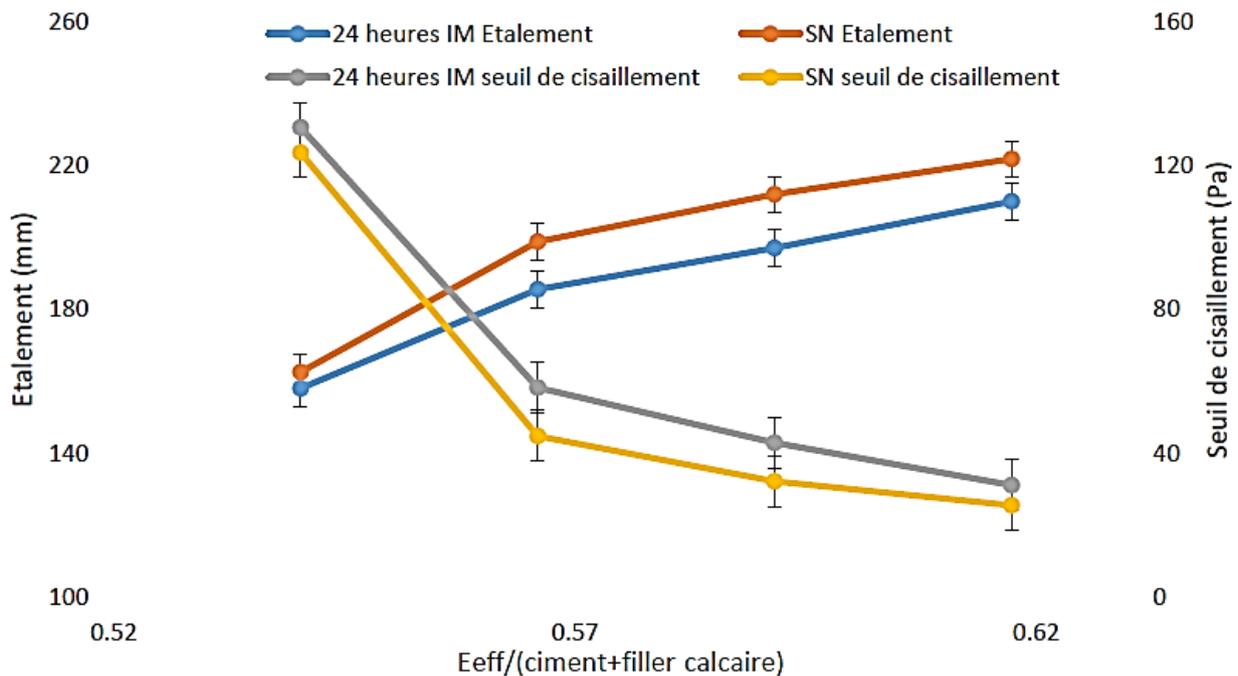


Figure I - 26 : Maniabilité des mortiers réalisés avec le SN ou le SR immergé dans l'eau pendant 24 heures.). (Bouarroudj.M , 2020)

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 (Figure I -27) 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. 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. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

à 8,33%. L'absorption d'eau présentée dans le (tableau I-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 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.

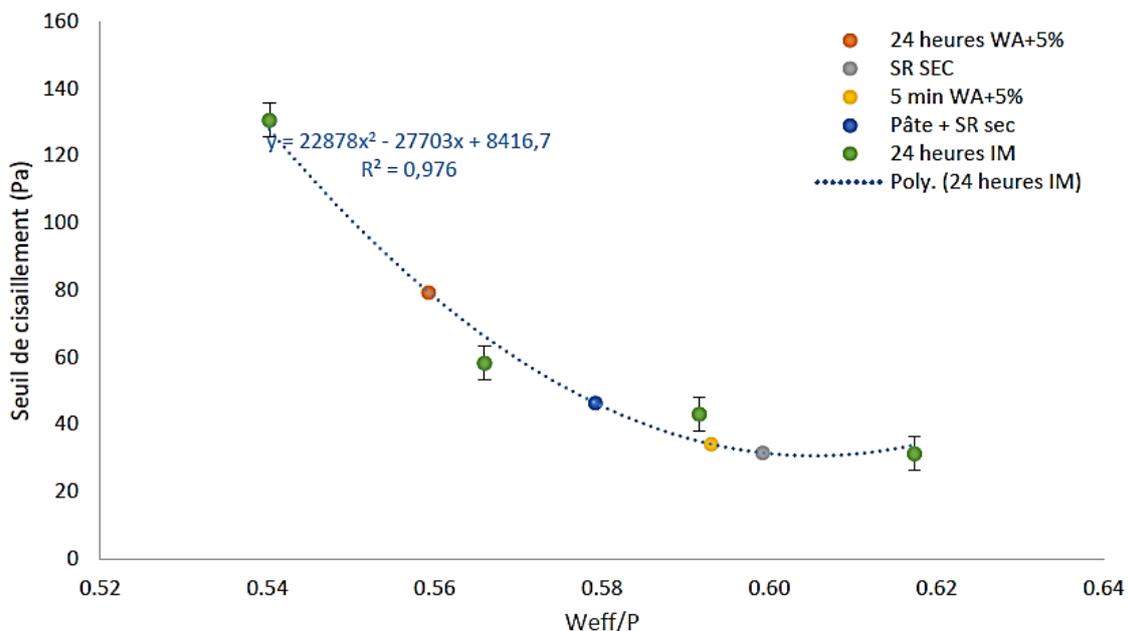


Figure I - 27 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du rapport Eeff/P pour les différents mortiers réalisés avec les différents états de saturation du SR. (Bouarroudj.M , 2020)

Chapitre I : Synthèse bibliographique

10 Propriétés mécaniques

il a été démontré que le SR et le SN avaient des caractéristiques très proches. 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 .Z et al, 2013 et 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, 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 compression des mortiers, différents mortiers ont été fabriqués avec du SR sec ou saturé et comparés au mortier fabriqué avec le SN.

11 Composition des mortiers

Le tableau I-9 présente les mélanges de mortier étudiés. L'étude rhéologique 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 (40×40×160mm³) 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 .

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

(Bouarroudj.M , 2020)

	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	3968	1 209	156	0,54
SR sec WA + 40%	1344	895	3968	1 325	156	0,59
SR sec WA + 60%	1344	895	3968	1 382	156	0,62
24 heures IM WA+ 0%	1344	895	3968	1 209	288	0,54
24 heures IM WA+ 40%	1344	895	3968	1 325	288	0,59
24 heures IM WA+ 60%	1344	895	3968	1 382	288	0,62

12 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 95

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.

Problématique & axes de recherche

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Les études sur mortiers est une phase initiale qui précède les études sur bétons. Les mortiers considérés comme des mini-bétons, il suffit d'ajouter des graviers à la même formulation pour obtenir des bétons.

Les fines issues du broyage des granulats de bétons de démolition seront substituées à une partie de ciment pour former un liant. Les taux de substitution vont varier de 5% à 60%.

Les liants Ciment + Fines recyclées) seront utilisés pour préparer des mortiers de composition 1/3 de liant et 2/3 de sable.

Les questions auxquelles nous essayons de répondre sont les suivantes :

- Est-ce que le mélange (ciment + FGBR) peut constituer un liant hydraulique ?
- Avec la substitution d'une partie de ciment parles (FGBR), est ce que les résistances mécaniques vont s'améliorer et diminuer ?
- Les granulats recyclés sont connus par leur grande absorption d'eau, est ce que les (FGBR) gardent cette caractéristique (surtout pour 60% de substitution) ?

CHAPITRE II : Matériaux & Méthodes

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des matériaux utilisés au cours du travail pratique effectué au niveau des laboratoires pédagogiques du Département de Génie et du Laboratoire de recherche (LCTPE) de l'Université de Mostaganem. Il sera aussi présenté, le travail de sélection des constituants ainsi que leur utilisation, dans le but d'obtenir les résultats en matière de résistance.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des diverses formulations.

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance) des différentes formulations.
- Évaluer l'influence du taux de substitutions des (FGBR) sur l'absorption capillaire.
- Faire une étude comparative du comportement mécanique de compression des différentes compositions.

2 Matériaux :

2.1 Le ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé (CPJ CEM II 42.5) de provenance de le fournisseur de cimenterie de GICA – BPE – Mostaganem.



Figure II - 1 : Échantillon de ciment (CPJ CEM II 42.5).

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

2.1.1 Composition du ciment :

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de 80 à 94% de clinker Portland, de 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur) et de Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

2.1.2 Caractéristiques du ciment :

Les caractéristiques physico-mécaniques de ciment utilisé sont présentées dans le tableau [II.1] ci-dessous.

Tableau II - 1 : Paramètres physico-chimique du ciment. (Bouarroudj .M . 2020).

Paramètres	Résultats			Norme
	Mini	Maxi	Moy	
Physico-mécaniques				NA 442
S Blaine cm ² /g	3464	4035	3702	-
Consistance (%)	25.60	27.00	26.01	-
Début de prise (mn)	148	185	165	≥60mn
Compression 02 jours (MPa)	19.62	23.54	21.32	≥10
Compression 07 jours (MPa)	35.34	41.61	38.06	-
Compression 28 jours (MPa)	42.75	49.93	45.62	≥42.5
Flexion 2 jours (MPa)	3.96	4.71	4.31	-
Flexion 7 jours (MPa)	5.37	6.27	5.91	-
Flexion 28 jours (MPa)	6.12	7.05	6.56	-
Expansion à chaud sur pate (mm)	0.38	5.00	1.72	≤10

Les caractéristiques chimiques du ciment sont données par le tableau [II. 2] ci-dessous.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Tableau II - 2 : Caractéristiques chimiques du ciment. (Bouarroudj .M . 2020).

Paramètres chimiques	Résultats			Norme
	Mini	Maxi	Moy	NA 442
Perte au feu (%)	6.20	8.98	7.73	-
CaO libre(%)	0.35	1.40	0.67	-
SiO ₂ (%)	17.04	20.14	18.00	-
Al ₂ O ₃ (%)	4.01	4.90	4.32	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2.79	3.26	3.15	-
CaO(%)	62.10	64.14	63.06	-
MgO(%)	0.81	0.94	0.84	≤5
SO ₃ (%)	1.72	2.94	2.15	≤4
Cl ⁻ (%)			<0.01	≤0.1
Insolubles (%)	-		0.79	-

2.2 Les sables :

Deux types de sables ont été utilisés. Un sable de mer fin de Sidi Lakhder, wilaya de Mostaganem et un sable concassé de provenance de la carrière de Kristel (w. Oran).

Les photos ci-dessous sont présentées afin de montrer l'aspect de chaque sable utilisé dans la confection de tous les bétons de cette étude.



Figure II - 2 : Échantillon de sable mer.



Figure II - 3 : Échantillon de sable carrière.

2.2.1 Essais sur granulat :

2.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 18-560)

La granulométrie s'exprime par un graphique dans lequel la courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs dont les mailles sont de plus en plus petites.



Figure II - 4 : Tamiseuse électrique.

2.2.1.2 But :

- Détermination la grosseur et le pourcentage en poids de différentes formes de granulats consistants les échantillons.
- Tracer la courbe granulométrique.

2.2.1.3 Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis ou passoires reposants sur un fond de tamis un matériau en plusieurs classes de tailles décroissantes. Le matériau étudié en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtiens par vibration de la colonne de tamis.

2.2.1.4 Matériels utilisés :

- Une série de tamis.
- Une machine à tamiser.
- Un couvercle qui éviter la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât.
- Un récipient.
- Une mais écope pour le remplissage.
- Une balance.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

2.2.1.5 Mode opératoire :

On prend une quantité de l'échantillon à étudier à l'étuve à 105° pendant 24h après on a lavée des fins en tamis 80 µm. On le repasse à l'étuve pendant 24h on sort le matériau que l'on verse sur le tamis disposé comme dans l'appareillage et on secoue à la main ou au vibreur de tamis il y a aura un passage selon le diamètre des tamis. On enlève chaque tamis et on pèse le refus et mesuré en faisant un cumul sur le tamis suivant.

2.2.1.6 Module de finesses :

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- 1,8 et 2,2 : le sable est à majorité de grains fins.
- 2,2 et 2,8 : on est en présence d'un sable préférentiel.
- 2,8 et 3,3 : le sable est un peu grossier.

Tableau II - 3 : Analyse granulométrique du sable de carrière.

DIAMETRE TAMIS (mm)	POIDS TOTAL SEC=911 g		
	REFUS CUMULE	REFUS %	TAMISATS %
5	5	0,55	99,45
4	22	2,41	97,59
3,15	130	14,26	85,74
2,5	225	24,70	75,3
2	319	35,02	64,98
1,25	494	54,23	45,77
1	549	60,26	39,74
0,63	641	70,36	29,64

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

0,5	679	74,53	25,47
0,315	730	80,13	19,87
0,25	749	82,22	17,78
0,125	789	86,61	13,39
0,063	808	88,69	11,31
Module de finesse (NF P 18-554)	3,4	1.8 < MF < 3.2	

Tableau II - 4 : analyse granulométrique de sable de mer.

DIAMETRE TAMIS (mm)	POIDS TOTAL SEC=626g		
	REFUS CUMULE	REFUS %	TAMISATS %
5	0	0	100
4	0	0	100
3,15	0	0	100
2,5	4	0,63	99,36
2	4	0,63	99,36
1,25	4	0,63	99,36
1	7	1,11	98,88
0,63	7	1,11	98,88
0,5	9	1,43	98,56
0,315	37	5,91	94,08
0,25	273	43,60	56,38
0,125	606	96,80	3,19
0,063	614	98,03	1,91
Module de finesse (NF P 18-554)	1,4	1.8 < MF < 3.2	

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Tableau II - 5 : analyse granulométrique de mélange de sable.

Tamis en mm	Poids totale sec (g)= 2000g		
	Masse de refus cumulé en mm	% de refus cumulé	% de passant cumuler
5	30	1,5	98,5
4	42	2,1	97,9
3,15	125	6,25	93,75
2,5	245	12,25	87,75
2	363	18,15	81,85
1,25	601	30,05	69,95
1	683	34,15	65,85
0,63	827	41,35	58,65
0,5	894	44,7	55,3
0,315	1163	58,15	41,85
0,25	1482	74,1	25,9
0,125	1804	90,2	9,8
0,063	1845	92,25	7,75
Module de finesse (NF P 18-554)	2,6	1.8 < MF < 3.2	

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus des deux tableaux II-3 et II-4 seront représentés dans les courbes suivantes :

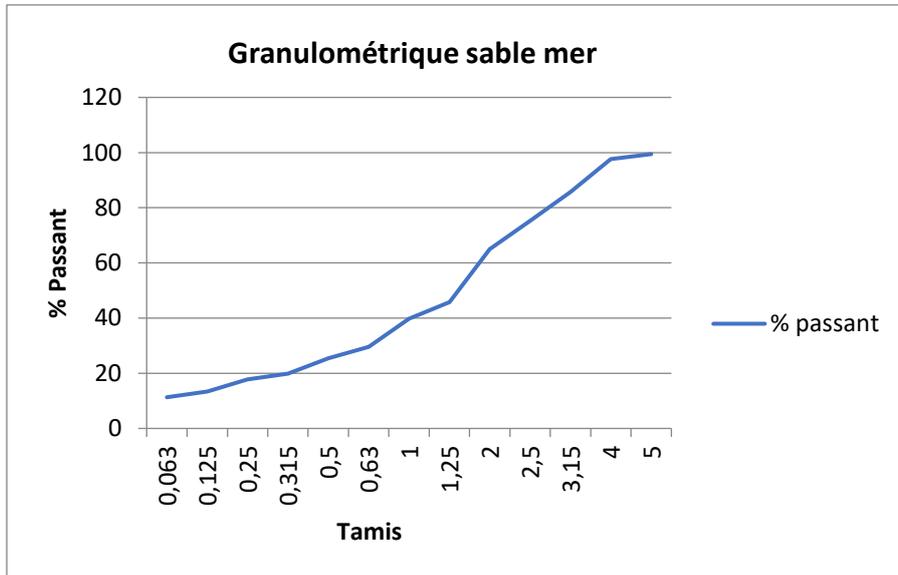


Figure II - 5 : courbe d'analyse granulométrique de sable de mer.

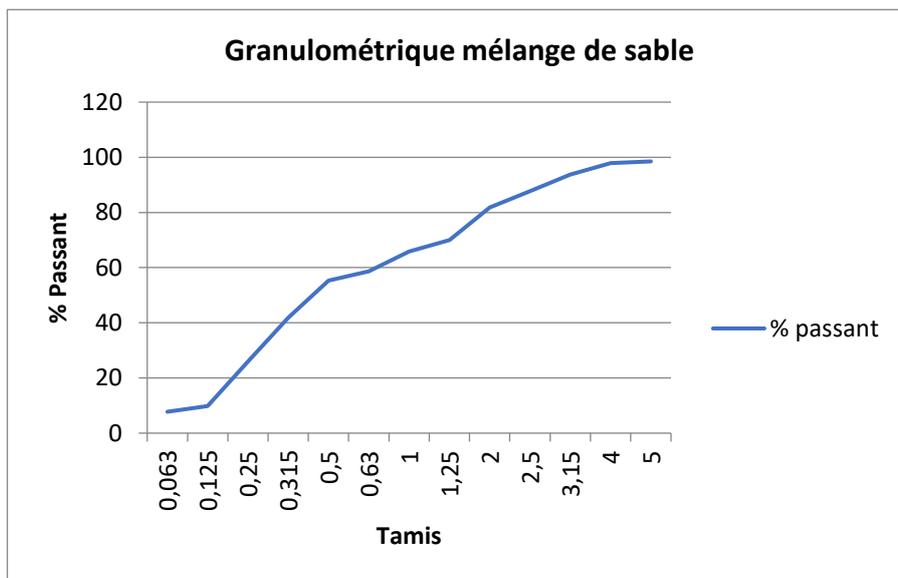


Figure II - 6 : courbe d'analyse granulométrique de sable de carrière.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

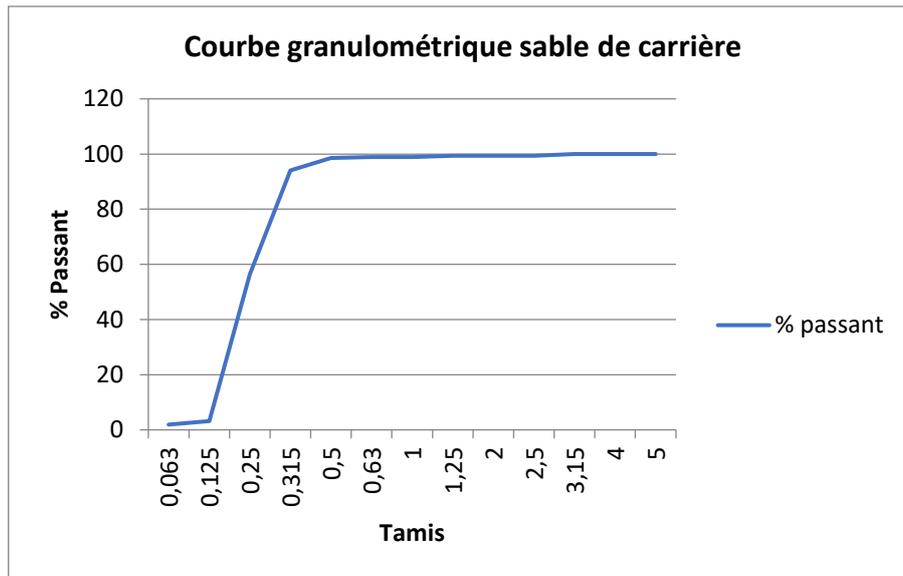


Figure II - 7 : courbe d'analyse granulométrique mélange de sable.

Les résultats des essais de l'analyse granulométrique effectuée sur chaque sable sont représentés par les courbes granulométriques suivantes :

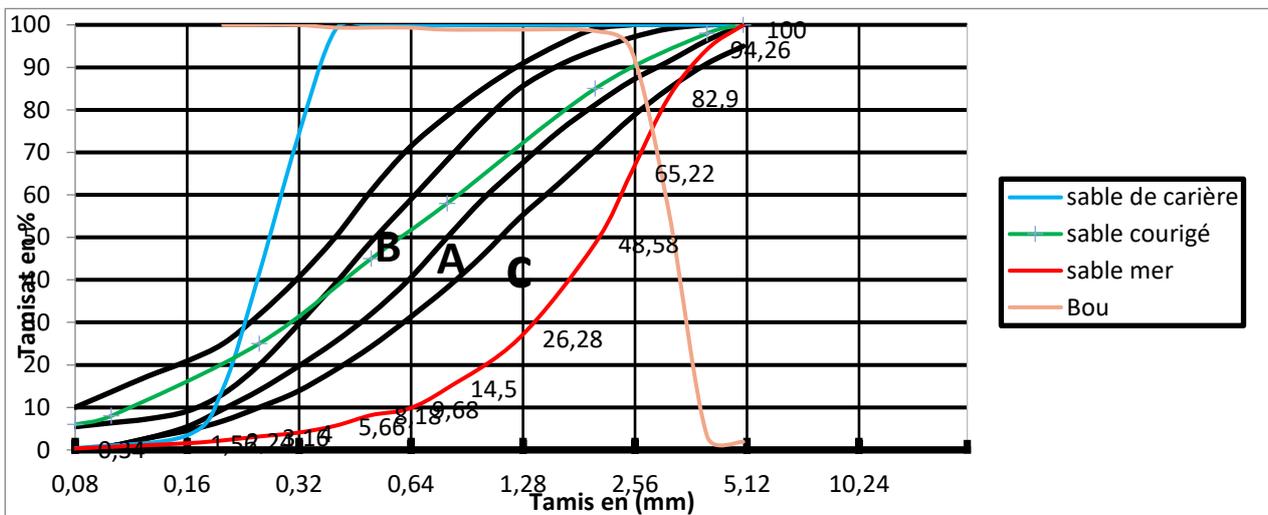


Figure II - 8 : Fuseaux Proposés pour la granularité des sables à mortiers.

Nous remarquons que la courbe de la figure II-8 précédente du sable de carrière n'appartient pas au fuseau privilégié, pour cette raison on a effectué des corrections par le sable de mer en utilisant la méthode de module de finesse comme suit :

Se basant sur ces résultats, il est clair qu'une correction est nécessaire pour l'utilisation de ces sables dans les mortiers. Pour cela, le choix d'un module de finesse optimal est de fixer $m_f = 2,6$. Le sable corrigé sera donc composé des deux

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

sables à raison de 40 % de sable de mer et de 60% de sable de carrière Selon la norme Française [NF EN 206-1].

$$SC = \frac{(Mf1 - Mf)}{(Mf1 - Mf2)} = \frac{(1,4 - 2,6)}{(1,4 - 3,4)} = 0,6 = 60\%$$

$$SM = \frac{(Mf - Mf2)}{(Mf1 - Mf2)} = \frac{(2,6 - 3,4)}{(1,4 - 3,4)} = 0,4 = 40\%$$

2.2.1.7 Equivalant de sable : (P18-598) :

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, il rend compte globalement de la quantité et la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (Es) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

2.2.1.7.1 But :

L'essai d'équivalent sable mesure la propreté du sable (PS) et identifie le rapport volumique d'argile et de matériaux très fins dans le sable, ainsi que leur aptitude à être utilisés dans des structures en béton.

2.2.1.7.2 Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer les caractéristiques des différents sables utilisés.

2.2.1.7.3 Appareillage utilisé :

3 éprouvettes cylindriques avec 2 traits de repère.

- Un bouchon en caoutchouc s'adaptant sur les éprouvettes.
- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon.
- Un piston.
- Un réglet métallique gradué.
- Un flacon de 5 litres muni d'un siphon (placé à 1 mètre au-dessus de la table de travail) contenant une solution lavant à base de solution concentrée (chlorure de calcium + glycérine + solution aqueuse de formaldéhyde).
- Un tube laveur relié au flacon avec un robinet d'arrêt.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

- Une machine agitatrice manuelle.
- Un chronomètre.
- Une balance, précision 1g.



Figure II - 9 : Eprouvettes de l'essai Equivalent de Sable.

2.2.1.7.4 Mode opératoire :

Nous apportons un échantillon de sable d'un diamètre granulaire inférieur à 5 mm et d'une humidité inférieure à 2 et vérifions que la masse sèche est de 120 grammes.

Remplissez chacun des deux éprouvettes graduées d'une solution lavage, jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette. Il verse une éprouvette de matériau dans chaque éprouvette à l'aide d'un entonnoir, puis laisse reposer pendant 10 min pour humidifier l'éprouvette. Après avoir fermé cette dernière, il le dispose ensuite sur une machine d'agitation et procède à l'agitation de chaque éprouvette pendant 30 secondes. Ou déplacez- le manuellement l'échantillon est déplacé 90 fois.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Le tube de lavage de l'échantillon est ensuite abaissé de manière à ce qu'il traverse les sédiments au fond du cylindre. L'échantillon est maintenu en position droite et l'opérateur sable sauvagement la solution de lavage, ce qui améliore la hauteur des fines et des éléments argileux. Tout en exposant l'échantillon à un mouvement de rotation lent, l'opérateur déplace lentement le tube de purification vers le haut.

Remplissez ensuite éprouvette l'échantillon avec la solution et laissez chaque échantillon testé pendant 20 minutes.

Après 20 minutes, la hauteur h_1 du niveau supérieur du frittage est mesurée par rapport au fond de l'échantillon gradué. Le piston est ensuite abaissé dans l'échantillon jusqu'à ce que la base se dépose sur les sédiments, ce qui permet de mesurer la hauteur h_2 .

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

2.2.1.7.5 Interprétation des résultats et qualité du sable :

Tableau II - 6 : Résultat et qualité de sable. (Bouarroudj.M , 2020).

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES <65%	ES <60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
$65\% \leq ES < 75\%$	$65\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$75\% \leq ES < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES \geq 80%	ES \geq 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

2.2.1.8 Essai d'équivalent de sable Théorique :

⇒ L'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$E_s = 100 * h_2 / h_1 \quad (\text{II.1})$$

⇒ L'équivalent de sable visuel est donné par la formule suivante :

$$E_{sv} = 100 * h'_2 / h_1 \quad (\text{II.2})$$

Tableau II - 7 : Essai d'équivalent de sable de carrière + sable de mer.

	Éprouvette 1	Éprouvette 2	Éprouvette 3
h_1	12,2	12,2	12,2
h_2	8,4	8,7	8,6
h'_2	8,0	8,9	8,4
ES reg	68,85	71,31	70,49
E.S _{pis}	65,57	72,95	68,85
Moyenne ES (%) = 70,22 %			

Le sable de carrière + sable de mer représente un équivalent de sable vérifiant $ES > 80\%$:
Sable très propre.

L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du mortier qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

2.2.1.9 Essai au Bleu de méthylène (EN933-9) :

Est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles de type montmorillonite (argile gonflante) et de matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu de méthylène.

2.2.1.10 But :

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique d'un sol et a pour but de caractériser la fraction argileuse contenue dans ce sol ou ce granulat.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

2.2.1.11 Principe de l'essai:

De méthylène permet de déterminer la propreté d'un sol et de connaître le type d'argile qu'il contient (sensibles à l'eau = gonflement). L'essai consiste à mesurer la capacité d'absorption des particules argileuses du matériau

2.2.1.12 Matériel utilisé :

- Un Burette.
- papier filtre.
- tige de verre.
- entraînement de lames, capable de contrôler des vitesses de rotation variables jusqu'à 600 tr/min avec un diamètre de 3 ou 4 lames de 75 mm.
- chronomètre, tamis à deux trous mm, béccher d'une capacité de environ . . litre à 2 litres, béccher de 1 litre.
- four ventilé.
- thermomètre.
- cuillère et séchoir.



Figure II - 10 : Essai bleu méthylène.

2.2.1.13 Mode opératoire :

Préparez un échantillon de gravats d'une manière qui contient 200 grammes de sable 0/2 mm. Il est séché à 110°C, refroidi à température ambiante, puis passé à travers un tamis de 2 mm et toutes les particules retenues dans un tamis sont éliminées de 2.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Versez 500 ml d'eau distillée ou d'eau minéralisée dans la tasse et ajoutez l'échantillon séché en remuant bien à l'aide de la cuillère.

Agiter la solution à la vitesse de 600 tr/min pendant 5 min, puis agiter continuellement à 400 tr/min pendant la poursuite de l'essai.

Après chaque injection de colorant à l'aide de la burette (5ml toutes les minutes), le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre disposé au fond du bécher. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleu foncé, entouré d'une zone humide incolore.

La valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kg de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante ;

$$MB = 10 \cdot \frac{V1}{M1}$$

M1 : la masse l'échantillon.

V1 : le volume totale de solution de colorant.

Tableau II - 8 : Essai au bleu de méthylène de sable de mer.

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction granulométrique de sable de mer (au gramme près) M1	M1=200g
Quantité totale de solution de colorant ajoutée, V1	V1= 16ml
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par kg de grains de fraction 0/1 mm	MB=0.85%

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Tableau II - 9 : Essai au bleu de méthylène de sable de carrière.

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction granulométrique de sable de carrière (au gramme près) M1	M1=200g
Quantité totale de solution de colorant ajoutée, V1	V1= 3ml
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par kg de grains de fraction 0/3 mm	MB=0.15%

2.2.1.14 Masses volumiques :(NF P18-555)

La densité est une caractéristique qui représente la quantité de matière (masse) dans une zone donnée (une unité de volume).

2.2.1.15 Masse volumique apparente (MVA) :

La masse volumique apparente ou plus précisément masse volumique apparente sans tassement, souvent appelée improprement densité apparente, est une grandeur utilisée essentiellement avec les substances se présentant sous forme de granulés, afin de rendre compte de la masse de matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel.



Figure II - 11: la masse volumique apparente de sable de mer + de carrière.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Tableau II - 10 : Résultat d'essai de la masse volumique Sable de mer + de carrière.

Types de granulats	Sable de mer + de carrière
MVa (g/cm ³)	1.30
MVr (g/cm ³)	2,42

3 Méthodes :

3.1 Granulat de Béton Recyclé :

Le recyclage du béton consiste à produire un granulat à partir d'un béton déjà hydraté. Pour la réalisation de l'étude faisant l'objet du présent rapport, trois types de béton ont été concassés, puis tamisés pour obtenir les trois fractions granulométriques généralement utilisées dans les bétons (20-14 mm ; 14-10 mm ; 10-5 mm). Des essais physico-mécaniques ont été réalisés par la suite sur ces trois types de matériaux recyclés. Grâce à ces essais, il a été possible de classer les granulats produits comme étant aptes à être employés comme granulats grossiers dans les mélanges de béton. De plus, une comparaison des propriétés physiques du granulat original et du granulat enrobé de pâte de ciment a été faite. Pour compléter l'étude des matériaux recyclés, des cylindres de béton ont été fabriqués en utilisant les trois bétons recyclés comme granulat grossier. Les bétons ayant atteint une maturité de 28 jours en chambre humide, des tests de compression sur les cylindres ont été réalisés, ce qui a permis d'établir la résistance en compression des nouveaux bétons.

Masses volumiques :

Tableau II - 11 : : Résultat d'essai de la Masse volumique apparente (MVa) et absolue ou réelle (MVr) des fines broyées.

Types de granulats	FGBR
MVa (g/cm ³)	1.58
MVr (g/cm ³)	2.95

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

3.2 Le mortier :

3.2.1 Définition :

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agréats avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Techniquement parlant, c'est une colle. Les professionnels du bâtiment qui utilisent le mortier sont le maçon, le couvreur, le carreleur et le tailleur de pierre. Jadis, la fonction était dévolue au gâcheur de mortier, qui le gâchait, c'est-à-dire le mélangeait (Figure II -13).



Figure II - 12 : Exemple d'un mortier.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

4 Formulation et conservation des éprouvettes :

4.1 Formulation :

La formulation des mortiers pour 90 éprouvettes confectionnés est représentée dans les tableaux suivants :

Tableau II - 12 : La formulation des mortiers.

Composant	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable (g)	FGBR
M ₁	450	214	1350	0
M ₂	427,5	214	1350	22,5
M ₃	405	214	1350	45
M ₄	382.5	214	1350	67.5
M ₅	370	214	1350	90
M ₆	337.5	214	1350	112,5
M ₇	315	214	1350	135
M ₈	270	214	1350	180
M ₉	225	214	1350	225
M ₁₀	180	214	1350	270

5 Le malaxage :

L'évolution du matériau avec le malaxage est très importante, le malaxage consiste en un mélange des différents constituants des bétons dans le but d'obtenir un matériau homogène

5.1 Le mode de malaxage :

Le malaxage joue un rôle précieux dans la fabrication des mortiers, d'où la nécessité de maîtriser et respecter son mode et son temps, comme le montre le tableau suivant :

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Tableau II - 13 : explication pour mettre un malaxage entre ciment et sable.

Matériaux	Séquence de malaxage
Ciment + l'eau	Mélange de matériaux 30s (Vitesse Lente)
Sable (SM-SC)	Ajout du sable pendant 30 s (Vitesse lente) et 30s (Vitesse rapide)
Arrêter le malaxeur pendant 30s	
Reprendre le malaxage pendant 1 min (Vitesse rapide)	
E/ C= 0,475	

Le malaxage des mortiers a été réalisé avec un malaxeur de laboratoire pour mortier axe vertical, constitué d'une cuve et d'une palette centrale tournante à deux vitesses lente et rapide, de capacité de 5 litres.



Figure II - 13 : Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [Labo de FST génie civil Mostaganem].

6 Préparations des éprouvettes et déroulement des essais :

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions (4×4×16) cm³.

Dans tous les essais le rapport E/C a été fixé sur [0.475] pour tous les mortiers normalisés. La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF P 18-400.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur dont la durée de malaxage totale est de 3 minutes.

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à durée de vibration réglable. La durée de vibration est de 2 fois 5s, $(5 \times 2) = 10$ secondes.

Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans le laboratoire dans les premières 24h.

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau à une température ambiante jusqu'à l'âge de l'essai (28j). A 28 J, les tests de résistances mécaniques des mortiers ont été effectués selon la norme NF 15 403 et NF EN196-1.

Dans notre étude, les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées avec des mortiers normalisés, six types de formulation ont été utilisées (Avec Sable de mère [SM] et (Avec Sable de carrière [SC]).

6.1 Confection des éprouvettes :

La confection des éprouvettes est faite conformément à la norme [NF P 18-404_Décembre 1981]. Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

6.2 Malaxage du mortier :

Le malaxage des mortiers a été réalisé comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur, pour limiter l'absorption de l'eau de gâchage.
- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. (Voir la Figure II -14).



Figure II - 14 : Les étapes de malaxage du Mortier normalisé.

6.3 Remplissage et conservation des moules :

Le remplissage et conservation des moules s'est effectué comme suit :

- Après gâchage, on procède au remplissage à raison de deux couches, dans des moules métalliques qui ont été enduits d'huile à l'avance.
- On procède à la table de choc pour les deux couches ; le nombre total de chocs60 (30chocs pour la première couche et 30chocs pour la dernière)
- Araser et lisser la surface du liant avec une truelle.

La conservation des moules contenant les éprouvettes, se fait dans le laboratoire, et afin d'éviter toute dessiccation initiale, on protège les moules par du film plastique.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

➤ Après 24 h les éprouvettes sont démoulées, notées et immergées dans un bassin d'eau jusqu'à l'âge de 28 jours. (Voir Figure II -15) :



Figure II - 15 : Remplissage et Conservation des éprouvettes du mortier normalisé [Photos prises au laboratoire de recherche de FST Génie Civil Mostaganem].

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

Nous avons conservé les éprouvettes dans un bassin de conservation rempli d'eau, juste après le démoulage pour y subir une cure d'hydratation jusqu'au mûrissement du béton à 60 jours, dans le but d'avoir un béton n'ayant pas subi de dessiccation. Toutes les éprouvettes ont été testées après 60 jours de mûrissement afin de déterminer les propriétés mécaniques du mortier normalisé.

7 Absorption capillaire :

Les pores capillaires ont un rayon compris entre 0,01 et 100 μm et correspondent aux espaces de la matrice cimentaire non comblés par les hydrates. Ils sont initialement occupés par l'eau en formant un réseau continu. Ils occupent la plupart du volume de vide dans le matériau et conditionnent les mécanismes de transfert. Leur volume diminue progressivement au cours de l'hydratation. La réaction pouzzolanique qui engendre la formation d'une quantité plus importante de C-S-H, comble également une partie de cette porosité capillaire.

L'absorptivité est définie comme un transfert des liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires. L'absorption se fait habituellement en deux phases. Une première phase correspondant à l'absorption initiale qui désigne la période de remplissage des plus gros capillaires, et une deuxième phase désignant la période de remplissage des capillaires les plus fins. Aussi, plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faibles.

L'essai d'absorption capillaire mesure le taux d'absorption d'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Dans cette étude, l'essai est effectué selon la procédure AFPC- AFREM.

Les éprouvettes sont imperméabilisées sur leurs faces latérales à l'aide de silicone et leurs masses initiales sont mesurées. Elles sont ensuite immergées dans l'eau sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales. Le récipient dans lequel sont placées les éprouvettes est muni d'un couvercle pour éviter l'évaporation de l'eau. À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances sont

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

les suivantes : 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 24 heures. L'essai est terminé après 24 heures.



Figure II - 16 : Montage expérimental pour l'essai d'absorption capillaire.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante :

$$C_a(\text{kg}/\text{m}^2) = \frac{M_x - M_0}{A}$$

8 Dispositif de l'essai de traction par la flexion :

8.1 Traction par la flexion trois points :

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 120mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F. Afin de transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement de leur centre dans les plans vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette. Le pas de chargement est de : 0.5[KN/ s]

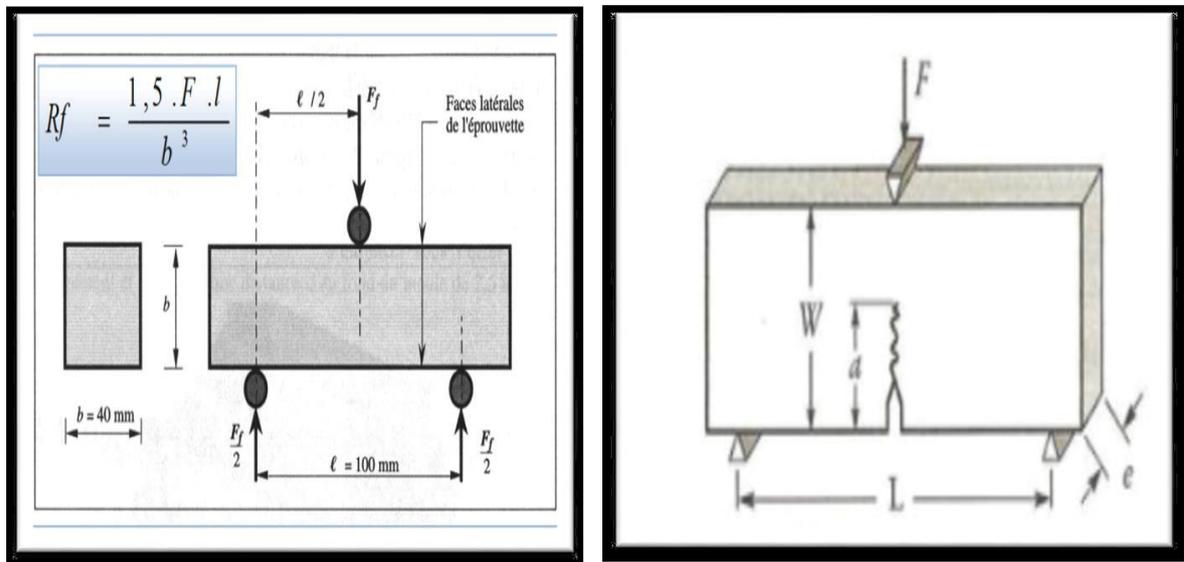


Figure II - 17 : Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion.

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

8.2 Résistance mécanique à la compression (NF P 15-471) :

L'essai de compression est effectué sur les demi-échantillons provenant de l'essai de flexion. Il est exécuté sur un bâti de compression de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel Test Expert V7.11, et doté d'un capteur de force de 300 KN. Celle-ci est reliée à une machine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force en fonction du temps. Le pas de chargement est de : 2.4[KN/ s].

8.2.1 Dispositif de l'essai

Chaque demi prisme est testé en compression sur ses faces de moulage, sous une section de 40×40 [mm²], entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de 40 mm de largeur. Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm.

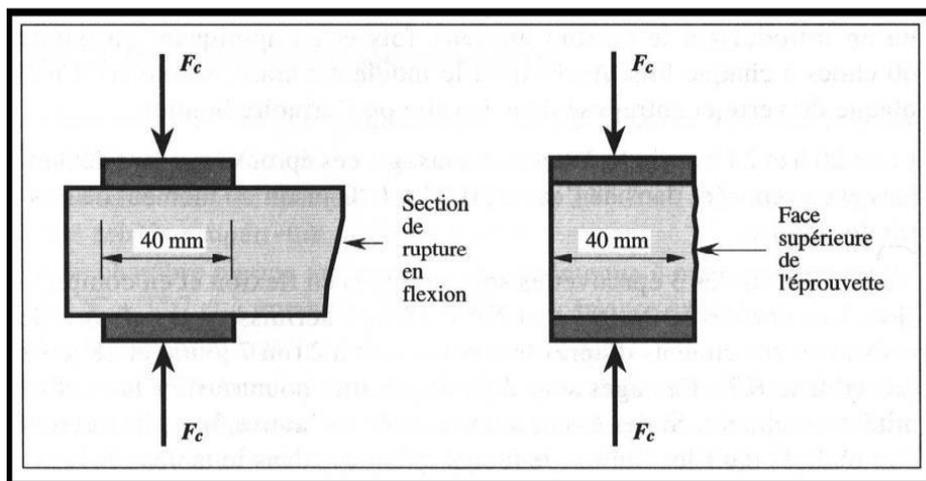


Figure II - 18 : Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points)

CHAPITRE II: Matériaux & Méthodes

9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par les caractérisations de différents constituants ; la formulation des bétons, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus à l'issue des tests effectués sont présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Résultats et analyse

Chapitre III : Résultat & analyse

1 Introduction :

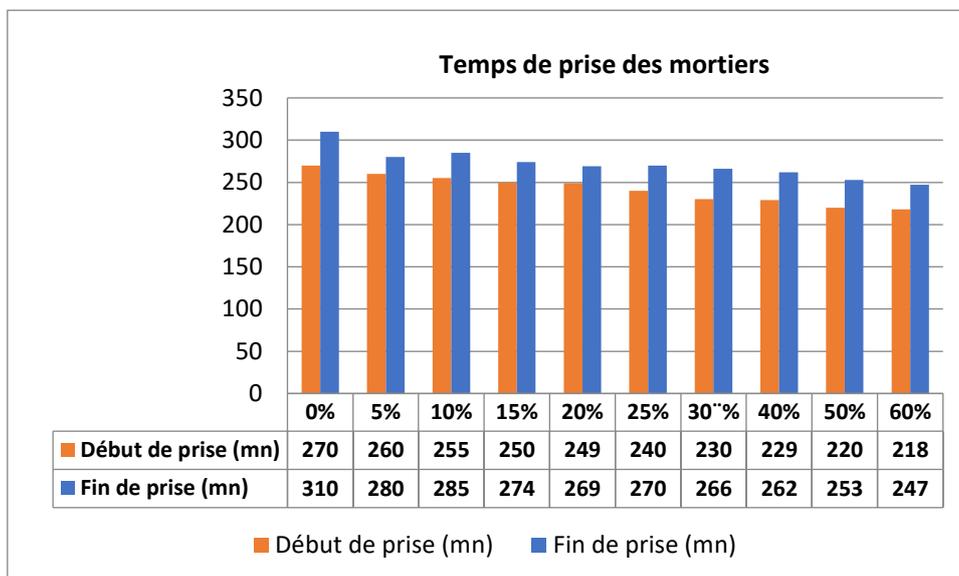
Ce chapitre présente l'étude réalisée sur le comportement à l'état frais et durci des mortiers contenant du granulat de béton recyclé. Nous exposons dans un premier temps les protocoles expérimentaux utilisés, puis nous présentons les résultats obtenus. L'objectif principale de ce travail est d'étudier le lien entre l'absorption d'eau et la résistance des mortiers. Nous nous intéressons en particulier à l'influence de l'état de saturation initiale des granulats recyclés sur leur comportement à l'état frais.

Cette étude a été menée en cinq étapes. Dans un premier temps, le temps de début et fin de prise concernant différent pourcentage de granulats de béton recyclé avec le ciment même chose avec les autres étapes.

2 Résultats des essais sur mortiers à l'état frais

2.1 Temps de début et fin de prise :

Le début de prise et la fin de prise constituent deux grandeurs caractéristiques du comportement d'un ciment. Pour tenir compte de la porosité intergranulaire des granulats recycle de béton et de l'absorption d'eau qui en résulte, nous avons choisi d'effectuer les essais de prise sur des pâtes de consistance égale. Les résultats sont illustrés sur la (Figure III - 1). On peut remarquer que les ciments élaborés satisfont aux exigences de temps de début de prise qui doit être d'au moins 60 minutes pour les ciments de classe 42,5 et d'au moins 75 minutes.



Chapitre III : Résultat & analyse

Figure III - 1 : Début et fin de prise des ciments composés.

L'ajout de la poudre de granulats recyclés de béton contribue à diminuer le temps de début et de fin de prise du ciment. À 20% de substitution, le temps de début de prise diminue d'environ 52 min et le temps de fin de prise de 63 min. Il est possible que ces ajournements de prise soient dus à la quantité supplémentaire d'eau qu'il faut ajouter chaque fois pour compenser l'eau absorbée par le granulat de béton recyclé et maintenir une consistance égale pour les pâtes.

3 Résultats des essais sur mortiers à l'état durci :

Plusieurs mortiers de différentes compositions ont été confectionnés, des essais de mesures des résistances à la traction par flexion (R_t) ont été effectués, les deux parties récupérées ont servi aux mesures des résistances à la compression (R_c).

3.1 Résistances mécaniques (R_c , R_t) :

3.1.1 L'effet du granulat recycle de béton sur la résistance à la compression R_c :

➤ Mortier témoin

Les Figures ci-dessous présentent les résultats des mesures de la résistance à la compression des mortiers de référence sans ajout.

Afin de pouvoir observer les variations des résistances au cours des temps, nous avons tracé les deux types de graphes (histogramme et courbe).

Les résistances à la compression R_c des mortiers témoins (sans substitution) sont données dans les figures (Figure III-2 et Figure III-3) ci-dessous :

Chapitre III : Résultat & analyse

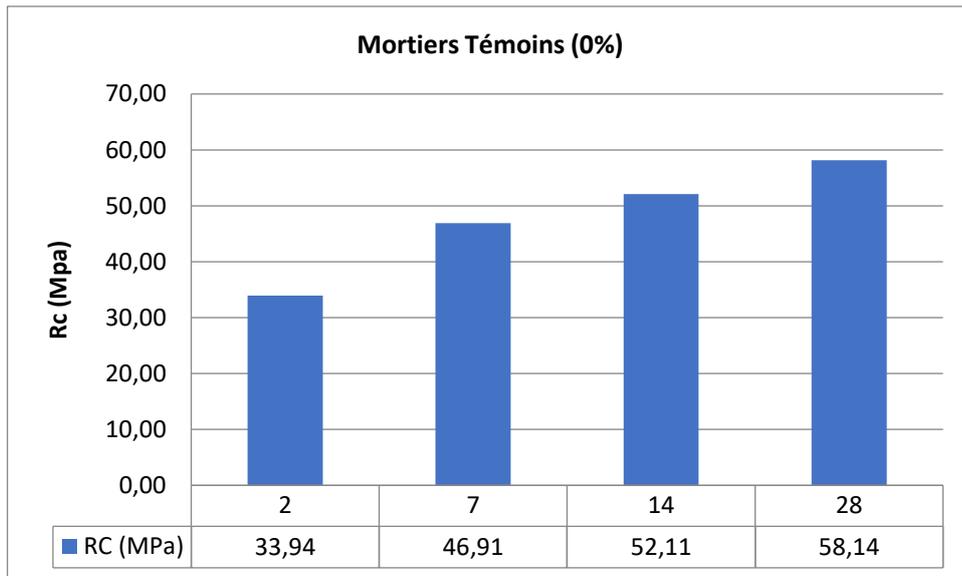


Figure III - 2 : la résistance à la compression R_c de mortier témoin histogramme.

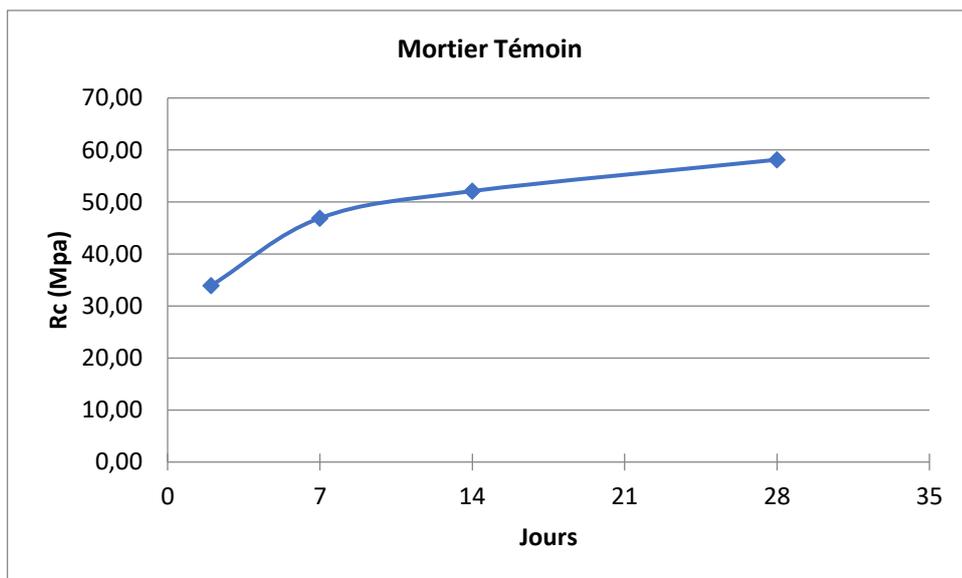


Figure III - 3 : la résistance à la compression R_c de mortier témoin courbe.

D'après les résultats obtenus, les résistances à la compression augmentent en fonction du temps jusqu'à 28 jours. La résistance maximale de plus de 58 MPa obtenue à 28 jours résulte du type du ciment, ces mortiers étant composés de 100% de ciment.

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (5% de substitution) :

Les résistances à la compression des mortiers à base de fine de granulats recyclés (GR) à 5% de substitution de ciment sont présentées dans les figures ci-après :

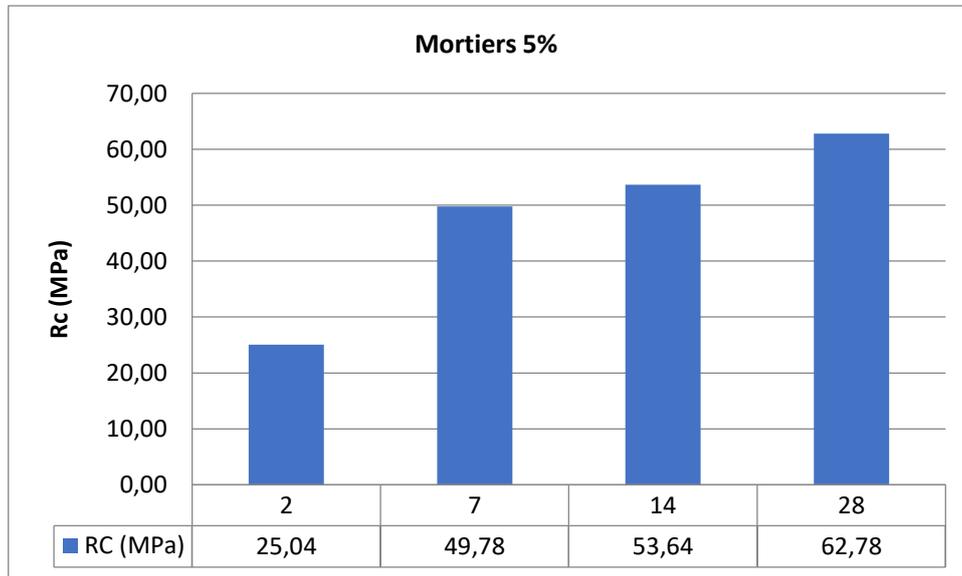


Figure III - 4 : la résistance à la compression R_c de mortier 5% FGBR histogramme.

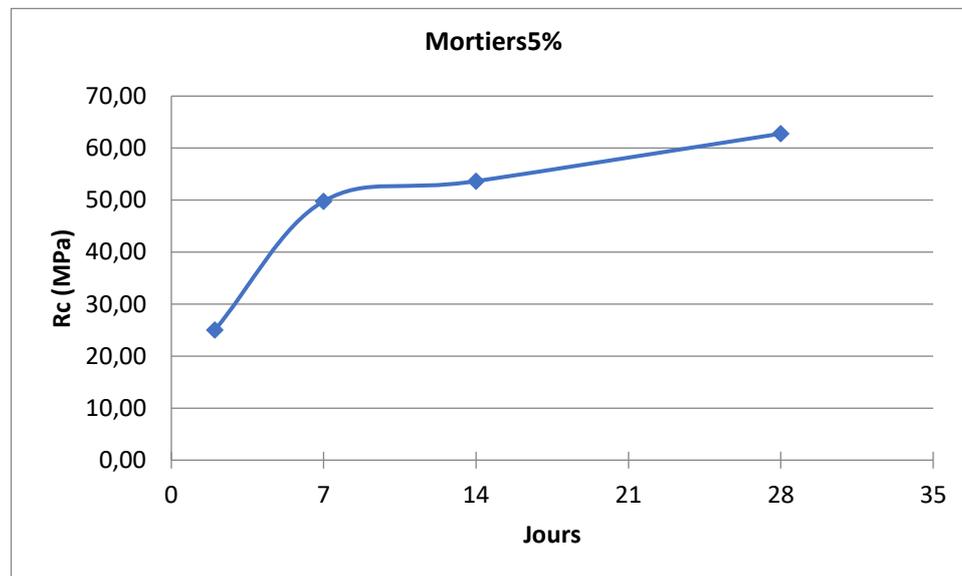


Figure III - 5 : la résistance à la compression R_c de mortier 5% FGBR courbe.

Les résultats obtenus montrent que toutes les résistances augmentent en fonction du temps. Une résistance à 7 jours assez grande (de plus de 49 MPa) et proche de celle de 14 jours. Entre 2 et 7 jours, les résistances ont pratiquement doublé (de 25,04 MPa à 49,78 MPa). A 28 jours (court terme), la résistance obtenue (de plus de 62 MPa) est assez grande et a dépassé celle du mortier de référence au

Chapitre III : Résultat & analyse

même âge, ceci est peut-être dû à l'apport supplémentaire que les fines de granulats recyclés par leur effet physique de remplissage.

➤ Mortiers avec fines de GR (10% de substitution) :

Les résistances à la compression des mortiers confectionnés avec 10% de substitution de ciment ont été mesurées et sont représentées dans les figures (III-6 et III-7) suivantes :



Figure III - 6 : la résistance à la compression R_c de mortier 10 % FGFR histogramme.

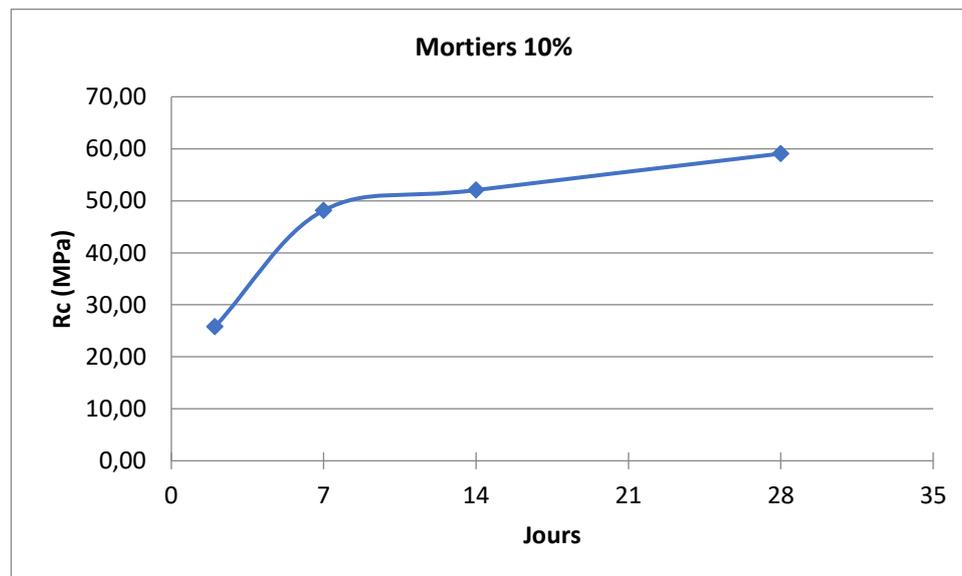


Figure III - 7 : la résistance à la compression R_c de mortier 10 % FGFR courbe.

Les résistances de ces mortiers à 28 jours sont de l'ordre de 59 MPa, elles dépassent de peu celles des mortiers de référence au même âge. À 2 jours, leurs

Chapitre III : Résultat & analyse

résistances sont équivalentes à celles des mortiers avec 5% de fines. Après 28 jours, les résistances avec 10% pourraient augmenter, compte tenue de la pente croissante de la courbe entre 14 et 28 jours (Figure III-7).

➤ Mortiers avec fines de GR (15% de substitution) :

Les résistances à la compression des mortiers confectionnés avec 15% de substitution de ciment ont été mesurées et sont données dans les figures (III-8 et III-9) :

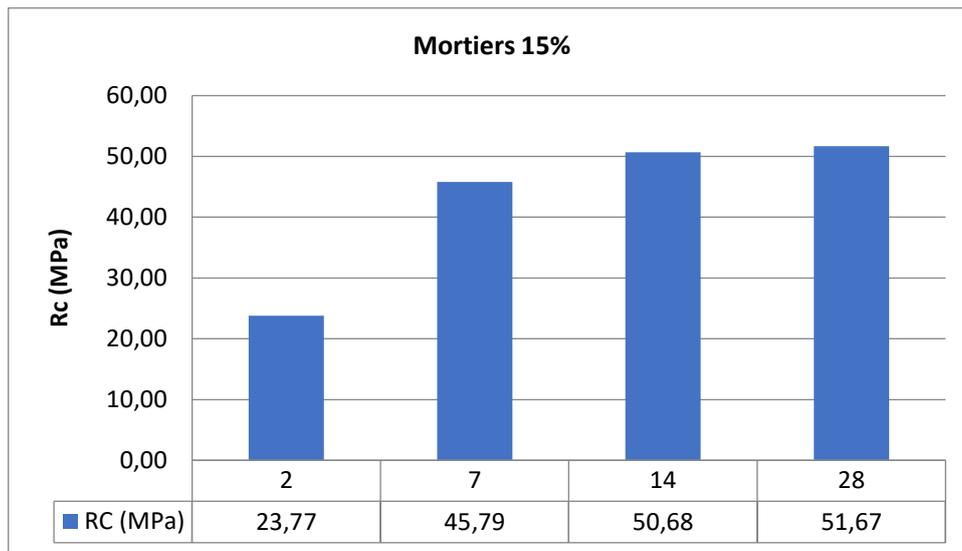


Figure III - 8 : La résistance à la compression Rc de mortiers 15% de FGFR histogramme.

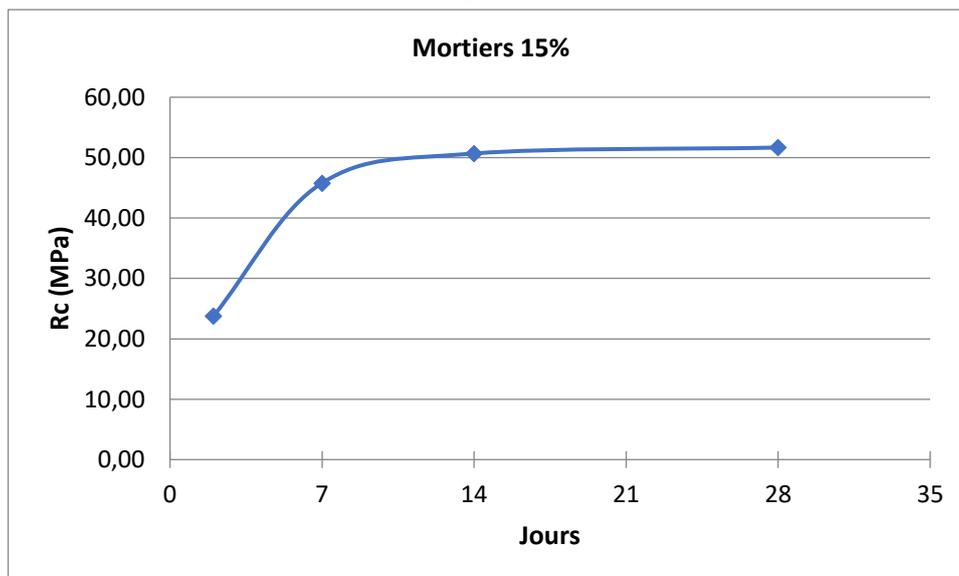


Figure III - 9 : La résistance à la compression Rc de mortier 15 % de FGFR courbe.

Chapitre III : Résultat & analyse

Les résultats obtenus ont montré qu'à 2 jours, les résistances obtenues sont légèrement inférieures que celles des mortiers précédents. Au-delà de cette échéance, les résistances ont pratiquement doublé. Entre 14 et 28 jours, les résistances sont proches et augmenteront faiblement au-delà de 28 jours, la pente de la courbe se stabilise (Figure III-9).

➤ **Mortiers avec fines de GR (20% de substitution) :**

Les variations des résistances à la compression des mortiers contenant 20% de fines substituées au ciment sont affichées sur les figures III -10 et (III - 11) ci-dessous.

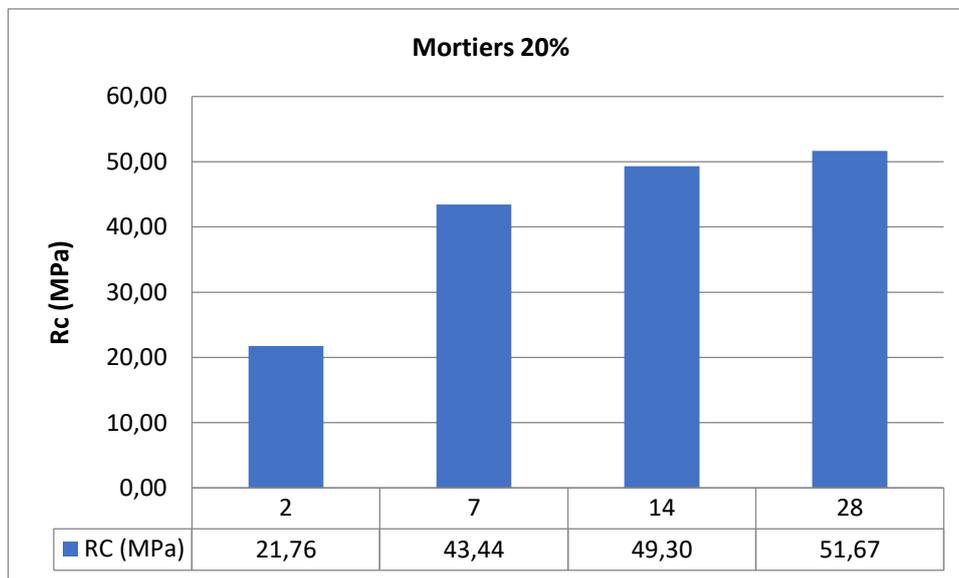


Figure III - 10 : La résistance à la compression Rc de mortiers 20% de FGBR histogramme.

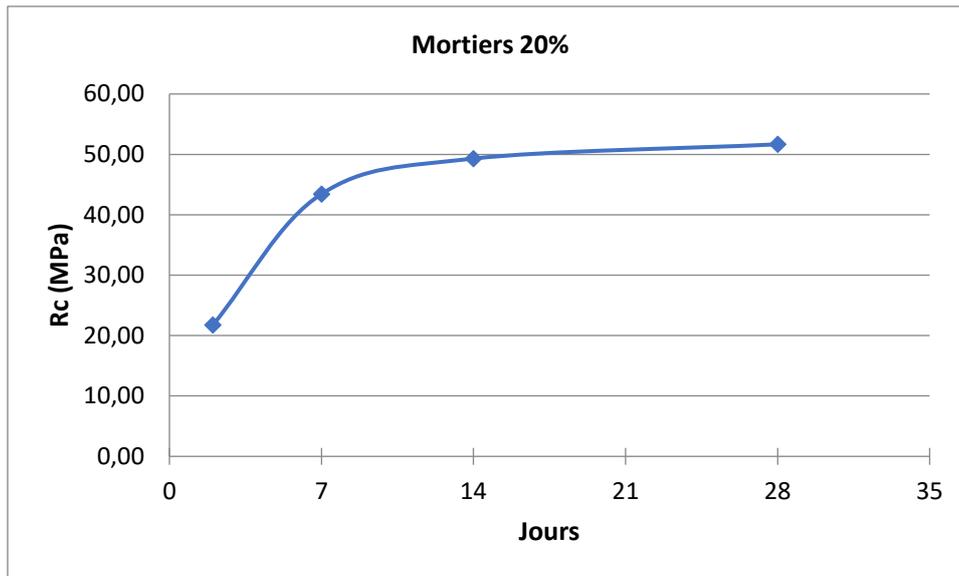


Figure III - 11 : : La résistance à la compression R_c de mortier 20 % de FGBR courbe.

Toutes les résistances ont diminué par rapport aux mortiers précédents, ceci est sûrement dû à la diminution de 20% de la quantité du ciment qui compose les mortiers. À partir de 14 jours ces résistances ont commencé à se stabiliser pour atteindre des valeurs voisines de 52 MPa.

➤ **Mortiers avec fines de GR (25% de substitution) :**

Les figures (III-12) et (III-13) présentent les résistances à la compression R_c en fonction du temps des mortiers contenant 25% de ciment substitué par les FGBR.

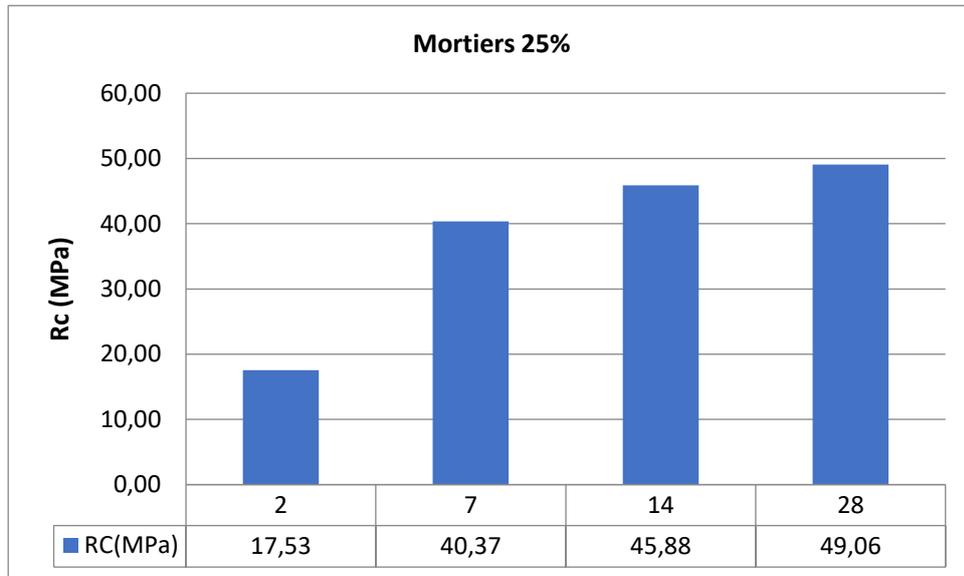
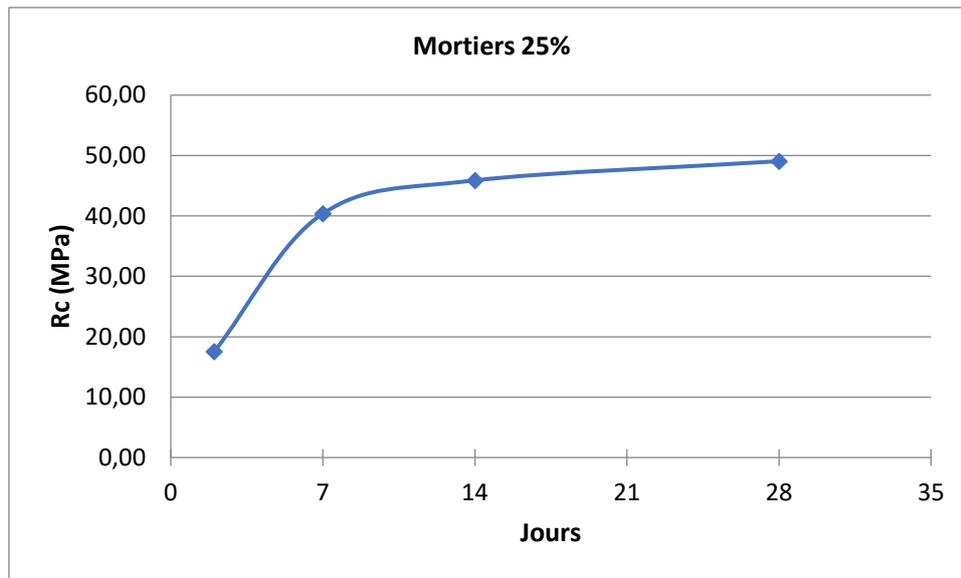


Figure III - 12 : La résistance à la compression Rc de mortier 25 % de FG BR



histogramme

Figure III - 13 : La résistance à la compression Rc de mortier 25 % de FG BR courbe.

A 2 jours, ces mortiers ont développé des résistances un peu faibles par rapport aux mortiers précédents. Entre 14 et 28 jours il y a eu un gain de moins de 9 MPa. Ce gain peut augmenter pour des échéances au-delà de 28 jours.

➤ **Mortiers avec fines de GR (30% de substitution) :**

Les différentes résistances des mortiers dont 30% de ciment ont été substitués par les FG BR sont affichées sur les figures (III-14) et (III-15) suivantes :

Chapitre III : Résultat & analyse

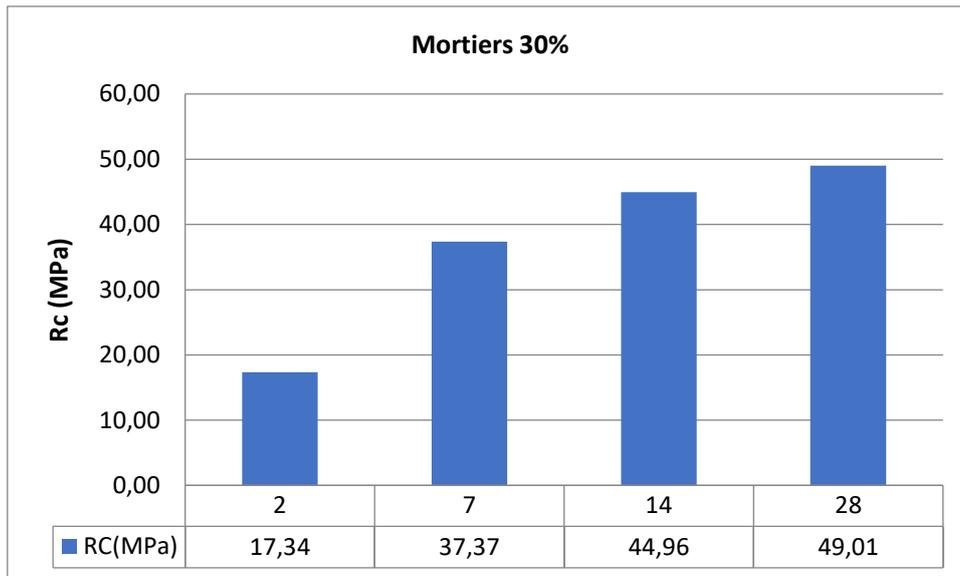


Figure III - 14 : La résistance à la compression R_c de mortier 30 % de FGBR histogramme.

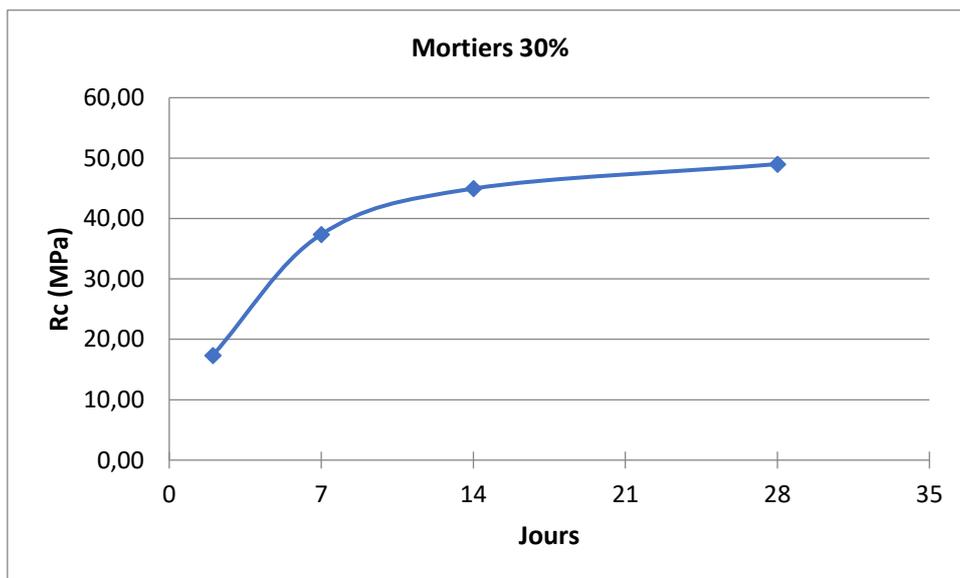


Figure III - 15 : La résistance à la compression R_c de mortier 30 % de FGBR courbe.

Les résistances à la compression trouvées sont croissantes jusqu'à l'âge de 28 jours, mais qui continuent à augmenter après cette date. Substituer 30% de ciment par des fines de granulats de bétons recyclés continue à développer des résistances assez intéressantes.

➤ Mortiers avec fines de GR (40% de substitution) :

Les résistances à la compression des mortiers fabriqués avec 40% de FGBR sont données dans les figures ci-dessous :

Chapitre III : Résultat & analyse

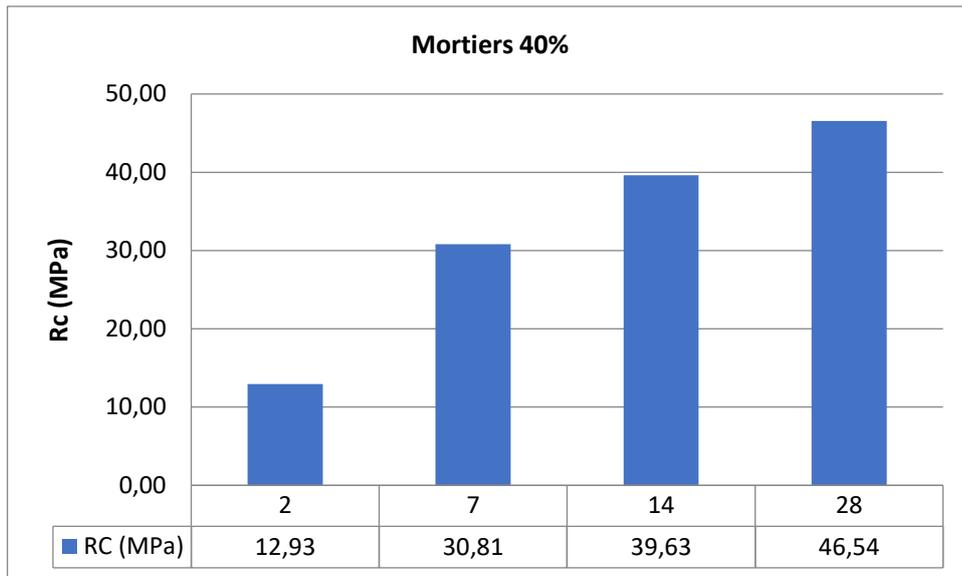


Figure III - 16 : La résistance à la compression R_c de mortier 40 % de FGFR histogramme.

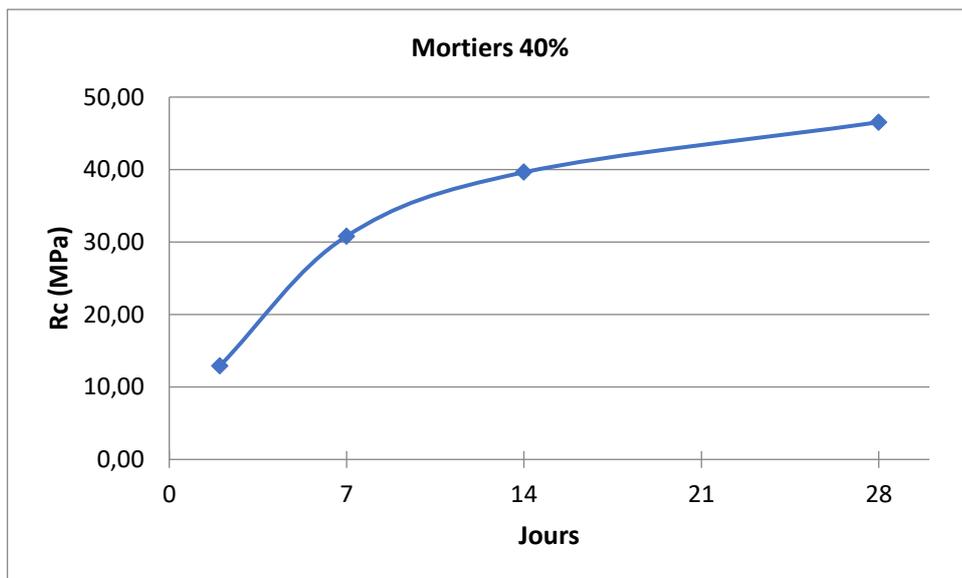


Figure III - 17 : La résistance à la compression R_c de mortier 40 % de FGFR courbe.

Il apparaît clair des résultats obtenus que les résistances à 2 jours de l'ordre de 12 MPa soient les plus faibles comparées à celles des mortiers précédents.

La pente croissante (Figure III-16) montre que les résistances continueront à augmenter et pourront dépasser la valeur de 46,54 MPa obtenue à 28 jours.

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (50% de substitution) :

Les résultats des mesures des résistances à la compression sont donnés par les figures ci-après :

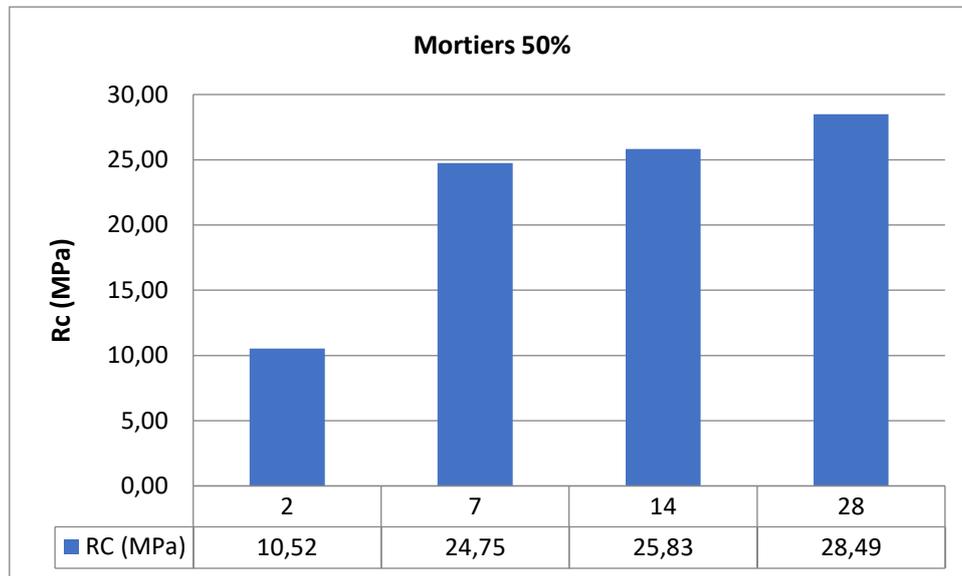


Figure III - 18 : La résistance à la compression R_c de mortier 50 % de FGFR histogramme.

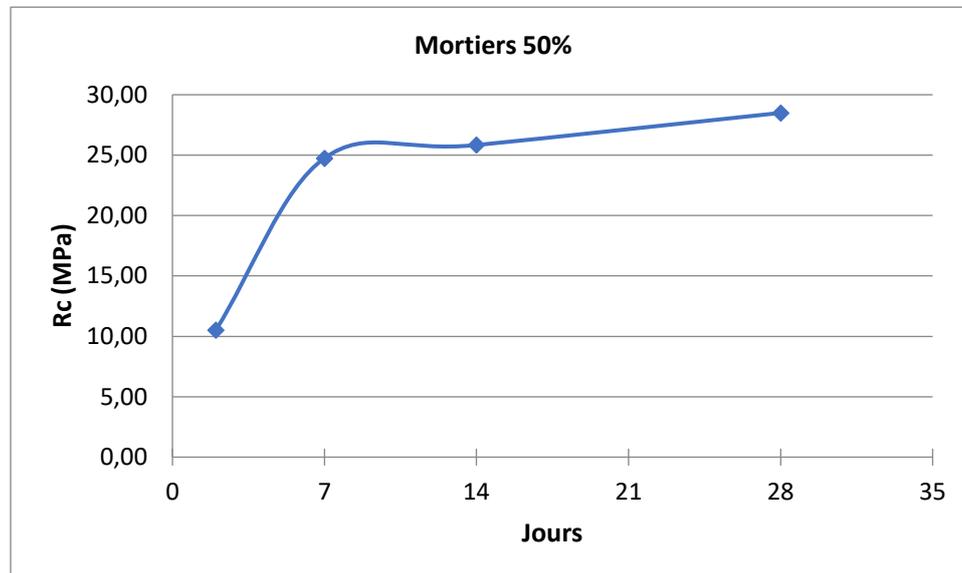


Figure III - 19 : La résistance à la compression R_c de mortier 50 % de FGFR graphe.

Les résistances initiales (à 2 jours) obtenues valent 10 MPa, elles continuent à augmenter pour dépasser 28 MPa à 28 jours. La (figure III-18) montre que les résistances à 7 et 14 jours sont presque similaires. La (figure III-19) montre un

Chapitre III : Résultat & analyse

rebondissement (une bosse) à 7 jours, synonyme du commencement des résistances intéressantes, la pente de la courbe entre 2 et 7 jours est très élevée.

➤ Mortiers avec fines de GR (60% de substitution) :

Sur les mortiers avec 60% de substitution de ciment par les FGBR, les résistances ont été mesurées et résultats ont montrée dans les figures ci-dessous :

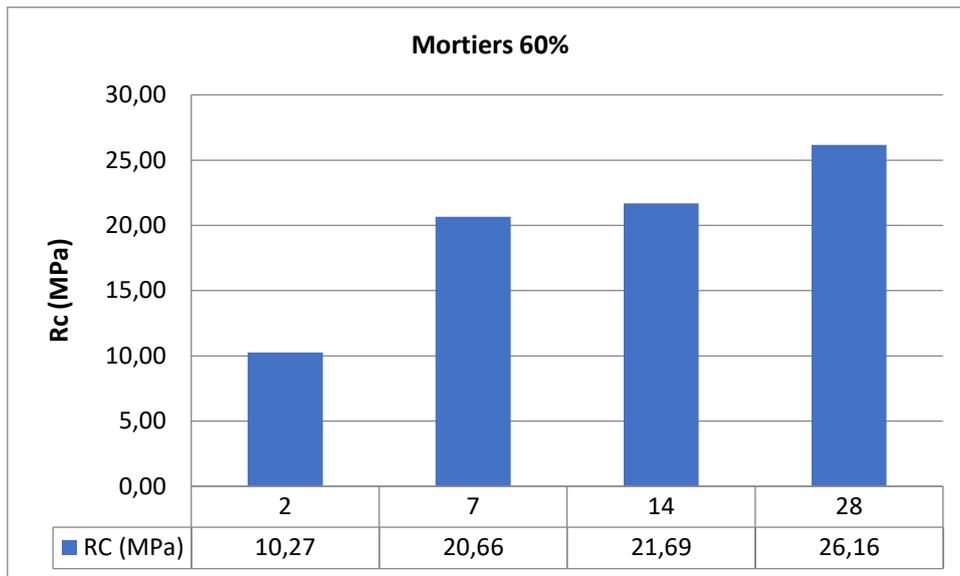


Figure III - 20 : La résistance à la compression R_c de mortier 60 % de FGBR histogramme.

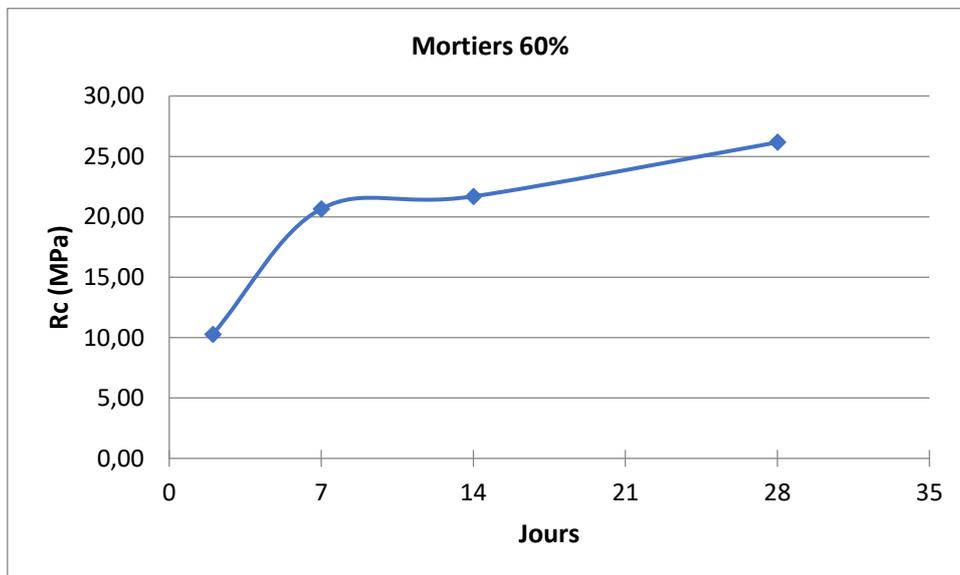


Figure III - 21: La résistance à la compression R_c de mortier 60 % de FGBR courbe.

Remplacer 60% de ciment par des fines inertes n'a pas empêcher de développer des résistances croissantes entre 2 et 28 jours, variant de 10 MPa à plus de 26 MPa. Une bosse a été observé entre 7 et 14 jours.

Chapitre III : Résultat & analyse

3.1.2 L'effet du granulat recycle de béton sur la résistance à la traction par flexion R_t :

➤ Mortiers de référence (0% de substitution) :

Les Figures (III-22 et III-23) ci-dessous présentent l'évolution dans le temps de la résistance à la traction par flexion du mortier témoin

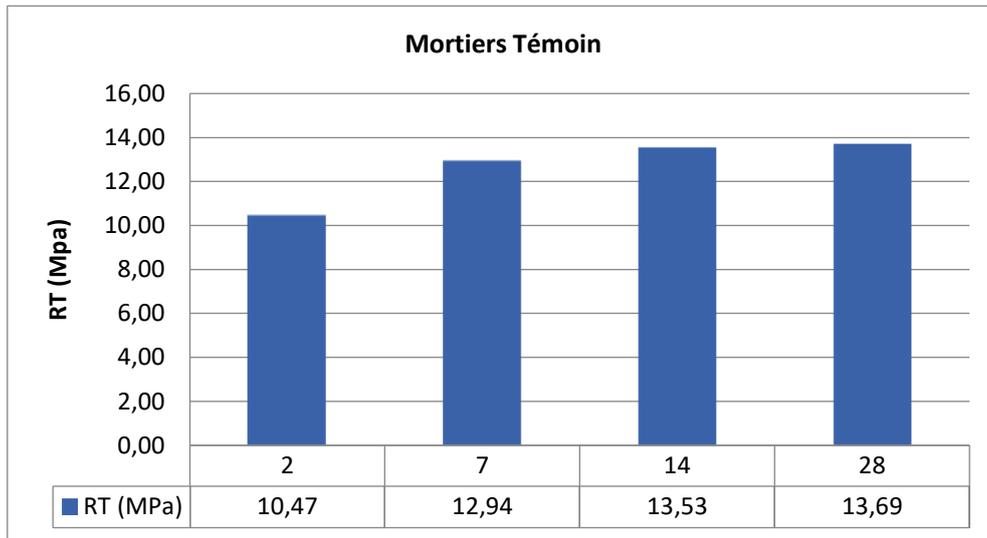


Figure III - 22 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier témoin histogramme.

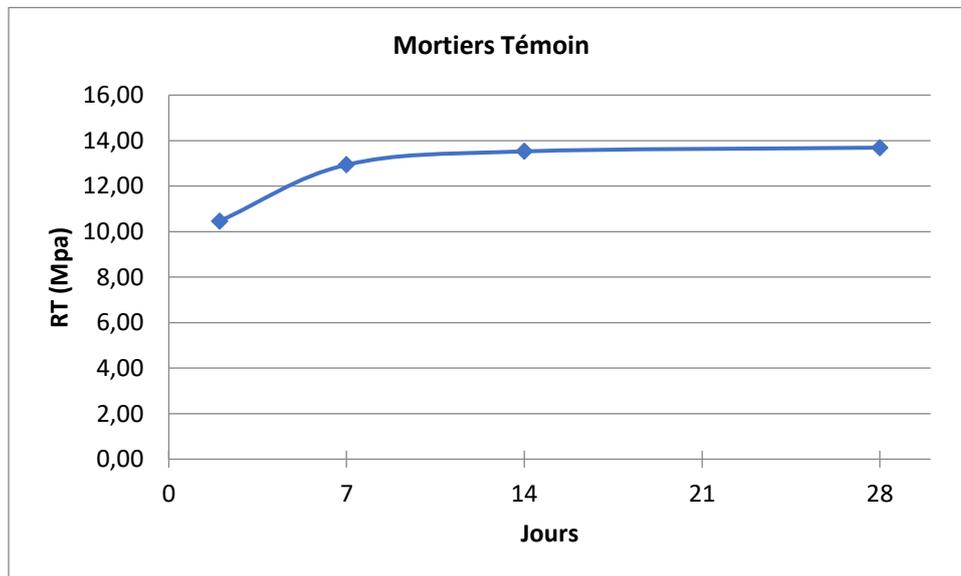


Figure III - 23 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier témoin courbe.

D'après les résultats obtenus, les résistances à la flexion augmentent en fonction du temps et se stabilisent au-delà de 14 jours. La valeur maximale obtenue à 28 jours est 13,69 MPa.

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (5% de substitution) :

Les résistances à la flexion des mortiers à base de fine de granulats recyclés (GR) à 5% de substitution de ciment sont présentées dans les figures ci-après :

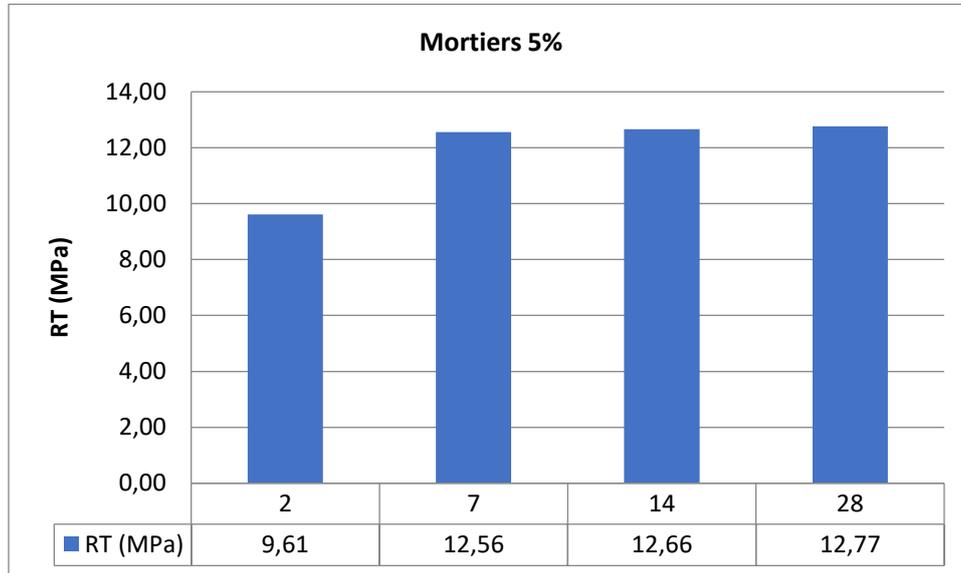


Figure III - 24 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier 5% FGBR histogramme.

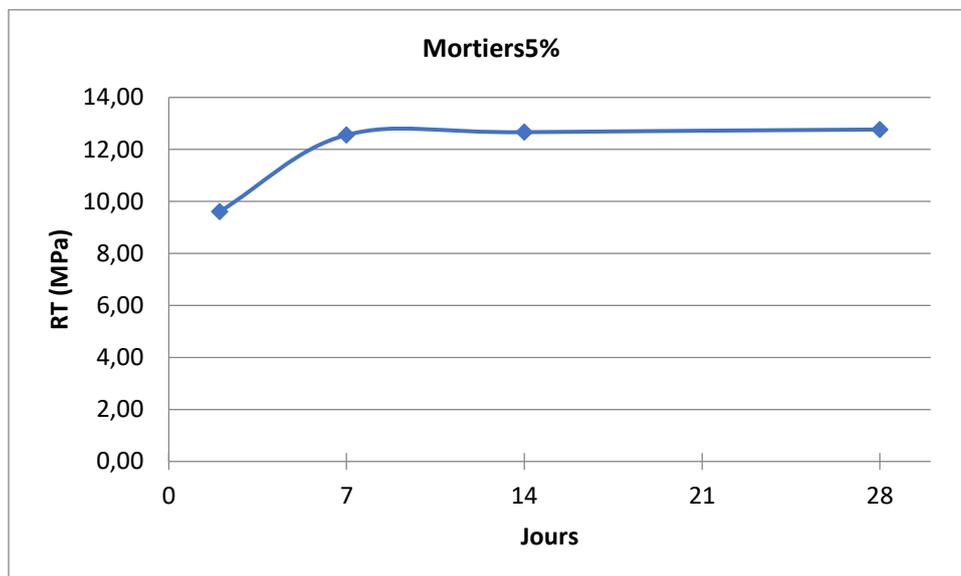


Figure III - 25 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier 5% FGBR courbe.

Les résultats obtenus montrent que les résistances augmentent en fonction du temps. Une résistance de 9,6 MPa est obtenue à 2 jours. Celles obtenues à 7 ;14 et 28 jours restent presque stables soit 12,56, 12,66 et 12,77 respectivement, ce qui indique que le pourcentage de 5% Résister dans les 14 jours.

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (10% de substitution) :

Les résistances à la traction par flexion des mortiers confectionnés avec 10% de substitution de ciment ont été mesurées et sont représentées dans les figures (III-26 et III-27) suivantes :

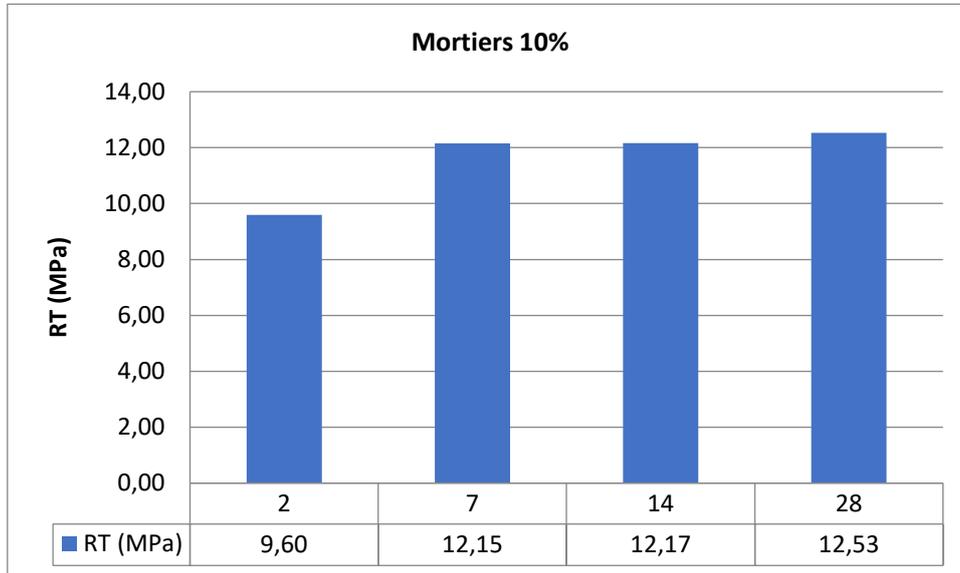


Figure III - 26 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier 10% FGBR histogramme.

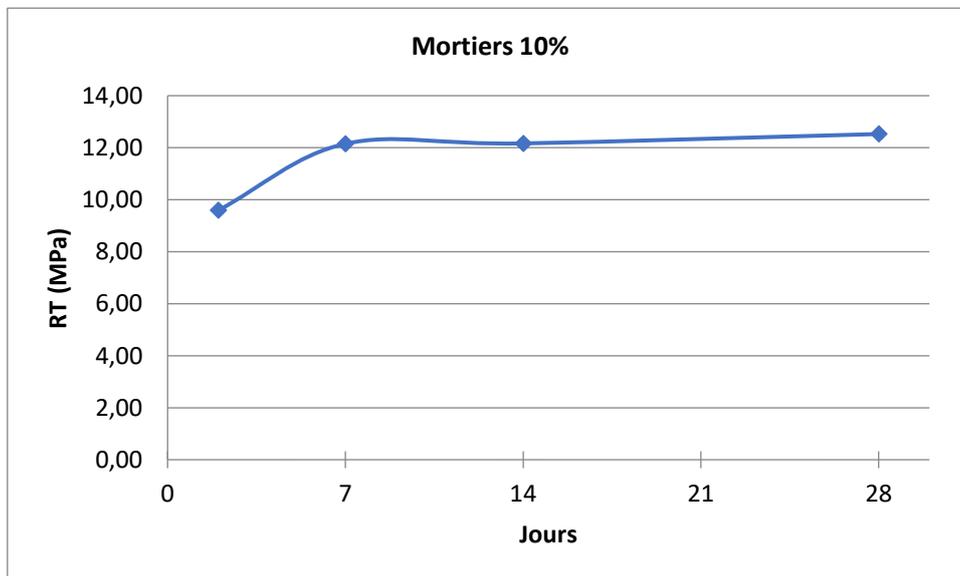


Figure III - 27 : la résistance à la traction par flexion R_t de mortier 10% FGBR courbe.

Même évolution a été observée. Les résultats obtenus ont montré qu'à 2 jours, sont légèrement même que celles des mortiers précédents. Au-delà de cette échéance. Entre 14 et 28 jours, les résistances sont proches et augmenteront faiblement au-delà de 28 jours, la pente de la courbe se stabilise (Figure III-27).

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (15% de substitution) :

Les résistances à la traction par flexion des mortiers confectionnés avec 15% de substitution de ciment ont été mesurées et sont données dans les figures (III-28 et III-29) :

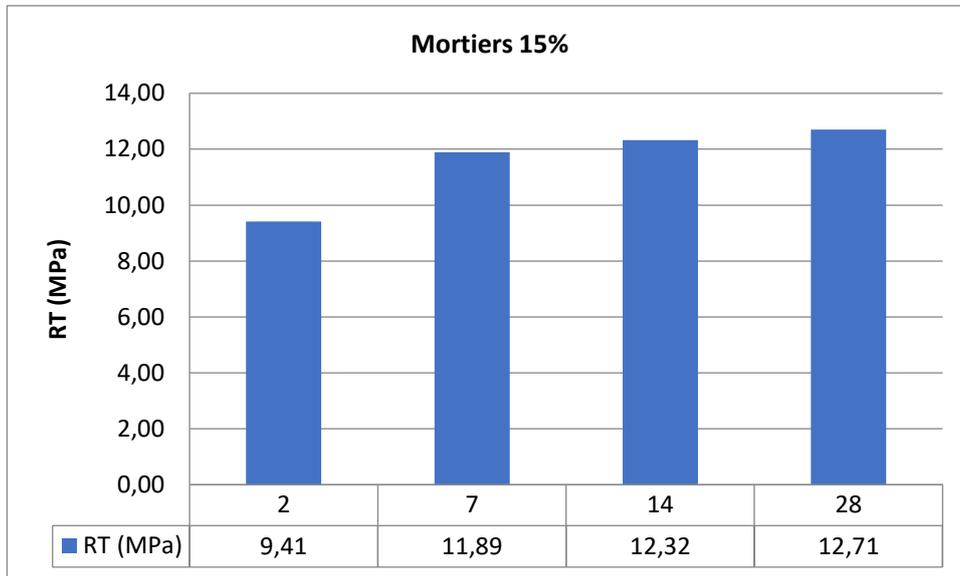


Figure III - 28 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortiers 15% de FGFR histogramme.

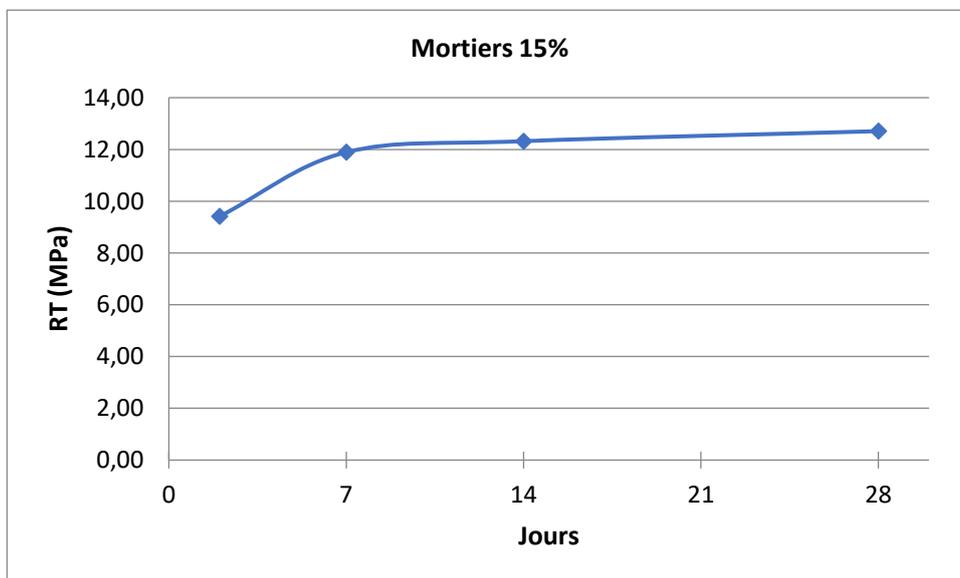


Figure III - 29 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 15 % de FGFR courbe.

Les résistances avec 15% pourraient augmenter, compte tenu de la pente croissante de la courbe entre 2 et 14 jours (Figure III-29). Les résistances de ce

Chapitre III : Résultat & analyse

mortier à 14 et 28 jours sont de l'ordre de 12 MPa, elles restent presque stables de peu celles des mortiers de référence au même âge. Après 28 jours.

➤ Mortiers avec fines de GR (20% de substitution) :

Les variations des résistances à la traction par flexion des mortiers contenant 20% de fines substituées au ciment sont affichées sur les figures (III -30) et (III -31) ci-dessous :



Figure III - 30 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortiers 20% de FGFR histogramme.

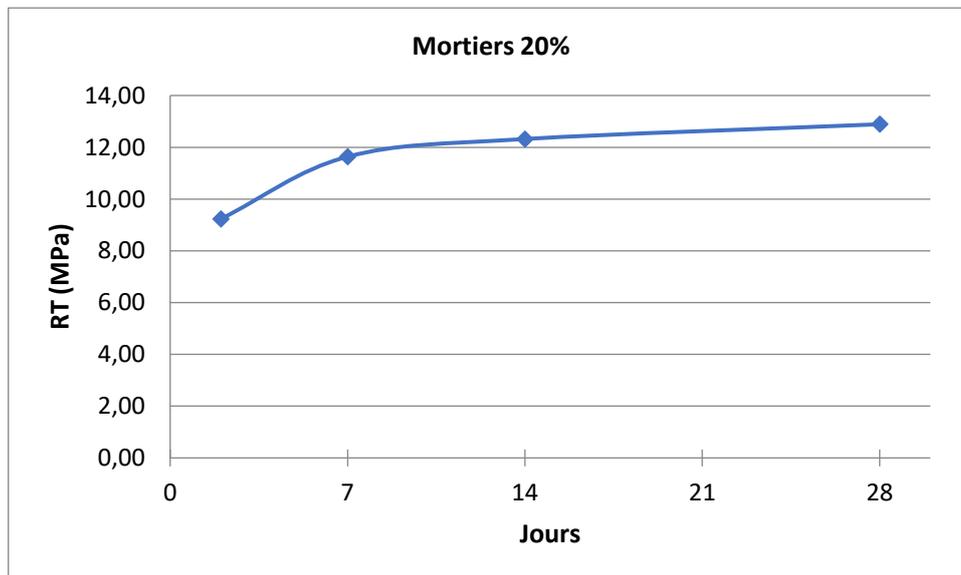


Figure III - 31 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 20 % de FGFR courbe.

Toutes les résistances ont resté presque le même par rapport aux mortiers précédents, ce qui fait que on a aller de voir presque même résultat aussi est

Chapitre III : Résultat & analyse

surement dû à la diminution de 20% de la quantité du ciment qui compose les mortiers.

➤ Mortiers avec fines de GR (25% de substitution) :

Les figures (III-32) et (III-33) présentent les résistances à la traction par flexion R_t en fonction du temps des mortiers contenant 25% de ciment substitué par les FGBR.

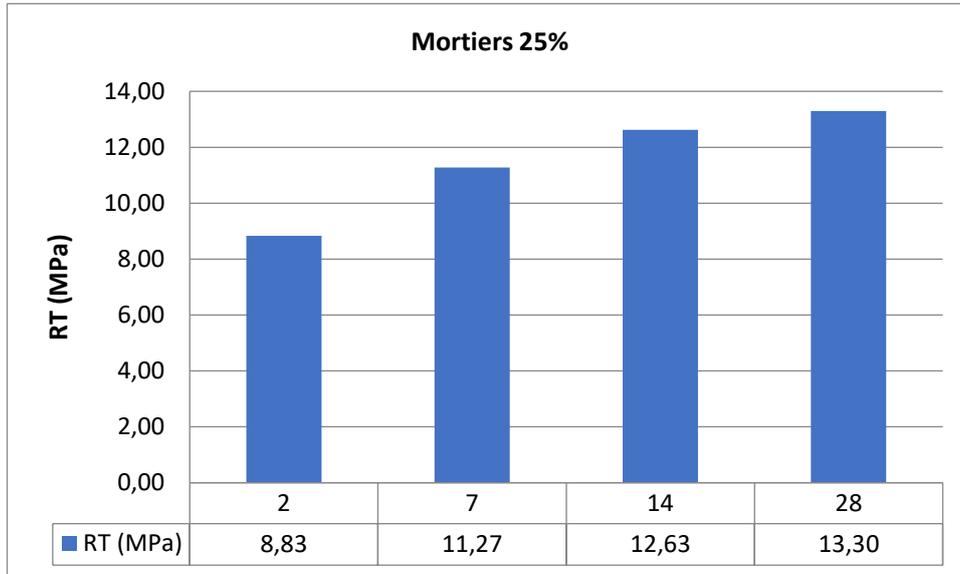


Figure III - 32 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 25 % de FGBR
histogramme

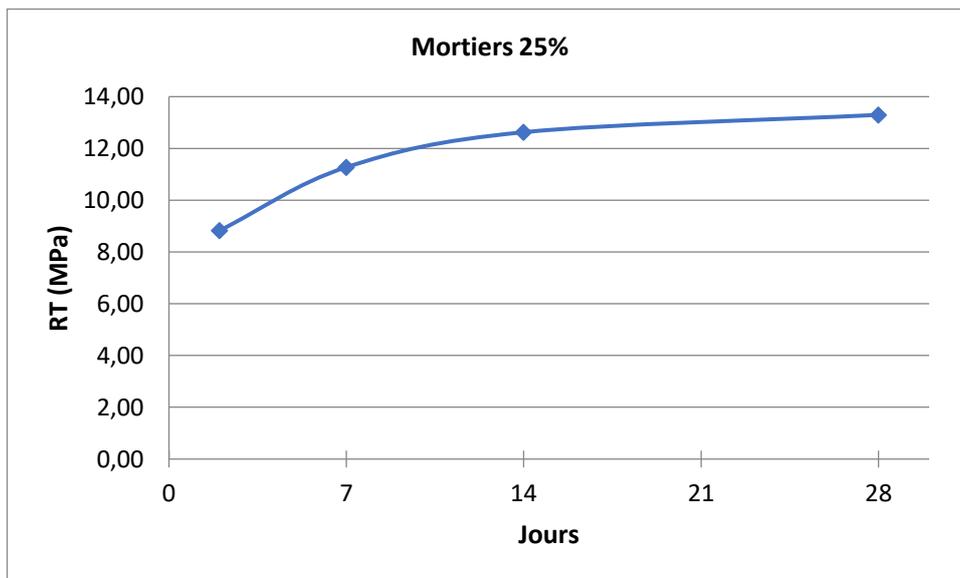


Figure III - 33 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 25 % de FGBR
courbe.

Chapitre III : Résultat & analyse

A 2 jours, ces mortiers ont développé des résistances un peu faibles par rapport aux mortiers précédents. Entre 14 et 28 jours les résistances sont proches, et on peut avoir peut-être l'augmentation de la résistance après 28 jours.

➤ Mortiers avec fines de GR (30% de substitution) :

Les différentes résistances à la traction par flexion R_t des mortiers dont 30% de ciment ont été substitués par les FGBR sont affichées sur les figures (III-34) et (III-35) suivantes :

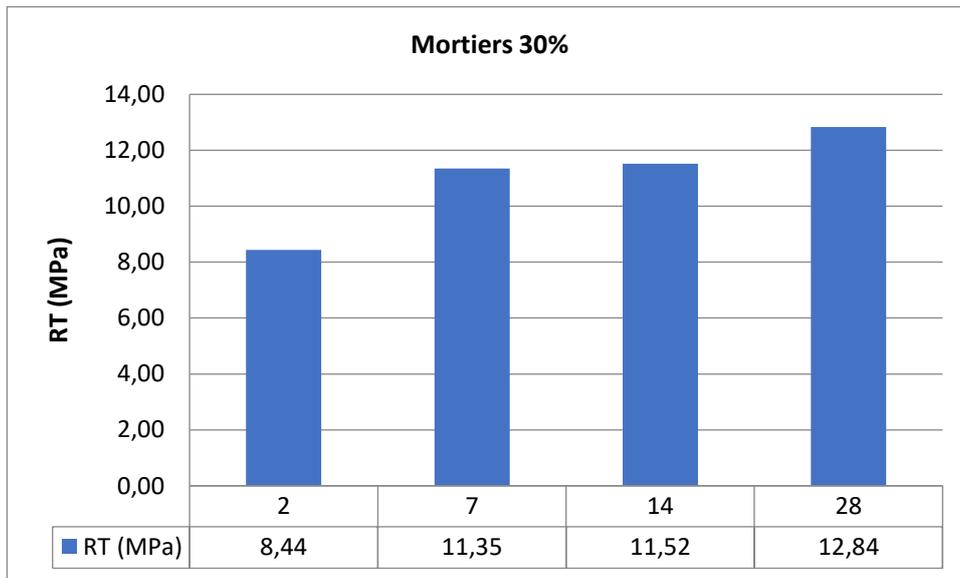


Figure III - 34 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 30 % de FGBR histogramme.

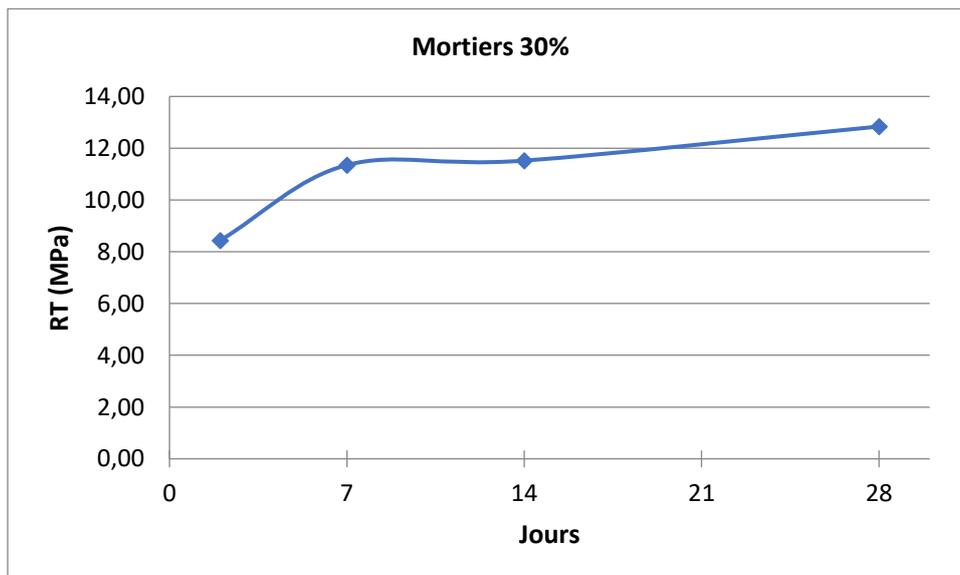


Figure III - 35 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 30 % de FGBR courbe.

Chapitre III : Résultat & analyse

Les résistances à la traction par flexion R_t trouvées sont croissantes jusqu'à l'âge de 28 jours. Enfin après 28 jours on peut avoir une augmentation double de la résistance à la traction par flexion mais qui continue à augmenter après cette date. Substituer 30% de ciment par des fines de granulats de bétons recyclés continue à développer des résistances assez intéressantes.

➤ **Mortiers avec fines de GR (40% de substitution) :**

Les résistances à la traction par flexion R_t des mortiers fabriqués avec 40% de FGBR sont données dans les figures ci-dessous :

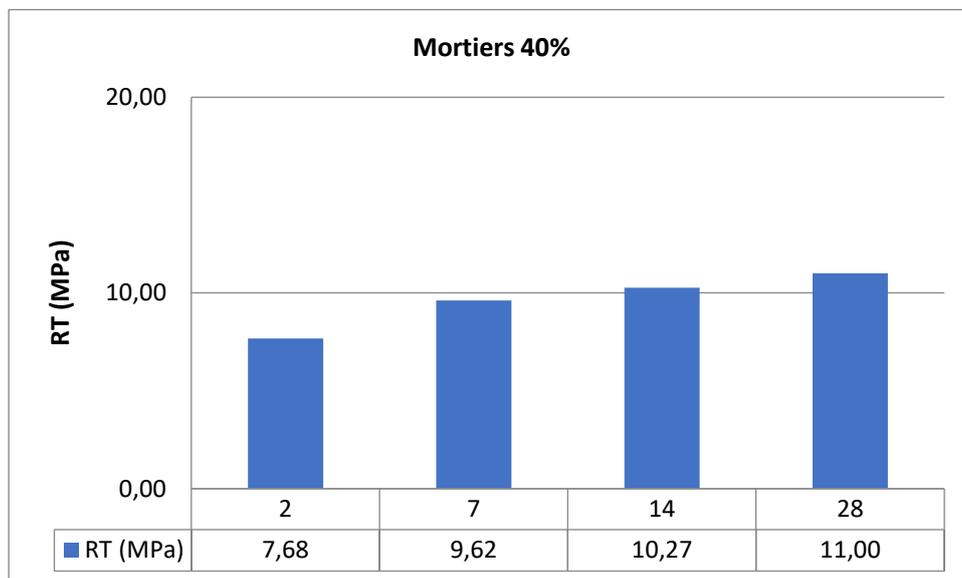


Figure III - 36 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 40 % de FGBR histogramme.

Chapitre III : Résultat & analyse

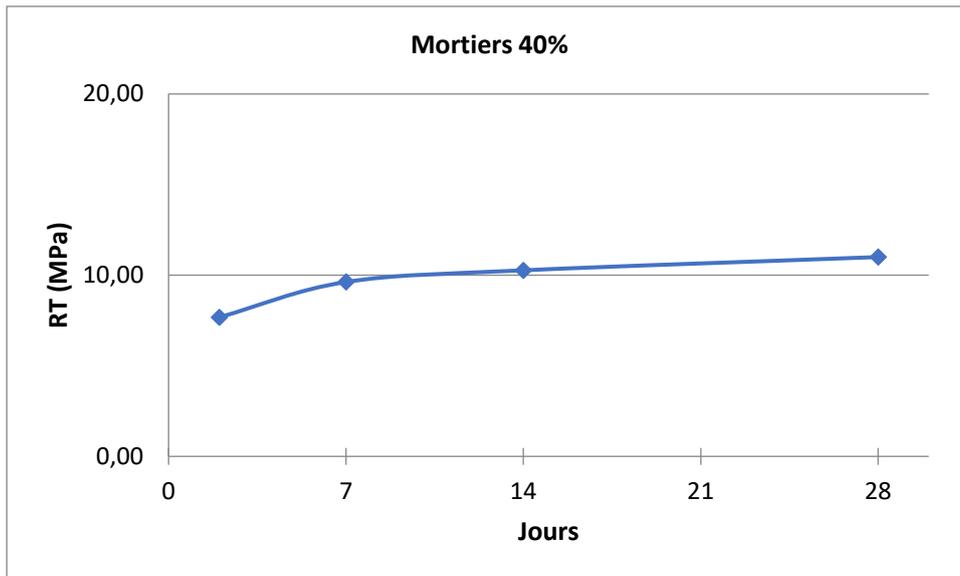


Figure III - 37 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 40 % de FGFR courbe.

Il apparaît clair des résultats obtenus que les résistances à 2 jours de l'ordre de 8 MPa soient les plus faibles comparées à celles des mortiers précédents.

La pente croissante (Figure III-37) montre que les résistances continueront à augmenter jusqu'à 14 jours et pourront stabiliser la valeur de 11 MPa obtenue à 28 jours.

➤ **Mortiers avec fines de GR (50% de substitution) :**

Les résultats des mesures des résistances à la traction par flexion R_t sont donnés par les figures ci-après :

Chapitre III : Résultat & analyse

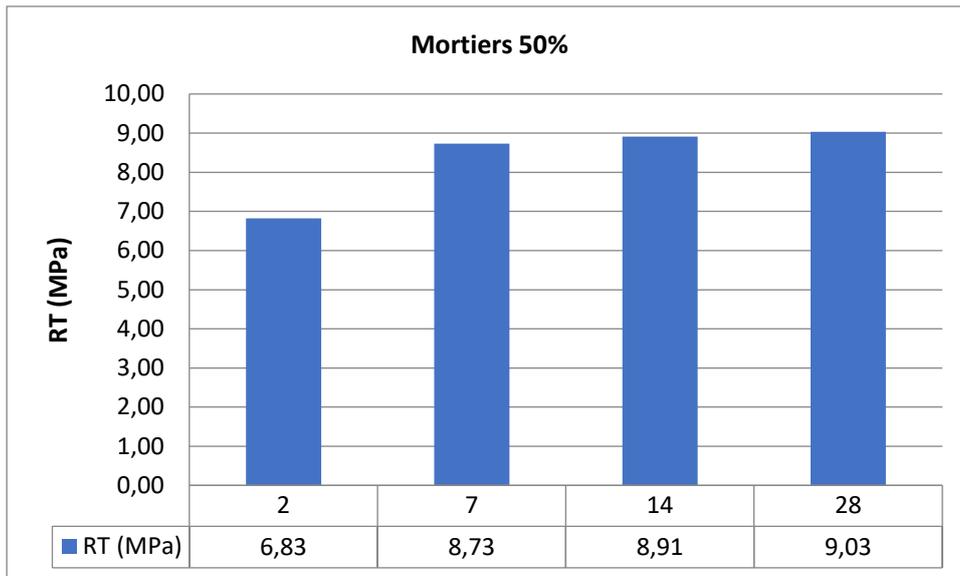
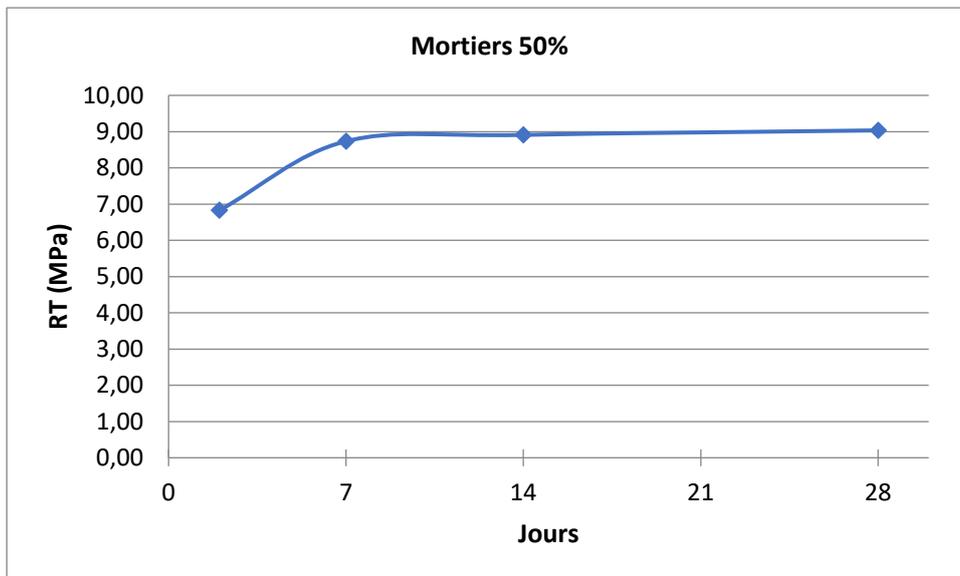


Figure III - 38 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 50 % de FGBR



histogramme.

Figure III - 39 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 50 % de FGBR
graphe.

Les résistances initiales (à 2 jours) obtenues valent 6MPa, elles sont croissantes jusqu'à 14 jours. La (figure III-39) montre que les résistances à 7 et 14 jours sont presque similaires. La figure III- montre un rebondissement (une bosse) à 7 jours, synonyme du commencement des résistances intéressantes, la pente de la courbe entre 2 et 7 jours est très élevée. Entre 14 et 28 jours il reste presque constante.

Chapitre III : Résultat & analyse

➤ Mortiers avec fines de GR (60% de substitution) :

Sur les mortiers avec 60% de substitution de ciment par les FGBR, les résistances ont été mesurées et résultats ont montrée dans les figures ci-dessous :

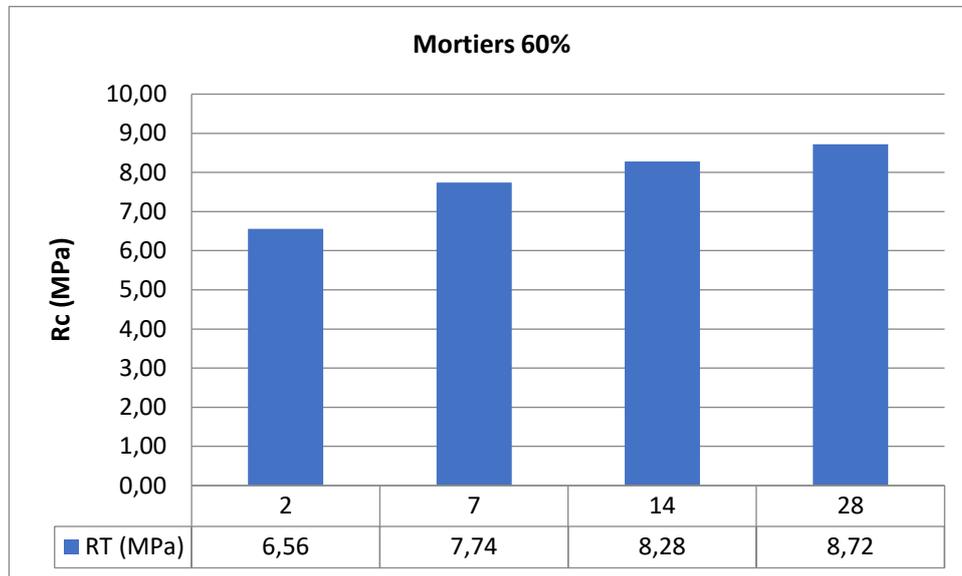


Figure III - 40 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 60 % de FGBR histogramme.

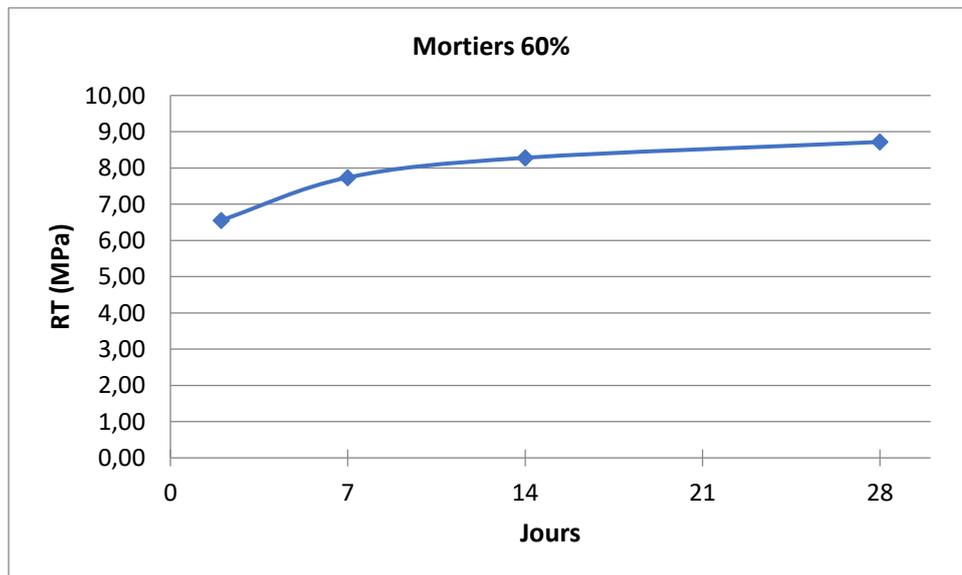


Figure III - 41 : La résistance à la traction par flexion R_t de mortier 60 % de FGBR courbe.

Remplacer 60% de ciment par des fines inertes n'a pas empêcher de développer des résistances croissantes entre 2 et 28 jours, variant de 10 MPa à plus de 26 MPa. Une bosse a été observé entre 7 et 14 jours.

Chapitre III : Résultat & analyse

3.2 Evolution des résistances :

L'étude de l'évolution des résistances permet de voir plus clair les variations des résistances par rapport à celles des mortiers de référence. L'évolution des résistances se mesure par le rapport entre résistances $R_c(\text{mortiers}) / R_c(\text{mortiers } 0\%)$. La figure (III-42) présente les évolutions des résistances à la compression de tous les mortiers confectionnés :

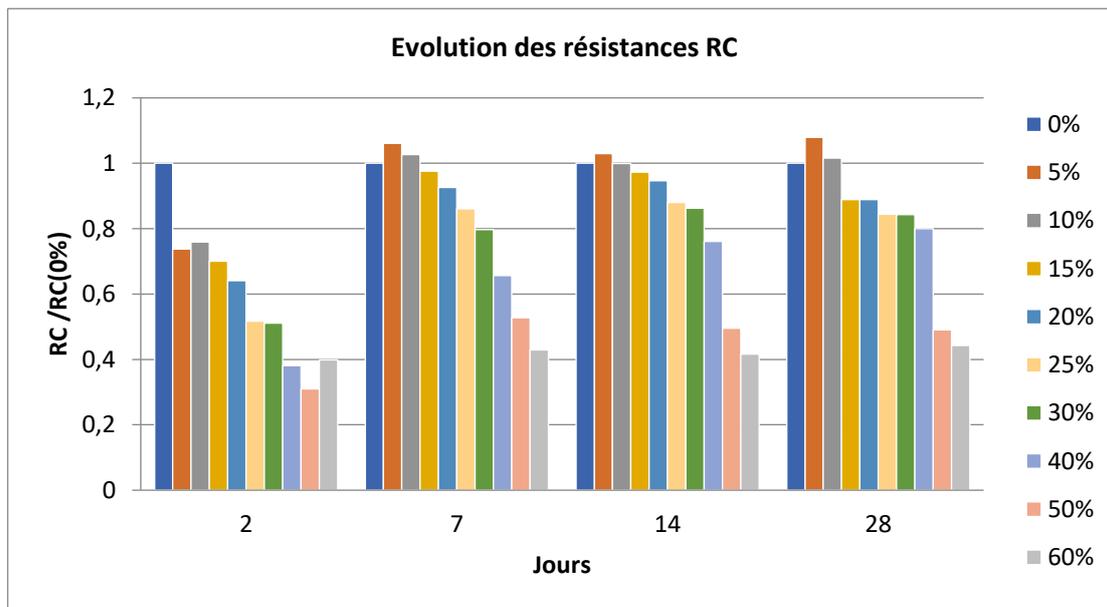


Figure III - 42 : Évolutions des résistances à la compression des mortiers.

De la figure, on peut observer qu'à 2 jours tous les mortiers avec fines substituées ont des résistances inférieures à celle du mortier témoin.

C'est à partir de 7 jours que les mortiers commencent à développer des résistances intéressantes, les mortiers à 5% et 10% ont donné des résistances supérieures à celle du mortier avec 100% de ciment. Avec 15% de substitution, les résistances sont voisines de celle de 0%.

À partir de 7 jours et jusqu'à 28 jours, les mortiers avec 5% et 10% ont donné des résistances supérieures et parfois similaires à celles des mortiers de référence.

À 14 et 28 jours, les résistances des mortiers à 15%, 20%, 25% et 30% ont évolué d'une façon similaire.

Chapitre III : Résultat & analyse

Les mortiers à 20%, 30% et 40% fines substituées ont développé des résistances inférieures, les résistances les plus faibles sont celles à base de liants contenant 50% et 60% de FGBR substituées au ciment.

3.3 Pertes de masse :

Les masses des différents entre 2 et 28 jours ont été mesurées juste avant de procéder aux écrasements des éprouvettes, ce qui a permis de suivre les variations des masses de ces mortiers au cours du temps. Ces variations sont représentées par les figures (III-43) et (III-44) ci-après. Afin de désencombrer les courbes, les variations des pertes de masses sont représentées sur lots de courbes séparées.

Les pertes des masses sont calculées selon la formule suivante :

$$Pertedemasse = \frac{(Mt - M0) \times 100}{M0}$$

Avec :

Mt : Masse du mortier à base de FGBR

M0 : Masse du mortier de référence à la même échéance.

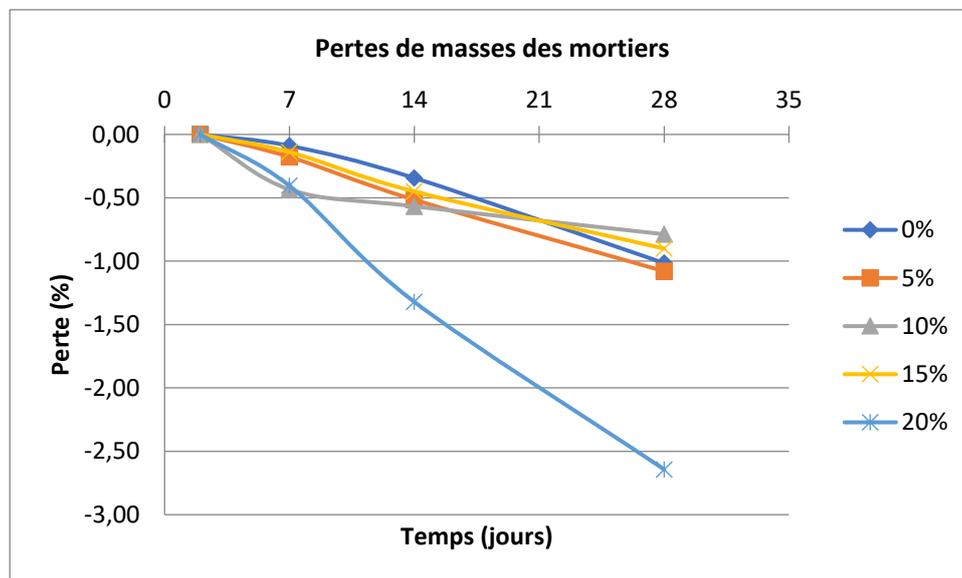


Figure III - 43 : Pertes des masses des mortiers (lot 1).

De la courbe, les pertes des masses des mortiers à 0%, 5%, 10% et 15% évoluent de la même façon, alors que celles des mortiers à 20% se détachent du lot (ces pertes sont les plus faibles).

Chapitre III : Résultat & analyse

Entre 21 et 28 jours, les pertes des masses des mortiers à 10% et 15% de FGBR substituées ont enregistré des pertes de masses inférieures à celles des mortiers de référence.

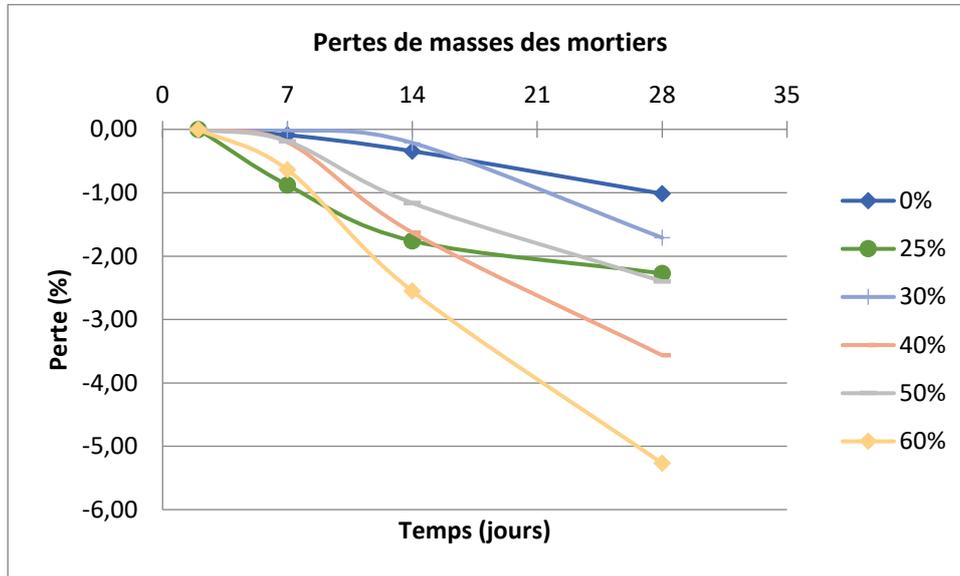


Figure III - 44 : Pertes des masses des mortiers (lot 2).

Les pertes des masses des mortiers à 40% et 50% sont les plus faibles.

Au-delà de 14 jours, toutes les pertes des masses des mortiers sont inférieures à celles du mortier de référence.

Un changement de pente inexplicable a été observé pour les mortiers à 14% de FGBR à partir de 14 jours.

3.4 Absorption capillaire :

La capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés a été étudiée et montrée plus dans plusieurs études (A. Grondin, 2011, Guerzou & al., 2018, Zitouni & al., 2020) que les granulats issus des bétons recyclés ont des capacités d'absorption d'eau importantes. Peu d'études se sont intéressées à la capacité d'absorption des fines de granulats recyclés. Ceci explique l'importance de mesurer ce paramètre sur les mortiers à base de FGBR.

La mesure de la capacité d'absorption (CA) se fait selon la formule suivante :

$$CA = \frac{M_t - M_i}{S} \text{ en g/mm}^2$$

Mt : Masse de l'éprouvette du mortier à l'instant de mesure (t)

Chapitre III : Résultat & analyse

Mi : Masse de l'éprouvette du mortier initiale au début des mesures.

S : Surface de contact avec l'eau ($40 \times 40 \text{ mm}^2 = 1600 \text{ mm}^2$).

Les figures ci-dessous montrent les évolutions des capacités d'absorption (CA) des différents mortiers en fonction du temps. Les mesures se sont arrêtées après stabilisation (fin d'absorption).

Pour une représentation claire, les valeurs (CA) trouvées (ordonnées) ont été multipliées par 100.

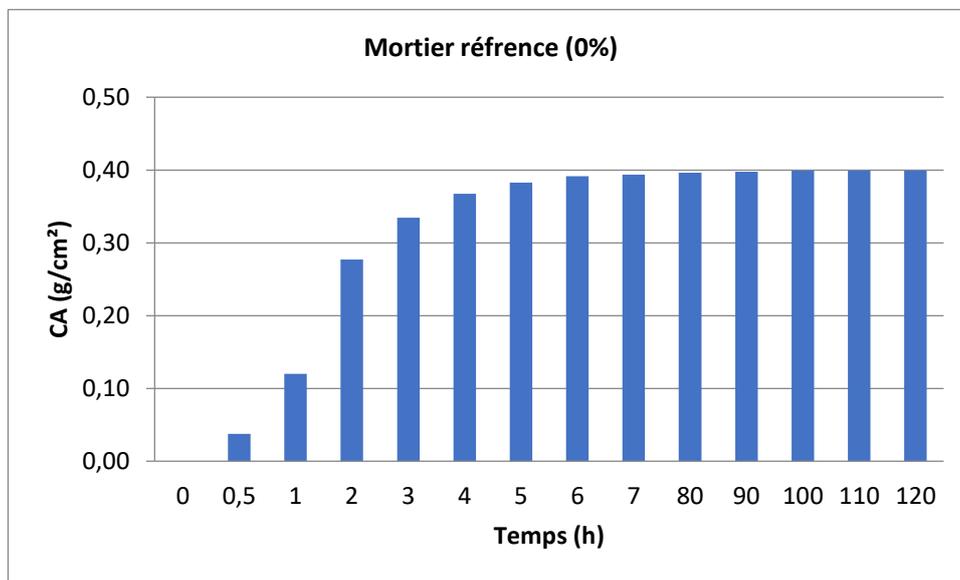


Figure III - 45 : CA des mortiers de référence.

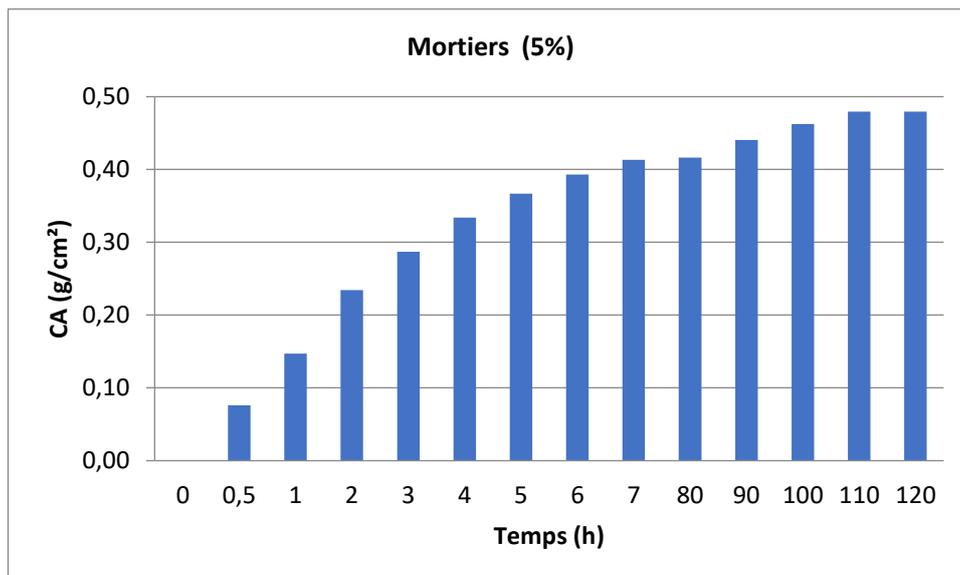


Figure III - 46 : CA des mortiers avec 5% de FGFR.

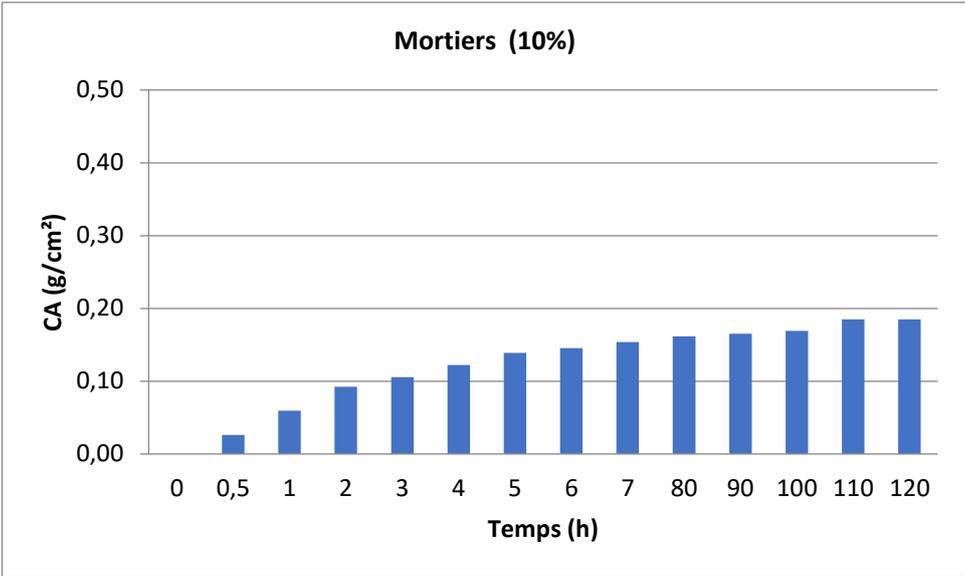


Figure III - 47 : CA des mortiers avec 10% de FGBR.

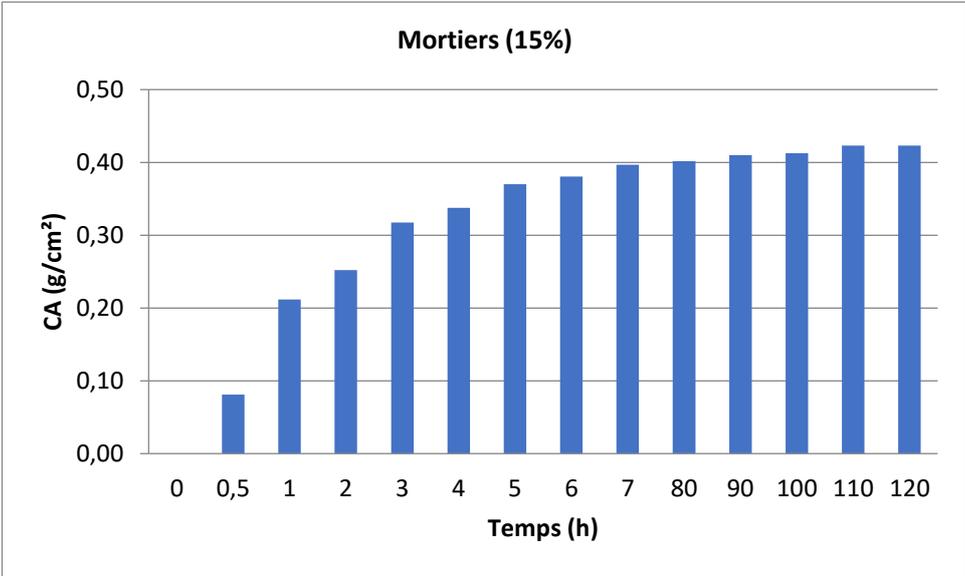


Figure III - 48 : CA des mortiers avec 15% de FGBR.

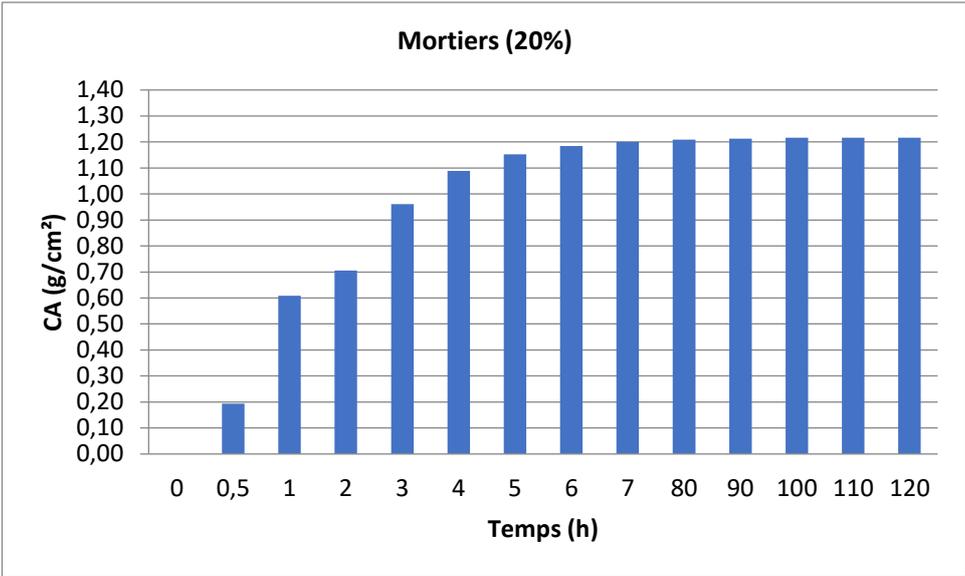


Figure III - 49 : CA des mortiers avec 20% de FGBR.

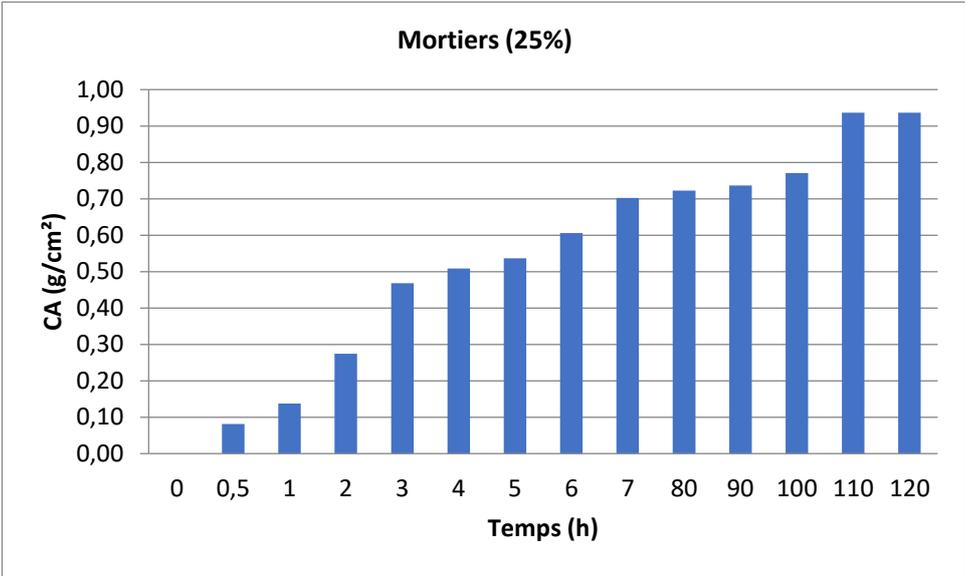


Figure III - 50 : CA des mortiers avec 25% de FGBR.

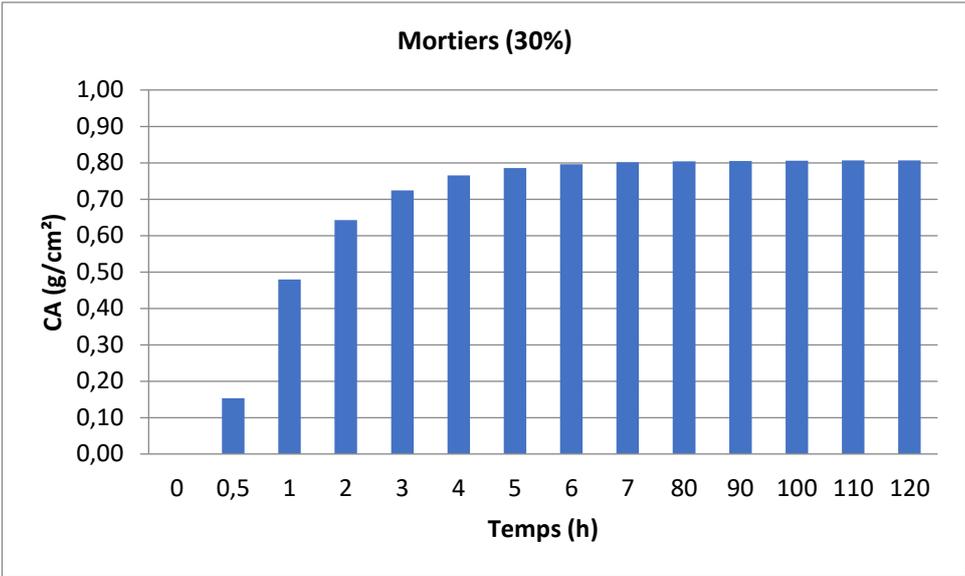


Figure III - 51 : CA des mortiers avec 30% de FGBR.

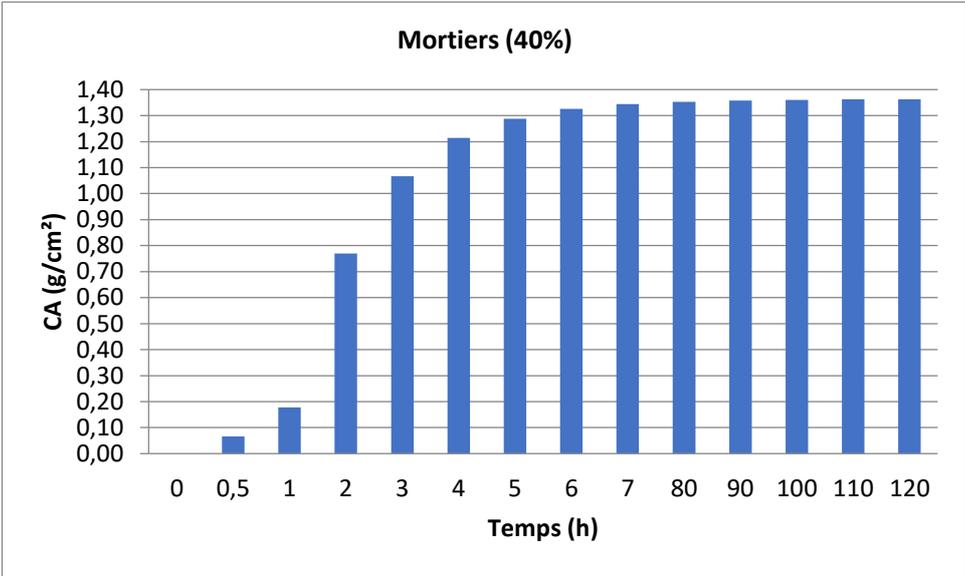


Figure III - 52 : CA des mortiers avec 40% de FGBR.

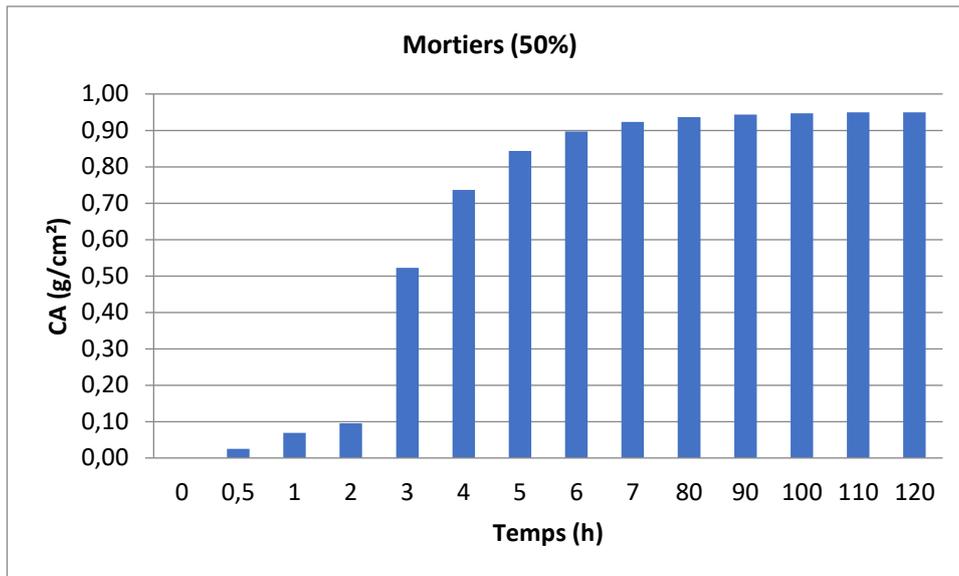


Figure III - 53 : CA des mortiers avec 50% de FGBR.

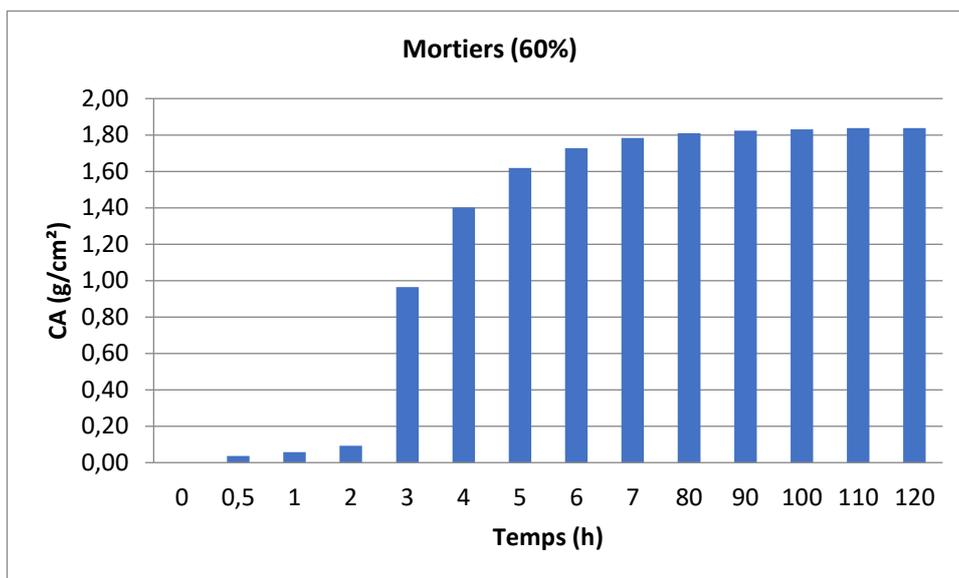


Figure III - 54 : CA des mortiers avec 60% de FGBR.

Les mortiers de référence sans fines sont les moins perméables à l'eau. Leur capacité d'absorption (CA) s'est stabilisée à 0,40 g/cm² après 7 heures passées en contact avec de l'eau.

Avec 5% de substitution, l'absorption a continué à croître pour atteindre 0,48g/cm² après 120 heures.

Les mortiers contenant 10% de FGBR ont donné les valeurs de (CA) les plus faibles, de valeur maximale de 0,19 g/cm² à partir de la 120^{ème} heure.

Chapitre III : Résultat & analyse

Les mortiers à 15% de FGBR ont une absorption accélérée les 7 premières heures puis (CA) atteint un maximum de 0,42 g/cm² à 110 heures.

La substitution de 20 de ciment par les FGBR a donné les valeurs de (CA) les plus grandes de tous les mortiers précédents, la valeur maximale de 1,21 g/cm² a été obtenue à la 80^{ème} heure.

À 25% de substitution, une accroissance absorption a été observée pour se stabiliser à 0,94 g/cm² au bout de 110 heures.

Les mortiers avec 30% de FGBR ont cessé d'absorber de l'eau (CA= 0,8 g/cm²) à partir de 6 heures.

Initialement ralentie, l'absorption s'est accélérée pour les mortiers avec 35% de FGBR et atteint des valeurs maximales très proches (1,34 à 1,36) à partir de 7 heures.

Avec 40% de substitution, les valeurs de (CA) de 1,34 g/cm² à 7 heures ont peu changé à 1 36 cm² à partir de 90 jours.

Les mortiers contenant 50% de ciment et 50% de FGBR ont donné des variations de (CA) de 0,10 g/cm² à 2 heures pour atteindre 0,95 g/cm² à 100 heures.

Avec 60% de FGBR, l'absorption d'eau n'a débuté qu'après 3 heures de contact. La valeur maximale CA = 1,84 g/cm² mesurée à 120 heure est la plus grande valeur par rapport à tous les mortiers. Ces mortiers contiennent 60% de FGBR et seulement 40% de ciment.

4 Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs essais ont été faits sur les mortiers de différentes compositions. Les résistances mécaniques (compression et traction) des mortiers composés de différents taux de substitutions de FGBR sont comparées à celles du mortier de référence. Les résultats montrent que les FGBR mélangées au ciment peuvent former un liant hydraulique et les résistances obtenues sont supérieures à celles des mortiers de référence (cas de 5% et 10% de substitution).

Entre 15% et 40% de substitution, toutes les résistances lui sont inférieures mais restent supérieures à 45 MPa à 28 jours.

Chapitre III : Résultat & analyse

Pour les mortiers avec 50% et 60% de FGBR, les résistances ont chuté, elles sont inférieures à 30 MPa à 28 jours, mais restent satisfaisantes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans cette étude, nous avons montré qu'il est possible d'utiliser un déchet et le valoriser comme matériau de construction. Les fines issues du broyage des granulats de bétons de démolition ont été substituées à une partie de ciment pour former un liant.

Les résultats obtenus ont montré que le liant ainsi obtenu a les mêmes caractéristiques que le ciment : le mélange (ciment + FGBR) réagit avec l'eau et peut donc s'hydrater et durcir dans le temps.

Les temps des butts déprisés des différents mortiers diminuent en fonction de l'augmentation du taux de substitution : moins de ciment donne un temps de prise inférieur à celui du mortier de référence (100% de ciment).

Jusqu'à 60% de substitution, les résistances mécaniques à 28 jours sont acceptables (elles sont toutes supérieures à 26 MPa).

Les mortiers avec 5% et 10% de FGBR ont donné des résistances supérieures à celle du mortier avec 100% de ciment.

Entre 15% et 40% de substitution, toutes les résistances lui sont inférieures mais restent supérieures à 45 MPa à 28 jours.

Pour les mortiers avec 50% et 60% de FGBR, les résistances sont les plus faibles, elles sont inférieures à 30 MPa à 28 jours, mais restent satisfaisantes.

A 5%, 10%, 15% et 20%, les valeurs de l'absorption capillaire (CA) mesurées sont équivalentes à celle du mortier de référence.

À 25% de substitution, une accroissance absorption a été observée pour se stabiliser à 0,94 g/cm² au bout de 110 heures.

Les mortiers avec 30% de FGBR ont cessé d'absorber de l'eau (CA= 0,8 g/cm²) à partir de 6 heures.

Initialement ralentie, l'absorption s'est accélérée pour les mortiers avec 35% de FGBR et atteint des valeurs maximales très proches (1,34 à 1,36) à partir de 7 heures.

Avec 40% de substitution, les valeurs de (CA) de 1,34 g/cm² à 7 heures ont peu changé à 1,36 g/cm² à partir de 90 jours.

Conclusion Générale

Les mortiers contenant 50% de ciment et 50% de FGBR ont donné des variations de (CA) de 0,10 g/cm² à 2 heures pour atteindre 0,95 g/cm² à 100 heures.

Avec 60% de FGBR, l'absorption d'eau n'a débuté qu'après 3 heures de contact. La valeur maximale CA = 1,84 g/cm² mesurée à 120 heures est la plus grande valeur par rapport à tous les mortiers. Ces mortiers contiennent 60% de FGBR et seulement 40% de ciment.

Les pertes des masses des mortiers à 0%, 5%, 10% et 15% évoluent de la même façon, alors que celles des mortiers à 20% se détachent du lot (ces pertes sont les plus faibles).

Entre 21 et 28 jours, les pertes des masses des mortiers à 10% et 15% de FGBR substituées ont enregistré des pertes de masses inférieures à celles des mortiers de référence.

Au-delà de 14 jours, toutes les pertes des masses des mortiers sont inférieures à celles du mortier de référence.

Un changement de pente inexplicable a été observé pour les mortiers à 14% de FGBR à partir de 14 jours.

À la fin de ce travail, nous recommandons de :

Continuer la substitution des FGBR à des taux supérieurs à 60%.

Étudier la porosité à l'air des différents mortiers pour expliquer les valeurs de (CA) trouvées.

Confectionner des bétons avec les mêmes taux de substitution.

Référence Bibliographique :

A

Abbas .A, 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.

B

Bendimerad .A.Z, E. Roziere, A. Loukili, : Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 3557–3569.

Bessa-Badreddine .A: « Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers », thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2004.

Bordy .A, 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.

D

De Juan .M.S & Gutiérrez P.A: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 872–877.

De Juan .M.S, P.A. Gutiérrez: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Constr. Builder. Mater.* 23 (2009) 872–877.

Direction générale de la recherche et de l'innovation : HORIZON 2020 en bref, 2013.

E

E. 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption ., 2013.

E. 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption, 2013.

Evangelista .L and J. de Brito: " Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, " Cem. Concr. Compos., vol. 29, no. 5, pp. 397-401, May 2007.

F

Florea .M.V.A, Z. Ning, H.J.H : Brouwers, Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, Constr. Build. Mater. 50 (2014) 1–12.

G

Gentilini .P, O. Yazoghli-Marzouk, V. Delmotte : Y. Descantes, Determination of the water content of fullerides fine aggregates in the saturated surface dry state, Constr. Build. Mater. 98 (2015) 662–670.

Grondinn , 2011 : A. Grondin, Valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des Bétons de granulats recyclés de béton, PhD Thésis, INSA de Strasbourg, France, 2011.

Guerzou .T & al, 2018 : Tourkia Guerzou, Abdelkader Mebrouki, Joao Castro-Gomes Study of concretes properties based on pre-saturated recycled aggregates, journal of materials and engineering structures 5 (2018) 279–288.

H

Habert .G, N. Roussel : Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental, XXVIème Rencontres Univ. Génie Civ. AUGC 2008, Jun 2008, Fr. (2008).

I

IFSTTAR : Test Method No.78, Tests on granulates in concrete: measurement of total water absorption of crushed sand, 2011.

K

Kajaste .R, M. Hurme : Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost, J. Clean. Prod.

Kou .S.C and C. S. Poon : " Cement & Concrete Composites Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, " Cem. Concr. Compos., vol. 31, no. 9, pp. 622-627, 2009.

L

Le .T: Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers, 2015.

Le .T, 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. Builder. Mater.* 141 (2017) 479–490.

Le .T, S. Rémond, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz: Fresh behavioral of Mortara based on recycled sand - Influence of moisture condition, *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 35–42.

Le .T: Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers, 2015.

Li .X : " Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete, " *Resour. Conserv . Recycl .* , vol . 53 , no . 3 , pp . 107-112 , 2009 .

M

Malesev et al, 2010 : M. Malešev, V. Radonjanin, and S. Marinković, " Recycled concrete as aggregate for structural concrete production, " *Sustainability*, vol. 2, no. 5, pp. 1204-1225, 2010.

Mechling .M, A. Lecomte, K. Merriaux : Mesure de l'absorption d ' eau des additions min rales des b tons par vaporom trie, *Matériaux Constr.* 36 (2003) 32–39.

Mills-beale .J, 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.

N

Nagataki .S, A. Gokce, T. Saeki, and M. Hisada : " Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, " *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 965-971, Jun. 2004.

Nagataki .S, A. Gokce, T. Saeki, M. Hisada: Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, *Cem. Concrete. Res.* 34 (2004) 965–971.

Norme, «NF EN 1015-6» : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais. », Octobre 1999.

Norme, NA 2607(2005): Norme Algérienne, ICS91.100.20, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, adopter le08/10/2009.

Norme, NA 455(1999): Norme Algérienne, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines - Equivalent de sable, adopter le16/05/2006.

O

Oksri-Nelfia .L : Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques, (2015).

Omary .S, E. Ghorbel, G. Wardeh: Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, Constr. Build. Mater. 108 (2016) 163–174.

P

Pereira .P, L. Evangelista, and J. De Brito : " The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates, " Constr. Build. Mater., vol. 28, no. 1, pp. 722-129, 2012.

R

Recycled béton. PN: Complete recycling of concrete, (2012).
<http://www.pnrecybeton.fr/>

Rodrigues .F, 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.

S

Sato .R, I. Maruyama, T. Sogabe, M. Sogo: Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams, J. Adv. Concrete. Technol. 5 (2007).

Schwartzentruber .A, C. Catherine : La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d ' aide h la formulation des bétons adjuvants, Mater. Structure. 33 (2000) 475–482.

Sogo .M, T. Sogabe, I. Maruyama, R. Sato, and K. Kawai: " Shear Behavior of Reinforced Recycled Concrete, " in RILEM proceeding 40, 2004, pp. 610-618.

T

Tam . V.W.Y, 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.

Tegguer .A.D: Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, Constr. Build. Mater. 27 (2012) 112–116.

U

UEPG : EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION, 2017.

UNICEM,2008 : UNICEM, Carrières de roches massives potentialités écologiques, 2008.

UNICEM,2018 : L'industrie Française des granulats, 2018 (2018) 3–4.

V

Villoria Saez .P: European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste, Open Constr. Build. Technol. J. 5 (2011) 156–161.

Z

Zhang .M.-H, O.E. Gjørv: PENETRATION OF CEMENT PASTE LIGHTWEIGHT AGGREGATE, 22 (1992) 47–55.

Zhao .Z, 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.

Zhao .Z: Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars, 072 (2013) 188.

Zitouni .K & al., 2020 : Kheira Zitouni, Assia Djerbi and Abdelkader Mebrouki, Grondinn Study on the Microstructure of the New Paste of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete, Materials 2020.