



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 2 : Influence des granulats recyclés sur la compatibilité des adjuvants avec les ciments

Auteurs :

F. CHALACON – D. ROGAT (SIGMA BETON)
S. AGGOUN – A. BOUVET – A. KACI –
E. KADRI – T. NGO – Z. TAHAR (L2MGC)

R/15/RECY/029
LC/14/RECY/47-48
Décembre 2015

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Influence des granulats recyclés sur la compatibilité des adjuvants avec les ciments

RAPPORT N° : R/15/RECY/029

DATE D'ÉTABLISSEMENT : Décembre 2015

AUTEUR(S) : F. CHALANCON – D. ROGAT
S. AGGOUN – A. BOUVET – A. KACI – A. KADRI – T. NGO – Z. TAHAR

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : SIGMA BETON – L2MGC

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE : LC/14/RECY/47 – LC/14/RECY/48

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Table des matières

Résumé	8
Abstract	9
I. Introduction.....	10
II. Programme expérimental.....	10
II.1 Matériaux utilisés	11
II.1.1 Granulats	11
II.1.2 Ciments :.....	17
II.1.3 Adjuvants :.....	18
II.2 MBE (Mortier de Béton Equivalent) :.....	19
▪ <i>Choix des couples ciments / adjuvants</i>	19
▪ <i>Formulation des MBE</i>	20
▪ <i>Procédure de malaxage du MBE [5]</i>	20
▪ <i>Essais réalisés</i>	21
II.3 Béton :.....	22
▪ <i>Formulation du béton testé</i>	22
▪ <i>Procédure de malaxage du béton</i>	22
▪ <i>Essais réalisés</i>	22
III. Résultats et interprétations.....	24
II.1. Résultats sur les MBE	24
a) <i>Variation du dosage en adjuvant pour obtenir un étalement à 280± 20 mm</i>	24
b) <i>Evolution de l'étalement</i>	25
c) <i>Variation de la teneur en air</i>	27
d) <i>Variation de la masse volumique</i>	29
e) <i>Variation de la température</i>	31
f) <i>Variation de la résistance en compression au jeune âge</i>	33
▪ <i>Conclusion sur les MBE :</i>	34
II.2. Résultats sur les bétons.....	35
II.2.1. Bétons avec sable recyclé (SR)	35
▪ <i>Conclusion sur les sables recyclés</i>	48
II.2.2. Bétons avec graviers recyclés (GR).....	49
▪ <i>Conclusion sur les graviers recyclés :</i>	62
IV. Conclusions générales.....	63
Bibliographie.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coefficient d'absorption d'eau des sables (SN et SR) et des granulats (GN et GR) recyclés.	16
Tableau 2 : Coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés mesurés par différents laboratoires dans le cadre du PN RECYBETON.	16
Tableau 3 : Caractéristiques physiques et chimiques des cinq ciments utilisés.	17
Tableau 4 : Constituants et caractéristiques minéralogiques des cinq ciments utilisés.	17
Tableau 5 : Les adjuvants et leurs compatibilités avec les ciments.	18
Tableau 6 : Formulations de béton.	20
Tableau 7 : Formulations de MBE.	20
Tableau 8 : Récapitulatif des essais réalisés sur les MBE.	21
Tableau 9 : Formulations de béton.	22
Tableau 10 : Récapitulatif des essais réalisés sur bétons.	23
Tableau 11 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements en fonction du pourcentage sable recyclé.	34
Tableau 12 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements pour les essais réalisés.	48
Tableau 13 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements en fonction du pourcentage de gravier recyclé.	62
Tableau 14 : Variation du sable recyclé et gravier recyclé.	64
Tableau 15 : Synthèse de l'impact des couples ciment/adjuvant et du pourcentage de sable et de gravier recyclé sur le comportement du béton. (Acceptable (✓) et Pas acceptable (×)).	65

Liste des figures

Figure 1 : Courbes granulométriques des sables naturels (SN) et recyclés (SR).....	12
Figure 2 : Sable naturel et recyclé (0/4mm).....	12
Figure 3 : Courbes granulométriques des granulats (4/10) naturels (GN) et recyclés (GR).....	13
Figure 4 : Gravier naturel et recyclé (4/10).....	13
Figure 5 : Courbes granulométriques des granulats (10/20) naturels (GN) et recyclés (GR).....	14
Figure 6 : Gravier naturel et recyclé (10/20).....	14
Figure 7 : Courbes granulométriques des gros granulats naturels (GN) et recyclés (GR).....	15
Figure 8 : Exemple de sable caractéristique pour mesure d'absorption selon la norme NF 1097-6.....	15
Figure 9 : Dimensions du mini-cône.....	19
Figure 10 : Pourcentage d'adjuvant à utiliser pour les différents couples ciment/adjuvant afin de maintenir un étalement de 280 mm à l'instant initial (T ₀).....	24
Figure 11 : Etalement du MBE à 30% de sable recyclé à 280±20 mm.....	25
Figure 12 : Évolution de l'étalement à T ₀ en fonction du pourcentage de sable recyclé pour les 5 couples ciment / adjuvant.....	25
Figure 13 : Evolution de l'étalement à 0 % de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	25
Figure 14 : Evolution de l'étalement à 15 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	26
Figure 15 : Evolution de l'étalement à 30 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	26
Figure 16 : Evolution de l'étalement à 100 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	26
Figure 17 : Evolution de la teneur en air à T ₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	27
Figure 18 : Evolution de la teneur en air à T ₃₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	27
Figure 19 : Evolution de la teneur en air à T ₆₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	28
Figure 20 : Evolution de la teneur en air à T ₉₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	28
Figure 21 : Evolution de la masse volumique à T ₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	29
Figure 22 : Evolution de la masse volumique à T ₃₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	29
Figure 23 : Evolution de la masse volumique à T ₆₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	30
Figure 24 : Evolution de la masse volumique à T ₉₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	30
Figure 25 : Evolution de la température à T ₀ en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	31

Figure 26 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	31
Figure 27 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	32
Figure 28 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	32
Figure 29 : Eprouvettes 4x4x16.....	33
a) b) Figure 30 : Eprouvettes 4x4x16 à 1 jour pour E/C=0,45 a) couple B à 0%SR, b) couple E à 100%SR.....	33
Figure 31 : Evolution de la résistance à 1 jour en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	34
Figure 32 : Evolution de la résistance à 7 jours en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	34
Figure 33 : Evolution du pourcentage d'adjuvant en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	35
Figure 34 : Evolution de l'affaissement à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	35
Figure 35 : Evolution de l'affaissement à T30 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	36
Figure 36 : Evolution de l'affaissement à T60 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	36
Figure 37 : Evolution de l'affaissement à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	37
Figure 38 : Evolution de l'affaissement à 0% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	37
Figure 39 : Evolution de l'affaissement à 15% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	38
Figure 40 : Evolution de l'affaissement à 30% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	38
Figure 41 : Evolution de l'affaissement à 100% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	38
Figure 42 : Evolution de la teneur en air à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	39
Figure 43 : Evolution de la teneur en air à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	40
Figure 44 : Evolution de la masse volumique à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	40
Figure 45 : Evolution de la masse volumique à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	41
Figure 46 : Evolution de la température à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	41

Figure 47 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	42
Figure 48 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	42
Figure 49 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	42
Figure 50 : Eprouvettes 15x30	43
Figure 51 : Evolution de la Résistance en compression à 1j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	43
Figure 52 : Evolution de la Résistance en compression à 7j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	43
Figure 53 : Evolution de la Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	44
Figure 54 : Evolution du module d'élasticité à 28j en fonction du % sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	45
Figure 55 : Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 pour différents couples ciment/adjuvant.....	46
Figure 56 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	46
Figure 57 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	47
Figure 58 : Evolution de la viscosité plastique μ à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	47
Figure 59 : Evolution de la viscosité plastique μ à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	48
Figure 60 : Evolution du pourcentage d'adjuvant en fonction du pourcentage du gravier recyclé pour différents couples pour différents couples ciment/adjuvant	49
Figure 61 : Evolution de l'affaissement à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	50
Figure 62 : Evolution de l'affaissement à T30 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	50
Figure 63 : Evolution de l'affaissement à T60 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	51
Figure 64 : Evolution de l'affaissement à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	51
Figure 65 : Evolution de l'affaissement à 0% de gravier recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	52
Figure 66 : Evolution de l'affaissement à 15% de gravier recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	52
Figure 67 : Evolution de l'affaissement à 30% de gravier recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	53

Figure 68 : Evolution de l'affaissement à 100% de gravier recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.....	53
Figure 69 : Evolution de la teneur en air à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	54
Figure 70 : Evolution de la teneur en air à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	54
Figure 71 : Evolution de la masse volumique à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	55
Figure 72 : Evolution de la masse volumique à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	55
Figure 73 : Evolution de la température à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	56
Figure 74 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	56
Figure 75 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	57
Figure 76 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	57
Figure 77 : Evolution de la Résistance en compression à 1j en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	58
Figure 78 : Evolution de la Résistance en compression à 7j en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant	58
Figure 79 : Evolution de la Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	58
Figure 80 : Evolution du module d'élasticité à 28j en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	59
Figure 81 : Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 pour différents couples ciment/adjuvant.....	60
Figure 82 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	60
Figure 83 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	61
Figure 84 : Evolution de la viscosité plastique μ à T0 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	61
Figure 85 : Evolution de la viscosité plastique μ à T90 en fonction du pourcentage de gravier recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.....	62

Résumé

Devant le besoin croissant de ressources en matériaux de construction ainsi que les exigences en terme de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et des sous-produits industriels, notamment dans le domaine de la construction et des travaux publics.

Les mortiers et bétons confectionnés à partir de granulats recyclés ont fait l'objet de nombreuses études. Toutefois, aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier l'influence de telles substitutions sur leurs propriétés rhéologiques et mécaniques. L'élargissement de l'utilisation des bétons comportant des granulats recyclés, dont les propriétés physico-chimiques sont différentes des bétons à base de granulats naturels, est inévitablement cautionné par une maîtrise accrue, d'une part, de leurs propriétés mécaniques et d'autre part, de leur mise en œuvre.

L'objectif de ce travail est de quantifier l'influence de la nature et du dosage des gravillons et du sable recyclés sur les propriétés rhéologiques et mécaniques.

Pour y parvenir, une campagne d'essais a été menée sur des bétons confectionnés avec différents taux de substitutions (sur le sable et les granulats) et avec différents couples ciments/adjuvants. En ce qui concerne les propriétés rhéologiques, les paramètres mesurés sont les suivants: seuil de cisaillement, viscosité plastique, l'ouvrabilité, la teneur en air et la masse volumique. De plus, afin de suivre l'évolution de ces grandeurs dans le temps les essais ont été réalisés à différents âges (à la sortie du malaxeur, 30 minutes, 60 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage). En ce qui concerne les propriétés mécaniques, des essais de compressions ont été effectués à 1 jour, 7 jours et 28 jours. Les propriétés des bétons ainsi confectionnés ont été comparées à un béton témoin.

Les résultats montrent que les propriétés des bétons et des MBE (Mortier de Béton Equivalent) à base de granulats recyclés dépendent du couple ciment/adjuvant et du dosage de substitution en granulats recyclés. Cela signifie qu'il y a bien une influence du granulats recyclés sur la compatibilité (équilibre physico-chimique) du couple ciment-adjuvant. Cette influence est plus remarquable sur le sable que sur les gravillons. Les résultats montrent aussi que pour des bétons à base de granulats recyclés, plus le pourcentage de substitution augmente, plus le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent et plus la résistance à la compression diminue.

Mots clés : béton, granulats recyclés, sable recyclé, rhéologie, maniabilité

Abstract

With the growing need of building material resources and requirements in terms of environmental protection in a vision of sustainable development, it has become necessary to explore all possibilities for the reuse and recycling of and industrial waste products, especially in the field of construction and public works.

Mortars and concrete made from recycled aggregates were the subject of numerous studies. However, no general rule has been identified to quantify the influence of such substitutions on their rheological and mechanical properties. Expanding the use of concrete containing recycled aggregates whose physicochemical properties are different from concrete with natural aggregates, is inevitably backed by increased mastery, on the one hand, of their mechanical properties, and secondly their implementation.

The objective of this work is to quantify the influence of the nature and dosage of recycled gravel and sand on the rheological and mechanical properties.

To do so, a test campaign was conducted on concrete made with different percentages of substitutions (on the sand and aggregates) and with different couples cements / admixtures. Regarding the rheological properties, the measured parameters are: shear threshold, plastic viscosity, workability, air content and density. Furthermore, in order to follow the evolution of these quantities in the time the tests were carried out at different ages (at the outlet of the mixer, 30 minutes, 60 minutes and 90 minutes after the end of mixing). Regarding the mechanical properties, compression tests were performed at 1 day, 7 days and 28 days. The properties of these concretes were compared to a control concrete.

The results show that the properties of recycled concrete aggregates and ECM (Equivalent Concrete Mortar) depend on the couple cement / admixture and the level of substitution on recycled aggregates. This means that there is indeed an influence of recycled aggregate on the compatibility (physico-chemical equilibrium) of the couple cement / admixture. This influence is most notable on the sand than on gravel. The results also show that for concrete based on recycled aggregate, the higher the percentage of substitution increases, the higher the yield stress and plastic viscosity and the lower the resistance to compression.

Keywords: concrete, recycled aggregates, recycled sand, rheology, workability.

I. Introduction

Devant le besoin croissant de ressources en matériaux de construction ainsi que les exigences en terme de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et des sous-produits industriels, notamment dans le domaine de la construction et des travaux publics.

Les mortiers et bétons confectionnés à partir de granulats recyclés ont fait l'objet de nombreuses études. Toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier l'influence de telles utilisations sur les propriétés et notamment en ce qui concerne leur résistance mécanique. Une généralisation de l'utilisation des bétons comportant des granulats recyclés, dont les propriétés physico-chimiques sont largement différentes des bétons à base de granulats naturels, passe inévitablement par une bonne maîtrise de leurs propriétés mécaniques, ainsi que de leur mise en œuvre. En effet, des études récentes ont montré que le comportement rhéologique d'un béton dépend de la nature de l'adjuvant, de son dosage, de la nature des granulats et de leurs dimensions [1,2].

Ce rapport final synthétise l'ensemble des résultats obtenus au L2MGC (Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, de l'Université de Cergy Pontoise) et au laboratoire Sigma béton de Lyon (Groupe Vicat) sur l'influence des couples Ciments/Adjuvants sur les bétons à base de granulats recyclés, dans le cadre du Projet National RECYBETON. L'objectif principal est d'étudier le comportement à l'état frais de bétons incorporant des granulats recyclés en substitution des granulats naturels, cela en étudiant les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) et l'évolution des essais empiriques dans le temps en fonction du taux de substitution pour cinq différents couples ciment/adjuvants. Les cinq ciments, tous de type CEM I, se différencient par leurs taux de C_3A , leurs finesse et leurs taux d'alcalins actifs. Les quatre adjuvants sont compatibles avec la liste des ciments par retour d'expériences de Sigma béton.

II. Programme expérimental

Une étude expérimentale sur MBE (Mortier à Béton Equivalent) et sur Béton est proposée dont le but est :

Sur MBE :

- Etudier l'impact d'un sable de granulats recyclés sur les besoins en adjuvant ou sur les caractéristiques des MBE.
- Voir l'influence des couples ciment/adjuvant sur les MBE à base de sable recyclé.

Sur Béton :

Le but de cette partie de l'étude est de mettre en évidence l'effet du couple ciment/adjuvant sur :

- Les bétons fabriqués avec des gravillons naturels (GN) et du sable recyclé (SR) (différentes natures de sable recyclé à différents dosages (15, 30 ,100%)).
- Les bétons fabriqués avec du sable naturel (SN) et des gravillons recyclés (GR) (différentes natures de granulats recyclés à différents dosages (15, 30, 100%)).

II.1 Matériaux utilisés

Les bétons sont fabriqués avec des matériaux dont les caractéristiques sont les suivantes :

II.1.1 Granulats

Etant donnée la forte absorption des granulats recyclés, ils seront utilisés dans un état d'humidité correspondant à 1% au-dessus de l'absorption. Il est donc en général nécessaire de pré-humidifier ces granulats qui sont stockés en laboratoire, selon la procédure de mise au point des formules de béton de référence du thème 0 [3].

- prélèvement d'un échantillon de granulat pour évaluation de la teneur en eau initiale;
- mise en fût étanche d'une certaine quantité de granulat (40 à 80 kg), Le fût doit au préalable être humidifié (en évacuant tout excès d'eau à l'aide d'une éponge) pour éviter toute perte d'eau par adsorption d'eau sur les parois du fût;
- ajout du complément d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée;
- roulage du fût pour homogénéisation;
- mise au repos du fût à l'horizontale pendant un minimum de 2 heures.

Les granulats naturels sont quant à eux utilisés dans leur état naturel, pourvu qu'ils soient saturés.

a) *Sable naturels (SN) et recyclés (SR)*

Les sables sont :

- Des sables naturels semi-concassés lavés 0/4 (Lafarge, Sandracourt),
- Des sables recyclés provenant de la plateforme de production DLB située à Gonesse les coefficients d'absorption qui sont consignés dans le tableau 1 sont mesurés selon la norme NF 1097-6 après 24 heures. On constate que les valeurs obtenus sur les recyclés sont prises dans l'intervalle des valeurs mesurées par les autres laboratoires partenaires à partir du même protocole (voir tableau 2 ci-dessous)

Les courbes granulométriques des sables utilisés sont représentées sur la figure 1

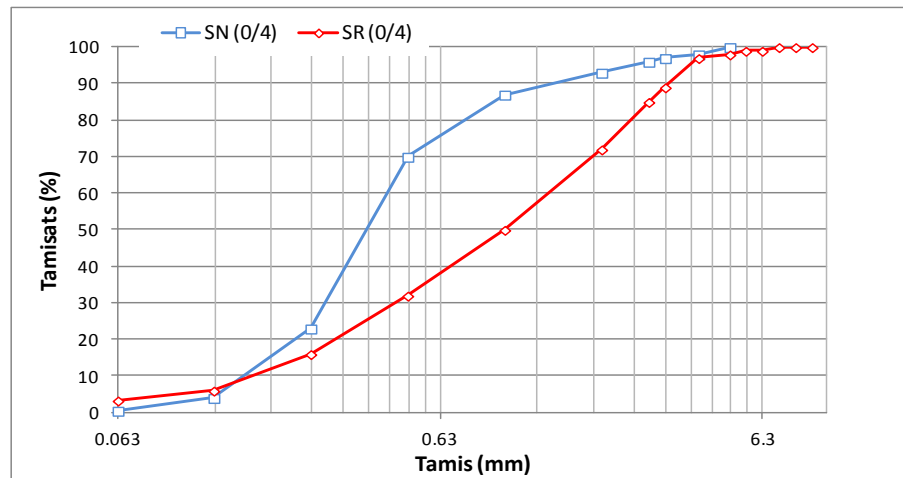


Figure 1 : Courbes granulométriques des sables naturels (SN) et recyclés (SR)



a) SN



b) SR

Figure 2 : Sable naturel et recyclé (0/4mm)

Le sable recyclé semble plus grossier que le sable naturel (Figures 1 et 2), il est constitué en majorité de petits gravillons (de 0,63 à 6,3 mm) et d'une faible proportion de sable moyen (de 0 à 0,63 mm). On retrouve dans ces fines une quantité importante de ciment. Le module de finesse du sable recyclé (MF = 3,27) est nettement plus élevé que celui du sable naturel utilisé (MF = 2,25). Par conséquent, la

substitution de sable naturel par du sable recyclé dans le béton recyclé risque de favoriser la ségrégation de ce dernier et la perte de maniabilité.

b) *Gravillons naturels (GN) et recyclés (GR)*

Les graviers sont :

- Des gravillons naturels concassés lavés. Deux coupures (4/10 et 10/20 mm) (Lafarge, Givet),
- Des gravillons recyclés provenant de la même plateforme que celle des sables recyclés. Deux coupures aussi (4/10 et 10/20).

Les courbes granulométriques, des gravillons utilisés, sont représentées sur les Figures 3, 5 et 7.

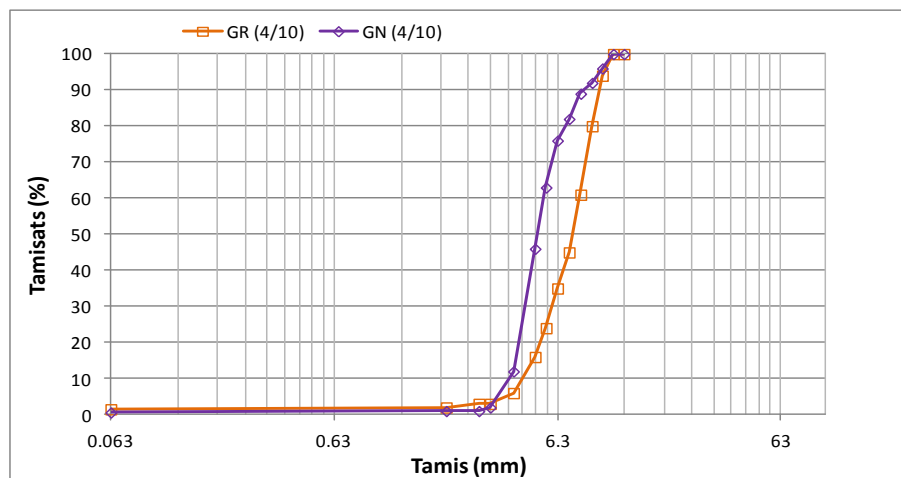
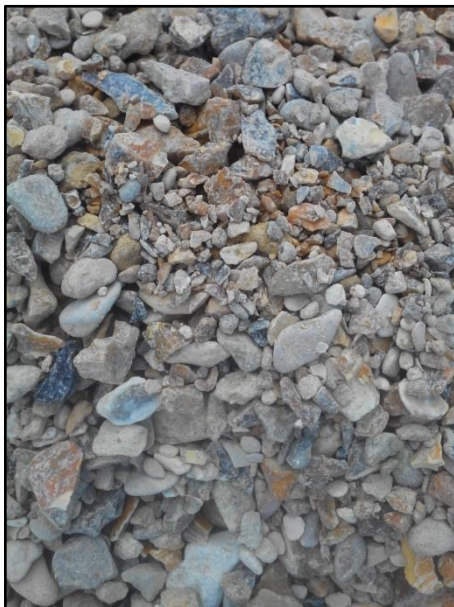
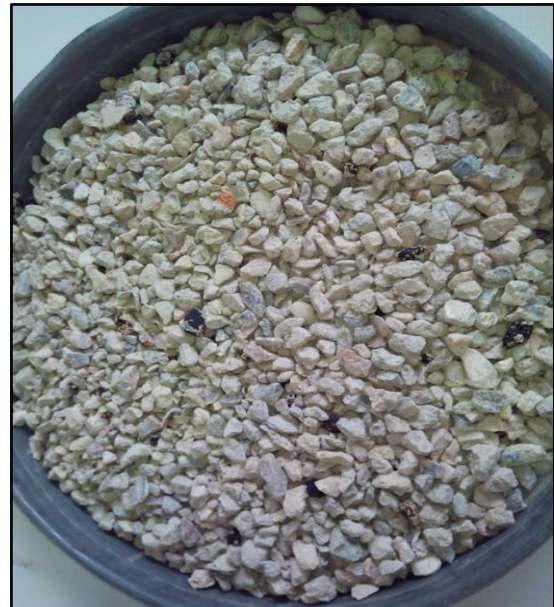


Figure 3 : Courbes granulométriques des granulats (4/10) naturels (GN) et recyclés (GR)



a) GN



b) GR

Figure 4 : Gravier naturel et recyclé (4/10)

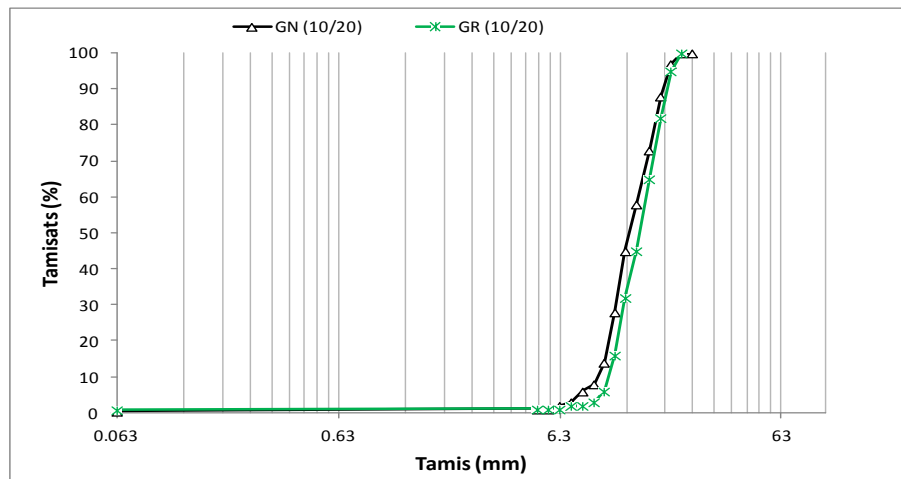
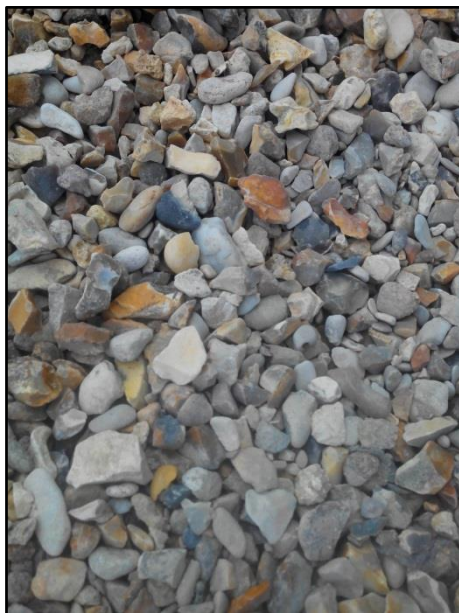


Figure 5 : Courbes granulométriques des granulats (10/20) naturels (GN) et recyclés (GR)



a) GN



b) GR

Figure 6 : Gravier naturel et recyclé (10/20)

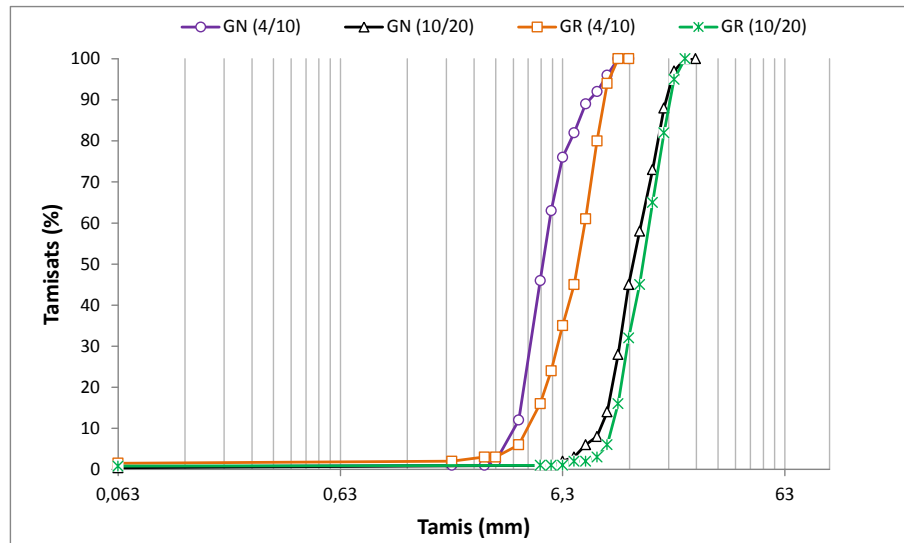


Figure 7 : Courbes granulométriques des gros granulats naturels (GN) et recyclés (GR)

Les gros granulats recyclés sont comparables aux gros granulats naturels, contrairement aux sables recyclés qui présentent un décalage significatif.

- **L'absorption d'eau des granulats recyclés**

Le tableau 1 représente le coefficient d'absorption d'eau des sables (SN et SR) et des granulats (GN et GR) recyclés mesurés selon la norme NF 1097-6 après 24 heures. On constate que les valeurs obtenues sur les recyclés sont beaucoup plus importantes que celles sur les naturels. Les valeurs des recyclés sont prises dans l'intervalle des valeurs mesurées par les autres laboratoires partenaires à partir du même protocole (tableau 2)



Figure 8 : Exemple de sable caractéristique pour mesure d'absorption selon la norme NF 1097-6

Type de recyclé	Coefficient d'absorption d'eau (%)
SN (0/4)	0,9
GN (4/10)	0,5
GN (10/20)	0,4
SR (0/4)	10,0
GR (4/10)	5,1
GR (10/20)	5,7

Tableau 1 : Coefficient d'absorption d'eau des sables (SN et SR) et des gravillons (GN et GR) recyclés.

Matériau	EUROVIA	IFSTTAR	CTG	GEM	CEMEX	LMDC
0/4		8,9	9,8		8,4	9,2
4/10	5,6	5,6	5,6	5,3	5,4	5,2
10/20	5,6	5,8	5,4	4,9	5,3	5,2

Tableau 2 : Coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés mesurés par différents laboratoires dans le cadre du PN RECYBETON.

Les granulats recyclés sont de deux natures différentes (le granulat naturel et le mortier de ciment ancien qui est accroché), ce mortier de ciment ancien est la principale cause de l'augmentation de l'absorption [4].

II.1.2 Ciments :

Ciments		Caractéristiques physiques					Caractéristiques chimiques			
		Finesse Blaine (cm ² /g)	Diamètre médian (μm)	Demande en eau (%)	Temps de début de prise (min)	Chaleur d'hydratation à 41h (j/g)	Na ₂ O eq actifs	Perte au feu 950°C (%)	SO ₃ (%)	S ²⁻ (%)
C1	CEM I 52,5R CE CP2	4520	9,7	27,2	120	328	0,78	0,79	3,66	0,00
C2	CEM I 52,5R CE	3250	16,5	26,0	165	300	0,60	2,08	3,32	0,01
C3	CEM I 52,5N CE CP2	4210	12,4	31,1	228	324	0,97	2,03	3,30	0,03
C4	CEM I 52,5N SR3 CE PM-CP2	3930	11,9	26,3	163	265	0,46	1,05	2,11	0,01
C5	CEM I 52,5N CE ES CP2	4110	11,3	26,5	244	256	0,51	0,65	1,68	0,01

Tableau 3 : Caractéristiques physiques et chimiques des cinq ciments utilisés.

Les cinq ciments utilisés (nommés C1, C2, C3, C4 et C5) sont compatibles avec quatre adjuvants (Adj1, Adj2, Adj3 et Adj4) formant des couples nommés respectivement A, B, C, D et E

Couples	Ciments		Constituants et caractéristiques (%)				
			Clinker	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
A	C1	CEM I 52,5R CE CP2	99	52,1	21,0	9,2	10,3
B	C2	CEM I 52,5R CE	97	57,6	18,3	8,2	9,8
C	C3	CEM I 52,5N CE CP2	99	51,8	22,9	7,8	10,1
D	C4	CEM I 52,5N SR3 CE PM-CP2	99	61,7	15,9	2,9	14,1
E	C5	CEM I 52,5N CE ES CP2	100	60,3	13,9	0,0	19,6

Tableau 4 : Constituants et caractéristiques minéralogiques des cinq ciments utilisés.

II.1.3 Adjuvants :

Les quatre adjuvants utilisés dans cette étude, compatibles avec les cinq ciments proposés, sont présentés dans le tableau 5.

Adjuvants	Ajd1	Adj2	Adj3	Adj4
Compatibilité avec ciments	C1	C2	C3 et C4	C5
	Réducteur d'eau	Haut réducteur d'eau	Haut réducteur d'eau	Réducteur d'eau
	Plastifiant	Super plastifiant	Super plastifiant	Plastifiant
Teneur en extrait sec	22,5 %	22,5 %	28,5 à 31,5%	20 ± 1,0%
Forme	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide
Couleur	jaune clair	Brun clair	Brun clair	jaune clair
pH		6 à 8	4 à 6	4,5 ± 1,0
Densité			1,06 ± 0,01	1,038 ± 0,020
Dosage recommandé		0,2% à 1,9%	0,3 à 3 %	0,1 à 3,0%
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 0,5%
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1%	≤ 0,1%	≤ 0,1%	≤ 0,1%
Nature chimique	polycarboxylate	Ether polycarboxylique	copolymère acrylique	polycarboxylate

Tableau 5 : Les adjuvants et leurs compatibilités avec les ciments.

II.2 MBE (Mortier de Béton Equivalent) :

Cette méthode consiste à fabriquer, à partir d'une formulation de béton, un mortier, appelé mortier de béton équivalent, avec des propriétés rhéologiques qui sont corrélables avec celle du béton. Le principe est de diminuer le nombre de gâchées et la quantité de béton pour un même résultat. Cette méthode permet de sélectionner et de trouver rapidement l'adjuvant qui répond le mieux aux exigences rhéologiques. Ainsi, la technique du Mortier de Béton Equivalent apparaît comme une alternative particulièrement intéressante.

L'étalement des MBE a été mesuré [5] en utilisant le mini-cône dont les dimensions sont données dans la figure 9.

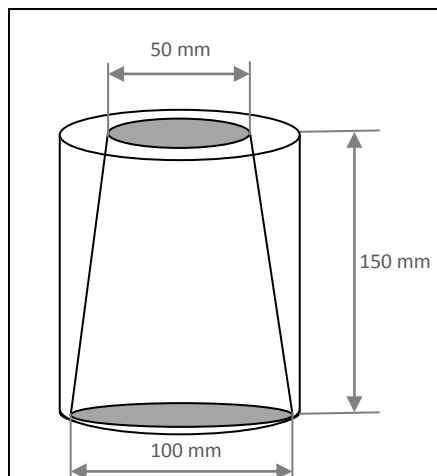


Figure 9 : Dimensions du mini-cône

▪ *Choix des couples ciments / adjuvants*

Les couples ciment / adjuvant sont formés comme suit :

Couple A : C1/Adj1, couple B : C2/Adj2, couple C : C3/Adj3, couple D : C4/Adj3 et couple E : C5/Adj4.

Caractérisation des cinq couples ciments / adjuvants à partir des études sur deux MBE dont les rapports E/C sont imposés par le PN à 0,45 et 0,55. Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel 0/4 dont les caractéristiques sont précisées ci-dessus.

■ *Formulation des MBE*

Les deux MBE utilisés selon la méthode de fabrication des MBE [5] sont représentatifs des deux bétons suivants :

Pour ces bétons étudiés, l'eau efficace est maintenue constante.

Matériaux	Dosage [Kg/m ³]					
	Ciment	Sable 0/4	Gravillon 4/10	Gravillon 6.3/20	Eau efficace	Adjuvant
0,45	365	831	330	706	164	Variable
0,55	320	852	325	696	176	Variable

Tableau 6 : Formulations de béton.

Les formulations des MBE étudiés sont présentées dans le tableau 7 suivant :

Matériaux	Dosage [Kg/m ³]			
	Ciment	Sable 0/4	Eau efficace	Adjuvant
0,45	365	886,91	165,52	Variable
0,55	320	907,07	176,44	Variable

Tableau 7 : Formulations de MBE.

Toutes les formulations des MBE sont représentées en annexe.

■ *Procédure de malaxage du MBE* [5]

- 1) Mettre le sable et le ciment (30 secondes à vitesse lente)
- 2) Mettre l'eau et l'adjuvant (30 secondes à vitesse lente)
- 3) Malaxer (1 minute à vitesse rapide)
- 4) Racler le bol et laisser reposer (1 minute 30 secondes)
- 5) Malaxer (1 minute à vitesse rapide)
- 6) Mettre en place le MBE dans le cône pour mesurer l'étalement (30 secondes)
- 7) Remalaxer (15 secondes) à petite vitesse avant d'effectuer des mesures à 30, 60 et 90 minutes

▪ Essais réalisés

Les essais réalisés sur les MBE sont les suivants :

- L'étalement (la valeur est fixée à $280\text{mm} \pm 20\text{mm}$ à T0) ;
- Le maintien en rhéologie (évolution de l'étalement) ;
- Mesure de la masse volumique ;
- Mesure de l'air occlus ;
- Mesure de la température ;
- Mesure de la résistance au jeune âge.

Ces essais ont été réalisés à T0, T0+30min, T0+60min et T0+90min.

Pour chaque couple sélectionné, les mêmes essais sont réalisés en remplaçant le sable de référence (naturel) par du sable recyclé à différents pourcentages massiques de substitution (15 ; 30 et 100%).

- La programmation des essais est présentée dans le tableau 8. :

Essai	Programmé
	Oui
	Non

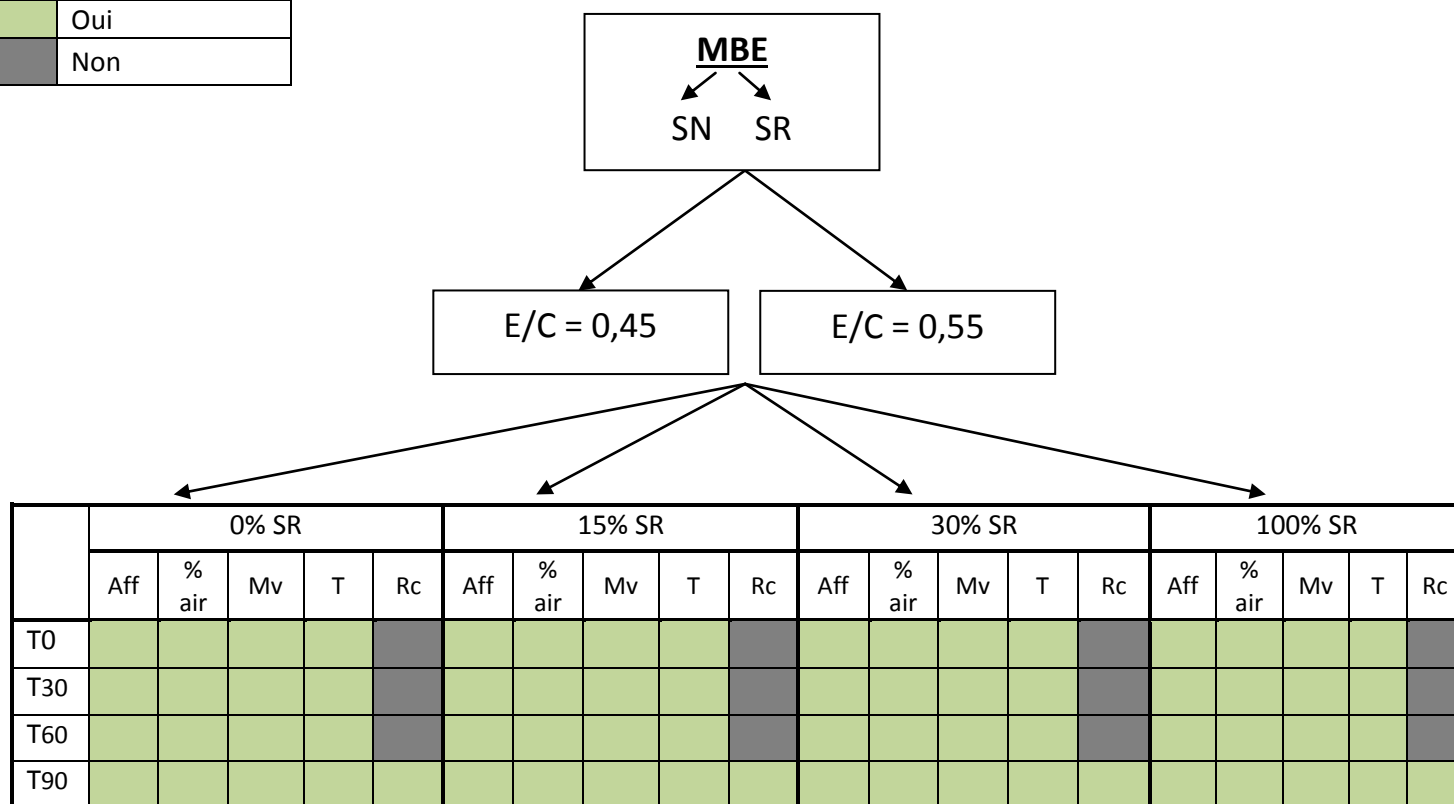


Tableau 8 : Récapitulatif des essais réalisés sur les MBE.

II.3 Béton :

■ *Formulation du béton testé*

Les cinq couples ciments / adjuvants, trouvés dans l'étude précédente sur les MBE, sont utilisés pour étudier l'effet du sable recyclé et des granulats recyclés sur les caractéristiques du béton à l'état frais et durcis. Le rapport E/C du béton sélectionné dans cette étude doit être suffisamment important pour pouvoir réaliser les essais à l'état frais à différents temps (T0, T0+30min, T0+60min et T0+90min). Les résultats ont permis de choisir la formulation :

Matériaux	Dosage [Kg/m ³]					
	Ciments	Sable 0/4	Granulat 4/10	Granulat 6.3/20	Eau	Adjuvant
0,55	320	852	325	696	176	Fixe/Ciment

Tableau 9 : Formulations de béton.

■ *Procédure de malaxage du béton*

- 1) Mettre la moitié des quantités de matériaux dans le malaxeur en commençant par les gros granulats, ensuite mettre les autres quantités de matériaux mais en commençant par les petits granulats.
- 2) Malaxer (30 secondes à vitesse lente)
- 3) Mettre l'eau et l'adjuvant (1 minute à vitesse lente)
- 4) Malaxer (3 minutes à vitesse rapide)
- 5) Mettre le béton dans le cône pour mesurer l'affaissement (30 secondes)
- 6) Re-malaxer (1 minute à vitesse lente) avant de faire des mesures à T30

■ *Essais réalisés*

Les essais réalisés sur le béton à différents temps (T0, T0+30min, T0+60min et T0+90min) sont les suivants :

- L'affaissement (fixé à 200mm ± 20mm à T0 (NF EN 12350-2)) ;
- Le maintien en rhéologie (évolution de l'affaissement en fonction du temps) ;
- Mesure de la masse volumique (NF EN 12350-6);
- Mesure de l'air occlus (NF EN 12350-7);
- Mesures de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement (essai au rhéomètre à béton) ;
- Mesure de la température.

Le programme de la campagne d'essais est consigné dans le tableau 10. :

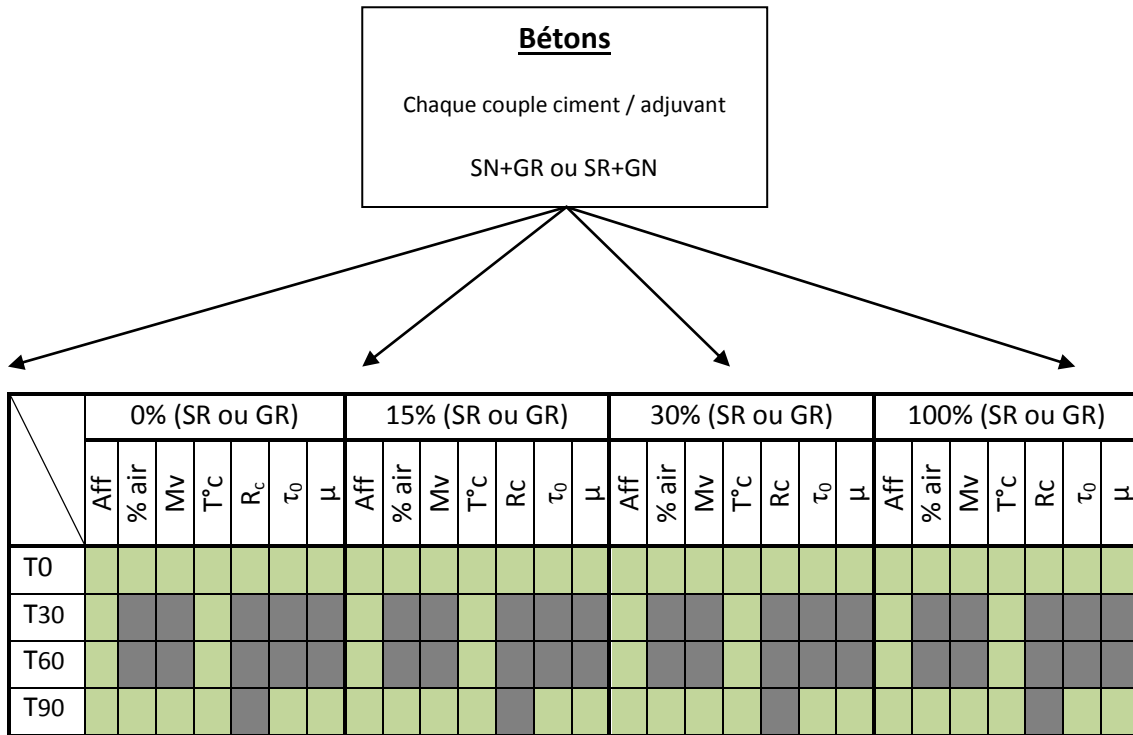


Tableau 10 : Récapitulatif des essais réalisés sur bétons.

Essai	Programmé
	Oui
	Non

III. Résultats et interprétations

II.1. Résultats sur les MBE

a) Variation du dosage en adjuvant pour obtenir un étalement à 280 ± 20 mm

Les pourcentages d'adjuvant à utiliser pour obtenir un étalement de 280 ± 20 mm (imposé par le PN) à l'instant initial (T_0) sont consignés sur la figure 10.

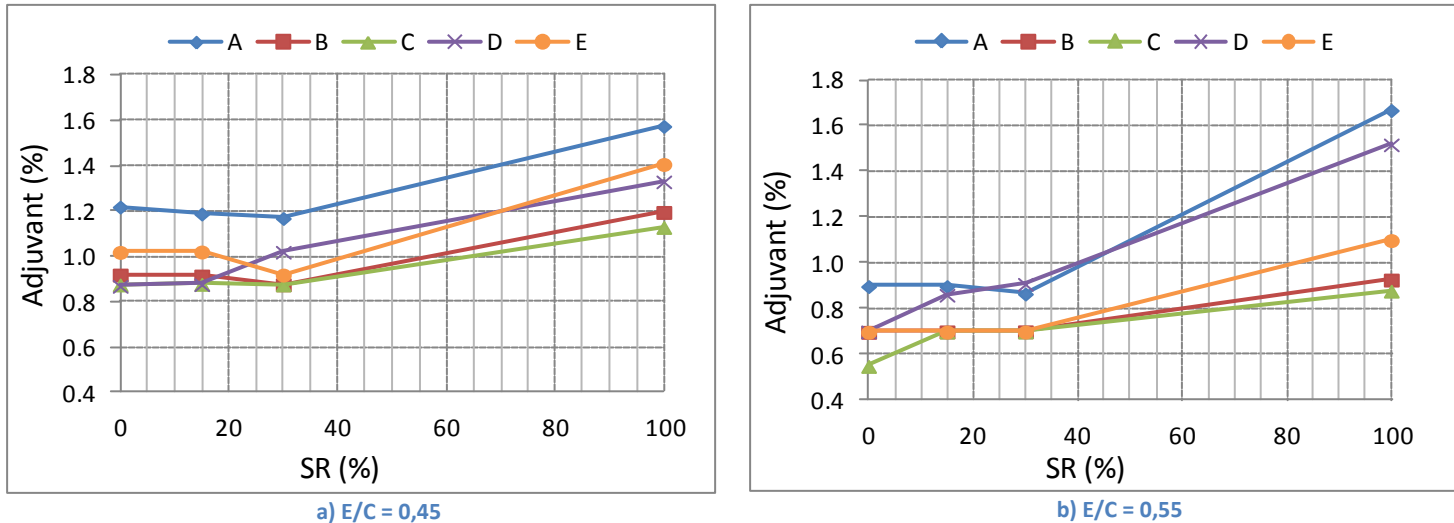


Figure 10 : Pourcentage d'adjuvant à utiliser pour les différents couples ciment/adjuvant afin de maintenir un étalement de 280 mm à l'instant initial (T_0)

Les résultats de la figure 10 montrent que pour maintenir un étalement de 280 ± 20 mm le taux de superplastifiant à utiliser est quasi constant en dessous de 30 % de substitution. Au-delà de 30 % de SR, le pourcentage d'adjuvant augmente significativement. Cette augmentation varie d'un couple à un autre allant de 22,4% (pour le couple c) jusqu'à de 58,7% (couple A). Effectivement, le SR absorbe beaucoup plus d'eau que le SN. Donc, pour avoir un étalement de 280 ± 20 mm, la demande en adjuvant est plus importante pour un pourcentage de sable recyclé plus élevé [6] [7].

Par ailleurs, cette étude a montré que les MBE étaient homogènes et qu'ils ne présentaient ni phénomène ressuage ni phénomène de ségrégation. A titre d'exemple, la figure 11 montre une galette de MBE à 280 ± 20 mm avec 30% de SR.



Figure 11 : Etalement du MBE à 30% de sable recyclé à 280±20 mm

b) Evolution de l'étalement

- en fonction du pourcentage de sable recyclé

La figure 12 montre qu'avec les pourcentages d'adjuvant précisés précédemment dans la figure 10, l'étalement des MBE à T0 rentre bien dans la plage de variation de 280±20 mm.

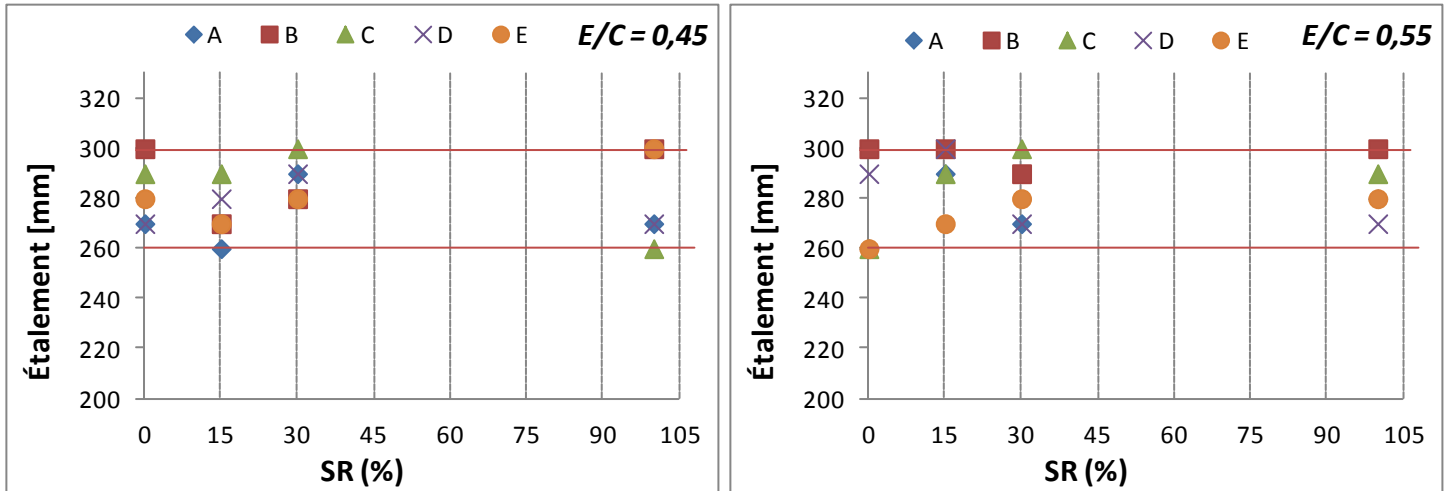


Figure 12 : Évolution de l'étalement à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour les 5 couples ciment / adjuvant.

- en fonction du temps

Les figures (13, 14, 15 et 16) montrent l'évolution de l'étalement à différents pourcentages de sable recyclé en fonction du temps, pour les cinq différents couples.

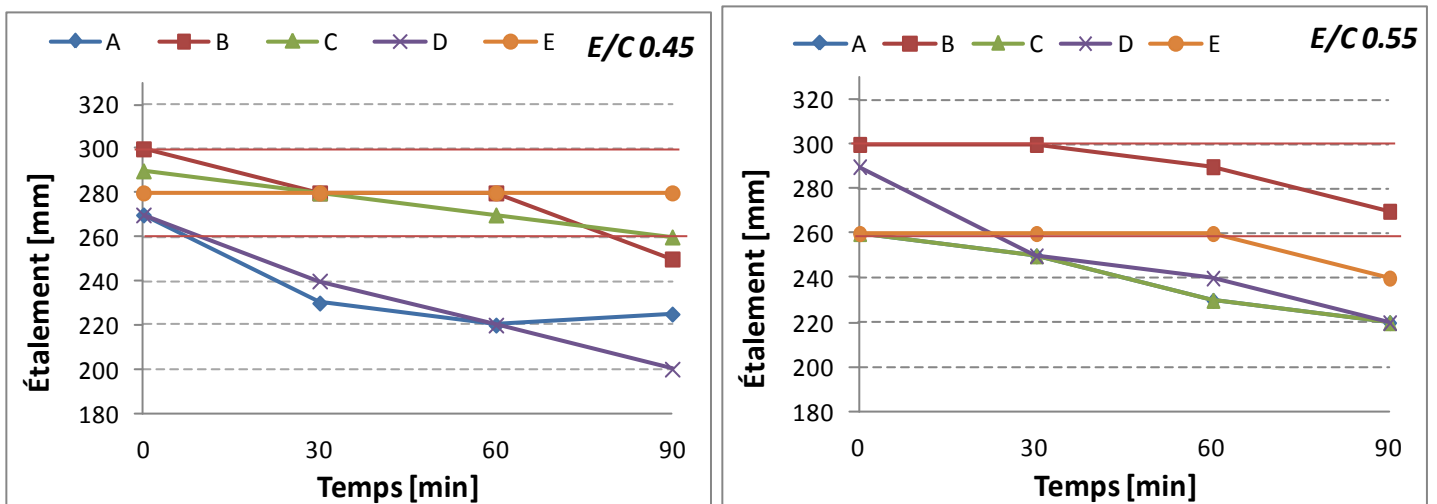


Figure 13 : Evolution de l'étalement à 0 % de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

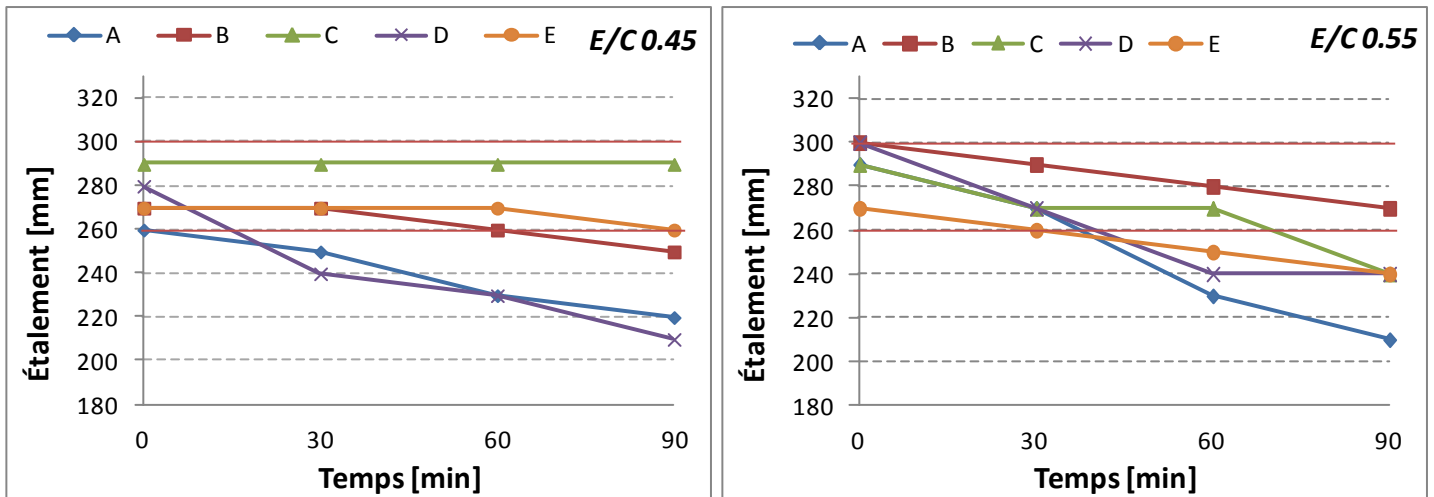


Figure 14 : Evolution de l'étalement à 15 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

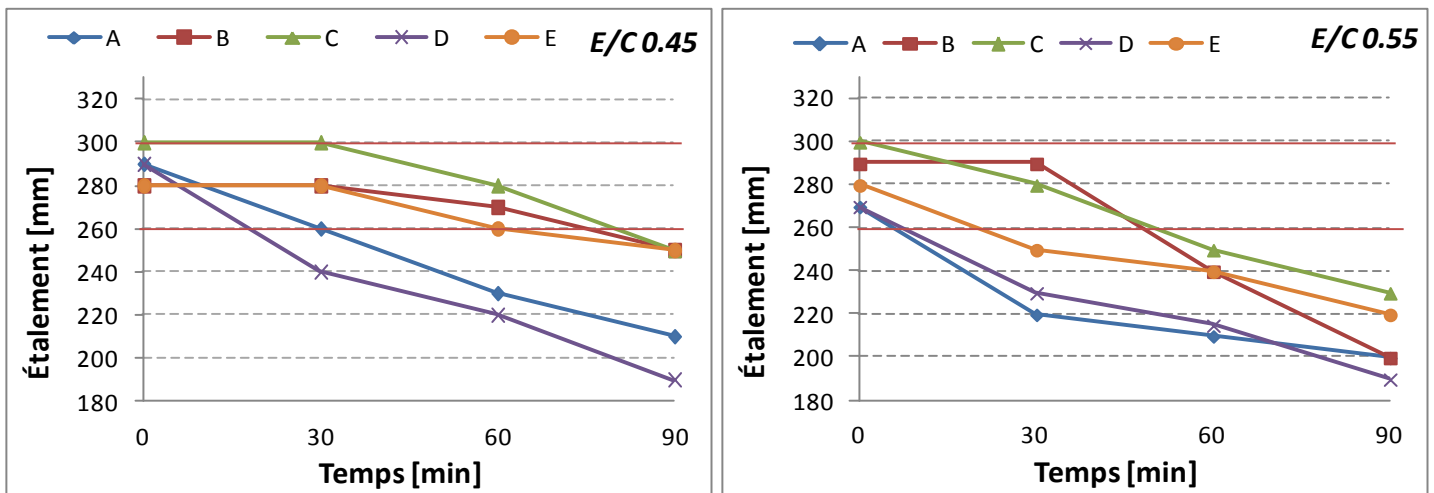


Figure 15 : Evolution de l'étalement à 30 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

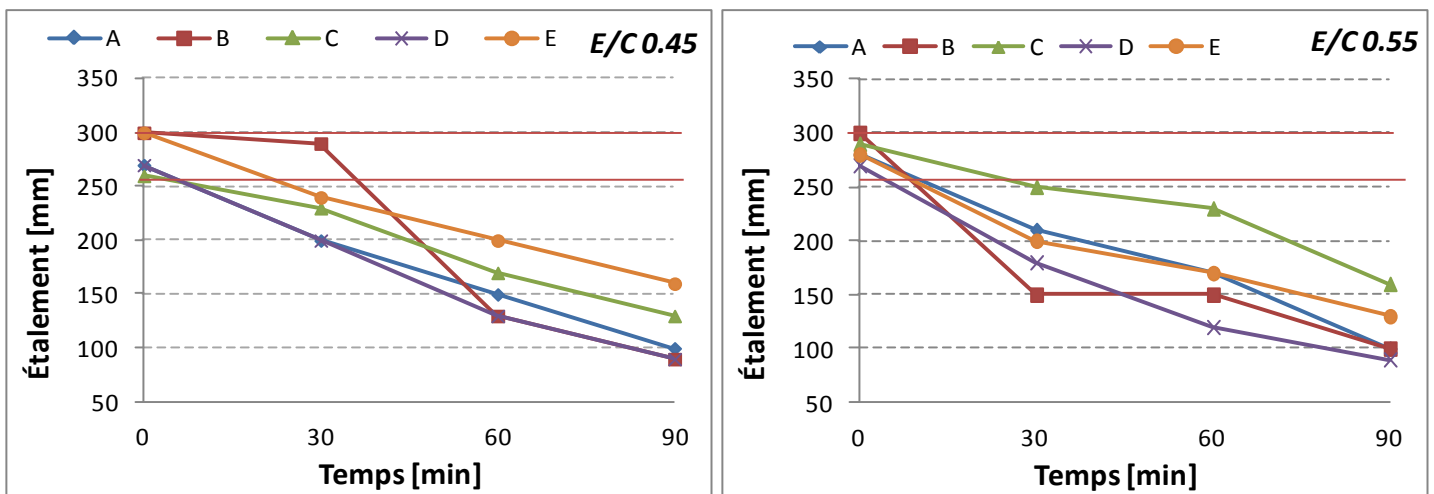


Figure 16 : Evolution de l'étalement à 100 % sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

Les résultats montrent que :

- L'étalement baisse en fonction du temps.
- A faible dosage en %SR ($\leq 30\%$), l'étalement baisse légèrement en fonction du temps contrairement à 100% SR, une baisse remarquable de 64%.
- Quel que soit le %SR, nous distinguons deux groupes ciment-adjuvant. Le premier qui présente un bon maintien en fonction du temps (les couples B, C et E) et le deuxième avec un mauvais maintien en fonction du temps (les couples A et D).

c) Variation de la teneur en air

Les figures 17, 18, 19 et 20 montrent l'évolution de la teneur en air en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couple ciment/adjuvant :

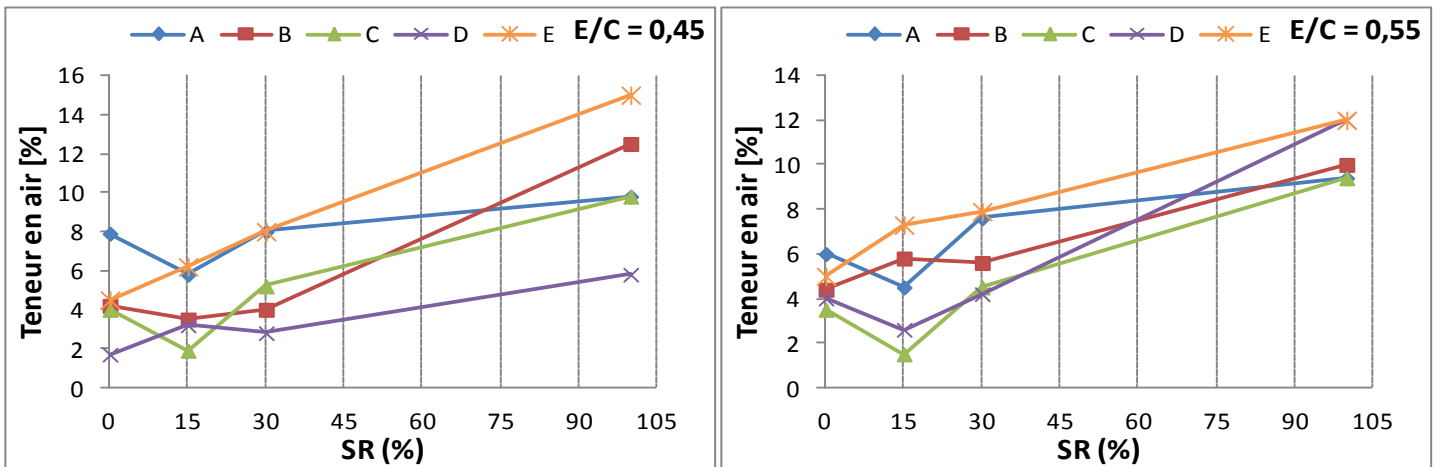


Figure 17 : Evolution de la teneur en air à T0 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

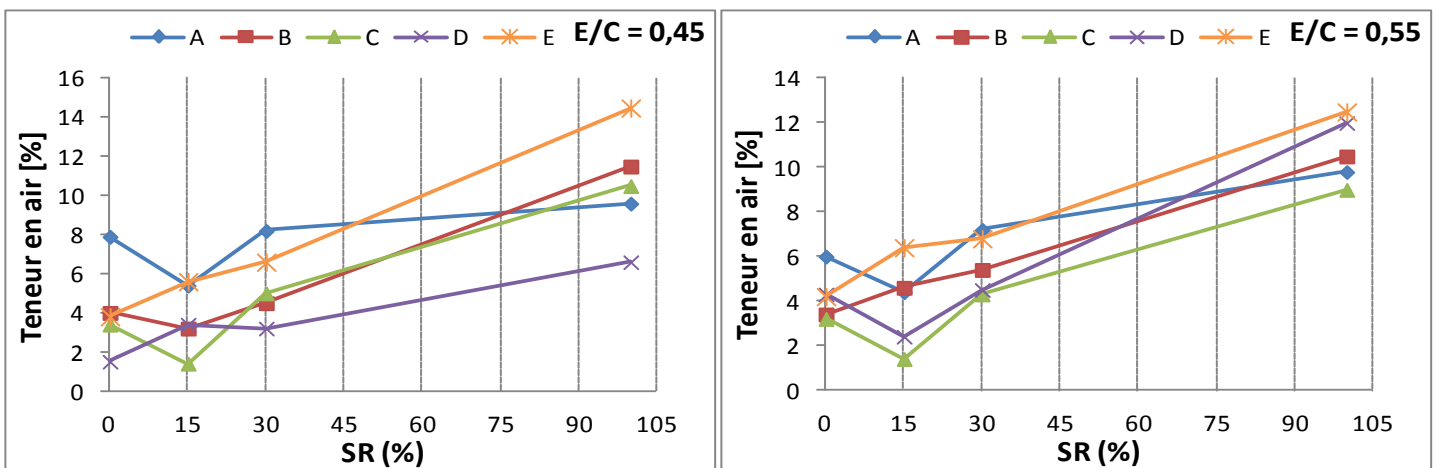


Figure 18 : Evolution de la teneur en air à T30 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

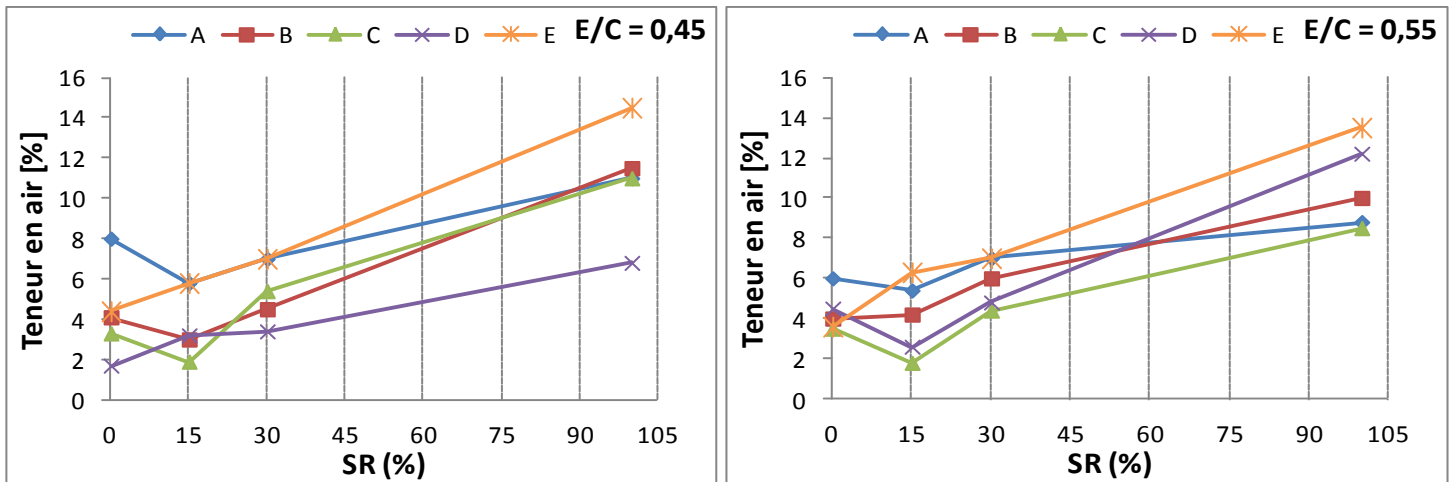


Figure 19 : Evolution de la teneur en air à T60 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant)

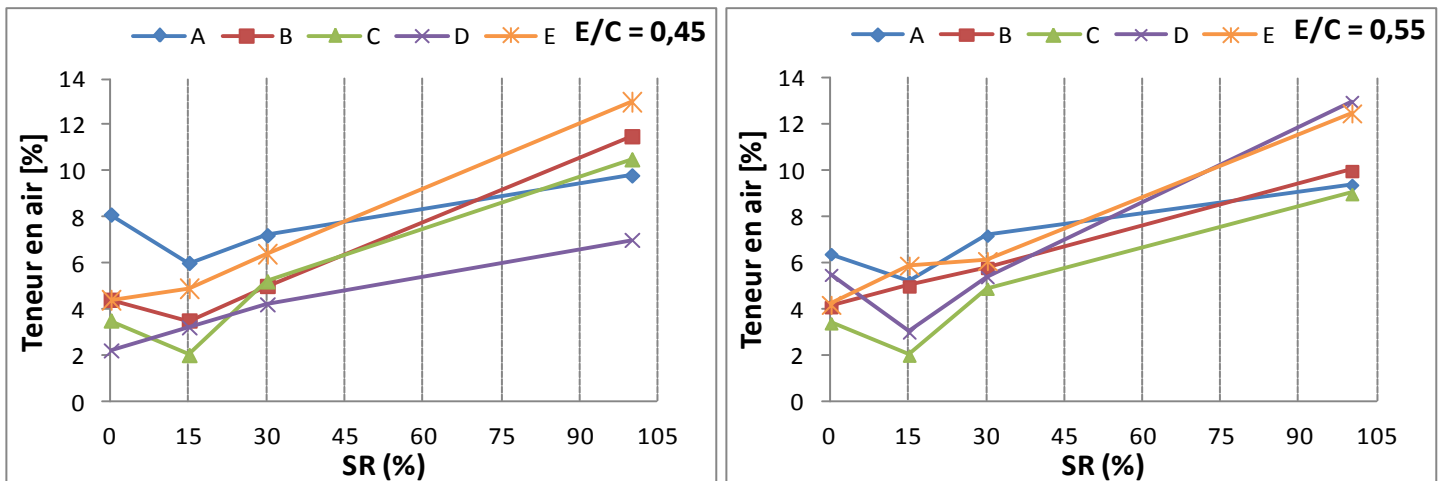


Figure 20 : Evolution de la teneur en air à T90 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

- la teneur en air augmente en fonction de l'accroissement du pourcentage de substitution pour différents couples ciment/adjuvant. Pour expliquer ce phénomène, il faut rappeler que l'essai de la teneur en air consiste à placer un échantillon de MBE dans le récipient de l'appareil (l'air occlus). Ensuite, il faut saturer l'échantillon avec de l'eau et mesurer la teneur en air. Par conséquent, plus la porosité du mélange granulaire est importante, plus la teneur en air est grande. Effectivement, la porosité du sable recyclé est plus importante que celle du sable naturel. De plus, la forme et la rugosité des granulats recyclés empêchent les bulles d'air de s'extraire du béton pendant la vibration [8]. Ce qui justifie que la teneur en air augmente avec l'augmentation du %SR.
- Les couples qui donnent des teneurs en air les plus faibles sont C et D et ceux qui donnent les teneurs en air élevée sont A et E.

d) Variation de la masse volumique

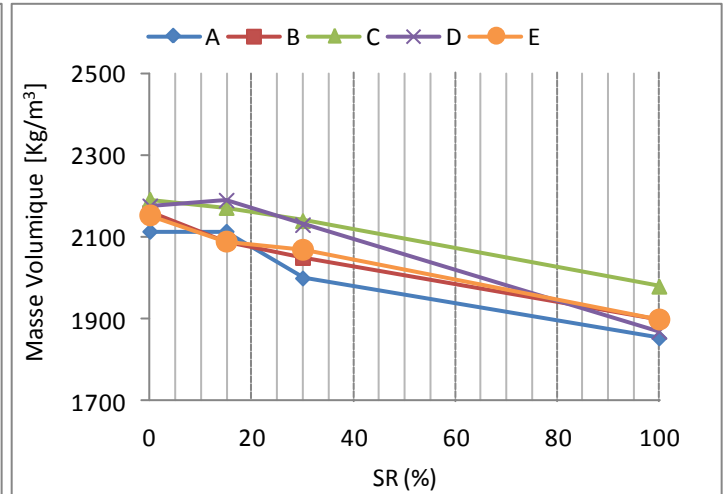
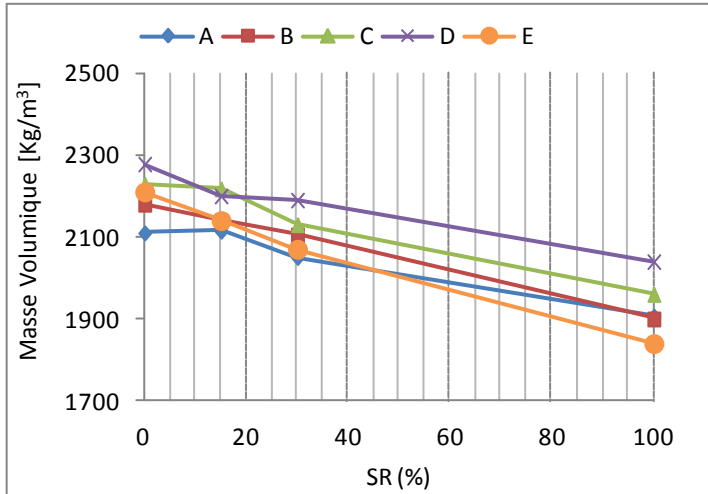


Figure 21 : Evolution de la masse volumique à T0 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

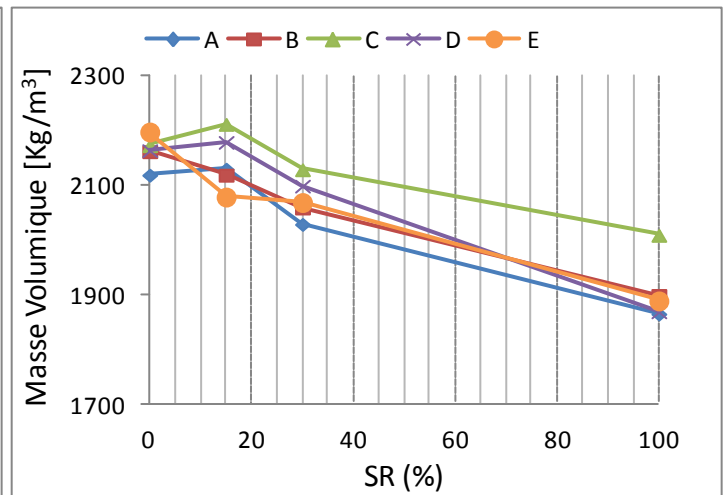
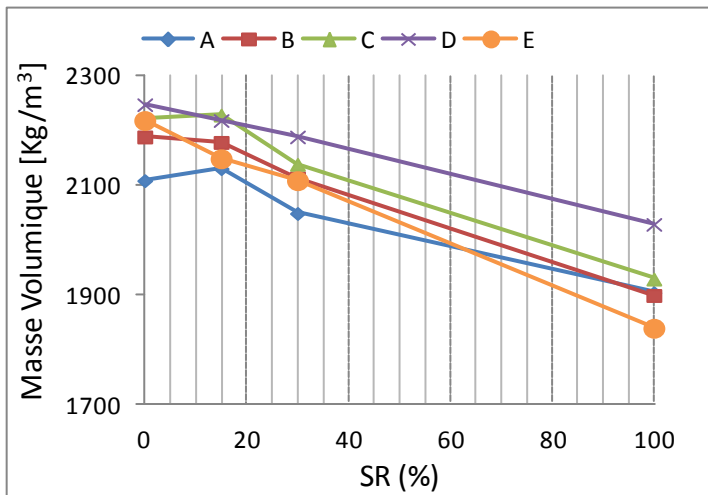


Figure 22 : Evolution de la masse volumique à T30 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

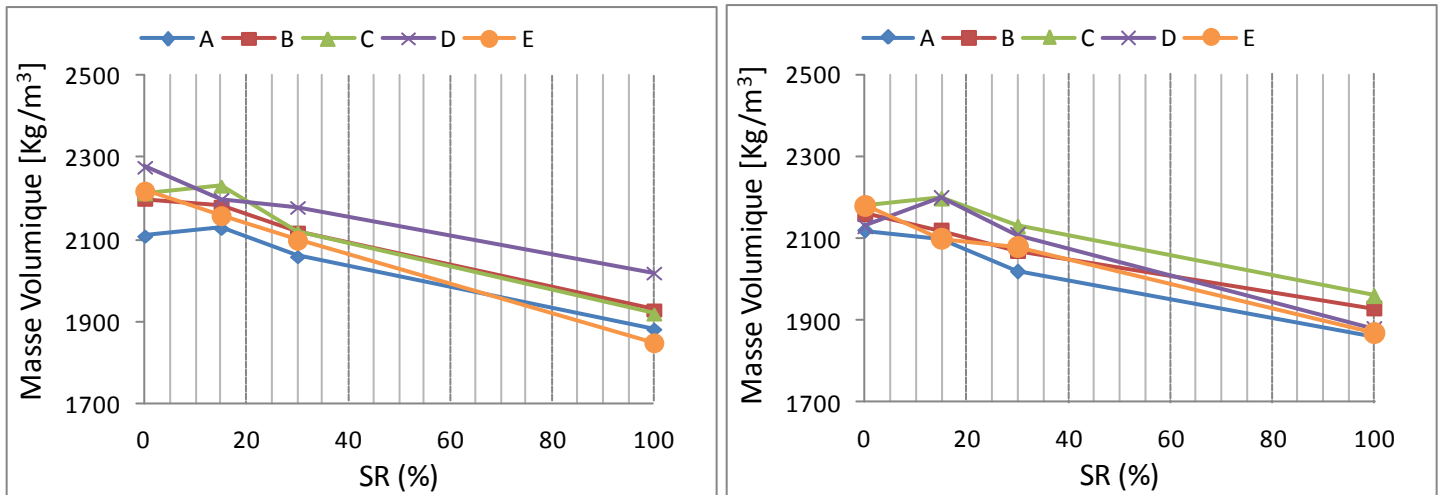


Figure 23 : Evolution de la masse volumique à T60 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

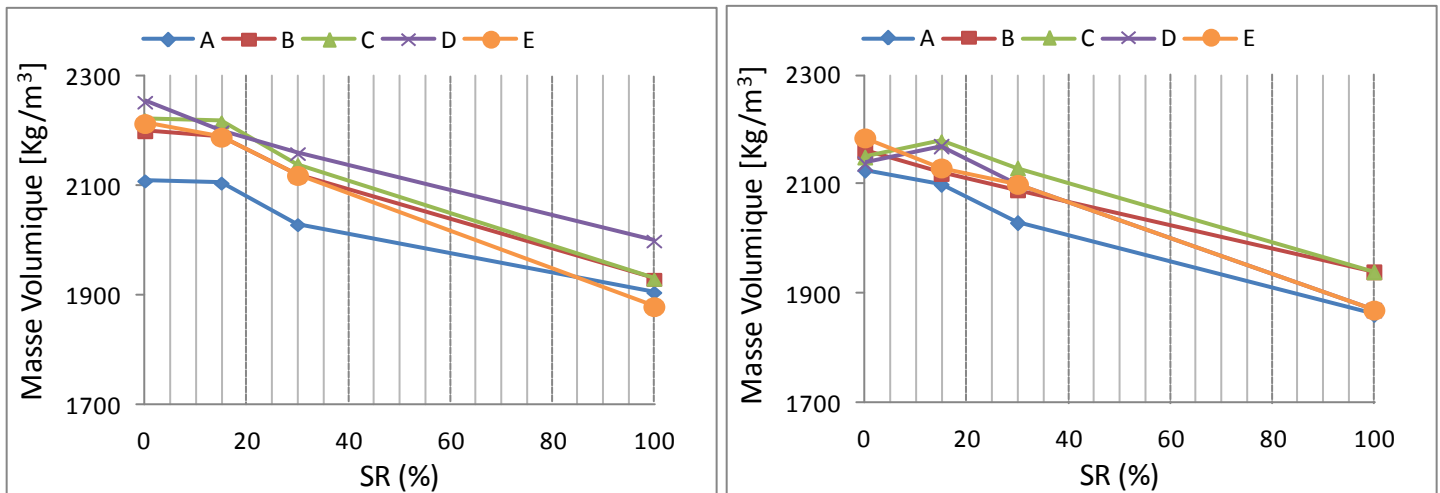


Figure 24 : Evolution de la masse volumique à T90 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures 21, 22, 23 et 24 montrent que les masses volumiques diminuent avec l'augmentation du pourcentage de substitution pour les 5 couples ciment/adjuvant. Cela est dû à la quantité de mortier ancien qui a une masse volumique inférieure à celle des granulats. Ces résultats confirment les résultats de l'évolution de la teneur en air (plus la teneur en air augmente et plus la masse volumique diminue).

e) Variation de la température

Ces mesures sont faites avec un thermomètre en mesurant la température de la pâte de béton après chaque sortie du malaxeur.

Les figures (25, 26, 27 et 28) montrent que l'augmentation du pourcentage de substitution SR engendre un accroissement de la température dans les MBE quel que soit les couples.

Ce phénomène est expliqué par l'augmentation du dosage en liant pour les SR à cause de la présence de poudre de ciment autour des grains de sables recyclés, qui dégage une petite quantité de chaleur lorsqu'il est en contact avec l'eau. Donc, plus le %SR augmente, plus la quantité de liant présente dans les MBE augmente. Cela engendre une augmentation de la température dans les MBE.

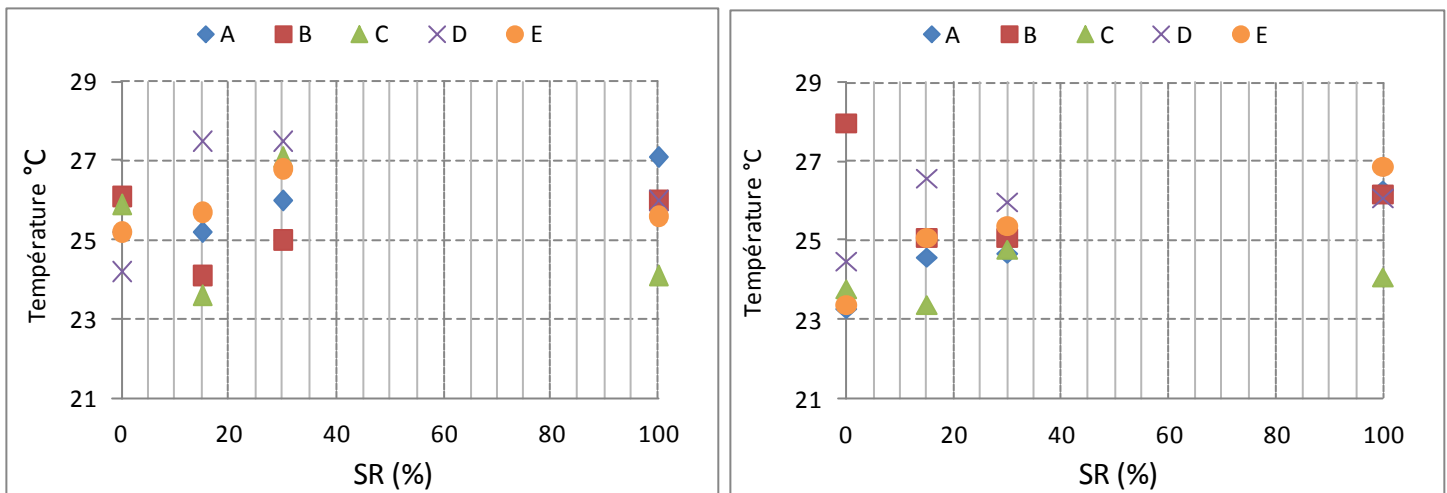


Figure 25 : Evolution de la température à T0 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

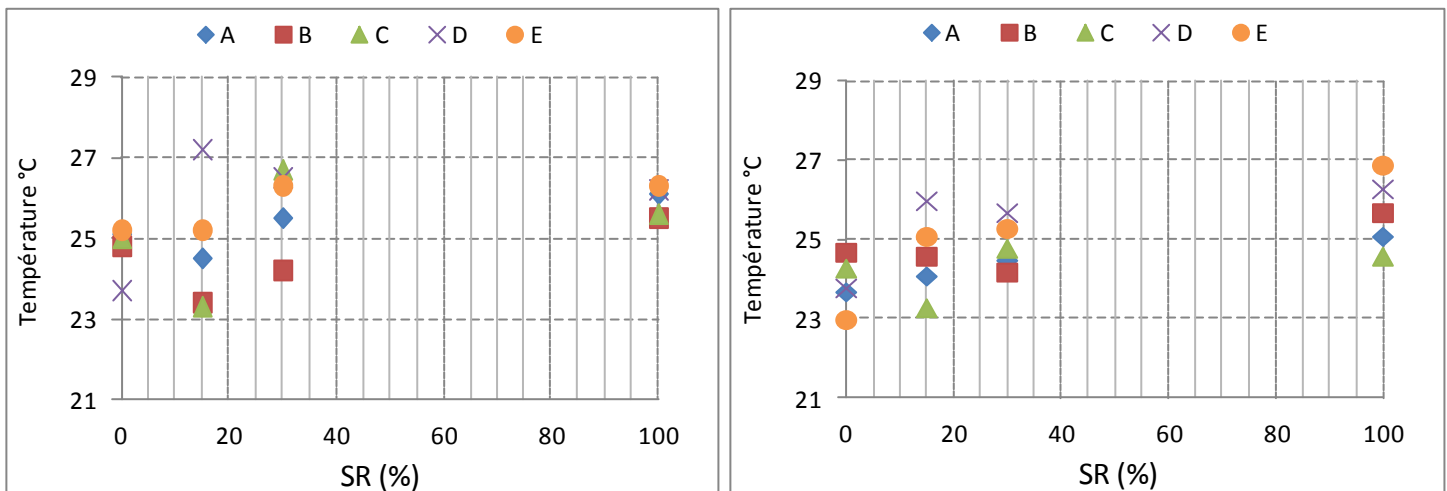


Figure 26 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

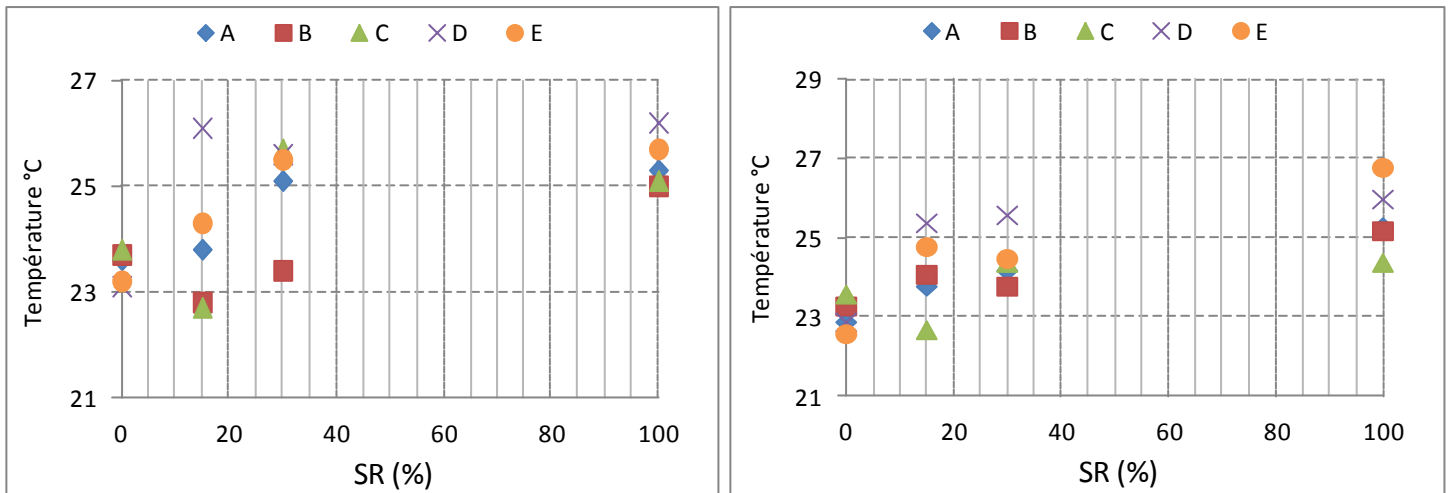


Figure 27 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

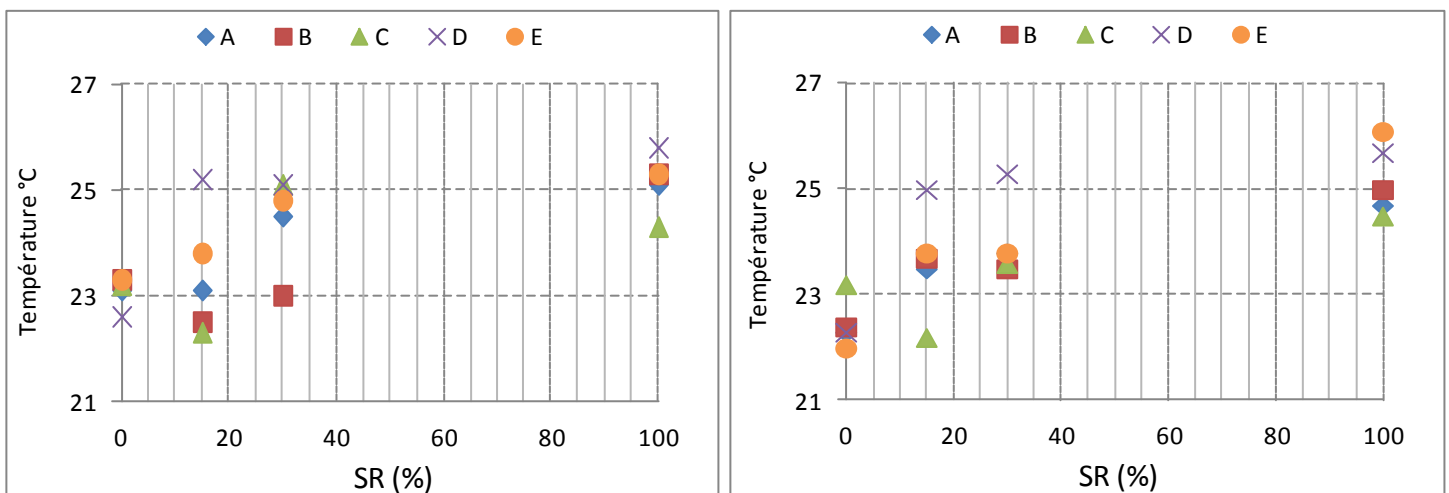


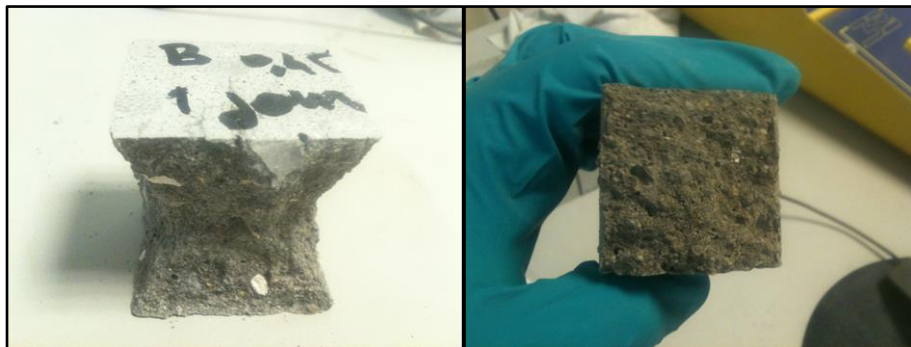
Figure 28 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

f) Variation de la résistance en compression au jeune âge

La résistance en compression au jeune âge des MBE est obtenue avec des éprouvettes 4x4x16 cm (figures 29 et 30) conservées dans des chambres de 95% d'humidité et la température de 20°C.



Figure 29 : Epreuves 4x4x16



a) b)
Figure 30 : Epreuves 4x4x16 à 1 jour pour E/C=0,45
a) couple B à 0%SR, b) couple E à 100%SR

Les résultats représentés sur les figures 31 et 32 montrent que la résistance en compression à 1 et 7 jours des MBE diminue lorsque le pourcentage en SR augmente. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Crensil [9]. Ce dernier a montré que la résistance en compression dépend de la nature du ciment. Il montre que le couple B permet d'obtenir une meilleure résistance au jeune âge, mais il présente une baisse de 45% pour le 100%SR comparé à 0%SR. Contrairement au couple E qui donne une mauvaise résistance au jeune âge.

Ceci est tout à fait logique compte tenu de l'augmentation de la teneur en air et de la baisse de la masse volumique des MBE quand le pourcentage du SR augmente. De plus, la présence de l'ancien ciment collé sur les SR affaiblit la structure du mélange et la porosité importante facilite la rupture.

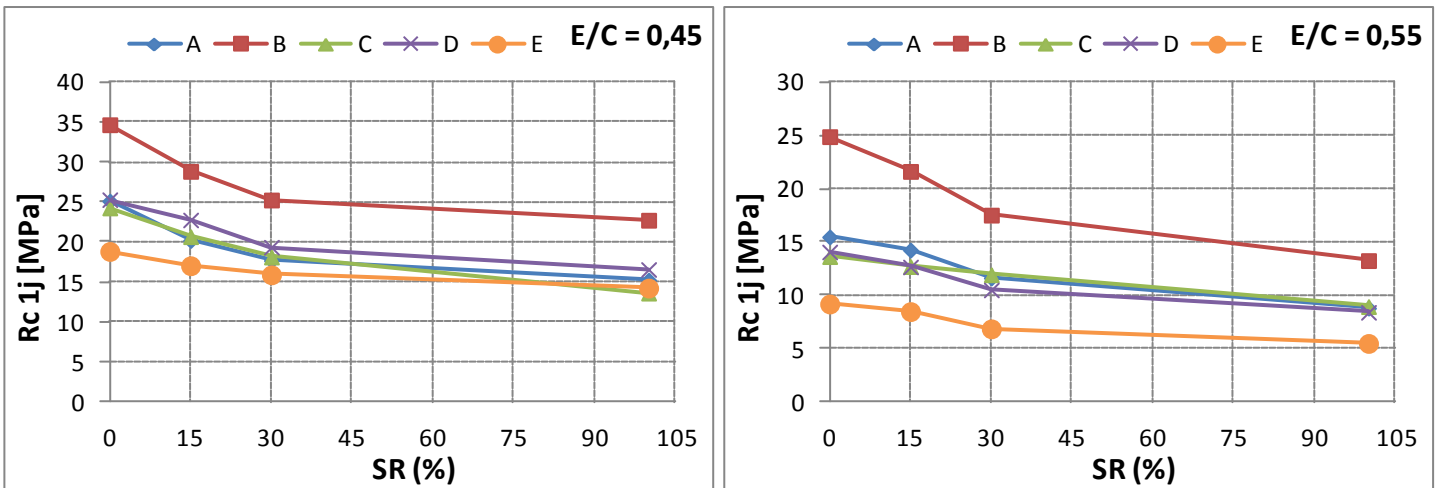


Figure 31 : Evolution de la résistance à 1 jour en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

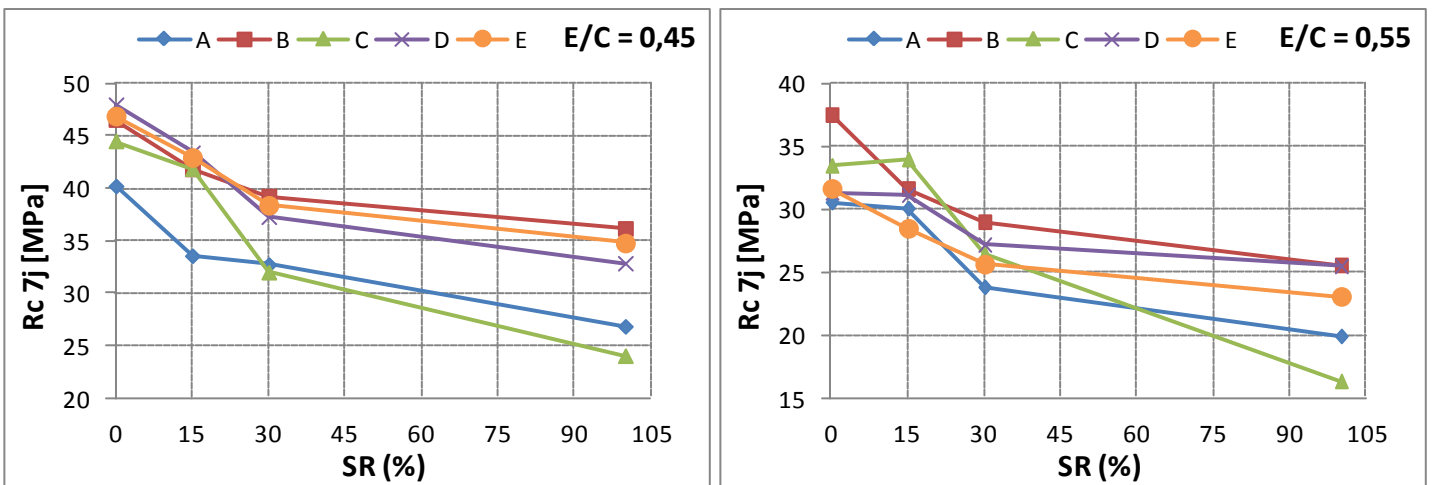


Figure 32 : Evolution de la résistance à 7 jours en fonction du pourcentage du sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

▪ **Conclusion sur les MBE :**

D'après les essais effectués sur les MBE on a pu déterminer les couples qui ont un bon et un mauvais comportement en fonction du pourcentage de substitution, les résultats sont résumés dans le tableau 11. :

Essais	Bons couples	Mauvais couples
Etalement	C, E	A, D
Teneur en air	A, E	C, D
Masse volumique	A, E	C, D
Résistance	B	A
Couples choisis	B, E	A, D

Tableau 11 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements en fonction du pourcentage sable recyclé.

II.2. Résultats sur les bétons

II.2.1. Bétons avec sable recyclé (SR)

a) Variation du dosage en adjuvant pour obtenir un affaissement à $200 \pm 20\text{mm}$ à T0

La figure 33 montre l'évolution du pourcentage en adjuvant à utiliser pour maintenir l'affaissement à $200 \pm 20\text{mm}$ lorsque le pourcentage de sable recyclé augmente.

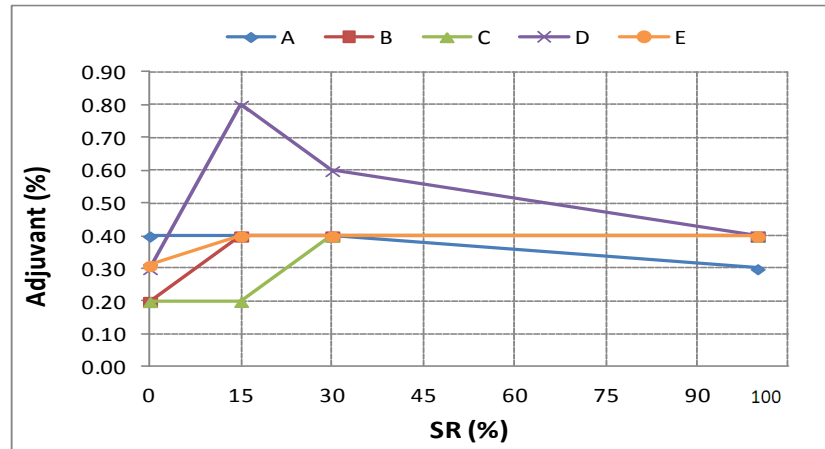


Figure 33 : Evolution du pourcentage d'adjuvant en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les résultats montrent que le sable recyclé présent dans les bétons a une faible influence sur la quantité d'adjuvant à mettre dans les bétons pour avoir un affaissement de $200 \pm 20\text{mm}$.

b) Evolution de l'affaissement

- **en fonction du pourcentage sable recyclé**

La figure 34 montre qu'avec les pourcentages d'adjuvant précisés précédemment, l'affaissement des bétons rentre bien dans la plage de variation de $200 \pm 20\text{mm}$.

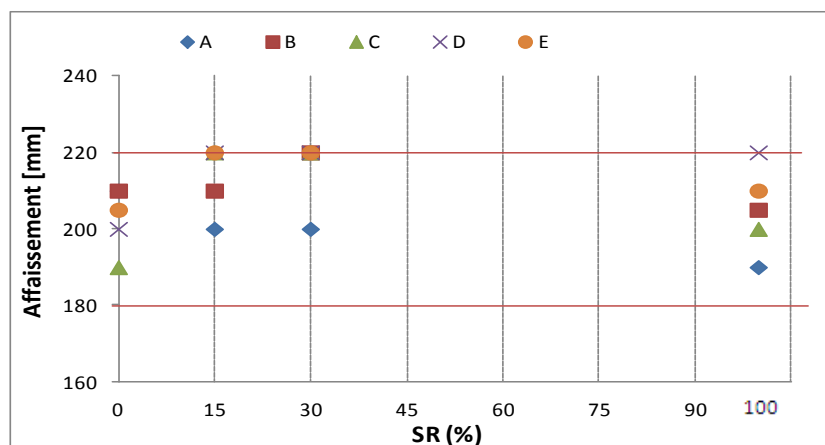


Figure 34 : Evolution de l'affaissement à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (35, 36 et 37) montrent que l'affaissement est maintenu à T30 pour les différents couples jusqu'à 30% SR sauf pour les couples A et D, et on remarque une perte en maintien à 100% SR (jusqu'à 70% pour le couple D). Cela est dû à la rugosité de surface des grains de sable [6].

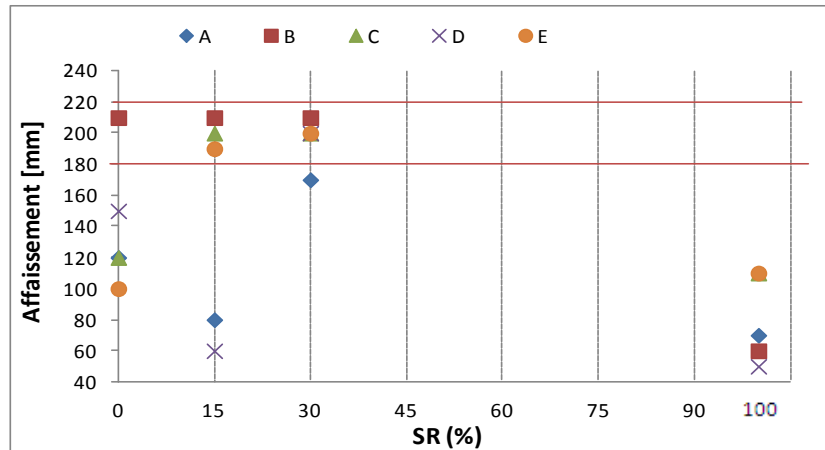


Figure 35 : Evolution de l'affaissement à T30 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

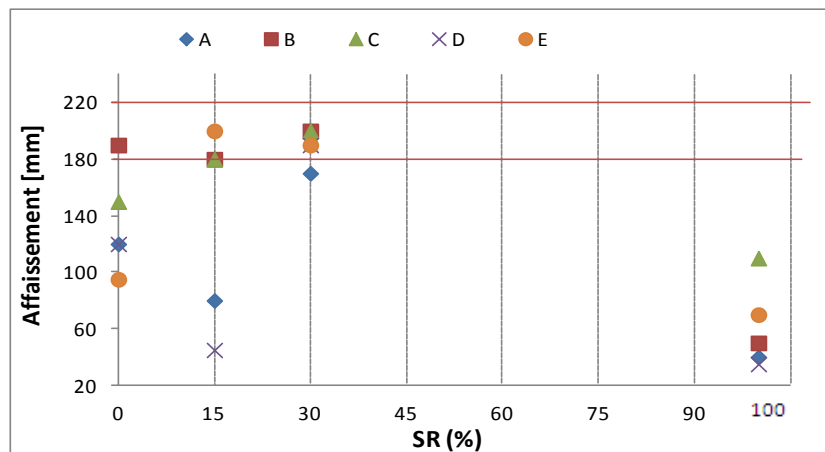


Figure 36 : Evolution de l'affaissement à T60 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

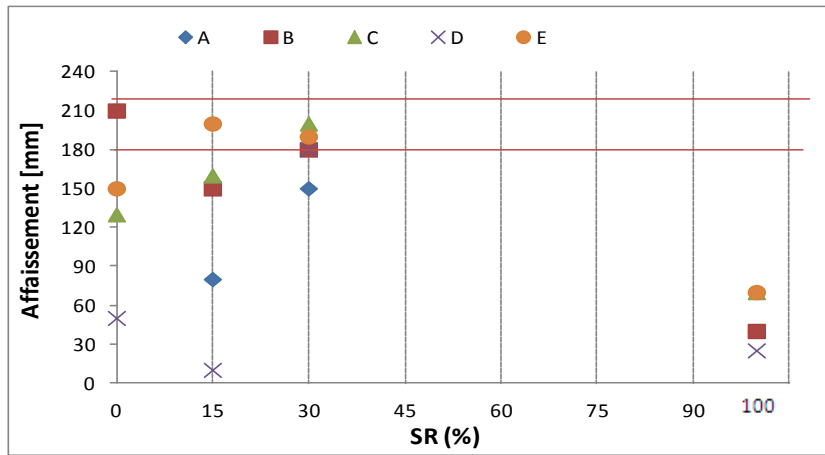


Figure 37 : Evolution de l'affaissement à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

- **en fonction du temps**

Les figures (38, 39, 40 et 41) montrent l'évolution de l'affaissement pour différents pourcentages de sable recyclé en fonction du temps, pour les cinq différents couples. :

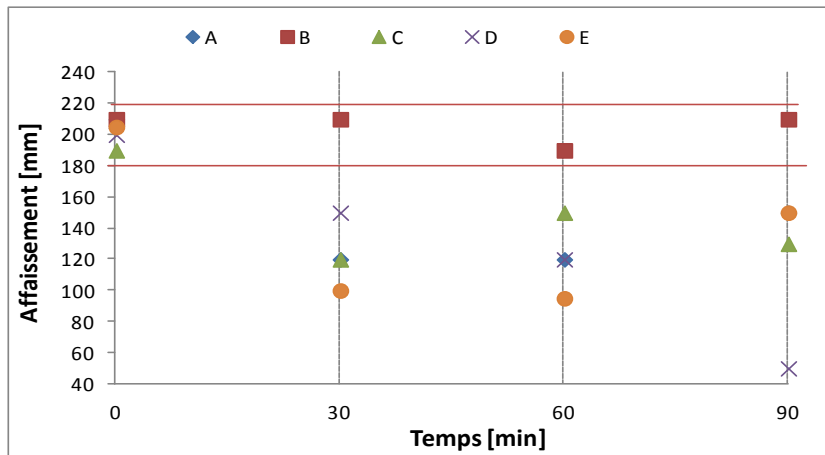


Figure 38 : Evolution de l'affaissement à 0% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

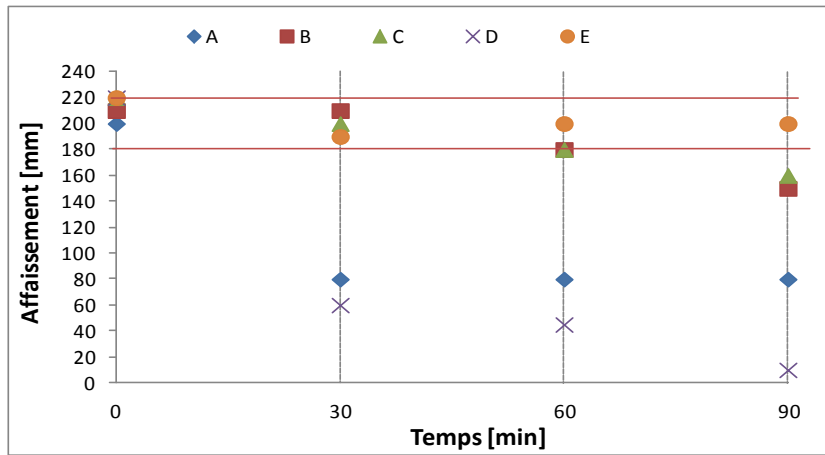


Figure 39 : Evolution de l'affaissement à 15% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

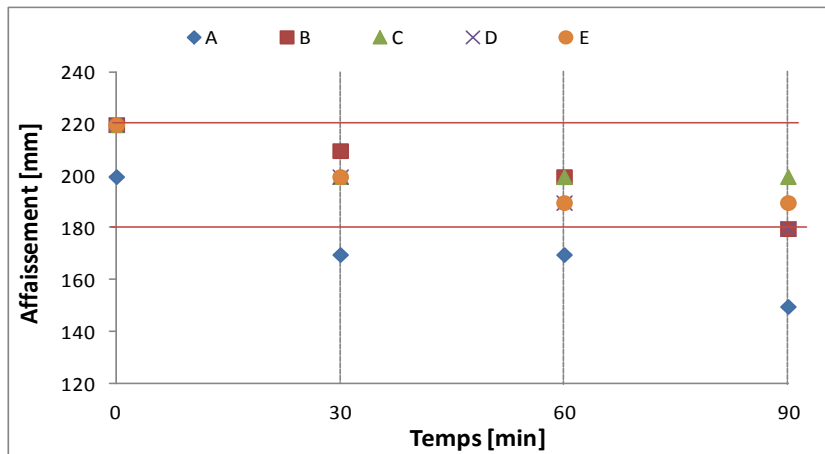


Figure 40 : Evolution de l'affaissement à 30% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

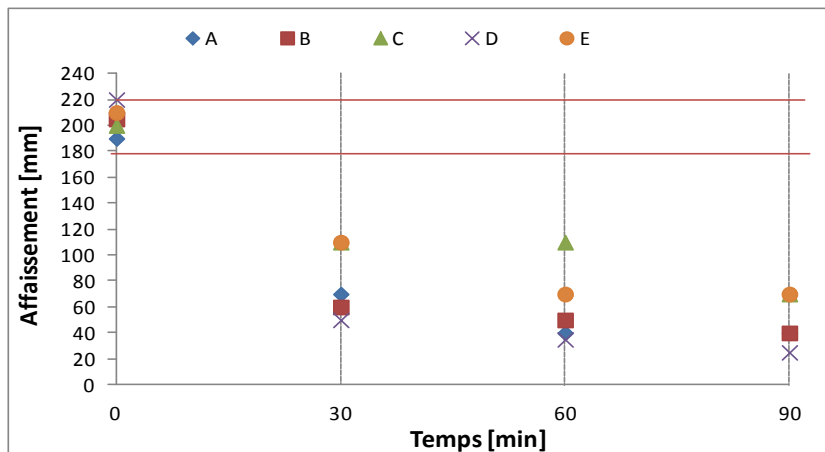


Figure 41 : Evolution de l'affaissement à 100% de sable recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

Les résultats montrent que :

- Quel que soit le %SR, l'affaissement baisse en fonction du temps.
- A faible dosage en %SR ($\leq 30\%$), l'étalement baisse légèrement en fonction du temps contrairement à 100% SR, une baisse remarquable.
- Quel que soit le %SR, nous distinguons deux groupes ciment-adjuvant. Le premier qui présente un bon maintien en fonction du temps (les couples B, C et E) et le deuxième avec un mauvais maintien en fonction du temps (les couples A et D).
- Une perte de maniabilité de 20% sauf pour le couple D qui est de 70%, et à 100% SR une perte de 75% sauf pour le couple D qui est de 85%.

c) Variation de la teneur en air

Les figures 42 et 43 montrent qu'avec un affaissement qui est de 200 ± 20 mm, la teneur en air augmente en fonction de l'accroissement du pourcentage de sable recyclé pour les 5 couples ciment/adjuvant.

Effectivement, le sable recyclé a une porosité plus importante que le sable naturel et la forme et la rugosité des granulats recyclés empêche les bulles d'air de s'extraire du béton pendant la vibration [8], donc il est logique que la teneur en air augmente (la teneur en air du 100%SR est 65% plus élevée que celle du 0%SR pour les couples A et E).

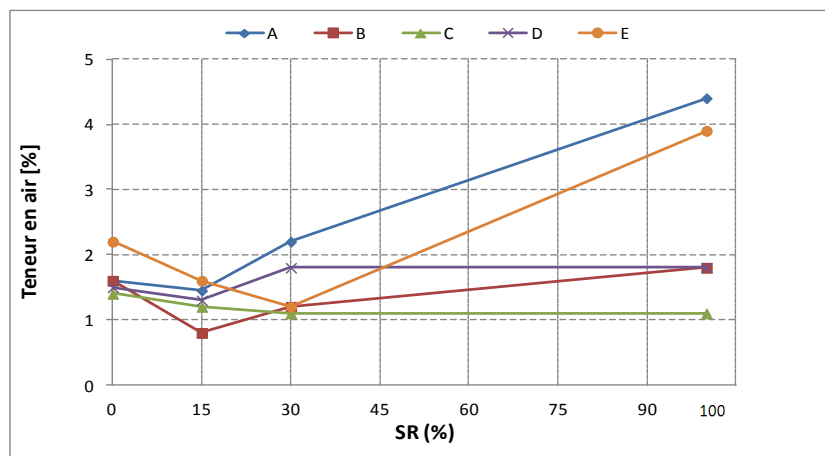


Figure 42 : Evolution de la teneur en air à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

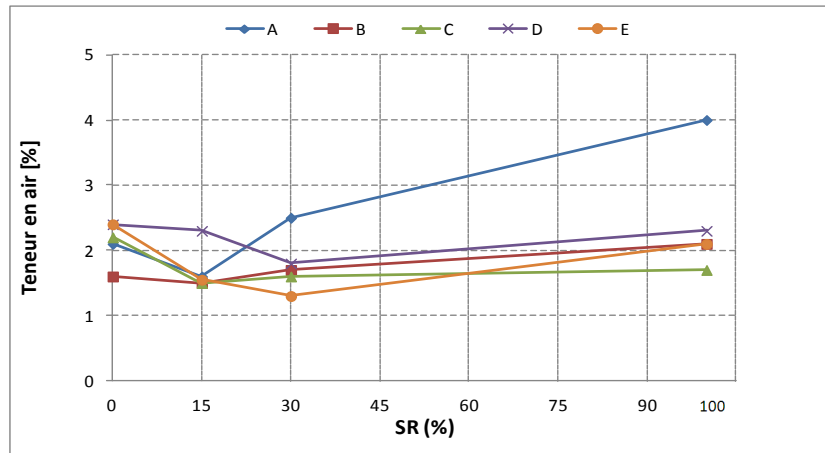


Figure 43 : Evolution de la teneur en air à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

d) Variation de la masse volumique

Les figures 44 et 45 montrent que les masses volumiques diminuent avec l'augmentation du pourcentage de sable recyclé SR pour différents couples ciment/adjuvant. Cela est dû à la quantité de mortier ancien collé aux granulats recyclés qui prend place autour des granulats. Ces résultats confirment les résultats de l'évolution de la teneur en air (plus la teneur en air augmente et plus la masse volumique diminue).

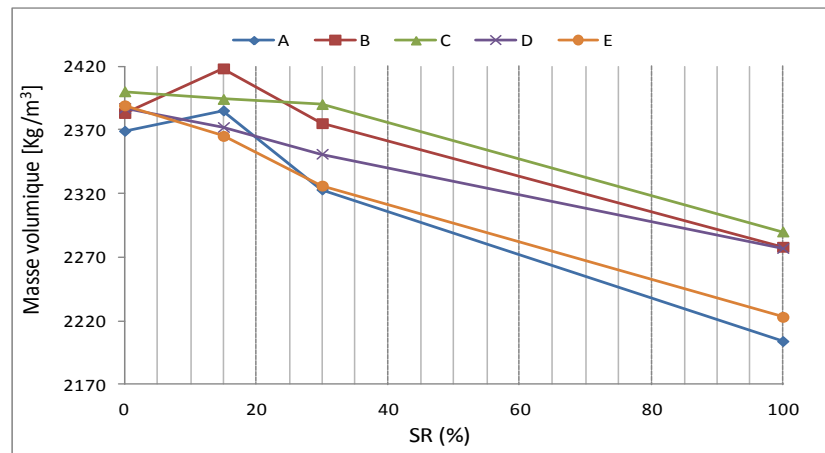


Figure 44 : Evolution de la masse volumique à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

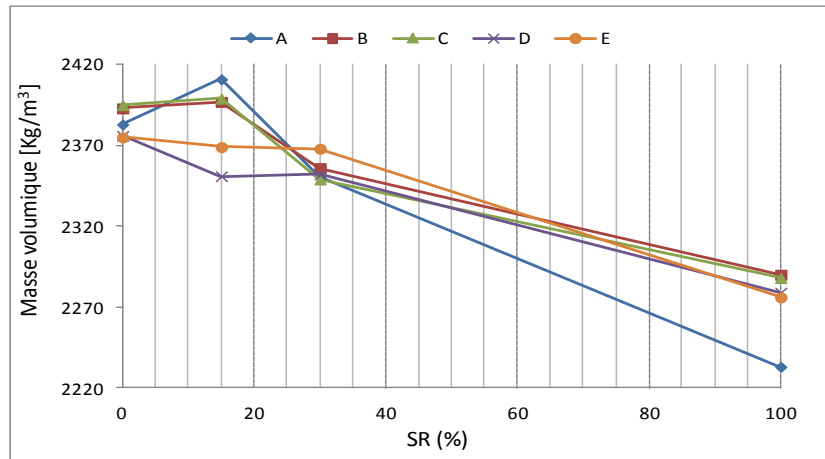


Figure 45 : Evolution de la masse volumique à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

e) Variation de la température

Les figures (46, 47, 48 et 49) montrent que l'augmentation du pourcentage en SR affecte peu la température initiale du béton, cela est expliqué par le fait que le ciment passe par une phase appelée phase dormante qui peut prendre 1h30 voir 2h, dans cette phase le ciment ne dégage pas de chaleur.

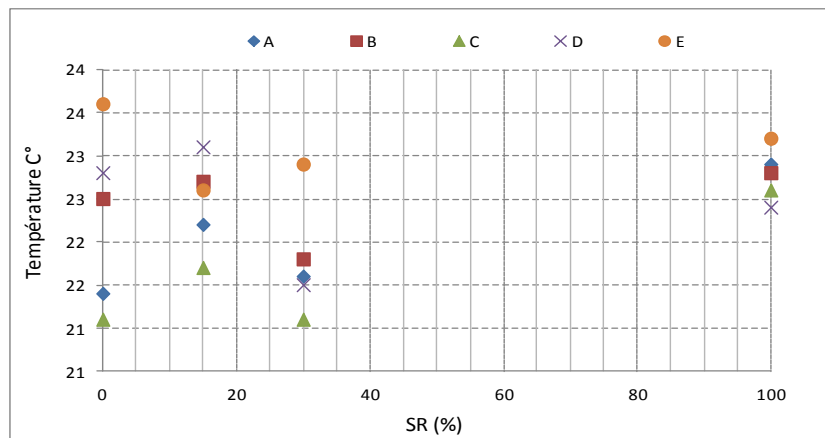


Figure 46 : Evolution de la température à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

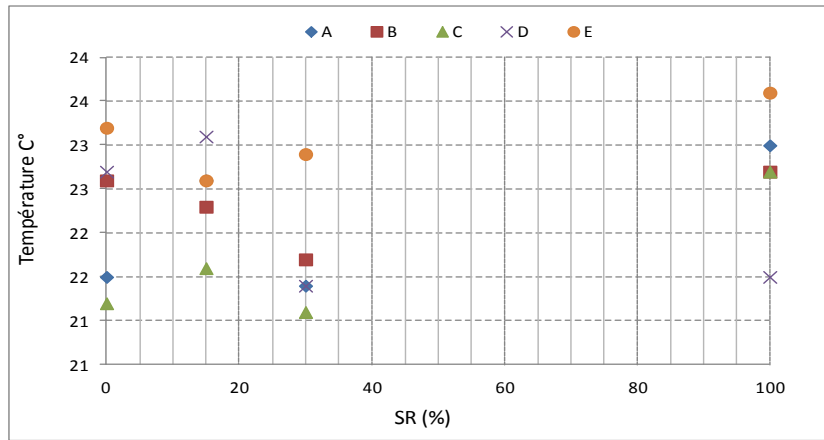


Figure 47 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

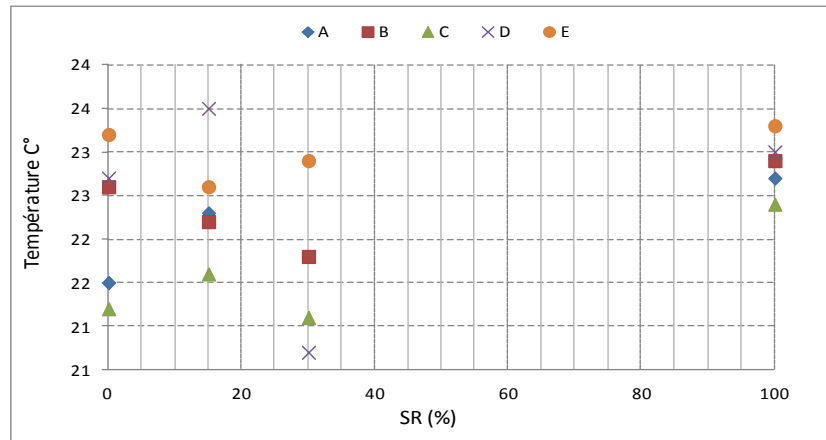


Figure 48 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

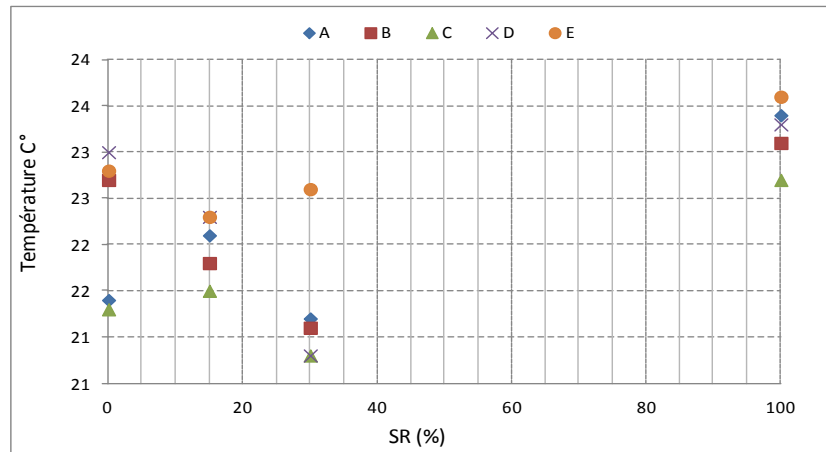


Figure 49 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

f) *Variation de la résistance en compression au jeune âge*

La résistance en compression au jeune âge des bétons est obtenue avec des éprouvettes 15x30 cm (cf. figure 50) conservées à 95% d'humidité relative et à 20°C. Les résultats sont consignés sur les figures 51, 52 et 53.



Figure 50 : Epreuves 15x30

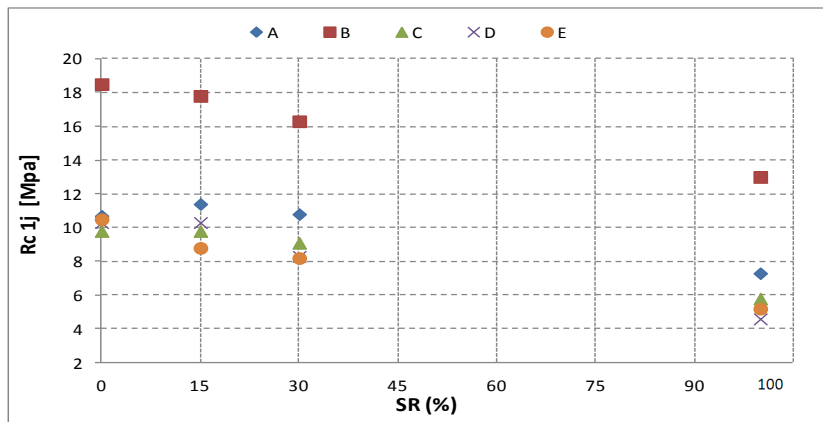


Figure 51 : Evolution de la Résistance en compression à 1j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

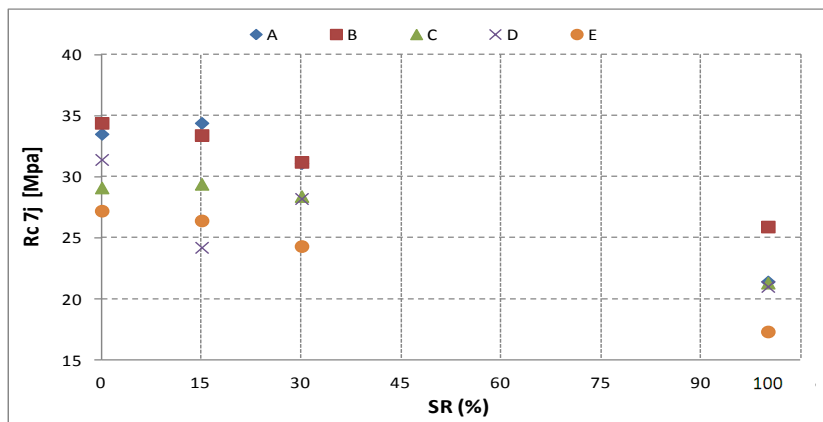


Figure 52 : Evolution de la Résistance en compression à 7j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

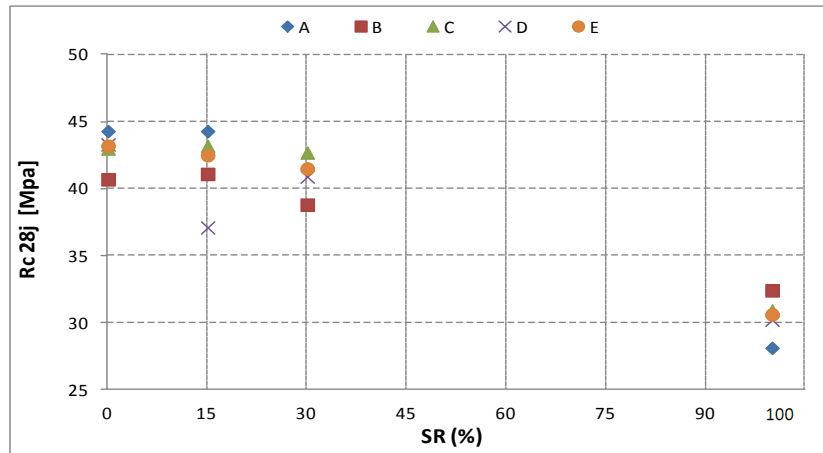


Figure 53 : Evolution de la Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les résultats montrent que la résistance en compression à 1, 7 et 28 jours des bétons constitués de sable recyclé diminue lorsque le pourcentage de substitution augmente. D'après Crentsil, [9], la résistance en compression dépend de la nature du ciment. Ainsi, le couple B permet d'obtenir une meilleure résistance au jeune âge, mais il présente une baisse de 45% pour le 100%SR comparé à 0%SR. Contrairement au couple E qui donne une mauvaise résistance au jeune âge, mais ont retrouvent les mêmes résistances à 28 jours avec toujours une baisse pour 100 de % SR

Ceci est tout à fait logique compte tenue de l'augmentation de la teneur en air et de la masse volumique des bétons quand le pourcentage du SR augmente. De plus, la présence de l'ancien ciment collé sur les SR qui d'une part affaiblie la structure du mélange, et d'autre part la présence de pore qui facilite la rupture.

g) Variation du module d'élasticité à 28 jours

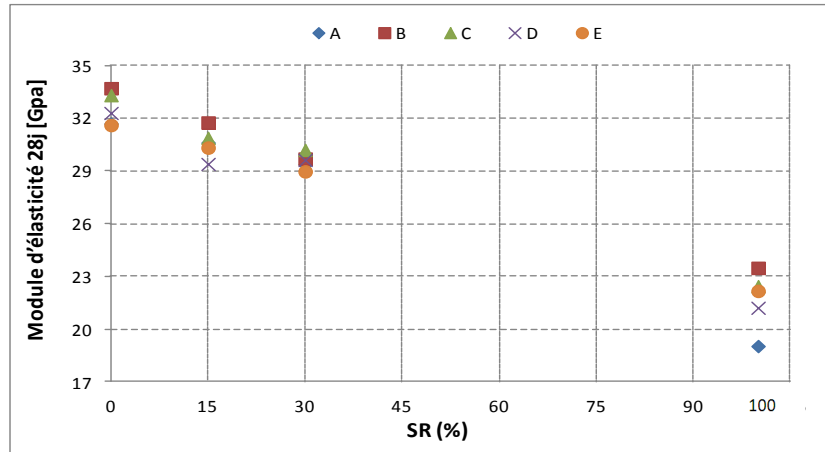


Figure 54 : Evolution du module d'élasticité à 28j en fonction du % sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les résultats représentés sur la figure 54 montrent que le module d'élasticité à 28 jours des bétons constitués de sable recyclé diminue lorsque le pourcentage de substitution augmente [10–14]. Par ailleurs, le couple ciment/adjuvant a peu d'influence sur le module d'élasticité et le pourcentage de substitution a un fort impact il engendre une diminution quasi linéaire pour atteindre moins 40% pour 100% de sable recyclé.

h) Comportement rhéologique

Le comportement rhéologique est mesuré à l'aide d'un rhéomètre rotatif développé par l'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise; Heidolph- RZR 2102 Control Z. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et de mesurer le couple appliqué. Les paramètres rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité plastique) sont ensuite calculés [15].

Après la mesure de l'affaissement, on verse le béton dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. A l'aide du logiciel on démarre la rotation en suivant un profil de vitesse approprié afin d'obtenir une courbe couple en fonction de la vitesse angulaire exploitable.

- Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 en pour différents couples ciment/adjuvant.

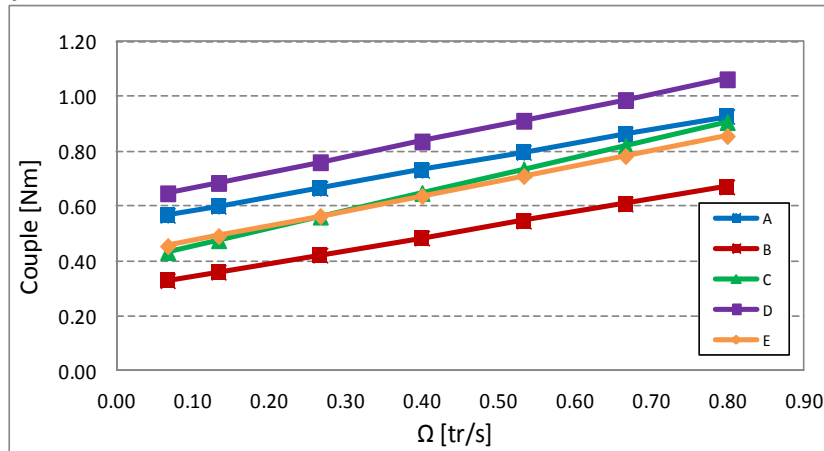


Figure 55 : Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 pour différents couples ciment/adjuvant

La Figure 55 représente l'évolution du couple en fonction de la vitesse angulaire. Les résultats montrent, d'une part, que le couple augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation, d'autre part, que la valeur des couples sont fortement dépendants du couple ciment/adjuvant.

- Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 et T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour les 5 couples ciment/adjuvant.

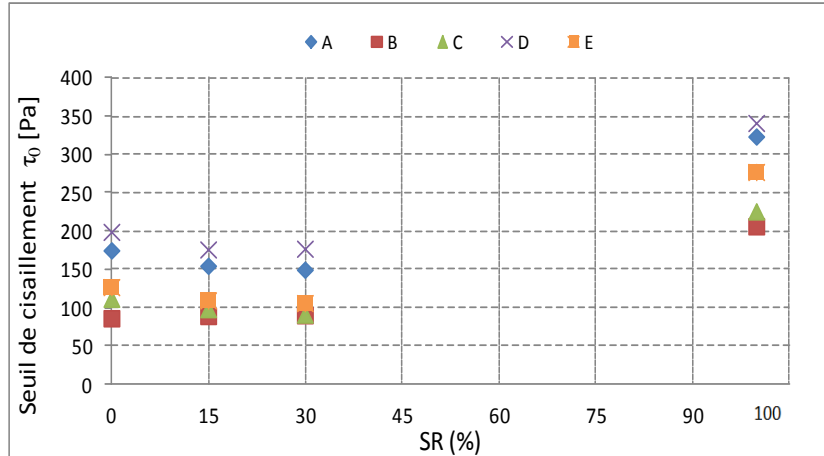


Figure 56 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

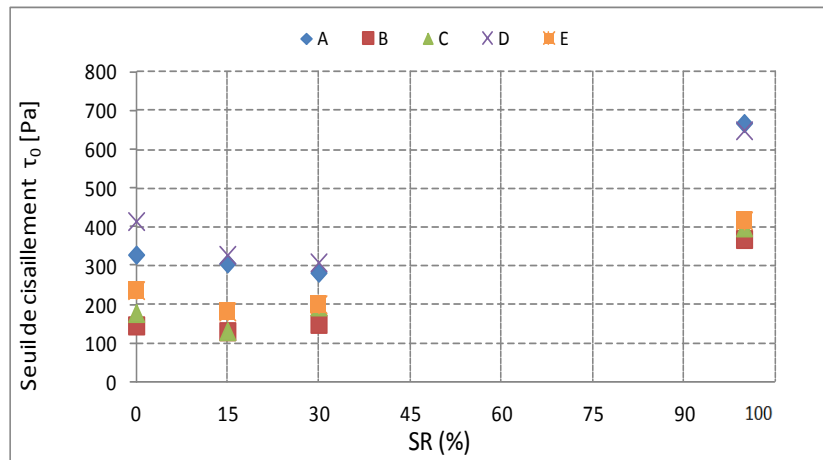


Figure 57 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (56, 57) montrent que le seuil est quasiment constant jusqu'à 30% de SR et augmente au-delà.

Les couples A et D présentent le seuil de cisaillement les plus élevés, jusqu'à 340 Pa à T0 et 680 Pa à T90. Plus on augmente le pourcentage de sable recyclé et plus le seuil de cisaillement augmente, cela est dû à la forte absorption du sable recyclé.

Le couple B présente le seuil de cisaillement le plus faible, jusqu'à 200 Pa à T0 et 340 Pa à T90 ; et cela pour un pourcentage de 100SR.

- Evolution de la viscosité plastique μ à T0 et T90 en fonction %SR pour différents couples ciment/adjuvant.

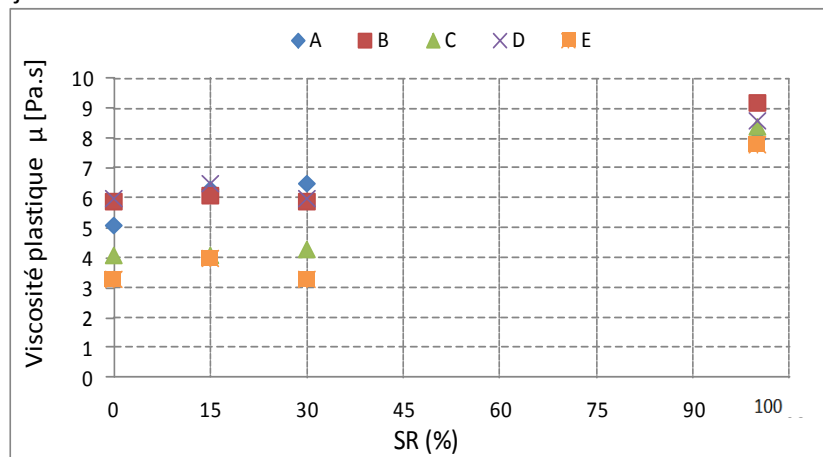


Figure 58 : Evolution de la viscosité plastique μ à T0 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

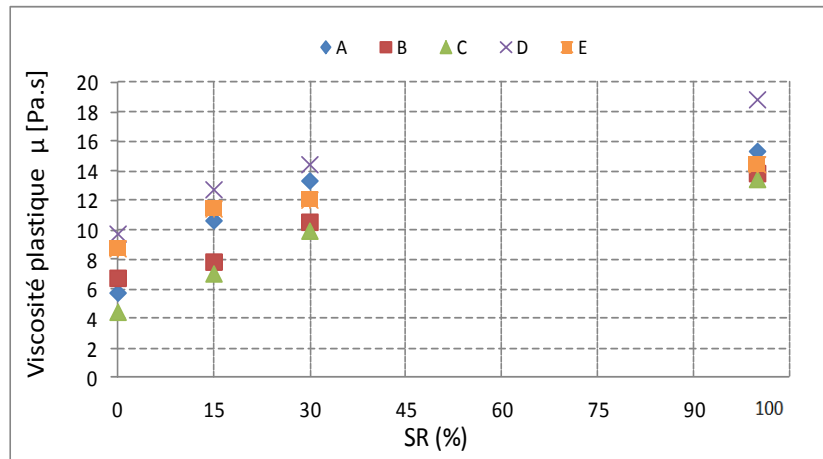


Figure 59 : Evolution de la viscosité plastique μ à T90 en fonction du pourcentage de sable recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (58, 59) montrent que plus les pourcentages de sable recyclé augmentent et plus la viscosité plastique augmente, cela est dû à la présence des fines dans le sable recyclé et la géométrie des granulats [16]. A noter que chaque rhéomètre donne des résultats différents selon leur configuration et donc ces résultats permettent seulement de comparer les paramètres rhéologiques des différents bétons en utilisant un même rhéomètre.

Le couple D présente la viscosité plastique la plus importante jusqu'à 19 Pa.s et le couple B le plus faible jusqu'à 13 Pa.s dans les deux cas obtenues avec 100 % de sable recyclé.

Plus on augmente le pourcentage de sable recyclé et plus la viscosité plastique augmente, cela est dû à la forte absorption du sable recyclé

▪ Conclusion sur les sables recyclés

D'après les essais effectués sur les bétons confectionnés à partir de sable recyclé on a pu déterminer les couples qui ont un bon et un mauvais comportement en fonction du pourcentage de substitution, les résultats sont résumés dans le tableau 12 :

Essais	Bons couples	Mauvais couples
Etalement	B, C, E	A, D
Teneur en air	B, C	A, E
Masse volumique	B, C	A, E
Résistance	B	D, E
Seuil de cisaillement	B	A, D
Viscosité plastique	B	D
Couples choisis	B, C	A, D, E

Tableau 12 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements pour les essais réalisés.

II.2.2. Bétons avec gravillons recyclés (GR)

a) Variation du dosage en adjuvant pour maintenir l'affaissement à 200 ± 20 mm

La figure 60 montre l'évolution du pourcentage en adjuvant à utiliser pour maintenir l'affaissement à 200 ± 20 mm lorsque le pourcentage de gravillon recyclé augmente.

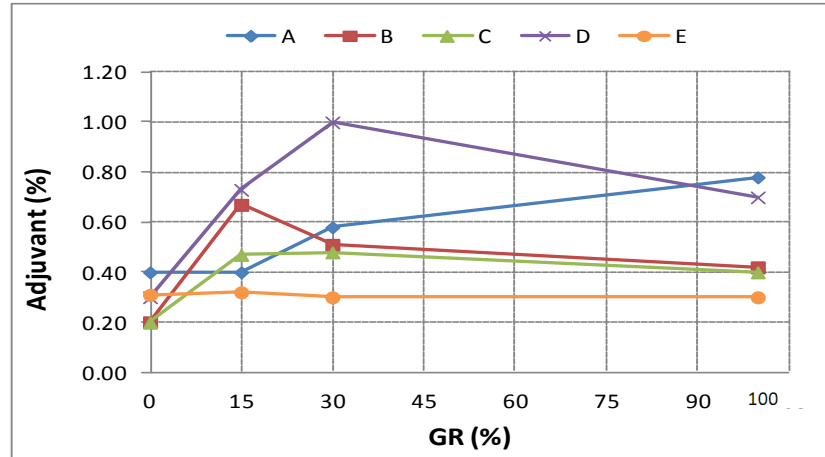


Figure 60 : Evolution du pourcentage d'adjuvant en fonction du pourcentage du gravillon recyclé pour différents couples pour différents couples ciment/adjuvant

Les résultats montrent que pour avoir un béton de classe S4 d'affaissement autour de 200 ± 20 mm, lorsque le pourcentage de GR est inférieur à 30%, le pourcentage de super plastifiant augmente. Au-delà de 15% de GR, le pourcentage d'adjuvant ne change presque pas sauf pour les couples A et D.

Cela est expliqué par le fait que le 100%GR a été pré-humidifié pendant 24h (pour remplacer la quantité d'eau qui sera absorbé par le recyclé) avant l'essai.

On remarque aussi que la quantité demandée de d'adjuvant par le gravier recyclé est moins importante que celle demandée par le sable recyclé, et ceci est expliqué par le pourcentage d'absorption, qui est faible par rapport au pourcentage d'absorption du sable recyclé.

b) Evolution de l'affaissement

• en fonction du pourcentage de gravillon recyclé

La figure 61 montre qu'avec les pourcentages d'adjuvant précisés précédemment, l'affaissement des bétons rentre bien dans la plage de variation de 200 ± 20 mm.

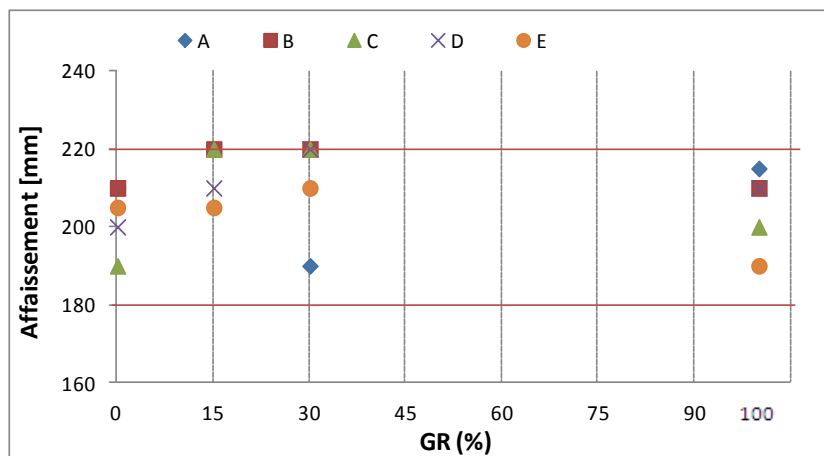


Figure 61 : Evolution de l'affaissement à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

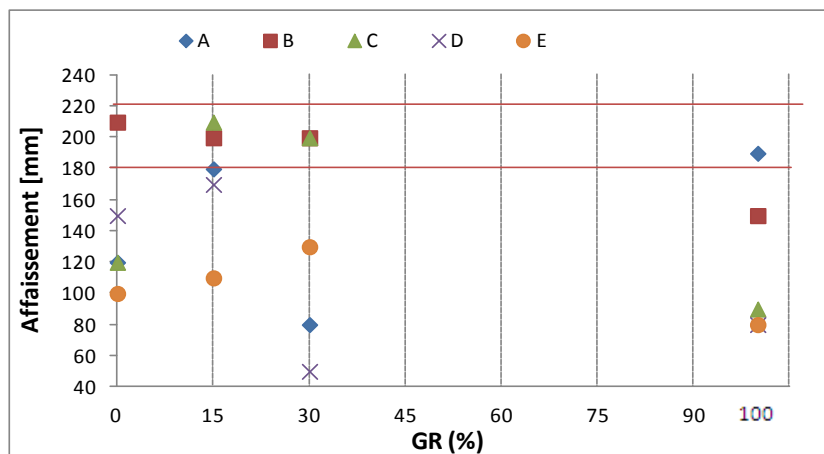


Figure 62 : Evolution de l'affaissement à T30 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

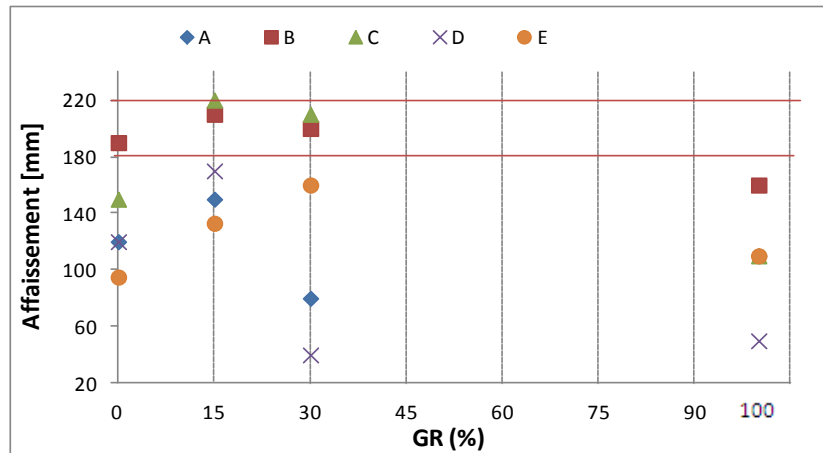


Figure 63 : Evolution de l'affaissement à T60 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

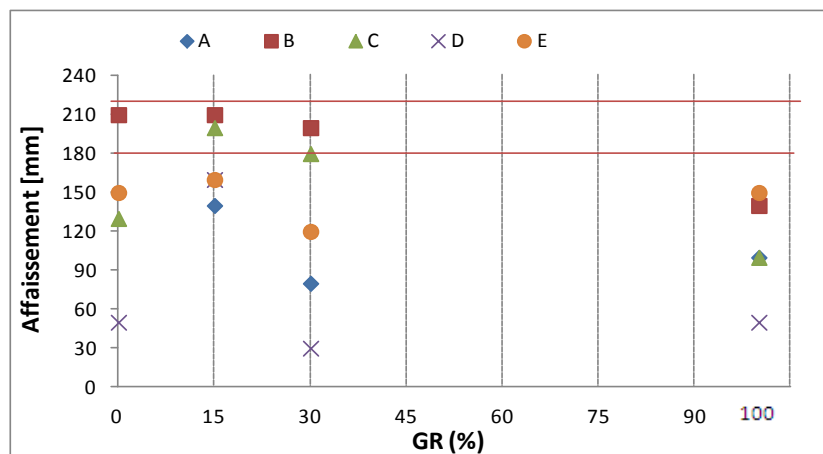


Figure 64 : Evolution de l'affaissement à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (62,63 et 64) montrent que l'affaissement est maintenue à T30 pour les différents couples jusqu'à 30% de gravillon recyclé sauf pour les couples E et D. De plus, on remarque une perte en maintien à 100% de gravillon recyclé (jusqu'à 55% pour les couples D et E) et une baisse progressive en fonction du temps jusqu'à T90min pour les cinq couples, à 0% de gravillon recyclé une perte de maniabilité jusqu'à 25% sauf pour le couple D qui est de 70%, et à 100% de gravillon recyclé une perte de 40% sauf pour le couple D qui est de 70%. Cela est dû à l'effet de la compacité qui est plus faible pour le gravillon recyclé, ainsi que la rugosité de surface des grains [6]

- **en fonction du temps**

Les figures (65, 66, 67 et 68) montrent l'évolution de l'affaissement à différents pourcentage du gravillon recyclé en fonction du temps, pour les cinq différents couples.

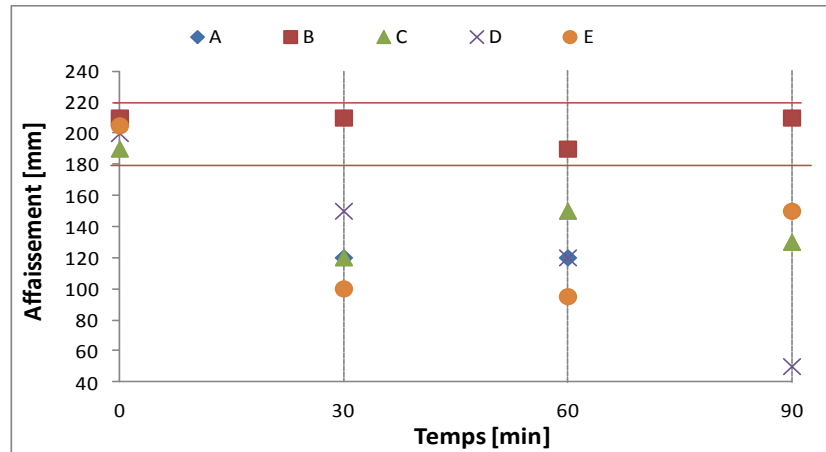


Figure 65 : Evolution de l'affaissement à 0% de gravillon recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

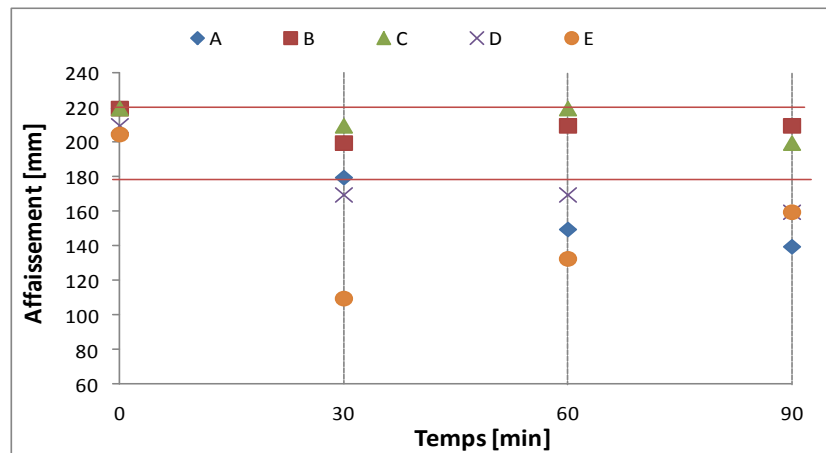


Figure 66 : Evolution de l'affaissement à 15% de gravillon recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

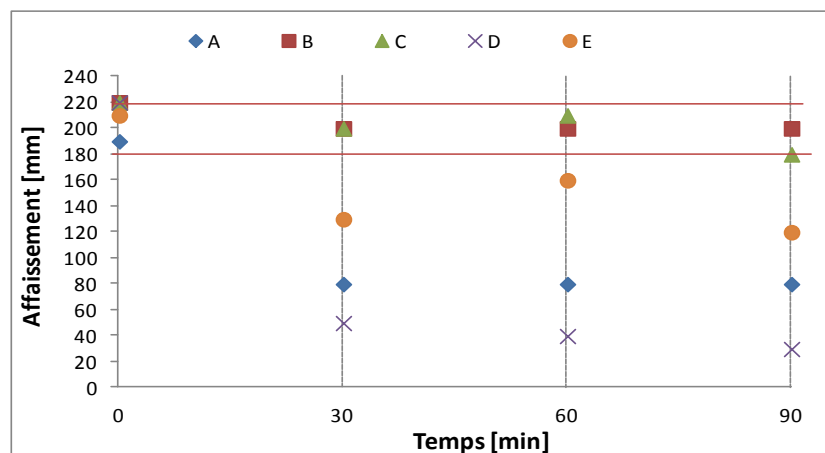


Figure 67 : Evolution de l'affaissement à 30% de gravillon recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

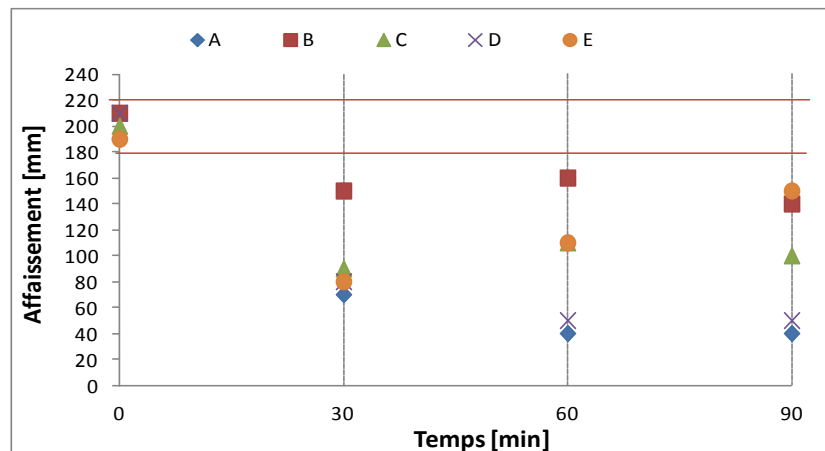


Figure 68 : Evolution de l'affaissement à 100% de gravillon recyclé en fonction du temps pour les couples ciment/adjuvant.

Les résultats montrent que :

- A faible dosage en %GR ($\leq 30\%$), l'étalement baisse légèrement en fonction du temps contrairement à 100% GR, une baisse remarquable.
- Quel que soit le %GR, nous distinguons deux groupes ciment-adjuvant. Le premier qui présente un bon maintien en fonction du temps (les couples B et C) et le deuxième avec un mauvais maintien en fonction du temps (les couples A, D et E).

c) *Variation de la teneur en air*

Les figures 69 et 70 montrent qu'avec un affaissement qui est de 200 ± 20 mm, la teneur en air augmente en fonction de l'accroissement du pourcentage du gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.

Sachant que le gravillon recyclé a une porosité plus importante que celle du gravillon naturel, et une forme et une rugosité des granulats qui empêche les bulles d'air de s'extraire du béton pendant la vibration [8], il est logique que la teneur en air augmente (la teneur en air du 100%GR est 40% à 50% plus élevée que le 0%GR pour le couple A et B).

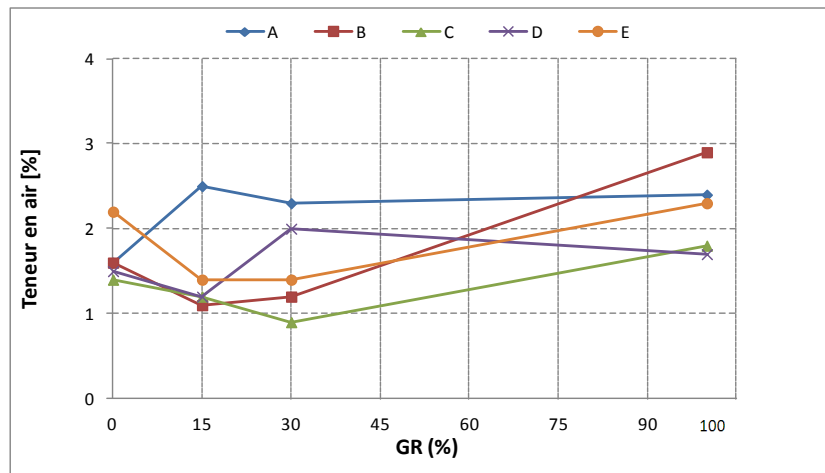


Figure 69 : Evolution de la teneur en air à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

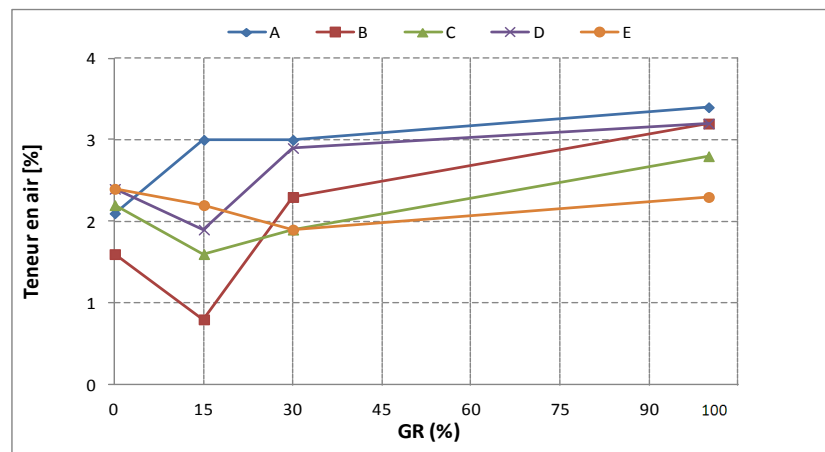


Figure 70 : Evolution de la teneur en air à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

d) *Variation de la masse volumique*

Les figures 71 et 72 montrent que les masses volumiques diminuent avec l'augmentation du pourcentage du gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant. Cela est dû à la quantité de mortier ancien qui prend place au granulat. Et ces résultats viennent aussi confirmer les résultats de l'évolution de la teneur en air (plus la teneur en air augmente et plus la masse volumique diminue).

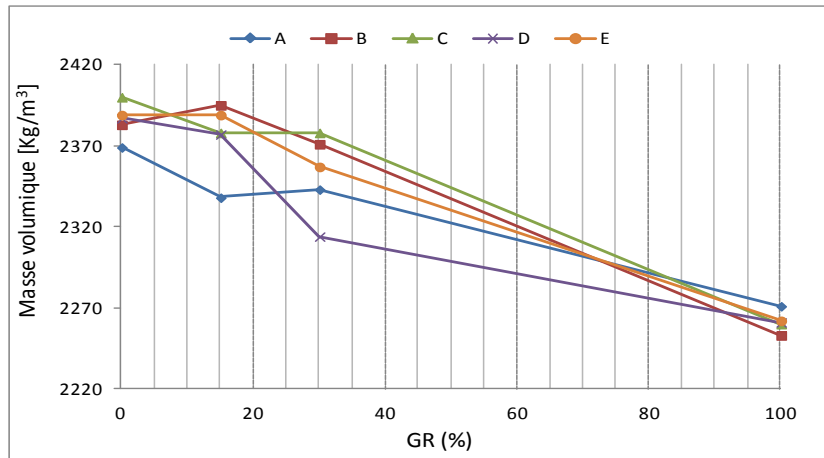


Figure 71 : Evolution de la masse volumique à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

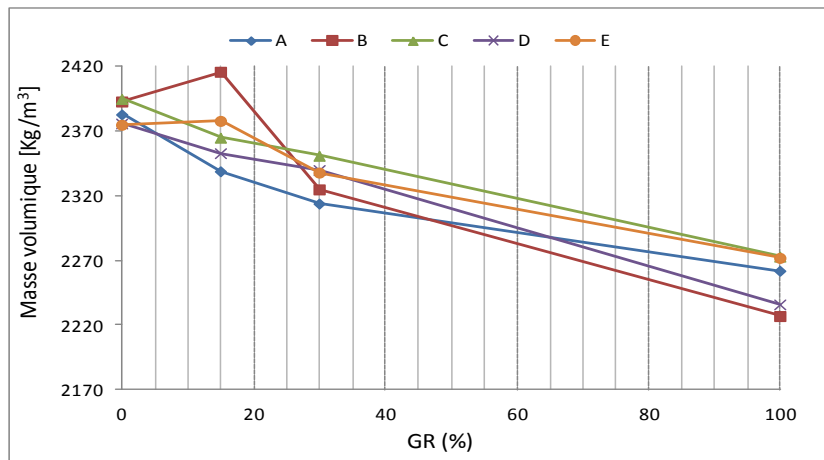


Figure 72 : Evolution de la masse volumique à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

e) *Variation de la température*

Les figures (73, 74, 75 et 76) montrent que l'augmentation du pourcentage en gravillon recyclé n'affecte pas beaucoup la température initiale du béton, cela est expliqué par le fait que le ciment passe par une phase appelée phase dormante qui peut prendre 1h30 voir 2h, dans cette phase là le ciment ne dégage pas de chaleur.

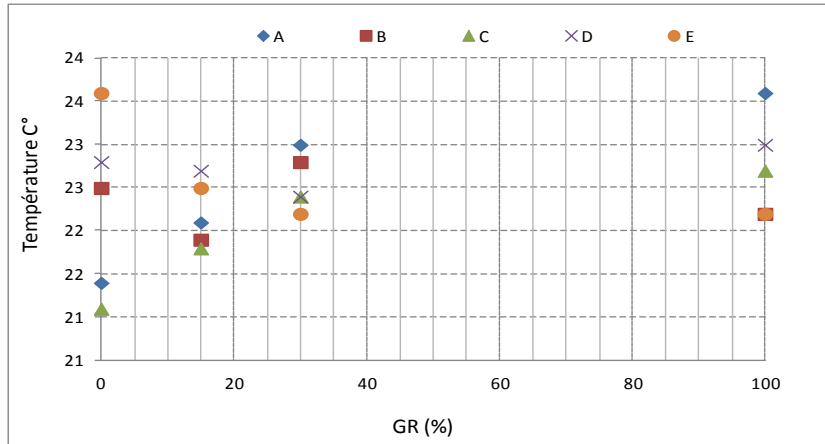


Figure 73 : Evolution de la température à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

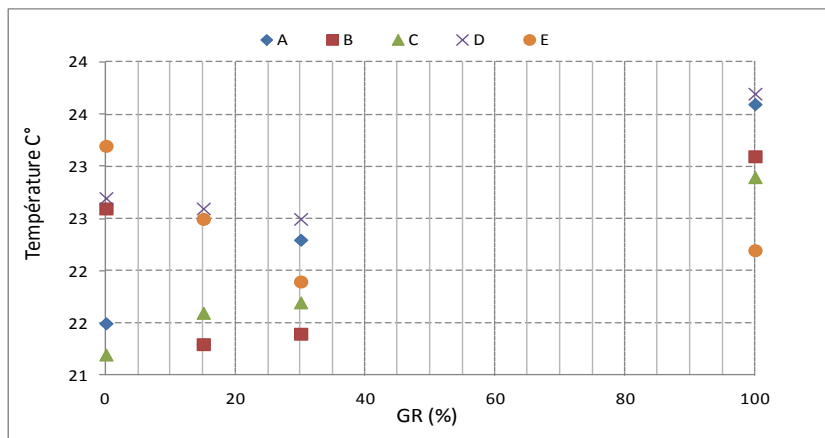


Figure 74 : Evolution de la température à T30 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

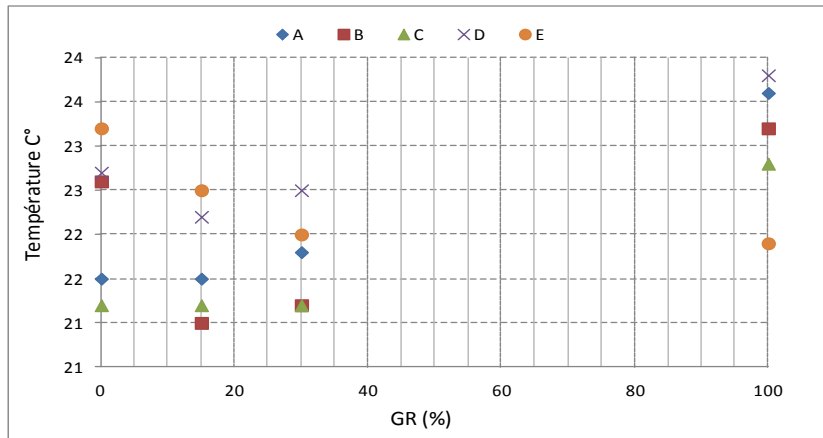


Figure 75 : Evolution de la température à T60 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

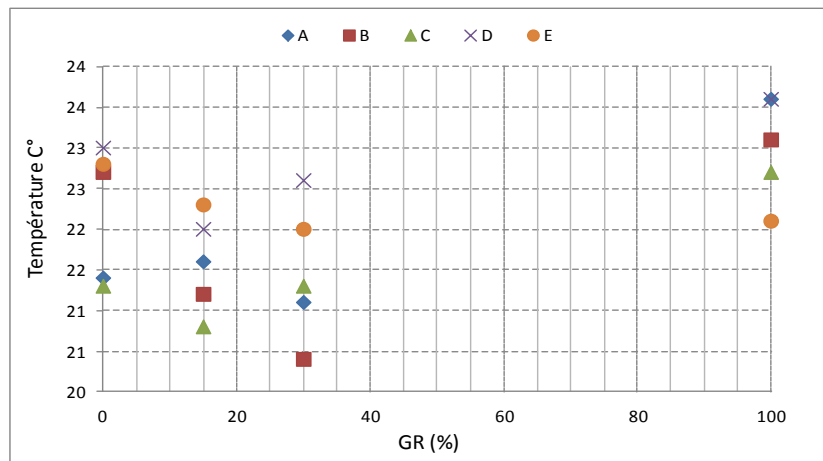


Figure 76 : Evolution de la température à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

f) Variation de la résistance en compression à jeune âge

Les résultats représentés sur les (figures 77, 78 et 79) montrent que la résistance en compression à 1, 7 et 28 jours des bétons à gravillon recyclé correspondant à différents couples ciment + adjuvant, diminue lorsque le pourcentage en gravillon recyclé augmente. D'après Crentsil [9], la résistance en compression dépend de la nature du ciment. Ainsi, le couple B permet d'obtenir une meilleure résistance au jeune âge, qui se maintient même à 100%GR. Contrairement au couple E qui donne une mauvaise résistance au jeune âge, et une baisse de 15% de résistance en compression pour le couple D à 100%GR par rapport au 0%GR.

Ceci est dû à l'augmentation de la teneur en air et de la masse volumique des bétons quand le pourcentage du gravillon recyclé augmente. De plus, la présence de l'ancien ciment collé sur les gravillons Recyclés qui d'une part affaiblit la structure du mélange, et d'autre part la présence de port qui facilite la rupture.

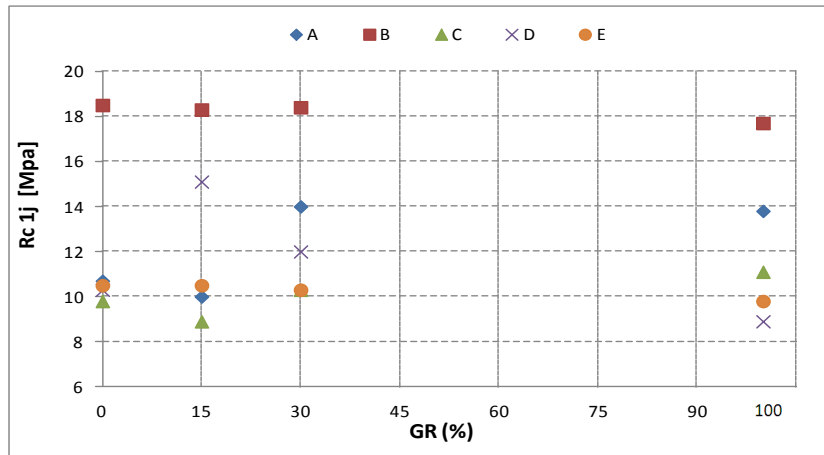


Figure 77 : Evolution de la Résistance en compression à 1j en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

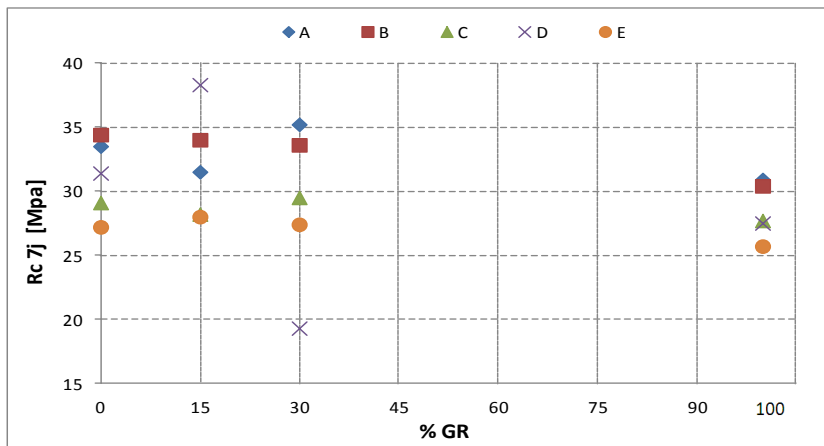


Figure 78 : Evolution de la Résistance en compression à 7j en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

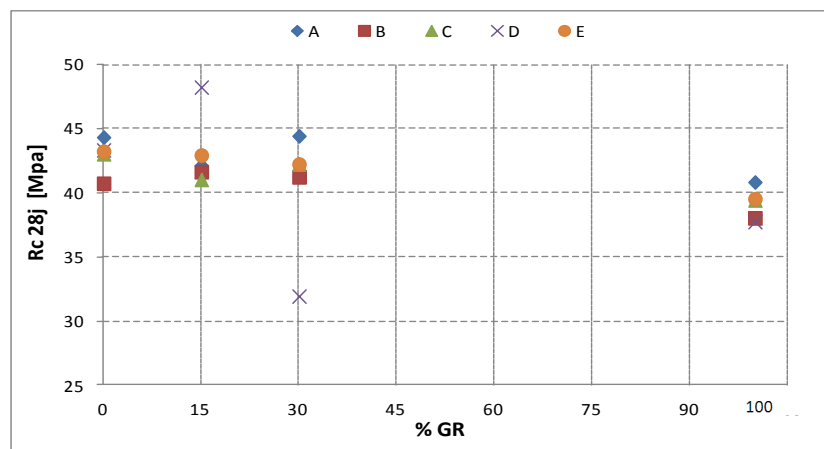


Figure 79 : Evolution de la Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

g) Variation du module d'élasticité à 28 jours

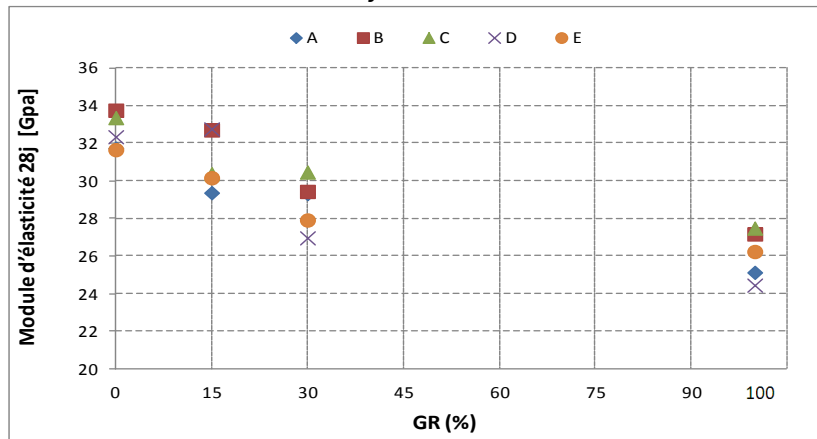


Figure 80 : Evolution du module d'élasticité à 28j en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les résultats représentés sur la (figure 80) montrent que le module d'élasticité à 28 jours des bétons à gravillon recyclé correspondant à différents couples ciment + adjuvant, diminue lorsque le pourcentage en gravillon recyclé augmente [10–14] , on remarque que le couple ciment/adjuvant n'affecte pas le comportement du module d'élasticité , mais la substitution de gravillon recyclé est bien visible pour le 100%GR, elle atteint 20% de moins que le naturel.

h) Comportement rhéologique

- Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 pour différents couples ciment/adjuvant.

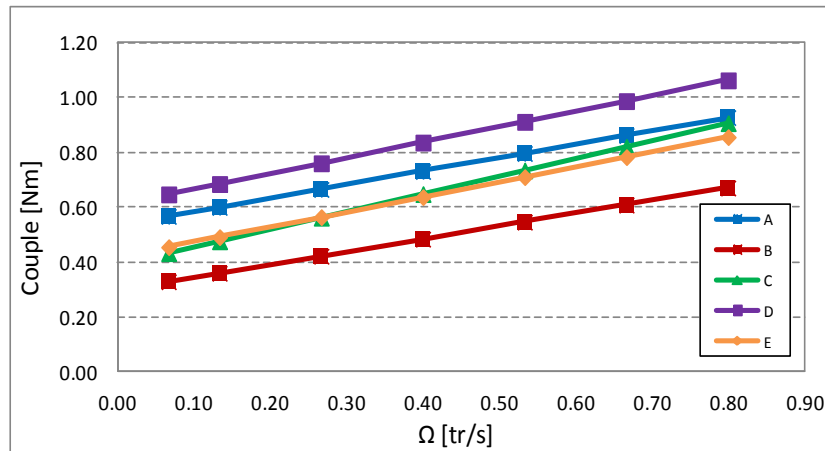


Figure 81 : Evolution du couple en fonction de la vitesse angulaire à T0 pour différents couples ciment/adjuvant

La Figure 81 représente l'évolution des paramètres d'interface en fonction du pourcentage du gravillon recyclé. Les résultats montrent que le couple augmente linéairement en fonction de l'augmentation de la vitesse. Et montrent aussi que le rhéomètre enregistre des couples important pour les couples D et A, et faible pour le couple B.

- Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 en fonction %GR pour différents couples ciment/adjuvant

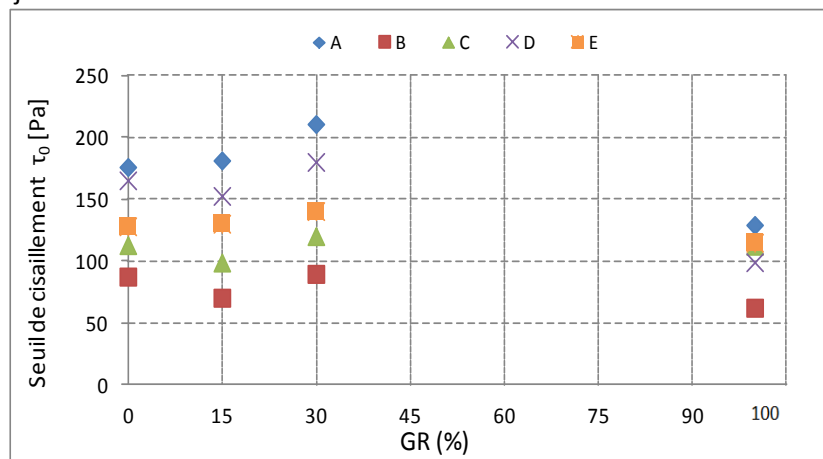


Figure 82 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

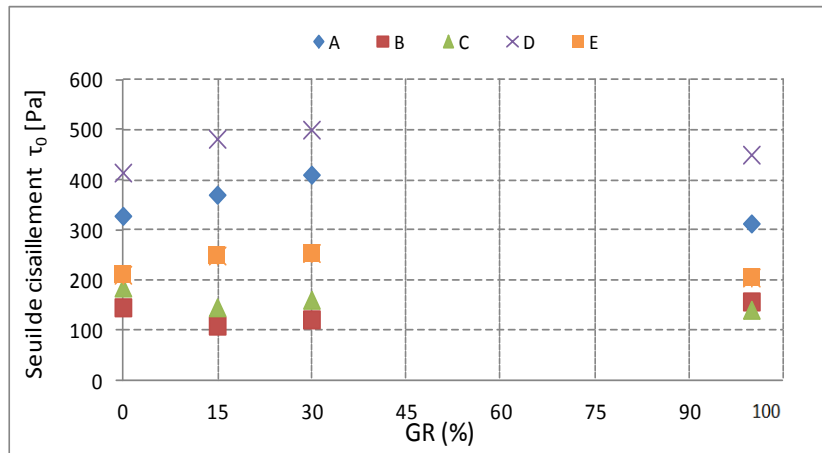


Figure 83 : Evolution du seuil de cisaillement τ_0 à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (82, 83) montrent que les pourcentages de gravillon recyclé n'influent pas beaucoup sur le seuil de cisaillement, cela peut s'expliquer par la faible présence des fines dans le gravillon recyclé et du coup la faible absorption d'eau[16].

Les couples A et D présentent le taux de cisaillement le plus grand jusqu'à 210 Pa à T0 et 500 Pa à T90, et le couple B le plus faible jusqu'à 60 Pa à T0 et 100 Pa à T90.

- Evolution de la viscosité plastique μ à T0 et T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant.

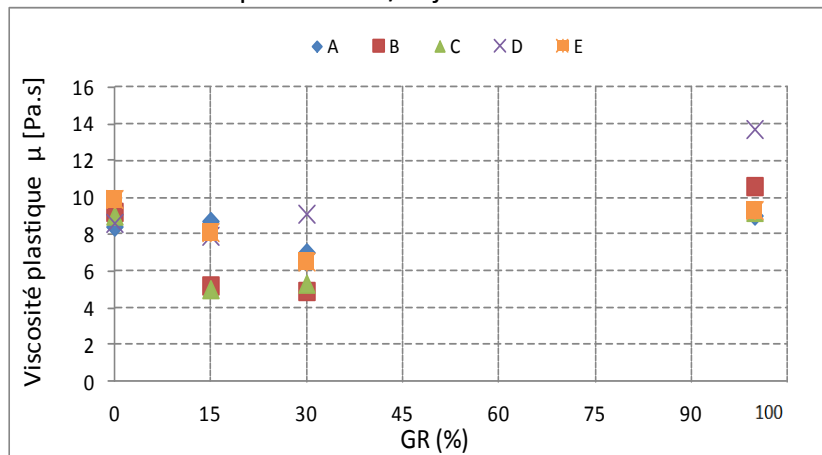


Figure 84 : Evolution de la viscosité plastique μ à T0 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

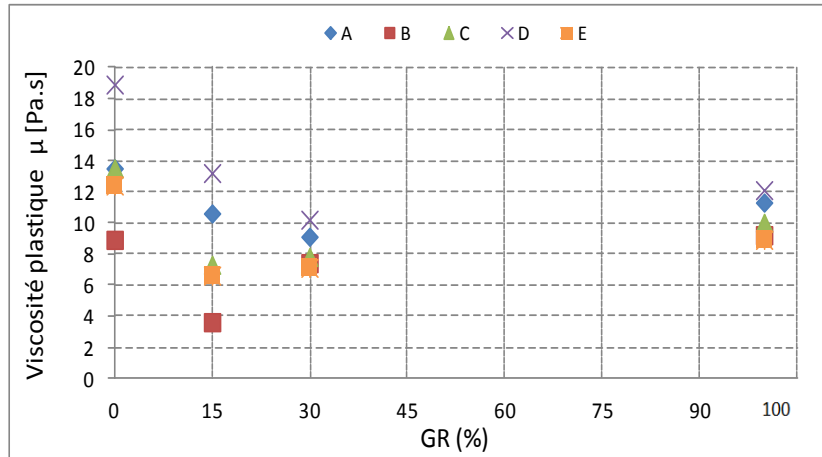


Figure 85 : Evolution de la viscosité plastique μ à T90 en fonction du pourcentage de gravillon recyclé pour différents couples ciment/adjuvant

Les figures (84, 85) montrent que les pourcentages de gravillon recyclé n'influent pas beaucoup sur la viscosité plastique, cela peut s'expliquer par la faible présence des fines dans le gravillon recyclé et du coup la faible absorption d'eau [16]

Le couple D présente le taux de cisaillement le plus grand jusqu'à 14 Pa.s à T0 et 19 Pa.s à T90, et le couple B le plus faible jusqu'à 5 Pa.s à T0 et 3 Pa.s à T90.

▪ Conclusion sur les gravillons recyclés :

D'après les essais effectués sur gravillon recyclé on a pu déterminer les couples qui ont un bon et un mauvais comportement en fonction du pourcentage de substitution, les résultats sont résumés dans le tableau 13 :

Essais	Manilleurs couples	Mauvais couples
Etalement	B, C	A
Teneur en air	C	A, B
Masse volumique	A, B	C
Résistance	B	E
Seuil de cisaillement	B	A, D
Viscosité plastique	B	D
Couples choisis	B, C	A, D, E

Tableau 13 : Les couples qui présentent des bons et des mauvais comportements en fonction du pourcentage de gravillon recyclé.

IV. Conclusions générales

L'objectif de ce travail est de déterminer l'influence des couples ciments/adjuvants sur les bétons à base de granulats recyclés. Un programme expérimental a été mis en place et réalisé.

La synthèse bibliographique permet de tirer les conclusions suivantes :

- ~ Les granulats recyclés présentent un intérêt particulier car leur valorisation permet de résoudre le manque de granulats naturels, de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes et de réduire les volumes mis en décharges ;
- ~ Jusqu'à présent, les granulats recyclés trouvent des débouchés principalement dans le secteur routier, avec une diversité de valorisation néanmoins limitée. L'utilisation des granulats recyclés dans le béton est contrariée non seulement par les normes et les réglementations mais aussi par la méfiance des usagers ;
- ~ Malgré les systèmes de tri et d'épuration utilisés dans les stations de concassage, les granulats recyclés restent hétérogènes et moins propres que les granulats naturels. Les granulats recyclés se distinguent des granulats naturels par deux particularités importantes, d'une part, le mortier qui reste attachée aux granulats naturels après concassage du béton source, d'autre part, la présence d'impuretés. Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés sont affaiblies par cet ancien mortier. Cette chute de performances est encore plus prononcée dans le cas des sables recyclés ;
- ~ Les bétons avec granulats recyclés présentent une faible masse volumique et une teneur en air élevée ;

L'analyse des résultats expérimentaux issus de notre étude permet de tirer les conclusions suivantes :

- ~ Par rapport aux granulats naturels, les granulats recyclés présentent une absorption d'eau élevée (+6% pour les gravillons et +10% pour le sable) ;
- ~ L'affaissement est maintenu au cours du temps pour les bétons confectionnés avec moins de 30% de granulats recyclés au-delà la baisse de l'affaissement est importante ;
- ~ Plus les pourcentages de sable recyclé augmentent et plus le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent.
- ~ Par rapport au béton témoin (confectionné avec des granulats naturels), la résistance à la compression du béton recyclé baisse avec l'augmentation du taux de substitution. Le module d'élasticité diminue également ;

Deux tableaux (14 et 15) récapitulent les couples qui présentent la tendance, les bons et les mauvais comportements, en fonction du sable et gravillon recyclé.

Paramètres Béton	SR				GR			
	0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%
Etallement	→				→			
% Air	→				→			
%MV	→				→			
Température	→				→			
Rc	→				→			
τ_0	→				→			
μ	→				→			

Tableau 14 : Variation du sable recyclé et gravillon recyclé.

Par ailleurs, les couples ciment/adjuvant ont une forte influence sur les propriétés des bétons :

- ~ Les couples C et E présentent un bon maintien, et les couples A et D un faible maintien en fonction du temps et en fonction du pourcentage de substituant ;
- ~ La teneur en air du couple C est la plus faible et la plus importante pour le couple A ;
- ~ La masse volumique des couples A et E est la plus faible et la plus importante pour les couples C et B ;
- ~ Le couple B a le meilleur comportement et le couple E le plus mauvais comportement coté résistance en compression au jeune âge, mais on retrouve les mêmes résistances à 28 jours avec toujours une baisse pour 100 % de granulat recyclé ;
- ~ Les couples ciments/adjuvants n'influent pas sur la variation du module d'élasticité ;
- ~ Les couples A et D présentent un seuil de cisaillement important, et les couples B et C le seuil de cisaillement le plus faible ;
- ~ Le couple D présente une viscosité plastique importante, et le couple C la plus faible.

D'après ces résultats, on peut conclure que les couples ciment/adjuvant n'ont pas la même influence sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés.

Les couples confectionnés avec des super-plastifiants (comme le cas des couples B, C et D, voir les tableaux 4 et 5), présentent un meilleur comportement à différents pourcentages de recyclé, contrairement aux couples qui sont confectionnés avec des plastifiants (comme le cas des couples A et E, voir les tableaux 4 et 5).

Le tableau 15 montre que l'utilisation des granulats recyclés présente un comportement différent pour le sable et le gravillon recyclés. L'utilisation des gravillons recyclés permet d'obtenir un meilleur comportement à l'état frais et durci que l'utilisation du sable recyclé.

Paramètres Béton	SR								GR							
	0%		15%		30%		100%		0%		15%		30%		100%	
	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x
Étalement	B	E	B	D	B	A	C	D	B	E	BC	E	BC	AD	B	AD
% Air	BC	DE	BC	DE	CE	AD	BC	AE	C	DE	BC	AE	BC E	AD	C	A
%MV	BC	DE	BC	DE	CE	AD	BC	AE	C	DE	BC	AE	BC E	AD	C	A
Rc	B	E	B	E	B	E	B	E	B	E	B	E	B	D	B	E
τ_0	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	B	AD
μ	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD	BC	AD
Bilan	BC	AD E	BC	AD E	BC	AD E	BC	AD E	BC	AD E	BC	AD E	BC	AD	BC	AD

Tableau 15 : Synthèse de l'impact des couples ciment/adjuvant et du pourcentage de sable et de gravillon recyclé sur le comportement du béton. (Acceptable (✓) et Pas acceptable (x))

Bibliographie.

- [1] T.-T. NGO, Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [2] E.H.K. et A.B. H. SOUALHI, T. T. NGO, Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental, Université de Cergy-Pontoise, 2014.
- [3] T. Sedran, Mise au point des formules de béton de référence, 2013.
- [4] M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 872–877.
- [5] C.T.G.I. Group, L. Technodes, La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d' aide à la formulation des bétons adjuvés, 33 (2000) 475–482.
- [6] A. Djerbi Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 112–116.
- [7] A. Abbas, G. Fathifazl, O.B. Isgor, a. G. Razaqpur, B. Fournier, S. Foo, Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 555–563.
- [8] İ.B. Topçu, S. Şengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1307–1312.
- [9] K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 707–712.
- [10] J.-Z. Xiao, J.-B. Li, C. Zhang, On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview, *Mater. Struct.* 39 (2006) 655–664.
- [11] V.W.Y. Tam, C.M. Tam, Y. Wang, Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1928–1939.
- [12] M. Casuccio, M.C. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, Failure mechanism of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1500–1506.
- [13] M. Chakradhara Rao, S.K. Bhattacharyya, S. V. Barai, Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Mater. Struct.* 44 (2010) 205–220.

- [14] V. Corinaldesi, G. Moriconi, Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 289–294.
- [15] H. Soualhi, E.H. Kadri, T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, S. Kenai, A Vane Rheometer for Fresh Mortar : Development and Validation Abstract :, 24 (2014) 1–7.
- [16] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand, E. Forsberg, Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 274–282.

Annexe

Bétons	E/C	Dosage (kg/m ³)	Ciment	Sable Naturel	Sable Recyclé	Eau efficace
A	0,45	0% SR	365	886,91	0	165,52
		15% SR	365	706,35	148,44	166
		30% SR	365	581,7	273,09	165,81
		100% SR	365	0	854,79	162,54
	0,55	0% SR	320	907,07	0	176,44
		15% SR	320	724,2	151,23	175,44
		30% SR	320	596,4	279,03	176,56
		100% SR	320	0	875,43	176,28
B	0,45	0% SR	365	884,91	0	164,85
		15% SR	365	704,65	148,14	165,45
		30% SR	365	580,3	272,49	165,85
		100% SR	365	0	852,79	166,11
	0,55	0% SR	320	906,08	0	175,82
		15% SR	320	723,35	151,08	176,22
		30% SR	320	595,7	278,73	176,89
		100% SR	320	0	874,43	177,45
C	0,45	0% SR	365	883,91	0	164,85
		15% SR	365	703,8	147,99	165,25
		30% SR	365	579,6	272,19	165,87
		100% SR	365	0	851,79	166,15
	0,55	0% SR	320	905,23	0	175,5
		15% SR	320	722,5	150,99	175,98
		30% SR	320	595	278,49	176,5
		100% SR	320	0	873,49	177,98
D	0,45	0% SR	365	888,91	0	164,54
		15% SR	365	708,05	148,74	164,87
		30% SR	365	583,1	273,69	165,57
		100% SR	365	0	856,79	165,98
	0,55	0% SR	320	910,23	0	175,75
		15% SR	320	726,75	151,74	175,98
		30% SR	320	598,5	279,99	176,51
		100% SR	320	0	878,49	177,23
E	0,45	0% SR	365	894,91	0	164,75
		15% SR	365	713,15	149,64	164,9

		30% SR	365	587,3	275,49	165,25
		100% SR	365	0	862,79	165,87
0,55		0% SR	320	915,23	0	175,25
		15% SR	320	731	152,49	175,66
		30% SR	320	602	281,49	175,97
		100% SR	320	0	883,49	177,54