



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME : Etude de l'effet du type d'agrégats
sur le comportement mécanique d'un béton.

Préparé par : MAAFI Nabil
ZEMMIT Abd Ennour

Soutenu le : 23/06/2013

Devant le jury :

Encadreur : BELAGRAA.L
Co-encadreure: LOGZIT.N

Président : BOUKELOUA.S
Examineur: NOULA
Examineur: LOUMACHIL

2013

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tiens à remercions "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que nos parents qui nous toujours encouragés et soutenu durant toute la durée de nos études.

Nous adressons nos profonds remerciements à notre encadreur de mémoire Mr BELAGRAA.L, pour avoir accepté nous encadrer, pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail de recherche et pour qu'il nous guider sur le bon chemin durant l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons exprimer notre sincère gratitude à Monsieur LOGZIT.N qu'il accepté de participer comme co-encadreure dans ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, afin de mener au mieux ce travail de recherche.

Nous voudrions remercions l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

Mr.BOUKELOUAS.S, Mr.NOUI.A et Mr.LOUMACHI.L

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil : ZOBIR, RACHID, FARID, FATIHA et HAYAT qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Nous remerciements aussi l'administration de génie civil.

Je remercié Mr.BENCHENEFE .M pour son médiocrité et son aide afin que nous accomplissions cette étude.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents ;

A mes frères et sœurs ;

A mes chairs amis : Abed Ennour, Nadjib, Antar, Saïd, Lamri, Younes, Mohamed.

A tous mes amis de promos master 2 génie civil et surtout : Ilham, Nassima, Ismahane, Siham, Fouzia et Fatah.

A tous la famille.

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

NABIL.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents ;

A mes frères et sœurs et leurs enfants ;

A mes chers amis : Nabil, Nadjib, Antar, Lamri, Mostapha, Mohamed, Yehya, Walid, Nassim, Houcin, Sofian, Riadh, Youcef, Boualam, Zohir;

A tous mes amis de promos master 2 génie civil et surtout : Ilham, Nassima, Ismahane, Siham, Fouzia et Fatah, Imen, hadjer et Ibtissem ;

A les familles: Zemmit, Belfar, Mharga, Ben Takouka ;

A monsieur RMADHNA.M ;

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

Abd Ennour.

Résumé

Résumé

Les granulats sont considérés comme constituants essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux. L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue économique et environnemental.

Cette étude concerne l'utilisation des granulats issus du concassage des déchets des bétons comme substituant des granulats naturels. Un plan expérimental d'essai sur le comportement des bétons recyclés avec des proportions de remplacement recyclés comme substituants de granulats naturels utilisant les pourcentage de 0%, 30%, 50%, 70% et 100% d'agrégats recyclés. Un adjuvant superplastifiant étant utilisé avec des dosages qui varie de 0%, 0.5%, 1%, 1.5% et 2% combiné avec un béton à 100% de remplacement.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de substitution d'agrégats recyclé sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un béton recyclé locale. Ainsi l'influence du superplastifiant sur le comportement d'un béton recyclé.

Les résultats obtenus montrent l'effet négatif de remplacement sur les propriétés physiques, teneur en air élevée et diminution de la masse volumique et ainsi sur la réponse mécanique du béton.

Par contre, l'adjuvant provoque une amélioration des propriétés physico-mécaniques du béton recyclé adjuvanté même à 100% de remplacement.

Mots clés : béton, granulats recyclés, propriétés mécaniques et physiques, l'air occlus, adjuvant.

Abstract

The aggregates are regarded as an essential constituent in the composition of the ordinary concrete or the special concretes. The use of the aggregates recycled aggregate has a great interest from the economic and environmental side. This study is concerned with the use of the aggregates resulting from construction waste from the old concretes as replacement of natural aggregates.

An experimental plan of tests on the behavior of the recycled concretes at various proportions of replacement as substitution of natural aggregate at the percentage of 0%, 30%, 50%, 70% and 100%. A superplastizier being used with proportioning which varies from 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% combined with a concrete with 100% of replacement. The objective of this work is to study the substitution effect on recycled concrete regarding the physical and mechanical characteristics of a the local. Thus the influence of admixture on the behavior of the resulting material.

Résumé

The obtained results showed the negative effect of replacement on the physical properties, high air content, reduction in the density and thus on the mechanical response of the concrete. On the other hand, the addition causes an improvement of the physico-mechanical properties of the recycled concrete treated with admixture even at 100% replacement.

Keywords: Concrete, Recycled aggregate, physical and mechanical properties, entrained air, Admixture.

ملخص

تعتبر الحصى احد المكونات الاساسية في تركيب الخرسانة العادية او الخاصة. استعمال الحصى المعاد تدويرها يمثل اهمية كبيرة من وجهة نظر اقتصادية و بيئية.

تهتم هذه الدراسة بالحصى المستخرجة من الفضلات الخرسانية كبديل للحصى الطبيعية. مخطط تجريبي من الاختبارات حول سلوك الخرسانات المسترجعة مع نسب استبدال الحصى الطبيعية بالمسترجعة كبديل بالنسب: 0%, 30%, 50%, 70% و 100% من الحصى المسترجعة. استعمل المساعد (superplastifiant) بجرعات متغيرة من: 0%, 0,5%, 1%, 1,5% و 2% منسقة مع خرسانة ب: 100% استبدال.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير اضافة الحصى المسترجعة على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية لخرسانة مسترجعة محلية الصنع. بالإضافة الى تأثير استعمال (superplastifiant) على سلوك الخرسانة المسترجعة.

النتائج المتحصل عليها تظهر التأثير السلبي للاستبدال على الخصائص الفيزيائية, ارتفاع الهواء المحتوى وانخفاض الكتلة الحجمية وكذا الاستجابة الميكانيكية.

وبالمقابل, المساعد ادى الى تحسين الخصائص الفيزيوميكانيكية للخرسانة المسترجعة مع المساعد حتى مع نسبة استبدال 100%.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة, حصى مسترجعة, خصائص فيزيائية و ميكانيكية, الهواء المحتوى, مساعد.

Sommaire

Sommaire

Chapitre I : Introduction

I.1 Problématique:.....	1
I.2 Objectifs :	1
I.3 Structure de mémoire :	2

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1 Introduction :	4
II.2 Historique :	4
II.3 Définition d'un béton :.....	4
II.4 Classification des bétons :	4
II.5 Composition du béton :	5
II.5.1 Ciment :	5
II.5.2 Qu'est-ce qu'un granulat ?	10
II.5.3 L'eau de gâchage :	13
II.5.4 Les adjuvants :	14
II.6 Propriétés principales des bétons :	15
II.6.1 Propriétés Physiques :	15
II.6.2 Propriétés mécaniques :	17
II.6.3 Durabilité :	18
II.7 Différents types de bétons:	18

Chapitre III : Déchets et agrégats recyclés

Partie A : les déchets :	21
III.1 Introduction :	21
III.2 Définition :	21
III.3 Classification des déchets :	21
III.4 Le recyclage des déchets :	23
III.5 Les type d'élimination :	23
Partie B : Agrégats recyclés :	24
III.6 Introduction :	24
III.7 Construction et gestion des déchets de démolition :	24
III.8 Processus de fabrication des granulats recyclés :	24
III.9 Composition des granulats recyclés de béton :	26
III.10 Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci :	27

Sommaire

III.10.1 Etat frais :	27
III.10.2 Etat durci :	27
III.10.3 Durabilité du béton à base de granulat recyclé :	29
.Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais	
IV.1 Introduction :	31
IV.2 Matériaux utilisés:.....	31
IV.3 Caractéristiques des matériaux:.....	31
IV.3.1 Caractéristiques du gravier :	31
IV.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :	31
IV.3.1.2 La densité :	36
IV.3.1.3 Masse volumique :	36
IV.3.1.4 La porosité :	39
IV.3.1.5 La compacité :	39
IV.3.1.6 L'indice des vides :	39
IV.3.1.7 La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles :	40
IV.3.1.8 Degré d'absorption d'eau :	42
IV.3.2 Caractéristique du sable :	43
IV.3.2.1 Analyse granulométrique :	43
IV.3.2.2 Modules de finesse:	44
IV.3.2.3 Equivalent de sable :	45
IV.3.2.4 Caractéristiques physiques du sable :	47
IV.3.3 Caractéristiques du ciment utilisé :.....	49
IV.3.3.1 Présentation du ciment (MATINE) :	49
IV.3.3.2 Domaines d'utilisation :	50
IV.3.3.3 Analyses et caractérisation :	50
IV.3.4 L'eau de gâchage :	51
IV.3.5 Adjuvant :	52
IV.3.5.1 Description :	52
IV.3.5.2 Domaines d'application :	52
IV.3.5.3 Propriétés :	52
IV.3.5.4 Caractéristiques :	53
IV.3.5.5 Mode d'emploi :	53
IV.3.5.6 Dosage :	53
IV.3.5.7 Conditionnement et stockage :	53

Sommaire

IV.3.5.8 Délai de conservation :	54
IV. 4 Calcul de la composition du béton:	54
IV.4.1 Méthode de calcul de la composition du béton:.....	54
IV.4.2 Présentation de la méthode :	55
IV.4.3 Calculs les composants :.....	58
IV.4.4 Volume du gâché pour 1m ³ du béton :	59
IV.4.5 Volume du gâché pour 12 éprouvettes cylindriques (10x20) cm ³ :.....	59
IV.5 Matériels et essais:.....	61
IV.5.1 Les essais sur le béton à l'état frais :	61
IV.5.1.1 Le malaxage :	61
IV.5.1.2 Affaissement au cône d'abrams (slump test):	61
IV.5.1.3 Teneur en air :	61
IV.5.1.4 Vibration :	63
IV.5.2 Les essais sur béton durci :	63
IV.5.2.1 Durcissement de béton :	63
IV.5.2.2 Mode de conservation de béton	63
IV.5.3 Détermination de la résistance par les essais non destructifs :.....	63
IV.5.3.1 Ultrason :	64
IV.5.3.2 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) :.....	65
IV.5.3.3 La méthode combinée :	65
IV.5.4 Détermination de la résistance par les essais destructifs :	66
IV.5.4.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement):	66
IV.5.4.2 La presse hydraulique :	67
IV.5.4.3 Essai d'écrasement :	67
IV.5.4.4 Essai de traction far fendage :	68
IV.5.4.5 Module d'élasticité dynamique :	68
IV.6 Mesure le taux d'absorption d'eau :	69

Chapitre V : Résultats et discussion

Partie A : Béton recyclé :	71
V.1 Introduction :	71
V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations :	71
V.3 La nomination des bétons :	71
V.4 Etat frais :	72

Sommaire

V.4.1 Masse volumique :	72
V.4.2 Teneur en air:	73
V.4.3 Rapport E/C :	74
V.5 Etat durci :	76
V.5.1 Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés :	76
V.5.2 Taux d'absorption d'eau [A]:.....	77
V.5.3 Masse volumique :	78
V.5.4 La résistance à la compression :	80
V.5.5 La résistance à la traction par fendage:.....	83
V.5.6 Les résultat de scléromètre :.....	84
V.5.7 Les résultat d'ultrason :	85
V.5.8 La résistance combinée [ultrason-scléromètre] :	87
V.5.9 Module d'élasticité dynamique :.....	88
Partie B: Béton recyclé avec adjuvant :.....	89
V.6 Introduction :	89
V.7 Etat frais :	89
V.7.1 Masse volumique :	90
V.7.2 Teneur en air:	91
V.7.3 Rapport E/C:	92
V.8 Etat durci :	93
V.8.1 Taux d'absorption d'eau des bétons:.....	93
V.8.2 Propriétés physiques et mécaniques des bétons.....	94
V.8.3 Masse volumique :	95
V.8.4 La résistance à la compression :	97
V.8.5 La résistance à la flexion par fendage :	99
V.8.6 Les résultats de scléromètre :	100
V.8.7 Les résultats d'ultrasons :	101
V.8.8 Les résultats combinés [ultrason-scléromètre] :.....	102
V.8.9 Module d'élasticité dynamique :	103

Chapitre VI : Conclusion et recommandation

Conclusions :.....	105
--------------------	-----

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II : Revue bibliographique

Tableau II.1 : Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.....	4
Tableau II.2 : Classe de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.....	5
Tableau II.3 : Classes de consistance.....	5
Tableau II.4 : Classification des ciments suivant les résistances à la compression.....	9
Tableau II.5 : Types de ciment et leurs domaines d'emploi.....	10
Tableau II.6 : classes granulaires principales.....	11
Tableau II.7: Différents types des granulats issus de roches massives.....	12
Tableau II.8: Choix de l'adjuvant en fonction de l'effet recherché.....	14

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

Tableau IV.1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) (8/16).....	32
Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) (8/16).....	35
Tableau IV.3 : La masse volumique apparente (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).....	37
Tableau IV.4 : La masse volumique apparente (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	37
Tableau IV.5 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).....	38
Tableau IV.6 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	39
Tableau IV.7 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....	40
Tableau IV.8 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier recyclé.....	40
Tableau IV.9 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.....	41
Tableau IV.10 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A	42
Tableau IV.11 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (3/8), (8/15).....	42
Tableau IV.12 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	42
Tableau IV.13: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) concassé.....	43
Tableau IV.14: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) recyclé.....	43
Tableau IV.15 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.....	44
Tableau IV.16 : Module de finesse du sable.....	44
Tableau IV.17: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SV} et E_{SP}	46
Tableau IV.18 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.....	47
Tableau IV.19: Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).....	49

Liste des tableaux

Tableau IV.20 : Analyse chimiques du ciment MATINE.....	50
Tableau IV.21 : Composition minéralogique du clinker.....	50
Tableau IV.22 : Propriétés physiques du ciment utilisé.....	51
Tableau IV.23 : Temps de prise à 20°C.....	51
Tableau IV.24: Résistance mécanique à la compression.....	51
Tableau IV.25: Analyse chimique de l'eau utilisée.....	51
Tableau IV.26:l'effet de l'adjuvant sur le béton.....	53
Tableau IV.27 : Valeurs des coefficients A et A'.....	55
Tableau IV.28 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	56
Tableau IV.29: Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment.....	57
Tableau IV.30: Composition pour un mètre cube du béton (1m ³).....	59
Tableau IV.31: Composition du mélange pour 12 éprouvette cylindrique (10*20) cm ²	60
Tableau IV.32 : Composition du mélange d'un m ³ béton recyclé adjuvanté.....	60

Chapitre V : Résultats et discussion

Tableau V.1 : Les différents types des bétons utilisés (recyclé, témoins).....	71
Tableau V.2: Propriétés des différents types des bétons à l'état frais (recyclé, témoins).....	72
Tableau V.3: Taux d'absorption d'eau des différents bétons étudiés.....	76
Tableau V4 : Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours à l'état durci..	76
Tableau V.5: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14 jours à l'état durci.....	76
Tableau V.6: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours à l'état durci.....	77
Tableau V.7: Les différents types des bétons utilisés.....	89
Tableau V.8: Propriétés des différents types des bétons à l'état frais.....	89
Tableau V.9 : Taux d'absorption d'eau des bétons.....	93
Tableau V.10 : Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours à l'état durci.....	94
Tableau V.11: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14 jours à l'état durci.....	94
Tableau V.12: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours à l'état durci.....	94

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre II : Revue bibliographique

Figure II.1 : Aspect du béton on coupe.....	4
Figure II.2 : Schéma de la fabrication du ciment.	7

Chapitre III : Déchets et agrégats recyclés

Figure III.1: Compositions des déchets du bâtiment.....	23
Figure III.2 : Réception des bétons de démolition.....	25
Figure III.3 : Stock de matériaux démolition destiné au recyclage.....	25
Figure III.4 : Préparation à la cisaille.....	26
Figure III.5 : Déferrailage électromagnétique.....	26
Figure III.6 : Agrégats recyclés.....	26
Figure III.7: Formes des granulats recyclés.....	27

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

Figure IV.1: Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).....	33
Figure IV.2 : Procédure de préparation des granulats recyclés.....	34
Figure IV.3 : concassage, criblage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.....	34
Figure IV.4: Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/15).....	36
Figure IV. 5 : les boules avant l'essai.....	41
Figure IV. 6 : Appareil de Los Angeles.....	41
Figure IV. 7: Courbe granulométrique du sable de dune.....	44
Figure IV.8 : Aéromètre à béton 8 litres.....	62
Figure IV.9: Appareil ultrason.....	64
Figure IV.10: Appareil Scléromètre.....	65
Figure IV.11: Presse hydraulique capacité 3000 KN.....	67
Figure IV.12 : Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage.....	68

Chapitre V : Résultats et discussion

Figure V.1: La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons (recyclé, témoins).....	72
Figure V.2: La variation de la teneur en air en fonction des différents types des bétons.....	73

Liste des figures

Figure V.3: La variation du rapport (E/C) en fonction du taux de substitution des agrégats recyclés.....	74
Figure V.4: La variation du rapport (E/C) en fonction des différents types des bétons.....	75
Figure V.5: La variation d'absorption d'eau pour les différents types des bétons.....	77
Figure V.6 La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28).....	78
Figure V.7: La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28).....	79
Figure V.8: La masse volumique des différents types des bétons à 28 jours.....	79
Figure V.9: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge des différents bétons (témoin, recyclé).....	80
Figure V.10: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge des différents bétons (témoin, recyclé).....	81
Figure V.11: Résistance à la compression en fonction du pourcentage des agrégats recyclés à 28 jours.....	81
Figure V.12: La variation de la résistance à la traction par fendage pour les différents types des bétons à 28 jours.....	83
Figure V.13: La variation de la résistance de scléromètre (R_s) pour les différents types des bétons à 28 jours.....	84
Figure V.14: vitesse de propagation d'ultrason (V) pour les différents types du béton (BT, B recyclé) en fonction de l'âge du béton.....	85
Figure V.15: La variation de la vitesse de propagation d'ultrason (V) en fonction de l'âge du béton.....	85
Figure V.16: Vitesse de propagation ultrason (V) à 28 jours.....	86
Figure V.17 : Résistance combinée [ultrason-scléromètre] (R_{us}) pour les différents types des bétons (témoin et recyclé) à 28 jours.....	87
Figure V.18: La Variation du module d'élasticité pour les différents types des bétons à 28 jours.....	88
Figure V.19: La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons.....	90
Figure V.20: La variation de teneur en air du béton en fonction du pourcentage d'adjuvant.....	91
Figure V.21: La variation du rapport (E/C) en fonction du pourcentage de l'adjuvant.....	92
Figure V.22: La variation du rapport (E/C) en fonction du pourcentage de l'adjuvant (BT, BR adjuvanté).....	92

Liste des figures

Figure V.23: La variation d'absorption d'eau pour les différents types des bétons.....	93
Figure V.24 : La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge.....	95
Figure V.25: Variation de la masse volumique apparente de bétons recyclé et bétons recyclés adjuvanté (BR et BRA) en fonction de l'âge.....	96
Figure V.26: La masse volumique des différents types des bétons à 28 jours.....	96
Figure V.27: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge du béton.....	97
Figure V.28: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge du béton.....	97
Figure V.29: Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant à 28 jours.....	98
Figure V.30: La variation de la résistance à la flexion par fendage pour les différents types des bétons à 28 jours.....	99
Figure V.31: La variation de la résistance de scléromètre (R_s) pour les différents types des bétons à 28 jours.....	100
Figure V.32: vitesse de propagation d'ultrason (V) en fonction de l'âge du béton.....	101
Figure V.33: Vitesse de propagation ultrason (V) à 28 jours.....	101
Figure V.34 la variation de la résistance combinée [ultrason-scléromètre] (R_{us}) à 28 jours.....	102
Figure V. 35: La Variation du module d'élasticité pour les différents types des bétons.....	103

Notations :

D&C : déchets de démolition de construction.

DIS: déchets industriels spéciaux.

DD : déchets dangereux.

DIB : déchets industriels banals.

DI : déchets inertes désignés.

C : ciment.

E : eau.

E/C : rapport eau sur ciment.

T : le temps.

V : la vitesse de propagation.

ν : Coefficient de poisson.

E_d : module d'élasticité dynamique.

I_s : indice sclérométrique.

D_{max} : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

γ : masse volumique absolue.

ρ : masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

$e(\%)$: indice des vides.

$P_c(\%)$: porosité à l'état compacte.

$C_c(\%)$: compacité à l'état compacte.

$e_c(\%)$: indice des vides à l'état compacte.

$P_L(\%)$: porosité à l'état lâche.

$C_L(\%)$: compacité à l'état lâche.

$e_L(\%)$: indice des vides à l'état lâche.

L_A : coefficient de Los Angeles.

A (%) : taux d'absorption.

M_H : La masse du matériau saturé d'eau.

M_S : La masse du matériau sec.

MF : module de finesse du sable.

Esv : équivalent de sable visuel.

E_{sp} : équivalent de sable par piston.

γ_c : masse volumique à l'état compacte.

γ_L : masse volumique à l'état lâche.

R_{c28} : résistance à la compression à 28 jours.

Rc: activité du ciment.

Rb: classe du béton.

PC : pierres concassées.

G : gravier.

S : sable.

A, A' : coefficients de la qualité des granulats et des liants.

α : coefficient d'écartement.

F : charge de rupture.

R_{us} : résistance combinée.

R_s : résistance sociométrique.

R_f : résistance traction par fendage.

AC : agrégats concassés.

AR : agrégats recyclés.

Chapitre I :

Introduction

Introduction

I.1 Problématique:

Le béton est le matériau de construction le plus employé dans le secteur de génie civil et travaux publics, grâce à ses propriétés et caractéristiques; tel que la résistance mécanique en premier ordre, d'où en peut bâtir des ouvrages de grandes hauteurs et de portées importantes en toute sécurité, répondant aux exigences de durabilité et économie.

Cette utilisation de ce matériau (béton), implique une grande consommation de ces constituants et notamment les agrégats qui représentent environ 70% du volume total du mélange et participent d'une grande partie à la résistance mécanique. L'utilisation intense de ces matériaux de construction provoque l'épuisement des sources naturelles de ces substances en particulier les gisements de granulats.

Au cours des dernières années, le secteur de construction a connu une grande dynamique de démolition et de construction suite à des causes accidentelles par exemple les séismes ou bien en raison d'exploitation et vieillissement des structures. Cette opération a comme conséquence directe, des milliers des tonnes des déchets de démolition de construction [D&C], (le verre, le bois, l'acier, la brique et le béton...etc.).

La gestion de ces déchets va provoquer des problèmes au niveau environnemental, qui se manifeste dans la diminution des espaces d'urbanisme ou d'agriculture occupés par les déchets de démolition. Les décharges et dépôts aléatoires des [D&C] conduit à un impact négatif sur l'environnement d'un côté, en plus d'une opération économique couteuse.

A présent, les chercheurs en génie civil sont appelés à proposer de nouvelles solutions afin de trouver des substitutions des sources naturelles tel que, les [D&C] (agrégats recyclés) comme alternative à des granulats naturels.

La substitution partielle ou total de granulats pour la formulation d'un béton répondant aux exigences de qualité et de durabilité ; constitue actuellement un sujet de grand intérêt des spécialistes de construction.

Cette étude utilise les agrégats recyclés provenant d'ancien béton de chantier pour la confection d'un béton de performance (résistance et durabilité) semblable à un béton conventionnel. Le comportement du béton recyclé incorporant un pourcentage allant de 0 jusqu'à 100 % de granulats récupérés fera l'objet de ce projet de recherche.

I.2 Objectifs :

L'objectif de notre recherche est d'étudier les caractéristiques physiques et mécanique des bétons à base de granulats recyclés et les comparer avec un béton ordinaire

à base d'agrégats naturels pour une utilisation future dans le domaine de génie civil et les travaux publics.

La substitution totale à 100% peut générer une chute de résistance mécanique, cependant un remplacement partiel des agrégats naturels par seuls recyclés avec un pourcentage bien défini pourrait être une solution pour la confection d'un béton à usage courant avec une performance adéquate. Cette étude vise à une formulation de béton recyclé en procédant par des taux de substitution en granulats recyclés allant de 0% jusqu'à 100%, (0, 30, 50,70 et 100 %).

L'emploi des adjuvants tels que les superplastifiant peut améliorer quelques propriétés des bétons, des dosages d'adjuvants de 0.5, 1, 1.5 et 2% pour un béton de 100% d'agrégats recyclés ont été adopté. Ceci, pour constater l'effet des différents pourcentages sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons adjuvantés.

Les essais directs et non destructifs seront considérés comme moyens de détermination et jugement sur la qualité du béton confectionné vis-à-vis à la résistance mécanique.

L'étude traitera les objectifs suivants:

- L'effet du taux de substitution d'agrégats recyclé et le taux d'adjuvants sur la réponse mécanique [compression, fendage] du béton recyclé avec et sans adjuvant.
- L'effet du taux de substitution d'agrégats recyclé et le taux d'adjuvants sur les propriétés physiques (absorption, rapport E/C, masse volumique et porosité) des bétons étudiés.
- Faire une comparaison entre les résultats obtenus par les essais directs (écrasement) et les résultats des essais non destructifs pour le béton recyclé par apport à un béton courant.

I.3 Structure de mémoire :

Chapitre I :

- Introduction.
- Problématique.
- Objectifs.
- Contenu du mémoire.

Chapitre II :

Revue bibliographique sur :

- Béton et constituants

Chapitre III :

Déchets et agrégats recyclés

Aperçu général sur les déchets :

- Déchets de démolition.
- Déchets de construction.
- Agrégats recyclés.
- Propriétés des bétons recyclés : (Etat frais- Etat durci)

Chapitre IV :

Matériaux, matériels et essais.

Matériaux : graviers concassés et recyclés, sable, ciment, eau de gâchage et adjuvant.

Matériels : Ultrason, Scéléromètre, Appareil de compression, Appareil de fendage.

Essais : Non destructifs (ultrason, scéléromètre), Destructifs (l'écrasement, traction par flexion).

CHAPITRE V :

Résultats et discussion

- a- Béton recyclé.
- b- Béton recyclé adjuvanté.

CHAPITRE VI :

Conclusion et recommandation.

Bibliographie.

Chapitre II :
Revue
bibliographique

Revue bibliographique

II.1 Introduction :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible cout et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme les bâtiments d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires etc...

II.2 Historique :

La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland. [BOERAEVE, 1994].

II.3 Définition d'un béton :

Un béton est un matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (gravier et sable) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment, d'eau, le plus souvent, parfois d'adjuvants. Après le durcissement il devient un matériau pierreux. [BOERAEVE, 1994].



Figure II.1 : Aspect du béton on coupe.

Tableau II.1 : Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.

[J.-P. Lott, et al, 2005]

Constituants	eau	air	ciment	granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	--	9-18	63-85

II.4 Classification des bétons

II.4.1 Classes de résistance à la compression

La classe de résistance à la compression des bétons à 28 jours est désignée par la lettre C de "concrete" suivi de deux nombres correspondant aux résistances mesurées

respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques (par exemple C 20/25 ; C30/37).

[J.-P. Lott, J et M. Landecy 2005]

Tableau II.2 : *Classe de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.* [J.-P. Lott, et al, 2005]

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale sur cubes
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

II.4.2 Classes de consistance

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5). La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test). [J.-P. Lott, et al, 2005]

Tableau II.3 : *Classes de consistance.* [J.-P. Lott, et al, 2005]

Classes de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	> 220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

II.5 Composition du béton :

Le béton est un matériau hétérogène, Composé essentiellement de granulats (gravier, sable et filler), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer certaines caractéristiques ou propriétés. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

II.5.1 Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous l'eau.

Le ciment est une poudre de synthèse obtenue par combinaison de 95% de clinker et 5% de gypse (CaSO_4). Le clinker est un mélange de calcaire CaCO_3 ($\approx 80\%$) et d'argile ($\approx 20\%$) ayant subi une cuisson à 1450°C au sein d'un long four métallique isolé par des briques réfractaires.

La fabrication du ciment en voie « sèche » (plus courante) est résumée en (**Figure II.2**). Les matières premières sont extraites des carrières et sont concassées puis intimement mélangées par broyage permettant d'obtenir le « cru ».

Ce mélange peut être modifié par addition de plusieurs constituants de manière à corriger les éventuelles fluctuations de la composition finale (**étape A**). Ainsi de faibles proportions de bauxite ou de laitier de hauts fourneaux peuvent pallier le manque d'alumine ou d'oxyde de fer dans le ciment.

Une étape de pré homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait de tous les constituants. Le mélange est ensuite finement broyé et séché (**étape B**) afin de passer à la cuisson (**étape C**).

Les fours de cimenterie se composent de quatre parties :

- Système de préchauffage du cru.
- Zone amont du four permettant la décarbonatation.
- Zone aval du four permettant la réaction de clinkérisation.
- Un refroidisseur.

Le système de préchauffage et de pré-calcination est assuré par un échangeur à cyclone. Dans la partie supérieure, le cru est déversé et progresse jusqu'à l'entrée du four. La température des gaz provenant du four et parcourant les cyclones permet d'entamer une décarbonatation partielle du cru.

Le four rotatif permet d'effectuer la réaction de clinkérisation au cœur de la fabrication du ciment. Il s'agit d'un tube cylindrique de 50 à 90 mètres de long pour un diamètre allant de 3 à 6 mètres. La matière progresse grâce à l'inclinaison et à la rotation du four (**1 à 3 tours/minute**). En sortie des cyclones, la matière arrive en amont du four. Cette zone permet de porter les matières premières jusqu'à environ **$800-900^\circ\text{C}$** , achevant ainsi la décarbonatation du calcaire. La matière progresse alors jusqu'à la zone de clinkérisation correspondant à une température d'environ **1450°C** .

A cette température les réactions entre la chaux CaO et les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 forment des silicates, aluminates et alumino-ferrites de calcium constituant le clinker.

A la fin de la cuisson en aval du four, le clinker obtenu sort à une température comprise entre **1200** et **1450°C** et tombe dans le refroidisseur. Ce refroidissement à l'air du clinker fige les phases formées à hautes températures (silicates et aluminates de calcium).

Le clinker obtenu se présente sous forme de granules qui après broyage avec **5%** de gypse et d'autres constituants en plus petite quantité, permettent d'obtenir le ciment (**étape D**).

Le produit fini est ensuite acheminé vers des silos de stockage. Il quitte l'usine en sac ou en vrac transporté dans des camions citerne par train ou bateau (**étape E**). [CYRILE Guerandel, 2009].

Les principaux composés du ciment portland sont :

- Les silicates tricalciques (alite) : $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C3S]
- Les silicates bis calciques (belite) : $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C2S]
- Les aluminates tricalciques : $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C3A]
- Les aluminoferrites tétra calciques : $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C4AF]
- Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).

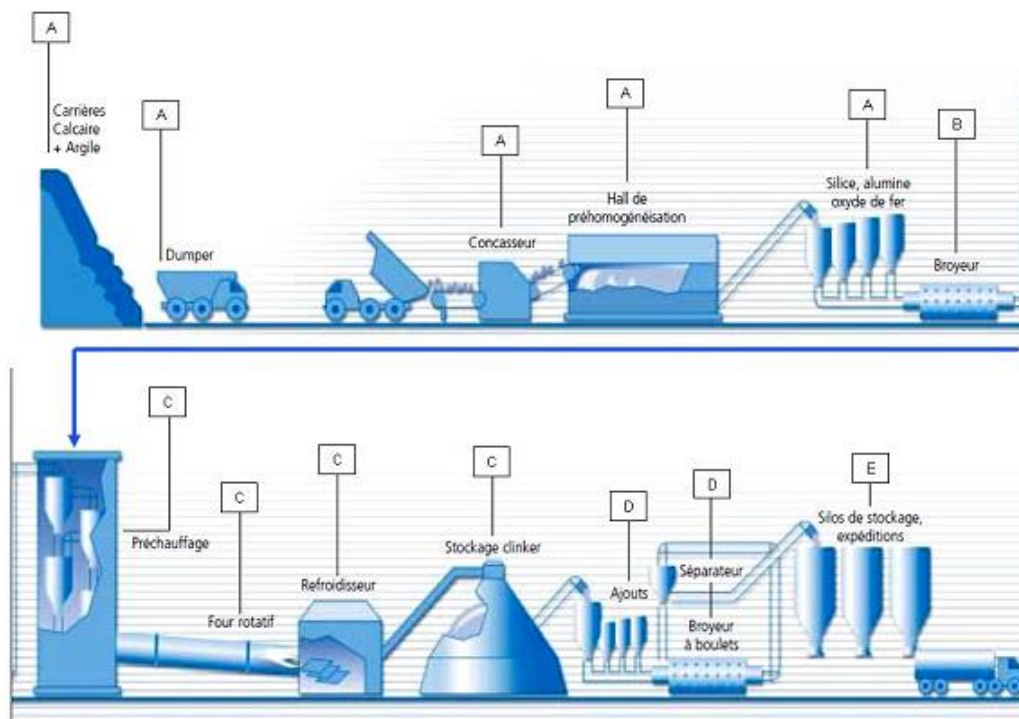


Figure II.2 : Schéma de la fabrication du ciment. [CYRILE Guerandel, 2009]

II.5.1.1 Classification des ciments :

a) Classification suivant la composition :

- **Ciment Portland: CEM I (Ciment Portland) :**

Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

- **Ciment portland composé : CEM II/A ou B (Portland composé) :**

Il contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

- **Ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B ... (Ciment de haut fourneau) :**

Il contient entre 36% à 80% de laitier et 20 à 64% de clinker.

- **Ciment composé CEM III/C : (anciennement ciment de laitier au clinker) :**

Il contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

- **Ciment composé : CEM IV/A ou B (anciennement ciment au laitier et aux cendres)**

Il contient de 20 à 64% de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier.

b) Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

- **Ciment PM : [EN 197.1]**

Résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

- **Ciment ES : [EN 197.1]**

Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

- **Ciments CP : [EN 197.1]**

Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{-2} :

- ✓ Ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension.
- ✓ Ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques. C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

c) Classification des ciments suivant les résistances à la compression :

La norme européenne [EN 197-1] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme [EN 196-1], mesurée à 28 jours en six classes de résistance. Et exprimée en N/mm² (1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars) [BOUTIBA.A, *sino dato*].

Tableau II.4 : Classification des ciments suivant les résistances à la compression.

[BOUTIBA.A *sino dato*].

Désignation de la classe de résistance	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	2 jours	7 jours		
32,5 N	-	≥16	≥32,5	≤52,5
32,5R	≥10	-		
42,5 N	≥10	-	≥42,5	≤62,5
42,5R	≥20	-		
52,5 N	≥20	-	≥52,5	-
52,5R	≥30	-		

La classe R correspond à une résistance au jeune âge plus élevée que la classe normale correspondante (N).

II.5.1.2 Domaines d'emploi :

Tableau II.5 : Types de ciment et leurs domaines d'emploi.

Types de ciment	Domaines d'emploi
CEM I	<ul style="list-style-type: none"> • Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué. • Béton précontraint. • Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R). • Bétonnage jusqu'à température extérieure entre 5 et 10 °C. • Béton étuvé ou auto-étuvé.
CEM II / A ou B	<p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants. • CEM II / A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple). • Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs. • Dallages, sols industriels. • Maçonneries. • Stabilisation des sols.
CEM III / A, B ou C CEM V / A ou B	<ul style="list-style-type: none"> • Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles, etc.). • Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments produits sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15-319. • Travaux à la mer ; les ciments produits sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317. • Bétons de masse.

II.5.2 Qu'est-ce qu'un granulats ?

Le granulats est un fragment de roche destiné à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépendent de leur provenance et des techniques de production. Le granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm).

[G. Maucuit-Lecomte, 2005]

Les granulats représentent, après l'eau et l'air, la matière première la plus importante utilisée dans un pays.

Se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

Fillers.	Sablons.
Sables.	Graves.
Gravillons.	Ballast.
Enrochements.	

Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés.

Tableau II.6 : classes granulaires principales. [G. Maucuit-Lecomte, 2005]

Familles	Dimensions	Caractéristique
Filler	0/D	D < 2 mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	D ≤ 1 mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	1 < D ≤ 6,3 mm
Graves	0/D	D > 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 1 et D ≤ 125 mm
Blasts	d/D	d ≥ 25 mm et D ≤ 50 mm

Trois grandes familles de granulats sont définies en fonction de leur origine:

II.5.2.1 Les granulats alluvionnaires ou de carrière (naturel) :

Leurs gisements sont des matériaux meubles, non consolidés. Ils proviennent de lits ou anciens lits de rivière, les fonds de lacs ou certains fonds marins. L'extraction des granulats alluvionnaires se fait « à sec » ou « dans l'eau », à l'aide de pelles hydrauliques ou de draglines. La technique d'exploitation varie en fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique. Ces granulats peuvent être traités suite à leur extraction. Ils sont concassés si leur granulométrie est trop importante. Cette opération est suivie d'un criblage, d'un lavage et d'un calibrage.

[G. Maucuit-Lecomte, 2005]

II.5.2.2 Les granulats de roches massives et artificiels :

Cette matière première est présente dans différentes situations géologiques: couches plus ou moins massives de roches sédimentaires, massifs de granit, anciennes coulées volcaniques, roches métamorphiques... Leur extraction se fait généralement à l'explosif. Les roches sont ensuite concassées, lavées et criblées.

[G. Maucuit-Lecomte, 2005]

Tableau II.7: *Différents types des granulats issus de roches massives.*

[G. Maucuit-Lecomte, 2005]

Types des roches massives	Exemple de famille de granulats
Roche magmatique – roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte...
Roche sédimentaire	Grès, grès quartziques, silex, calcaire, etc.
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc.

II.5.2.3 Les granulats de recyclage :

Des granulats sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers. Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours. [G. Maucuit-Lecomte, 2005]

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- Les fillers.
- Les sables.
- Les gravillons.
- Les graves.

II.5.2.4 Les gros granulats (graviers et pierres concassées) :

a. Les granulats de rivière :

Ils proviennent de la désagrégation des roches (gravier) ils sont en général très durs et très propres, Cependant leurs grains après par le frottement n'offrent pas une très bonne adhérence au liant. [BELAGRAA. L, 2011]

b. Les granulats de concassage :

Ils sont obtenus en concassant des roches dures (siliceuses, calcaires ou granitiques). Les grains sont anguleux, ils doivent être soigneusement lavés afin de les débarrasser

des poussières qui les recouvrent au moment du concassage (pierres concassées). [BELAGRAA. L, 2011]

1.5.2.5 Les granulats fins (Sable) :

a. Sable de rivière :

Ils sont extraits par dragage du lit des cours d'eau (matériaux siliceux). Il est bon parce qu'il est bien lavé mais sa forme ronde facilite les mouvements et diminue son adhérence aux mortiers et béton. Le sable gypseux est à éliminer. [BELAGRAA. L, 2011]

b .Sable de mer :

Il provient de la désagrégation des roches sous-marines ou des falaises sous l'action des mouvements des eaux. Il est pur et excellent s'il n'est pas trop fin, il est chargé de sel. Avant l'utilisation on doit le laver à l'eau douce pour le purifier ou le laisser exposé aux intempéries pendant un certain temps. Afin de le débarrasser au maximum des sels marins qu'il contient. Ces sels sont susceptibles de réagir en présence des liants (ciment). [BELAGRAA. L, 2011]

c. Sable de dune :

Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très fins (faible résistance mécanique de béton). Il provient d'éléments de désagrégation de roches transportées par le vent. [BELAGRAA. L ,2011]

d .Sables de carrière :

Il doit être lavé avant usage pour éliminer les matières terreuses. Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable en l'empêchant d'adhérer aux liants. Le sable quartzeux exempt de matières terreuses ou argileuses est excellent pour la confection du béton et mortier. [BELAGRAA. L ,2011]

II.5.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

Attention :

Un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis) .L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme [EN 1008]. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme EN 1008. [J.-P. Lott, et al, 2005]

II.5.4 Les adjuvants :

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci. Les adjuvants sont classés par la norme [EN 934-2]. [BERNIER. Gérard, *sino dato*]

Tableau II.8: Choix de l'adjuvant en fonction de l'effet recherché.
[BERNIER. Gérard *sino dato*]

Choix de l'adjuvant en fonction de l'effet recherché		
Adjuvant (1)	Effet recherché	Effet secondaire possible
Plastifiant/réducteur d'eau	augmentation de la résistance et réduction d'eau modérées.	Entraîneur d'air, retardateur.
Superplastifiant/haut réducteur d'eau	augmentation forte de la résistance et réduction d'eau importante.	Entraîneur d'air, retardateur.
	À rapport (E_{eff}/C) égal : augmentation forte de l'affaissement et de l'étalement.	Entraîneur d'air Diminution faible de la résistance.
Retardateur de prise	augmente le temps de prise.	Augmentation de la résistance à 28 jours.
Accélérateur de prise	diminue le temps de prise.	Diminution faible de la résistance à 28 jours.
Accélérateur de durcissement	augmente la résistance du béton jeune.	Entraîneur d'air Diminution faible de la résistance à 28 jours.
Hydrofuge de masse	Absorption capillaire diminuée.	Diminution faible de la résistance à 28 jours.
Entraîneur d'air	teneur en air de 4 à 6 % en volume, facteur d'espacement $\leq 200 \mu m$.	Diminution sensible de la résistance.
(1) NF EN 934-2 : 2002		

II.5.4.1 Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton :

Les plastifiants -Les plastifiants réducteurs d'eau -Les superplastifiant.

Domaines d'emploi :

- Béton manufacturé, travaux de génie civil, bétonnage avec coffrages glissants.
- Réalisation de fondations, dallages, radiers, sols industriels, routes, etc., BHP et béton pompé.

II.5.4.2 Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement :

Les accélérateurs de prise et de durcissement- Les retardateurs de prise.

Domaines d'emploi :

- Bétonnages par temps froid, décoffrages rapides, scellements, travaux en galerie, travaux sous l'eau, etc.
- Bétonnages par temps chaud, en grande masse, avec coffrages glissants, reprises de bétonnage.

II.5.4.3 Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton :

Les entraîneurs d'air- Les hydrofuges de masse- Les rétenteurs d'eau.

Domaines d'emploi :

- Bétons exposés au gel, aux sels de déverglaçage, aux eaux agressives, bétons routiers.
- Ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau, etc.), mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).
- Mélanges retardés ou mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

II.6 Propriétés principales des bétons :**II.6.1 Propriétés Physiques :****II.6.1.1 Ouvrabilité:**

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage : une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquence fâcheuses. Une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale. L'ouvrabilité dépend, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité. C'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée par le laboratoire chargé de l'étude d'un béton, comme une qualité aussi importante que la résistance.

Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (**norme NF P 18-451**), l'essai d'étalement à la table à secousses et maniabilimètre L.C.P.C. Mais les essais vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [**DREUX.G et FESTA.J, 1998**].

II.6.1.2 Le Retrait :

Est une diminution dimensionnelle du béton en l'absence de chargement, dû à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton.

Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une époque où le béton très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurerait facilement sous l'effet du retrait.

Généralement le retrait est différent selon la région par exemple :

Région très humides : $\Delta L/L = 1.5 \times 10^{-4}$ à 2×10^{-4} (mm/m).

Région très sèches (Sahara) : $\Delta L/L = 5 \times 10^{-4}$ (mm/m).

Il y a cinq types de retrait : Le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation. [DREUX.G et FESTA.J, 1998]

II.6.1.3 La compacité et la porosité :

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telles que sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité.

Plus la porosité diminue, plus la compacité augmente, plus la perméabilité diminue, et plus les propriétés mécaniques augmentent.

La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vide, qu'on peut classer en fonction de leurs dimensions, leurs géométries et de leur rôle dans le transport de matière :

Les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'Armstrong. Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros.

Par ordre décroissant de diamètre on retrouve :

- **Les vides d'air ou pores** (diamètre > 1 mm), ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.
- **Les bulles d'air entraînées** ($10\mu < \text{diamètre} < 1\text{mm}$).
- **Les pores capillaires** ($0.01\mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\mu\text{m}$), si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Par contre, si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.

- Les pores de gel (diamètre < 40 Å), contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillets de C-S-H. Cette eau est relativement stable et difficile de l'extraire par séchage. [MESSOUDENE. B, 2013]

II.6.1.4 Perméabilité et diffusivité :

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air, ou un autre gaz ...). Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.), la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation.

[ANDRIAMANANTSILVO.N.R, 2003].

La diffusion est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration, elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion [CHANVILLARD.G, 1999], les mécanismes et les lois qui régissent la perméabilité et la diffusivité sont différents mais les moyens d'action limitants sont les mêmes à savoir limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire, car le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs extérieurs.

II.6.2 Propriétés mécaniques :

II.6.2.1 Résistance mécanique :

La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- La nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant) ;
- Les conditions de mise en œuvre de ces constituants ;
- Les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

II.6.2.2 Résistance à la compression :

La résistance en compression simple du béton est le paramètre fondamental du comportement pour l'ingénieur de bureau d'études. C'est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé.

Tout d'abord, l'ingénieur de bureau d'études s'intéresse à une valeur caractéristique le plus souvent à 28 jours. Cette durée ne signifie pas que les réactions d'hydratation du ciment sont terminées. C'est, en fait, un compromis entre un délai trop long pour le contrôle et l'obtention d'une valeur représentative de la résistance finale que l'on peut considérer comme acquise après plusieurs mois de réactions d'hydratation. [TORRENTI Jean Michel *sino dato*]

II.6.2.3 Résistance à la traction :

La mesure de la résistance en traction est beaucoup plus rare que celle de la résistance en compression. Ceci essentiellement parce que, dans les règlements actuels, le béton tendu est généralement négligé (en béton armé et précontraint, mais pas dans les chaussées, par exemple). De plus, cette résistance en traction étant faible, une estimation à partir de la résistance en compression est souvent suffisante. [TORRENTI Jean Michel, *sino dato*]

II.6.3 Durabilité :

Un béton durable est un béton capable de résister à un degré satisfait aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration. Il conserve sa forme originale et sa qualité quand il est exposé à son environnement. La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, compositions des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes aux bétons comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlorure (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réaction alcalis granulats, les ions sulfates (dans certains granulats calcaires), ou externes (cycle de gel dégel, l'action des sels de déverglaçage...), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides ...etc.

II.7 Différents types de bétons:

II.7.1 Béton auto plaçant (BAP) :

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Ils se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité. [BARON et SAUTEREY .R ,1982]

II.7.2 Bétons de hautes performances (BHP) :

Sont des bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (supérieure à 50 MPa), et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau

de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants réducteurs et hauts réducteurs d'eau et en utilisant des ultrafines, telles que les fumées de silice qui permettent de combler les vides entre les grains de ciment et d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais. [BERNIER.G, 2005]

II.7.3 Béton de fibres :

Est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudé traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc. Les fibres synthétiques peuvent être d'origine minérale (verre, carbone, métallique) ou d'origine organique (polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide). Les fibres métalliques peuvent être utilisées avec des propriétés spécifiques et avec un dosage de l'ordre de 0,3 à 2% en volume. C'est surtout le rapport entre la longueur et le diamètre des fibres (élancement) qui aura une influence sur les performances finales du béton de fibres.

II.7.4 Béton compacte au rouleau (BCR) :

Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc...). Il est utilisé pour la construction de barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes [BACARA, 1996].

II.7.5 Béton préfabriqué :

Sert à la fabrication, généralement en usine et en milieu contrôlé, de diverses composantes allant de l'élément standardisé comme le bloc jusqu'aux éléments de structure ou des panneaux de façades multifonction [CIM BETON, 2000]. Les éléments préfabriqués sont caractérisés par un niveau de qualité constant. Mais ce qui est toujours recherché pour ces bétons est la résistance initiale pour diminuer le délai entre la préfabrication et le transport sur le chantier.

II.7.6 Béton léger :

La norme **NF EN 206-1** définit les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2100 kg/m³, parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction. [CORMON.P, 1973]

II.7.7 Béton lourd :

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [DREUX.G et FESTA.J, 1998].

II.7.8 Béton de poudre réactive (BPR) :

Est un nouveau béton composé essentiellement de ciment, des fumées de silice, des fines réactives constituées de quartz et de sable broyés à une grosseur inférieure à 500 µm, des fibres métalliques d'une longueur de 13 mm environ. Le BPR est caractérisé par des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré ou post-tension. Les résistances en traction et en compression sont très élevées voir mêmes supérieures à celles des aciers (350 MPa). [RICHARD et CHEYREZY.M, 1995]

II.7.9 Béton ordinaire :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, Eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre : $20 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPa}$.

Chapitre III :
Déchets et
agrégats recyclés

Déchets et agrégats recyclés

Partie A : les déchets

III.1 Introduction :

Le recyclage devient une opération très importante avec un intérêt industriel en premier ordre, à cause de la grande dynamique que les domaines de génie civil et travaux publics connu à nos jours.

Dans ce cadre en a destiné ce troisième chapitre pour parler essentiellement sur les déchets, leur classification, leur préparation et en va finir par quelques propriétés physiques et mécaniques des bétons à base des agrégats recyclés.

III.2 Définition:

Usuellement, un déchet désigne : la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui reste après l'utilisation.

Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer [LALAMI Sallah Eddine ,2012].

III.3 Classification des déchets :

Les granulats recyclés proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes. Ces déchets de chantier sont constitués de résidus des procédés de production et de transformation (déchets chimiques, emballages, bois traités ou non traités...etc.).

Ces déchets de démolition font partis des déchets industriels dans la classification usuelle (à distinguer des déchets urbains et des déchets agroalimentaires).

[GRONDIN Aurélie 2011]. Il est nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets industriels. Quatre grandes catégories permettent de classer ces déchets industriels :

III.3.1 Les déchets inertes désignés (DI):

Un déchet inerte comme un déchet ne pouvant subir aucune modification physique, chimique ou biologique. Les déchets inertes ne se décomposent pas ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique. Ces déchets n'entraînent pas de pollution de l'environnement et ne peuvent nuire à la santé humaine.

Exemple : béton, briques, pierre, tuiles, céramiques...

III.3.2 Les déchets industriels banals (DIB) :

Un déchet est dit banal si est traité par les mêmes procédures que ceux employés pour les déchets ménagers. Ces déchets ne sont ni inertes, ni toxiques. Cette appellation est en cours de modification : Déchets Non Dangereux (DND) [GRONDIN Aurélie, 2011].

Exemple : plastiques, métaux, verre, bois non traités...

III.3.3 Les déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD):

Ce type de déchet est traité par des procédés qui diffèrent de ceux employés pour les ordures ménagères. Ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement. Leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes [GRONDIN Aurélie, 2011].

Exemple : amiante, solvants, peintures, huiles, colles, goudron, bois traités ou emballages souillés.

III.3.4 Les déchets d'emballages :

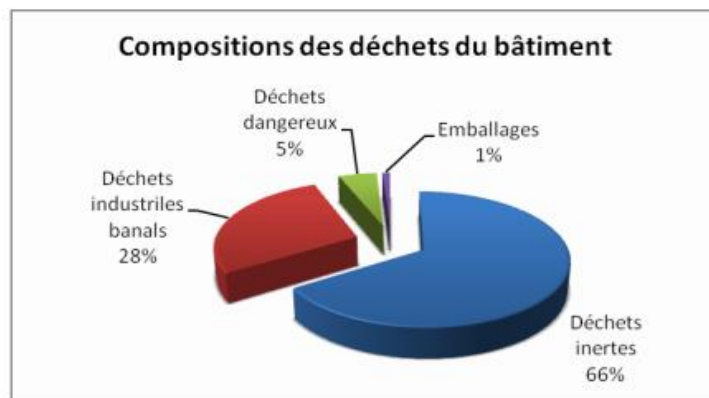
Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastique, cartons....etc. [GRONDIN Aurélie, 2011].

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets [Oikonomou N.D, 2005].

- Béton (40 %),
- Brique (30 %),
- Bois (10 %),
- Plastique (5 %),
- Métaux (5 %),
- Autres éléments (10 %).

Le traitement de ces déchets permet d'extraire les éléments non appropriés (comme les métaux) dans la fabrication de granulats recyclés pour usage routier. On distingue trois types de matériaux issus du recyclage :

- Granulat recyclé béton.
- Granulat recyclé enrobés.
- Granulat recyclé tout venant.



FigureIII.1: *Compositions des déchets du bâtiment.* [Oikonomou N.D, 2005]

III.4 Le recyclage des déchets :

Chaque année les activités du Bâtiment et des Travaux Publics produisent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais, qui dans le cas général sont des déchets inertes. Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour les acteurs des Travaux Publics : maîtrises d'ouvrage, maîtrises d'œuvre, entreprises de BTP, carriers....etc.

L'utilisation de tels matériaux dits recyclés offre plusieurs avantages :

- Économie des ressources naturelles de granulats.
- Réduction des volumes de stockage des déchets inertes.
- Économie de transports.

III.5 Les type d'élimination :

Selon le type et la nature du déchet obtenu ; on doit choisir le type d'élimination appropriée parmi les types suivants :

- Décharge ou réutilisation du déchet (remplissage ou remblai).
- Déchet recyclable.
- Valorisation énergétique.
- Incinération.
- Déchet recyclable après décontamination.

Partie B : Agrégats recyclés

III.6 Introduction :

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux.

L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnement car d'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis. De l'autre côté ; leurs réutilisations permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats ordinaires.

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne [Khalaf & DeVenny, 2004]. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton.

III.7 Construction et gestion des déchets de démolition :

III.7.1 États-Unis d'Amérique [Gilpin et al. 2004]

Sur les quelque 2,7 milliards de tonnes de granulats utilisés actuellement aux Etats-Unis, le compte trottoirs pour 10-15%, alors que d'autres la construction de routes et les travaux d'entretien consomme un autre 20-30%, et le volume d'environ 60-70% d'agrégats sont utilisés dans le béton de structure. RA aux États-Unis est produit par les producteurs d'agrégats naturels, des entrepreneurs et des centres de recyclage de débris, qui ont une part de 50%, 36% et 14%, respectivement. Mesures incitatives pour le transport des déchets de béton et de granulats transformés à partir de sites de production sont donnés à promouvoir l'utilisation de la RA, mais une grande partie de la production est approprié seulement comme matériau de remblai ou de base de la construction

III.8 Processus de fabrication des granulats recyclés :

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- **Sélection, stockage et traitement** des produits bruts.
- **Préparation des matériaux avant concassage** : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses.
- **Tri manuel.**
- **Déferrage électromagnétique.**

- **Concassage et criblage** : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques.
- **Concassage secondaire éventuel** de la fraction supérieure issue du concassage primaire.
- **Stockage**
- **Analyses éventuelles avant utilisation.**



Figure III.2 : Réception des bétons de démolition



Figure III.3 : Stock de matériaux démolition destiné au recyclage.



Figure III.4 : Préparation à la cisaille



Figure III.5 : Déferrailage électromagnétique.



Figure III.6 : Agrégats recyclés.

III.9 Composition des granulats recyclés de béton :

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition. En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont [De Juan M.S. and Gutiérrez P.A, 2009 ; Douara T.H, 2009 ; Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S, 2009] :

- Des granulats naturels concassés partiellement.
- De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.

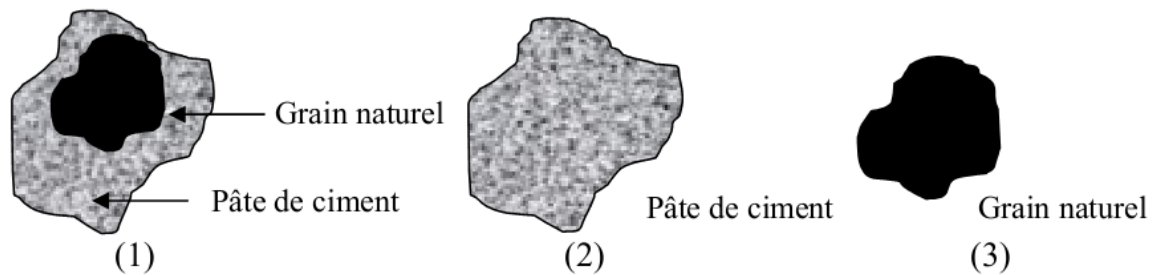


Figure III.7: Formes des granulats recyclés.

III.10 Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci :

La thématique des bétons de granulats recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie bibliographique ne présente que les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie du béton de granulats recyclés de béton à l'état frais et à l'état durci.

III.10.1 Etat frais :

III.10.1.1 La teneur en air :

La teneur en air du béton de granulat recyclé est légèrement supérieure (4% à 5,5%) par rapport au béton à base des granulats 100% naturel [Katz. A, 2003].

Cette augmentation de teneur en air peut être attribuée à la plus grande porosité des agrégats recyclés.

III.10.1.2 Masse volumique:

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de 2400 kg/m³, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, 2150 kg/m³, quel que soit le type de ciment [Topcu et Guncan, 1995 ; Katz. A, 2003].

La densité plus faible est le résultat de la masse volumique des granulats, qui est liée à la nature du béton utilisé pour la production de l'agrégat. En outre, l'augmentation de la teneur en air dans le béton recyclé, conduit à une réduction supplémentaire de la masse volumique du béton frais.

III.10.2 Etat durci :

III.10.2.1 Absorption:

L'absorption d'eau est importante pour les bétons de granulat recyclé. En effet, l'ensemble des études montre que les bétons de granulat recyclé sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau. De plus, il semble que la partie plus fine des granulats recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions du béton de granulat recyclé nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels. En effet, les bétons de granulat recyclé requièrent approximativement 15% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique [Evangelista et al. 2010 ; De Brito et al. 2010].

III.10.2.2 Porosité:

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons de granulat recyclé

La porosité des bétons de granulat recyclé est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des bétons de granulat recyclé est liée une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des bétons de granulat recyclé. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [Katz. A, 2003].

III.10.2.3 Perméabilité :

Selon [Rasheeduzzafar et al, 1984], lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

III.10.2.4 Résistance à la compression :

des études antérieures montrés que lors du remplacement des agrégats naturels par des granulats recyclés, les caractéristiques et propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclés changent. Il provoque une réduction sur ces propriétés mécaniques.

[Gómez-Soberon J.M.V, 2002].

Bien que les chercheurs ont signalé une réduction de la résistance du béton à base de granulat recyclé, il convient de noter que l'ampleur de la réduction est liée à des paramètres tels que le type de béton utilisé pour la fabrication des agrégats recyclés (élevé, moyen ou faible résistance), le ratio de remplacement, de l'eau / ciment et l'état d'humidité des granulats recyclés [Crentsil et al, 2001; Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002]. Par exemple, Katz a constaté que dans un rapport de haute E / C (entre 0,6 et 0,75), la résistance du béton à base de granulat recyclé est comparable à celui du béton de référence, même à un niveau de remplacement de 75% [Katz. A, 2003]. Rao a trouvé la résistance du béton à base de granulat recyclé et le béton de référence à comparable avec un remplacement à 100%, à condition que le rapport eau-ciment est supérieur à 0,55 [Rao, 2005].

Selon [Quebaud, 1996] la comparaison des performances du béton à base de granulats recyclés par rapport à un béton de même composition formulé avec des granulats naturels donne les indications suivantes résistances à la compression inférieures d'environ **10 à 30 %**.

III.10.2.5 Résistance à la traction par flexion et par fendage :

Une étude menée par Rao, montre une diminution de la résistance à la flexion et à la traction de **15-20%** par rapport à béton référence à 100% de remplacement [Rao, 2005]. Dans une autre étude, où on a déterminé la résistance à la traction directe du béton, il a été constaté que cette différence est inférieure à **10%** pour la résistance à la traction du béton à base de granulats recyclés et du béton de référence à 28 jours [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002]. Des études ont également montré que l'utilisation de mélanges cimentaires supplémentaires, telles que la fumée de silice, ...etc. contribue à améliorer les propriétés du béton à base de granulats recyclés [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002].

III.10.2.6 Module d'élasticité :

Pour un béton ordinaire, le module d'Young augmente en fonction de l'âge du béton tandis que le module d'Young des bétons de granulats recyclés (26,6 GPa) ne semble pas dépendre de l'âge de l'éprouvette de béton (à rappeler que la valeur conventionnellement utilisée pour un béton ordinaire est 35 GPa) [Oikonomou N.D, 2005].

III.10.2.7 Fluage et retrait :

L'utilisation des agrégats recyclés dans le béton induit une contraction due à la forte absorption de ces agrégats. Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulats recyclés à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0,55 à 0,8 mm / m, alors que la valeur pour un béton à base de granulats naturels est seulement d'environ **0,30 mm / m** [Katz, 2003].

Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évidents, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est à dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieure à celle du béton avec béton à base de granulats naturels [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002]. Bien que davantage de travaux de recherche sont nécessaires dans le domaine, il semble que le comportement global du béton à base de granulats recyclés et béton à base de granulats naturels peut être comparable lors de l'affichage de l'effet combiné du retrait et du fluage.

III.10.3 Durabilité du béton à base de granulats recyclés :

Les études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités des agrégats recyclés sur les propriétés du béton à base de granulats

recyclé. Cependant, certaines études ont montré que le béton à base de granulats recyclés est beaucoup plus perméable que le béton à base de granulats naturels, donc est un béton moins résistant à un degré satisfaisant aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration.

Il a noté que les propriétés de durabilité peuvent être améliorées par l'utilisation des cendres volantes, fumée de silice condensée, etc.

III.10.3.1 Carbonatation :

Sur la base du test de carbonatation fait après 6 mois de séchage, la profondeur de la carbonatation du béton recyclé a été jugée [1,3-2,5] fois supérieure à celle du béton à base de granulats naturels [Crentsil et al, 2001; Levy Salomon et Paulo 2004]. On voit que pour le même ratio liant de l'eau, la profondeur de carbonatation du béton à base de granulats recyclés est légèrement plus élevée que celle du béton à base de granulats naturels [Otsuki et al. 2003].

Cette augmentation de la profondeur de carbonatation peut être attribuée à une augmentation de la perméabilité du béton à base de granulats recyclés.

D'une manière générale, les auteurs s'accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels. [Khalaf FM, DeVenny Alan, 2004]

Chapitre IV :
Matériaux,
matériels et essais

Matériaux, matériels et essais

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et on présente les calculs de formulation de notre béton et ensuite on d'écrit les différents modes opératoire des essais non destructifs (ultrason, scléromètre) et des essais destructif.

IV.2 Matériaux utilisés:

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Elbachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj. D'autres travaux dans le cadre de ce projet ont fait l'objet d'essais réalisés par nos soins au laboratoire de génie civil à l'Université de M'sila.

IV.3 Caractéristiques des matériaux:

IV.3.1 Caractéristiques du gravier :

Le gravie utilisé pour la confection du béton est gravier de MECHRI obtenue après concassage de la roche .Les fractions utilisées sont : (3/8), (8/15).

IV.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5] :

a. gravier concassé :

✓ But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

✓ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

✓ Préparation de l'échantillon pour l'essai :

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NA EN 933-5). La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres [MAAREF.H et MAHBOUS.R 2007].

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) (8/16).

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 01	02	03	Moy			
Gravier 3/8 1600g	8	103	114	133	116.67	116.67	7.29	92.71
	6.3	645	712	681	679.34	796.01	49.75	50.25
	5	507	447	466	473.34	1269.35	79.34	20.66
	4	286	265	267	272.67	1542.02	96.38	3.62
	3.15	55	55	49	53.00	1595.02	99.67	0.33
	2.5	03	03	02	2.67	1597.69	99.85	0.15
	Fond	01	00	00	0.34	1598.03	99.88	0.12
Gravier 8/16 3200g	16	48	53	85	62	62	1.94	98.06
	12.5	480	552	530	520.67	582.67	18.21	81.79
	10	907	958	956	940.34	1523.01	47.59	52.41
	8	1076	1080	1004	1053.34	2576.35	80.51	19.49
	6.3	561	461	509	510.34	3086.69	96.46	3.54
	5	85	72	79	78.67	3165.36	98.92	1.08
	Font	42	25	33	33.34	3198.7	99.96	0.04

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisés sont tracés ci-dessous.

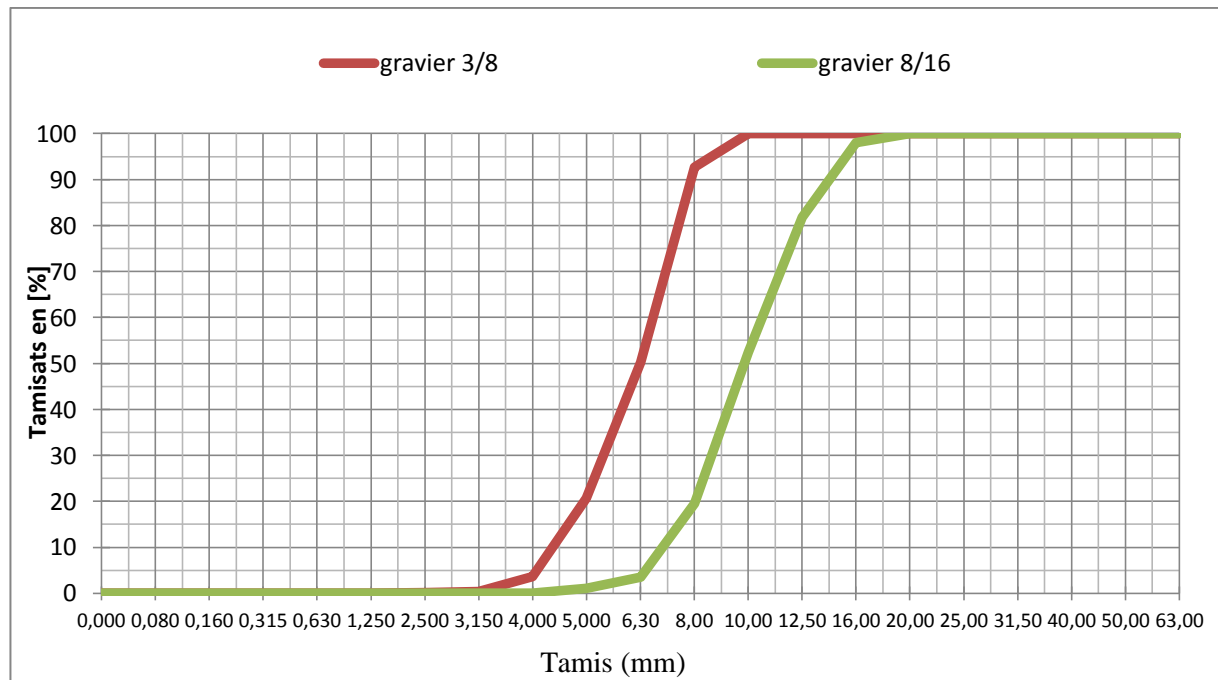


Figure IV.1: *Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).*

b. Gravier recyclé :

Les éprouvettes sont ramenées depuis le Bureau d'Etudes et Suivi Technique de M.BENCHENNAF Mohamed sis à Bordj Bou Arreridj.

La source de ces éprouvettes est un béton local fabriqué dans le chantier et testé dans le laboratoire.

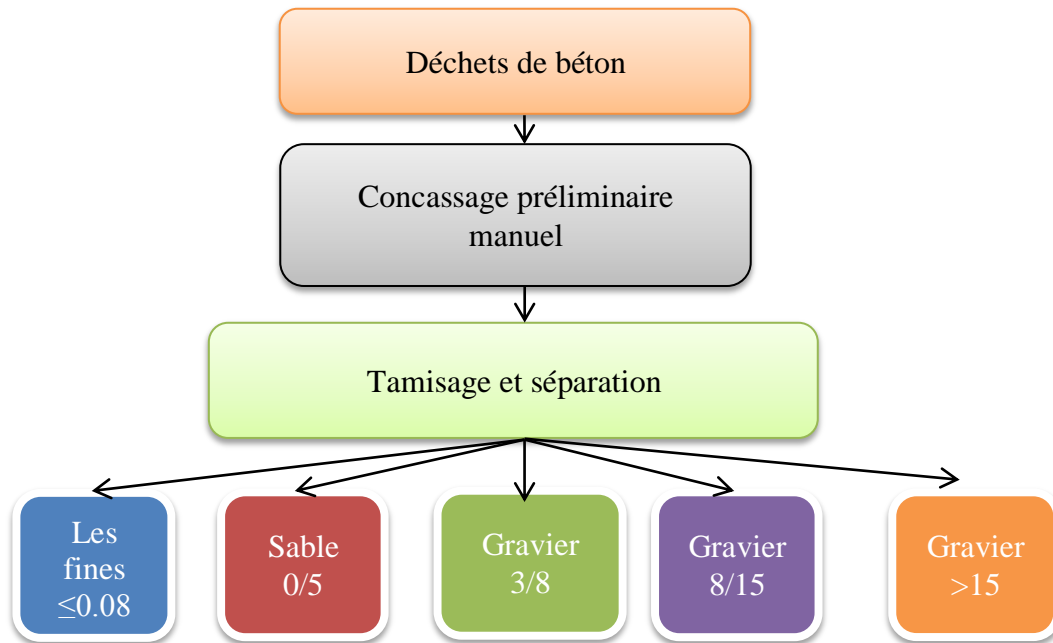


Figure IV.2 : Procédure de préparation des granulats recyclés.



Figure IV.3 : concassage, criblage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.

Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) (8/16).

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulés
		Essai 01	02	03	Moy			
Gravier 3/8 1600g	8	14	18	13	15	15	0.94	99.06
	6.3	424	485	458	455.67	470.67	29.42	70.58
	5	350	353	328	343.67	814.34	50.90	49.10
	4	346	333	348	342.34	1156.68	72.29	27.71
	3.15	291	269	290	283.34	1440.02	90.00	10.00
	2.5	130	115	123	122.67	1562.69	97.67	2.33
	Fond	47	27	33	35.67	1598.36	99.90	0.10
Gravier 8/16 3200g	16	38	16	27	27	27	0.84	99.16
	12.5	1614	1548	1434	1532	1559	48.72	51.28
	10	836	785	888	836.34	2395.34	74.85	25.15
	8	554	671	668	631	3026.34	94.57	5.43
	6.3	127	157	162	148.67	3175.01	99.22	0.78
	5	7	10	12	9.67	3184.68	99.52	0.48
	Font	5	9	6	6.67	3191.35	99.73	0.27

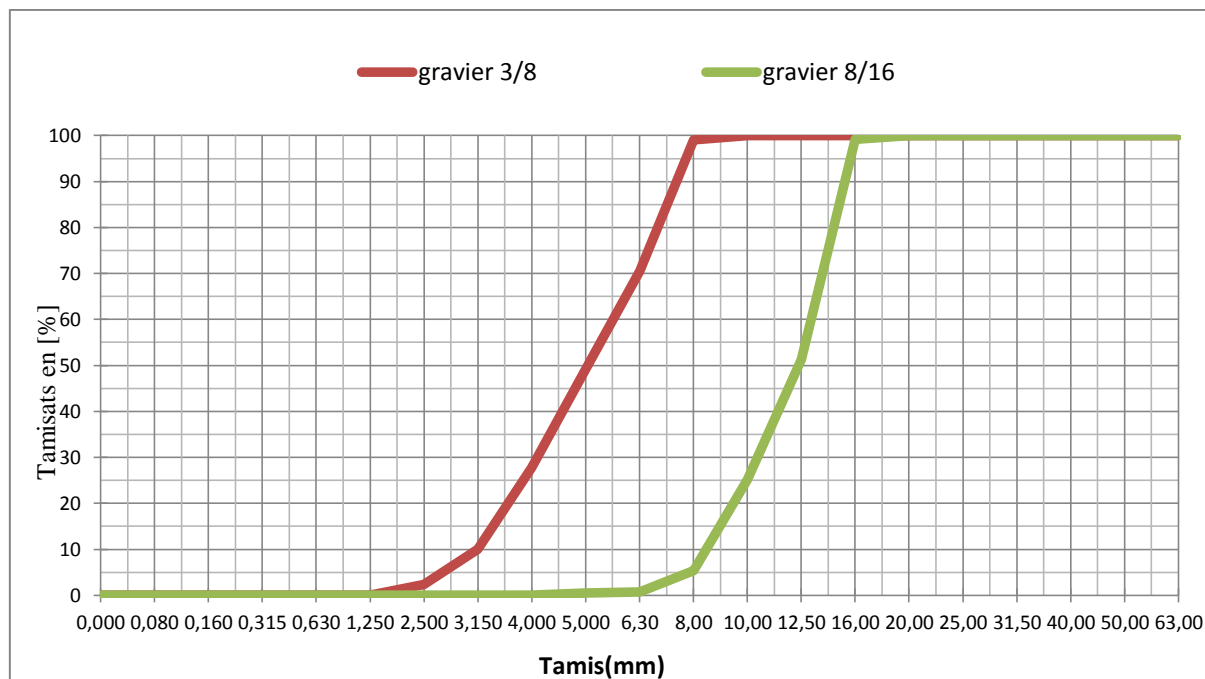


Figure IV.4: Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/15).

IV.3.1.2 La densité :

En sens physique ; c'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température Elle est exprimée sans unité.

IV.3.1.3 Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité. [AYADI.B et HAMMACHE.Y, 2012]

Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ):

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm^3 ; Kg/m^3 ; t/m^3).

✓ Principe :

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure, a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

✓ **Mode opératoire :**

- Peser le récipient à vide et noter M_1
- Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- Araser à la règle,
- Peser le contenu et noter M_2 .
- Il résulte que :

$$\gamma = (M_2 - M_1)/V$$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.3 : La masse volumique apparente (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).

matériaux	M_1 (kg)	V (l)	M_2 (kg)	γ_{app}	γ_{moy} (kg/l)
3/8	7.416	5	0.841	1.315	1.338
	7.595	5	0.841	1.351	
	7.580	5	0.841	1.348	
8/16	7.983	5	0.841	1.428	1.419
	7.958	5	0.841	1.423	
	7.882	5	0.841	1.408	

Tableau IV.4 : La masse volumique apparente (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).

matériaux	M_1 (kg)	V (l)	M_2 (kg)	γ_{app}	γ_{moy} (kg/l)
3/8	6.521	5	0.841	1.136	1.148
	6.607	5	0.841	1.153	
	6.620	5	0.841	1.156	
8/16	7.003	5	0.841	1.232	1.239
	7.059	5	0.841	1.244	
	7.042	5	0.841	1.240	

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ):

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (t/m^3 , kg/dm^3 , g/cm^3).

✓ Principe :

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

✓ Mode opératoire :

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air,
- Lire le nouveau volume V_2 ,
- Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$
- La masse volumique réelle est: $\rho = M / (V_2 - V_1)$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOULA, 2012]

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.5 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).

matériaux	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{abs}	ρ_{moy} (kg/l)
3/8	300	400	516	2.586	2.593
	300	400	515	2.608	
	300	400	516	2.586	
8/16	300	400	517	2.564	2.564
	300	400	518	2.542	
	300	400	516	2.586	

Tableau IV.6 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).

matériaux	M (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ_{abs}	ρ_{moy} (kg/l)
3/8	300	400	528	2.344	2.369
	300	400	526	2.381	
	300	400	526	2.381	
8/16	300	400	521	2.479	2.486
	300	400	520	2.500	
	300	400	521	2.479	

IV.3.1.4 La porosité :

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P (\%) = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho}\right) \times 100$$

IV.3.1.5 La compacité :

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P$$

IV.3.1.6 L'indice des vides :

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains,

V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s}$$

Aussi :

$$e(\%) = \frac{1-C}{C}$$

Tableau IV.7 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	48.39	51.61	0.937
(8/15)	44.65	55.35	0.806

Tableau IV.8 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier recyclé.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	51.54	48.46	1.063
(8/15)	49.84	50.16	0.994

IV.3.1.7 La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles

[NA EN 1097- 2]:

✓ **But de l'essai :**

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats et à l'usure par frottements.

✓ **Principe de l'essai :**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, en évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50). [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012]

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après

Tableau IV.9 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012].

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 – 10	9	3960	à -150
10 – 14	11	4840	
10 – 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à -150
25 – 50	12	5280	

✓ **Mode opératoire :**

- Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr /min à 33 tr/min.
- Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm Égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.



Figure IV. 5 : les boules avant l'essai.



Figure IV. 6 : Appareil de Los Angeles.

Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

P = 5000 - refus

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :

$$L_A = 100 (P/5000)$$

P : est le passant à 1.6mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Tableau IV.10 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A .
[HAMMOUCHE.Y et LAALAOUIA, 2012]

Coefficient L_A	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dur
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrit dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.11 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (3/8), (8/15).

Fraction granulaire	L_A (%)
(3/8)	21
(8/15)	21

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

Tableau IV.12 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier recyclé (3/8), (8/15).

Fraction granulaire	L_A (%)
(8/15)	29.9

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est assez dur et reconnu apte pour la confection du béton.

IV.3.1.8 Degré d'absorption d'eau [NA EN 1097-6]

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g). [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012]

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.13: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) concassé

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(3/8)	1000	978	2.25
(8/15)	1000	986	1.42

Tableau IV.14: Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) recyclé.

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(3/8)	1000	912	9.65
(8/15)	1000	939	6.50

IV.3.2 Caractéristique du sable :

Le sable utilisé dans nos travaux est un sable de dune. Ce sable est prélevé dans une zone située au sud de M'sila (OUED MAITHER) d'où les caractéristiques sont cités ci-après :

IV.3.2.1 Analyse granulométrique [NA EN 933-1]

✓ **But de l'essai :**

Permettre la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

✓ **Principe de l'essai :**

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

✓ **Mode opératoire :**

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3minute dans le cas des sables.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA est inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.15 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	8.33	8.33	0.42	99.58
2,50	115	123.33	6.16	93.84
1,25	83	206.33	10.31	89.69
0,63	113.33	319.66	15.97	84.03
0,315	1007	1326.66	66.28	33.72
0,16	590.67	1917.33	95.79	4.21
0,08	75.67	1993	99.57	0.43
Fond	8.67	2001.67	100	0.00

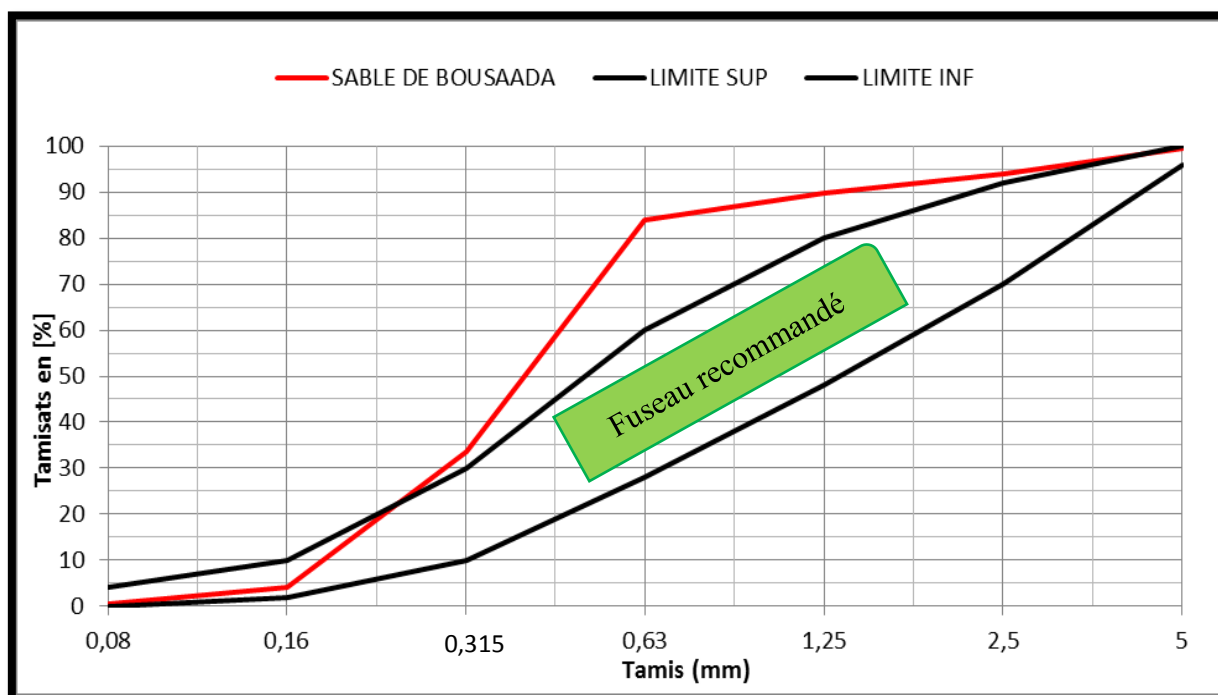


Figure IV. 7: Courbe granulométrique du sable de dune.

IV.3.2.2 Modules de finesse [NA EN 12620] :

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis. [BRETTE. Alain, 2007]

Tableau IV.16 : Module de finesse du sable

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

$$MF = \sum R_i / 100$$

$$MF = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

$$MF = 0.42 + 6.16 + 10.31 + 15.97 + 66.28 + 95.79 / 100 = 1.94$$

$$MF = 1.94$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à :

$$MF = 1.94, MF < 2 \text{ (C'est un sable fin).}$$

IV.3.2.3 Equivalent de sable : [NA EN 933-8]

✓ But de l'essai :

Cet essai consiste à déterminer la quantité d'élément fins (argile, limons, impuretés) contenus dans sable par rapport à la quantité d'élément sableux.

✓ Mode opératoire :

- Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libéré les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 min.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontal en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vente au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Introduire el piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

Tableau IV.17: *Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SV} et E_{SP}*
[BRETTE Alain,].

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité de sable
$Es < 65$	$Es < 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
$65 < Es < 75$	$65 < Es < 80$	Sable légèrement argileux de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq Es \leq 85$	$70 \leq Es \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
$Es \geq 85$	$Es > 85$	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

En a répété l'essai 03 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.18 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.

Hauteur (cm)	h_1	h_2	$E_{SV} (\%)$	$E_{SVmoy} (\%)$	h'_2	$E_{SP} (\%)$	$E_{SPmoy} (\%)$
Echantillon (1)	13.90	8.20	58.99	64.27	8.00	57.55	59.07
Echantillon (2)	12.50	8.3	66.40		7.40	59.20	
Echantillon (3)	12.90	8.7	67.44		7.80	60.46	

Le sable testé donne les résultats suivants :

$E_{SV} = 64.27 (\%)$
 $E_{SP} = 59.07 (\%)$

} Le sable est considéré argileux et nécessite un lavage avant son utilisation.

IV.3.2.4 Caractéristiques physiques du sable :

Il est nécessaire de déterminer toutes les caractéristiques physiques pour le sable de dune .

a. Masse volumique apparent [EN 1097-6]

a.1 Masse volumique à l'état lâche :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1L.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec
- On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1L$).

a.2 Masse volumique à l'état compacte :

C'est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient et le compacter par tassement à 25 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M_2 la masse de l'ensemble (sable +récipient) M_1 la masse de le récipient.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_c = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : Masse du récipient vide

M_2 : Masse du récipient plus le sable

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1L$).

b. La porosité :

La porosité d'un matériau est le rapport du volume des vides au volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides .

Cette propriété ou notion de porosité est importante car elle influe sur certain caractéristique fondamentale tel que :

- Résistance mécanique élevée, donc P faible .
- Capacité d'absorption d'eau (w) ; Prélevée donc (w) grand

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P(\%) = [1 - (\gamma / \rho_s)] \times 100\%$$

b.1 à l'état lâche :

$$P_L = [1 - (\gamma_L / \rho_s)] \times 100\%$$

b.2 à l'état compact :

$$P_c = [1 - (\gamma_c / \rho_s)] \times 100\%$$

c. La compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau :

$$C = 1 - P$$

c.1 à l'état lâche :

$$C_L = 1 - P_L$$

c.2 à l'état compacte :

$$C_c = 1 - P_c$$

e. L'indice des vides :

Le rapport de volume de vide sur le volume de solide :

$$e = p / (1 - p)$$

e.1 à l'état lâche :

$$e_L = P_L / (1 - P_L)$$

e.2 à l'état compacte :

$$e_c = P_c / (1 - P_c)$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau (IV.19) ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Les résultats qui regroupés dans le tableau suivant : sont tirés d'après une étude de caractérisation du sable.

Tableau IV.19: Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).

Propriété	Valeurs
Masse volumique apparente	1.558
Masse volumique absolue	2.514
Masse volumique à l'état lâche	1.558
Masse volumique à l'état compact	1.574
Compacité à l'état lâche	61.98%
Porosité à l'état lâche	38.02%
Indice des vides à l'état lâche	61.34%
Compacité à l'état compact	62.61%
Porosité à l'état compact	37.39%
Indice des vides à l'état compact	59.72%
Degré d'absorption	17.65%

IV.3.3 Caractéristiques du ciment utilisé :

IV.3.3.1 Présentation du ciment (MATINE) :

C'est un ciment CEM II/B 42.5 N, provient de la cimenterie de HAMMAM DALAA Wilaya de M'SILA. Il est gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C°. [MATINE, 2013]

En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme [NA EN 197-1].

IV.3.3.2 Domaines d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment. [MATINE, 2013]

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport, etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, château d'eau, stations d'épuration, etc.) ;
- Secteur industriel.

IV.3.3.3 Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment MATINE obtenu du fournisseur. [MATINE, 2013]

Tableau IV.20 : Analyse chimiques du ciment MATINE.

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en sulfates SO ₃	2.00 à 2.70	NA 5042
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.00 à 2.20	
Teneur en chlorures	0.01 à 0.05	
Teneur en équivalent en alcalis	0.3 à 0.75	
Perte au feu	7.50 à 12.00	
Résidus insolubles	0.7 à 2.00	

Tableau IV.21 : Composition minéralogique du clinker.

Composantes	Valeur (%)
Silicates tricalciques C3S	58 à 64
Silicates bicalciques C2S	12 à 18
Aluminates tricalciques C3A	6.00 à 8.00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF	10.00 à 12.00

Tableau IV.22 : Propriétés physiques du ciment utilisé.

Propriété	Valeur
Consistance normale	25 à 28.50 (%)
Surface spécifique Blaine	4150 à 5250 (cm ² /g)
Retrait à 28 jours	<1000 (µm/m)
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 (kg/dm ³)
Masse volumique spécifique	3.02 (kg/dm ³)

Tableau IV.23 : Temps de prise à 20°C.

Temps de prise	Temps (min)	Norme
Début de prise	140 à 195	NA 230
Fin de prise	195 à 290	

Tableau IV.24: Résistance mécanique à la compression.

Age de l'éprouvette	Résistance à la compression (MPa)	Norme
02 jours	≥ 10.0	NA 234
28 jours	≥ 42.5	

IV.3.4 L'eau de gâchage : [NA EN 1008]

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau IV.25: Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 µs/cm	
Taux de (Cl ⁻)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂ ⁻)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃ ⁻)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

Les résultats obtenus ont montré que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

IV.3.5 Adjuvant :

On a utilisé dans notre projet de recherche pour cette étude un adjuvant **MEDAFLUID SF 150**.

IV.3.5.1 Description :

Le **MEDAFLUID SF 150** est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Son utilisation dans le béton permet d'accélérer le durcissement du béton d'une manière significative.

Il est compatible avec tous les types de ciment et se dilue parfaitement dans l'eau de gâchage.

IV.3.5.2 Domaines d'application :

- Bétons préfabriqués.
- Bétonnage par temps froid.
- Coulis d'injection.
- Bétons prêts à l'emploi.
- Bétons pompés.
- Bétons coffrage tunnel.

IV.3.5.3 Propriétés :

Grace à ses propriétés le **MEDAFLUID SF 150** permet :

a. Sur béton frais :

- Améliorer l'ouvrabilité à rapport E/C constant (pour un béton témoin ayant un slump de 3 à 8 cm **MEDAFLUID SF 150** permet d'obtenir un slump de 12 à 15 cm).
- De diminuer la ségrégation.
- Réduire le début de durcissement.

b. Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques.
- Augmenter la cohésion granulats ciment.

Tableau IV.26: l'effet de l'adjuvant sur le béton. [GRANITEX, 2013].

Désignation	Rc (Mpa)		
	1j	7j	28j
MEDAFLUID SF 150 1.5%	13	28.5	46.7

Résistances mécaniques en compression (béton confectionné sur chantier, dosé à 350kg/m^3
E/C=0.35 et Aff.=11cm).

IV.3.5.4 Caractéristiques :

- Aspectliquide.
- Couleur.....marron.
- pH.....9.5-10.5.
- Densité..... 1.19 ± 0.01 .
- Teneur en chlore $<0.1\text{g/L}$.
- Extrait sec.....38%.

IV.3.5.5 Mode d'emploi :

Le **MEDAFLUID SF 150** peut être ajouté dans la bétonnière à la confection du béton ou dans les camions malaxeurs :

- Dans la bétonnière il s'ajoute mélangé à l'eau de gâchage lorsque le béton est déjà mouillé.
- Dans le camion malaxeur, le **MEDAFLUID SF 150** est introduit dans la toupie à l'arrêt et malaxé à grande vitesse pendant environ 1 minute par mètre cube de béton.

IV.3.5.6 Dosage :

A titre indicatif un dosage à 1.5% réduit le début de prise d'un heur (selon le type de ciment) par rapport au témoin :

Le dosage du **MEDAFLUID SF 150** varie entre 1.0% et 1.5% du poids du ciment soit 0.85 à 1.25 litre pour 100kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

IV.3.5.7 Conditionnement et stockage :

Le **MEDAFLUID SF 150** est conditionné en bidons de 12Kg, fut de 270Kg, cubitenaire 1200 Kg.

IV.3.5.8 Délai de conservation :

1 année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel. [GRANITEX, 2013].

IV. 4 Calcul de la composition du béton:**✓ But :**

Déterminer les proportions de ciment, d'eau, de granulats et sable éventuels devant entrer dans la composition d'un béton dont on exige certaines performances

IV.4.1 Méthode de calcul de la composition du béton:

Le calcul de la composition du béton à pour le but de déterminer le dosage en ciment, granulats et en eau pour un dosage de 1 m^3 de béton frais afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue.

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la composition du béton proposé et appliquées dans les différents pays du monde parmi ces méthodes on peut citer:

- Méthode de BOLOMEY
- Méthode d'ABRAMS
- Méthode de FAURY
- Méthode d'OISEL
- Méthode de VALETTE
- Méthode de DREUX GORISSE
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS
- Méthode GENERALE DU CENTRE D'ESSAIS DES STRUCTURES

Dans notre PFE on va utiliser la méthode des volumes absolus dite aussi méthode de SCRAMTAIEV, cette méthode consiste à :

- Calculer la somme de toutes les composantes du béton frais qui doit être égale à 1000 litres ou bien 1 m^3 .
- La porosité $P = 0$ pour un béton damé.

Pour confectionner un béton il faut calculer des dépenses en matières premières et leur mise en œuvre donc il faut choisir les composants du béton d'une façon convenable dans des proportions bien définies.

Les données de base pour effectuer les calculs de cette méthode est:

- La classe de résistance requise du béton (R_b).
- Le degré de fluidité ou de consistance du béton.
- Les caractéristiques des matériaux d'origine :

1. Activité du ciment (R_c).
2. Masse spécifique du ciment.
3. Masse volumique et masse spécifique du sable ou gravier.
4. La porosité des pierres concassées ou du gravier.

La composition du béton est établie approximativement par calcul ensuite, elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélanges de béton.

IV.4.2 Présentation de la méthode :

Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (R_b) en fonction du rapport C/E et des quantités du liant et des granulats.

a. Définition du rapport (C/E):

Pour $(C/E) \leq 2.5$

$$C/E = R_b / (A \times R_c) + 0.5 \dots\dots(1)$$

Pour $(C/E) > 2.5$:

$$C/E = R_b / (A' \times R_c) - 0.5 \dots\dots(2)$$

R_b : classe de béton.

R_c : activité ou classe du ciment.

A , A' : coefficient admis d'après le tableau (IV.27) selon les propriétés et la qualité des matériaux

C/E : rapport du poids de ciment au poids de l'eau dans l'unité de volume du mélange.

Tableau IV.27 : Valeurs des coefficients A et A' . [BELAGRAA.L, 2011]

Granulats et liants	A	A'
De qualité supérieure	0.65	0.43
De qualité ordinaire	0.60	0.40
De qualité inférieure	0.55	0.37

La formule -1- correspond aux bétons ordinaires plastiques.

La formule -2- correspond au béton plutôt sec de haute résistance mécanique.

b. Détermination de la déponce en eau:

Elle est établie approximativement d'après le tableau (IV.28) qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés.

Tableau IV.28 : *Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.*

[BELAGRAA.L, 2011]

La quantité d'eau l/m ³ en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons	
70	40	20	10	Maniabilité, sec	Affaissement, cm
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	145	160	80-60	0
130	135	150	165	50-30	0
140	145	160	175	30-15	0
145	155	170	185	-	2-1
160	165	180	195	-	4-3
165	170	185	200	-	6-5
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

c. Détermination de la dépense en ciment:

$$C = [(C/E) \times E] \dots (2)$$

d. Détermination de la dépense en gravier :

La détermination du dosage en agrégats doit remplir les conditions suivantes: La somme des volumes absolue de tous les composants du béton est égale à 1m³.

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_E) + (S/\rho_S) + (G/\rho_G) = 1000L \dots(3)$$

C, E, S et G: dépenses en ciment, eau, sable et gravier en (kg).

ρ_c , ρ_E , ρ_S et ρ_G : masse spécifiques de ciment, eau, sable et gravier en (kg/m³).

$$E + (S/\rho_S) + (C/\rho_c) = [(P_g \times a \times G/\gamma_g)] \dots(4)$$

P_g : porosité des pierres concassées.

γ_g : masse volumique des pierres concassées en (kg/l).

a : coefficient d'écartement des grains donné par le tableau suivant:

Tableau IV.29: Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment [BELAGRAA.L, 2011].

Dosage en ciment (kg/m ³)	E/C 0.30	E/C 0.40	E/C 0.50	E/C 0.60	E/C 0.70	E/C 0.80
250	-	-	-	1.26	1.32	1.38
300	-	-	1.30	1.36	1.42	-
350	-	1.32	1.38	1.44	-	-
400	1.31	1.40	1.46	-	-	-
500	1.44	1.52	1.56	-	-	-
600	1.52	1.56	-	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations (2) et (3) pour trouver l'expression qui permet de déterminer la quantité nécessaire de gravier.

$$G=1000/ [V_{\text{voi,pc}} \cdot (\alpha/ \gamma_{\text{vol,oc}}) + (1/ \rho_{\text{pc}})] \dots(5)$$

$$G=1000[P_g \times (\alpha/\gamma_g) + (1/\rho_G)] \dots (6)$$

e. Détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en gravier on fait le calcul de la dépense en sable (kg/m³).

[BELAGRAA.L, 2011].

$$S= [1000 - [(C/\rho_c) + E + (G/\rho_G)]] \times \rho_s \dots (6)$$

Mode opératoire :

Les données de travail

Sable de dune :

$$\gamma_s = 1.558 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = 2.514 \text{ g/cm}^3$$

Pierres concassées (gravier) :

$$D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$$

$$\gamma_{\text{pc}} = 1.420 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{pc}} = 2.564 \text{ g/cm}^3$$

Ciment:

$$\rho_c = 3.00 \text{ g/cm}^3$$

$$R_b = 35 \text{ Mpa}$$

$$A_{\text{ff}} = 6 \text{ cm}$$

$$R_c = 42.5 \text{ N/mm}^2$$

IV.4.3 Calculs les composants :

a. Calcul de C/E :

Avec :

$R_b = 350$ bars classe du béton

$R_c = 425$ bars classe du ciment.

$D_{max} < 20$ mm

Affaissement $A = 5$ cm

$$C/E = R_b / (A \cdot R_c) + 0.5 = 35 / (0.6 \times 42.5) + 0.5$$

$$C/E = 1.87$$

b. Calcul de la dépense en eau :

D'après le tableau $E = 191$ l c'est quantité dans le cas de (CPA, sable moyen, gravai)

- En CPJ (+10 à 15) l
- Pierre concassé (+10 l)
- Sable fine (+10 l)

$$E = 191 + 10 + 15 = 216$$

Donc :

$$E = 216 \text{ l}$$

c. Calcul de la dépense en ciment :

$$C = [(C/E) \cdot E] = 1.87 \times 216 = 404.5 \text{ Kg/m}^3$$

$$C = 404.5 \text{ Kg/m}^3$$

d. Calcul de la dépense en gravier :

$$G = 1000 / [V_{\text{vol.pc}} \cdot (\alpha / \gamma_{\text{vol.oc}}) + (1 / \rho_{\text{pc}})]$$

$$V = \text{cavité} = \text{porosité} = P$$

$$P = 1 - (\gamma_{\text{pc}} / \rho_{\text{pc}})$$

$$P = 1 - (1.42 / 2.56) = 0.45$$

α : coefficient d'écartement entre le gravies

$$\alpha = 1.4$$

$$G = 1000 / [0.445 \cdot (1.4 / 1.42) + (1 / 2.56)]$$

$$G = 1205.75 \text{ Kg/m}^3$$

e. Calcul de la dépense en sable :

$$S = [1000 - (C / \rho_c) + E + (G / \rho_g)] \cdot \rho_s$$

$$S = [1000 - (404.5 / 3.0) + (216 / 1) + (1205.75 / 2.56)] \cdot 2.51$$

$$S = 447.21 \text{ Kg/m}^3$$

IV.4.4 Volume du gâché pour 1m³ du béton :

Remarque :

AC : agrégats concassé.

AR : agrégats recyclé

Tableau IV.30: Composition pour un mètre cube du béton (1 m³).

Composants	0% AR	30%AR	50%AR	70%AR	100%AR
L'eau (l)	233	236	238	247	278
AC 3/8 (Kg)	482	338	241	145	/
AR 3/8 (Kg)	/	145	241	338	482
AC 8/16 (Kg)	723	506	362	217	/
AR 8/16 (Kg)	/	217	362	506	723
Ciment (Kg)	405				
Sable (Kg)	447				
Gâché (Kg)	2290	2294	2296	2305	2335
E/C	0.57	0.58	0.59	0.61	0.69

IV.4.5 Volume du gâché pour 12 éprouvettes cylindriques (10x20) cm³:

. Pour une éprouvette :

$$V = \pi \times R^2 \times H = 3.14 \times 5^2 \times 20 = 1570.80 \text{ cm}^3 = 1.57.10^{-3} \text{ m}^3$$

Pour 12 éprouvettes :

$$V = 1.57.10^{-3} \times 12 = 1.884.10^{-2} \text{ m}^3$$

On a effectué une majoration en volume de 20% sur les dépenses des différents constituants, les résultats sont regroupés dans le tableau (25) suivant:

Tableau IV.31: Composition du mélange pour 12 éprouvette cylindrique (10*20) cm² :

Composants	0% AR	30%AR	50%AC	70%AR	100%AR
L'eau (l)	5.286	5.326	5.386	5.586	6.286
AC 3/8 (Kg)	10.912	7.638	5.455	3.273	/
AR 3/8 (Kg)	/	3.273	5.455	7.638	10.912
AC 8/16 (Kg)	16.367	11.457	8.183	4.910	/
AR 8/16 (Kg)	/	4.910	8.183	11.457	16.367
Ciment (Kg)	9.150				
Sable (Kg)	10.134				
Gâché (Kg)	51.449	51.449	51.449	51.449	51.449

Tableau IV.32 : Composition du mélange d'un m³ béton recyclé adjuvanté.

Composant	Adjuvant	L'eau	AR 3/8	AR 8/16	Ciment	Sable	E/C
% adj	(Kg)	(l)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	
0%	0.00	278	482	723	405	447	0.69
0.5%	0.0475	254	482	723	405	447	0.63
1%	0.0915	247	482	723	405	447	0.61
1.5%	0.1425	238	482	723	405	447	0.59
2%	0.1900	216	482	723	405	447	0.53

Tableau IV.33: Composition du mélange pour 12 éprouvette cylindrique (10*20) cm² pour un béton recyclé adjuvanté:

composante	Adjuvant	L'eau	AR 3/8	AR 8/16	Ciment	Sable
% adj	(Kg)	(l)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)
0%	0.00	6.286	10.912	16.367	9.150	10.134
0.5%	2.0225	5.736	10.912	16.367	9.150	10.134
1%	4.0450	5.586	10.912	16.367	9.150	10.134
1.5%	6.0675	5.386	10.912	16.367	9.150	10.134
2%	8.0900	4.886	10.912	16.367	9.150	10.134

IV.5 Matériels et essais:

IV.5.1 Les essais sur le béton à l'état frais :

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidification par un liant de ciment, un squelette granulaire composé d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs graviers.

IV.5.1.1 Le malaxage : [NA EN 12390-2]

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- Introduire gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.
- Malaxer pendant 1 min et 30 secs.
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.
- Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désirée et visée. [R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman, 2009]

IV.5.1.2 Affaissement au cône d'abrams (slump test): [NA EN 12350-2]

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (NA EN 12350-2). C'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30cm de hauteur. Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égale volume. Chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1,6 cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie.

Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de va et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse; des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettent de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement.

La valeur de l'affaissement est exprimée en cm [R.DAUPAIN, J.-C. Saint .A, 2009]. Dans notre étude on a fixé l'affaissement à : Aff. entre 5 et 6cm.

IV.5.1.3 Teneur en air : [NA EN 12350-7]

✓ But de l'essai :

Il s'agit de mesurer la teneur en air occlus du béton frais c.-à-d. pour connaître la teneur en air d'un béton quelconque.

✓ Principe :

L'aéromètre travaille selon le principe de la loi de **BOYLE - MARIOTTE**. La mesure du pourcentage d'air occlus d'un béton frais est basée sur le fait que seul l'air occlus est compressible.



Figure IV.8 : *Aéromètre à béton 8 litres.*

✓ **Mode opératoire :**

- Peser la cuve vide par la balance et noté M_1 .
- Introduire le béton dans la cuve .
- Placer la cuve sur la table vibrante et vibrer pendant 15 secondes en complétant la quantité de béton .
- Araser la surface supérieure à l'aide d'une règle biseautée, avec un mouvement de sciage .
- Nettoyer les bords de la cuve.
- peser la cuve pleine par la balance et noté M_2 pour calculer la masse volumique apparente.
- Mettre le chapeau sur la cuve, et serrer à l'aide des crochés.
- Régler l'aiguille à 100%.
- Vider l'air occlus jusqu'au niveau rouge.
- Régler l'aiguille à 0% à l'aide du bouton noir.
- Appliqué une pression à l'aide du bouton vert jusqu'à la stabilisation de l'aiguille.
- Après finir le mode opératoire, lire le pourcentage de l'air occlus sur l'écran.

IV.5.1.4 Vibration : [NA EN 12390-2]

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- On commence par piqué de vibration qui utilise pour vibrer le béton dans l'éprouvette dans 3 étapes et 3 couches à chaque fois en frappe 25 frappes avec le même rythme à fin d'homogénéiser la forme de l'échantillon.
- On fait la vibration sur la table vibrante pendant 20s.
- Peser 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par peinture et conservées dans l'eau.

IV.5.2 Les essais sur béton durci :

Les essais sur béton durci sont faits pour la détermination des performances mécaniques du béton de manière destructive et non-destructive au moyen des essais les plus courants

IV.5.2.1 Durcissement de béton :

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progressive du ciment.

Il est bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le béton passe ceci peut être expliqué par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décroît elle-même avec le temps.

IV.5.2.2 Mode de conservation de béton : [NA EN 12390-2]

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton [DREUX.G et FESTA.J, 1998].

Notre béton est conservé dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

IV.5.3 Détermination de la résistance par les essais non destructifs :

Le béton est l'un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction, leur résistance a été considérée comme la qualité essentielle.

Le contrôle de la résistance des bétons est un problème de première importance pour les constructeurs, ils développent des méthodes et des matériels pour s'appuyer uniquement sur les essais non destructifs (ultrason, scléromètre).

Au moyen des essais non destructifs (Ultrason, scléromètre), 7j, 14j et 28 jours, on évalue l'effet des différents types d'agrégats sur la réponse mécanique d'un béton testé.

IV.5.3.1 Ultrason [NA EN 12504-4]

✓ Principe d'essai :

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur, les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.



Figure IV.9: Appareil ultrason.

✓ Principe de fonctionnement :

L'appareil ultrason permet de mesurer le temps de passage des ondes ultrasoniques longitudinales à travers le béton, ce temps indiqué par un affichage digital. [NETTAH Zouhir et MESSADI Djamel, 2006]

L'appareil ultrason se compose de l'instrumentation électrique caractérisée par :

- Un affichage digitale ou on peut lire le temps de propagation des ondes mesurées (μs).
- Deux sondes : un émetteur et l'autre un récepteur de fréquence.
- Deux câbles pour le branchement des ondes.
- Une éprouvette cylindrique pour l'étalonnage ($42.5\mu\text{s}$).
- Un alimentaire en charge (batterie).

On branche les deux sondes aux bornes de l'appareil à l'aide d'un câble.

On fait l'étalonnage de l'appareil, on enduit les deux faces de l'éprouvette étalonnée de vaseline.

On déduit la vitesse égale à (d/t) exprimé le plus souvent en (Km/s).

IV.5.3.2 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2]

✓ Description de l'essai :

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la " dureté au choc" du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).

Cet indice, reporté sur abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé.



Figure IV.10: Appareil Scléromètre.

✓ Mode opératoire :

On place l'éprouvette entre les plateaux de la presse et on applique la vitesse constante (0.5 MPa) jusqu'à la charge de 10KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal 9 coups. La distance entre les points d'essai doit être au moins de (20mm), pour éviter l'influence du compactage superficiel du béton.

Pour chaque zone d'essai, on établit la moyenne des lectures au scléromètre après l'élimination des valeurs très faible au très fortes.

Pour calculer la moyenne on a :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}$$

S : dureté au choc d'élément.

Si : dureté de la zone de l'élément.

n : nombre de zone d'essai sur l'élément

IV.5.3.3 La méthode combinée :

Dans certains cas en combine les deux méthodes, essais sclérométrique et auscultation sonique, ce qui permet de faire en suite l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé [DREUX.G et FESTA.J, 1998].

Ces techniques ont été évoluées au cours des dernières années en particulier dans le cas de l'évaluation construction.

Toutes les méthodes disponibles pour l'évaluation du béton in-situ sont limitées, leur fiabilité est souvent mise en doute, et la combinaison de deux ou plusieurs des techniques est en train de devenir une solution à tous ces problèmes.

La combinaison de plusieurs techniques d'essais non destructifs est souvent mise en manière empirique, en combinant deux techniques les plus souvent utilisées pour améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression du béton; le principe est basé sur les corrélations entre les mesures observées et la propriété désirée.

La résistance à la compression du béton est généralement la propriété la plus prisés. Ceci a conduit au développement d'une méthode qui combine l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation ultrasonore.

L'objectif de ces tests combinés est d'évaluer la résistance à la compression du béton coulé sur place, la meilleure approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à compression d'échantillon normalisée de laboratoire, dans certains cas les échantillon ne sont pas disponibles, alors un nombre de carottes doivent être prisés pour établir cette relation. La méthode normalisée combinée plus largement utilisée est la méthode mise au point par SonReb RILEM.

L'amélioration de la fiabilité des mesures s'explique par la prise en compte l'effet contradictoire des facteurs de variabilité de certaines propriétés de chacune des deux techniques (impulsion ultrasonique de la vitesse et le scléromètre).

[DEGHFEL Moussa, 2010]

On a un exemple d'une formule combinée proposée par FERET qui associe le résultat de l'essai à l'ultrason et celui du scléromètre :

Avec :

S : l'indice sclérométrique.

$$R_c = \left(\frac{S}{3,64 + 0,0235 * S - 0,56 * v} \right)^2$$

V : la vitesse de propagation (mm/μs).

R_C: la résistance à la compression du béton (bars).

IV.5.4 Détermination de la résistance par les essais destructifs :

IV.5.4.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement): [NA EN 12390-3]

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

IV.5.4.2 La presse hydraulique : [NA EN 12390-3]

La presse utilisée répond aux normes NA EN 12390-3, elle comporte deux parties :
Unité de commande constituée de :

- Un cadran pour valeur maximal de charge ;
- Interrupteur principal ;
- Commande de réglage de la vitesse ;
- Clapet de charge-décharge.

Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Figure IV.11: Presse hydraulique capacité 3000 KN.

IV.5.4.3 Essai d'écrasement [NA EN 12390-3]:

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000KN, à une vitesse constante (0.5KN/S) des éprouvettes cylindriques de dimensions (10x20) cm. Celles-ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

On calcule la résistance à la compression par la relation

$$R_c = F/S$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2).

IV.5.4.4 Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]

La norme (EN 12390-6) précise en particulier les dispositions de mise en charge. L'éprouvette est placée horizontalement entre les plateaux de la presse le contact des génératrices supérieure et inférieure avec les plateaux est assuré l'intermédiaire de bandes de mesures en contreplaqué Okoumé.

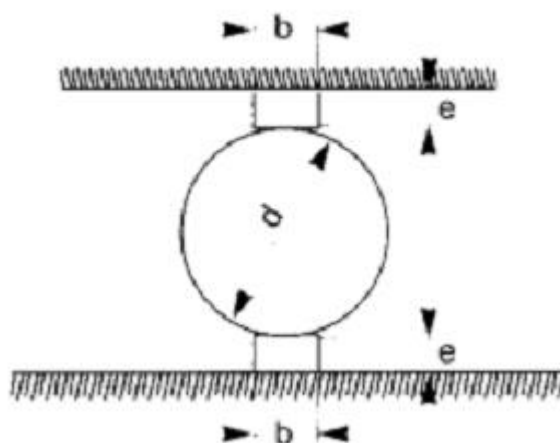


Figure IV.12 : Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage. [DREUX.G et FESTA.J, 1998]

Avec :

$$b = (0.09 \pm 0.01) d$$

$$e = 4 \pm 1 \text{ mm.}$$

d : diamètre de l'éprouvette.

Cet essai nécessite que les éprouvettes présentent des génératrices bien rectilignes. La mise, en charge s'effectue à la vitesse de **0,05 MPa/s** avec une tolérance de $\pm 0,1$ MPa par seconds.

Expression des résultats :

$$F_T \text{ (en MPa)} = \boxed{0,637 F/dh} \text{ d'après la formule de base } \boxed{F_T = 2F/\pi dh}$$

Avec F = charge de rupture en newtons,

Avec d = diamètre de l'éprouvette, en mm;

Avec h = hauteur de l'éprouvette, en mm [DREUX.G et FESTA.J, 1998].

IV.5.4.5 Module d'élasticité dynamique :

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique (E_d) selon l'expression suivante :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Dans laquelle :

V : représente la vitesse des ondes, exprimée en km/s.

γ : la masse volumique du béton, exprimée en kg/m^3

ν : coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0.15 pour un béton de haut résistance et de 0.30 pour un béton de faible résistance.

E_d : module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa [BENCHERAI Saïd, 2007].

IV.6 Mesure le taux d'absorption d'eau [NA EN 1097]

✓ **Objet :**

La présente norme a pour objet d'exposer la technique de la mesure du coefficient d'absorption d'eau des agrégats.

✓ **Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont de forme cylindrique, cubique ou prismatique.

Dans le cas des carottes, le diamètre minimal doit être de 50mm, et l'élancement de 1 à 4.

Dans notre travail nous avons utilisés les tiare-cylindres de l'éprouvette obtenue en on a coupé l'éprouvette en trois coups avant de la compression.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesés effectués à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15heures à l'étuve pour éteindre cette masse).

Par la suite la précision admise sur les pesées est de 1/1000.

✓ **Mode opératoire :**

On note la masse M_1 (en gramme) de chaque éprouvette sèche.

- Au temps t , on place les éprouvettes dans l'eau potable jusqu'au quart de leur hauteur de façon que l'eau remonte perpendiculairement au lit de carrière.
- À $[t+1 \text{ heures}]$, on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour que le niveau atteigne la moitié de la hauteur des éprouvettes.
- À $[t+22\text{heures}]$ on ajoute de l'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient complètement immergées.
- À $[t+48\text{heures}]$, les éprouvettes sont sorties de l'eau, rapidement essuyées à l'aide d'un chiffon ou d'une peau de chamois humide, puis pesées, soit M_2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique

[AYADL.B et HAMMACHE.Y, 2012].

- **Expression des résultats :**

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est $M_2 - M_1$.

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A_{bs} = (M_2 - M_1) / M_1$$

A_{bs} : taux d'absorption.

M_1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M_2 : masse d'éprouvette saturée d'eau

Chapitre V :

Résultats et

discussion

Partie A : Béton recyclé

V.1 Introduction :

On procède dans ce qui suit à l'analyse et l'interprétation, après présentation des résultats que nous avons obtenus dans notre étude. On discute tous les propriétés étudiés: (La masse volumique, la porosité, E/C, l'absorption d'eau, l'indice sclérométrique, la vitesse de propagation des ultrasons et les résistances à l'écrasement). Les paramètres pris en compte sont :

1. L'influence de l'âge du béton.
2. Le taux de substitution des agrégats recyclés.
3. L'influence du pourcentage de l'adjuvant sur le béton recyclé.

V.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations :

Rappelons que le but de notre travail est de voir l'effet des différents types d'agrégats sur le comportement mécanique d'un béton. Pour atteindre les objectifs on a adoptée pour les essais proposés la méthodologie suivante :

Il fallait préparer des gâchées pour confectionner **108** éprouvettes de **(10x20) cm³** dont :

- La composition a été déterminé par la méthode des volumes absolue.
- Les pourcentages des agrégats recyclés retenus sont : **(0%, 30%, 50%, 70% et 100%)**.
- Les pourcentages d'adjuvant (**MEDAFLUID SF 150**) sont : **(0%, 0,5%, 1%, 1,5% et 2%)**, pour un béton recyclé a **100%** de substitution.
- Les essais étant exécuté à : **7 j, 14 j, et 28 jours**.

V.3 La nomination des bétons :

Tableau V.1 : Les différents types des bétons utilisés (recyclé, témoins).

Type de béton	% Agrégat recyclé	%Agrégat concassé
BT	0	100
B₃₀	30	70
B₅₀	50	50
B₇₀	70	30
BR	100	0

V.4 Etat frais :

Tableau V.2: Propriétés des différents types des bétons à l'état frais (recyclé, témoins).

Les types des bétons	La masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	La masse volumique absolue ρ_{abs} (kg/m ³)	Affaissement Aff. (cm)	Rapport E/C efficace	Teneur en air (%)	Compacité de béton C(%)
BT	2399	2447	6	0.57	1.95	98.05
B ₃₀	2359	2408	5	0.58	2.05	97.95
B ₅₀	2338	2401	5.5	0.59	2.60	97.4
B ₇₀	2315	2376	5.5	0.61	2.60	97.4
BR	2267	2342	6	0.69	3.20	96.8

V.4.1 Masse volumique :

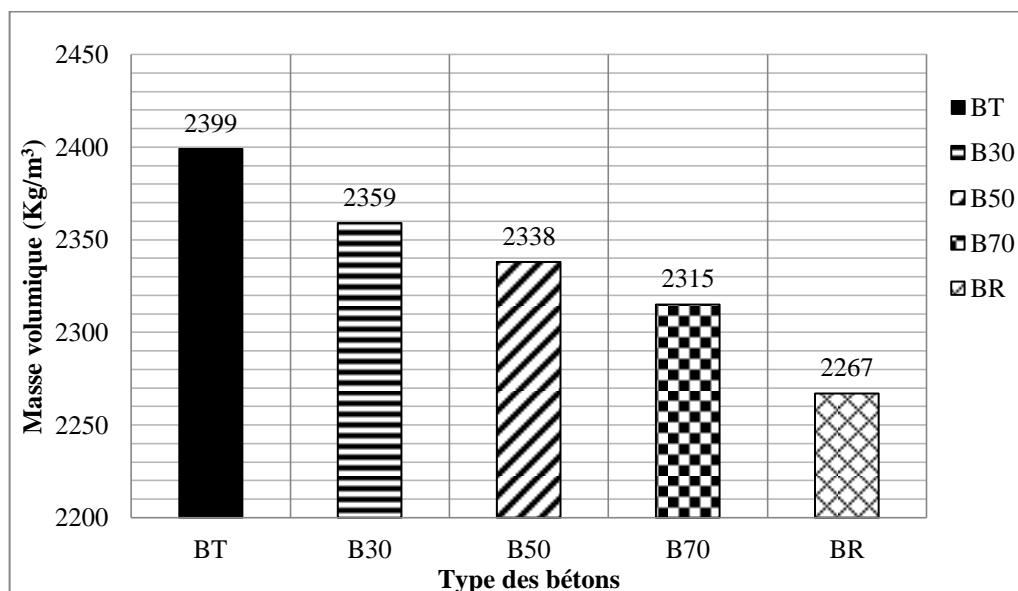


Figure V.1: La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons (recyclé, témoins).

D'après la figure [V-1], On constate, que la masse volumique des bétons avec différents pourcentage d'agrégat recyclé est inférieure en comparaison avec le béton témoin, la valeur maximale enregistrée est obtenue avec le béton témoin ; ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande environ (2400 Kg/m³) par rapport aux autres types des bétons (recyclé).

Le béton avec 100 % agrégats recyclé (BR) donne une valeur de masse volumique très faible en comparaison avec le béton témoin environ (2267, 2399 Kg/m³) respectivement.

L'effet de substitution des agrégats recyclés présente une diminution la masse volumique à l'état frais très appréciable.

Le taux de réduction de la masse volumique de béton **100% recyclé (BR)** donne une diminution de masse volumique d'ordre **5%** par rapport au béton témoin (**BT**). Ceci peut être attribué à la nature des agrégats, notamment les granulats recyclés qui ont une porosité élevée et en teneur en air importante, en comparaison avec les agrégats concassés (dense, compacte).

Selon des études précédentes faites la masse volumique apparente du béton recyclé à l'état frais est significativement légère de (**2120 Kg/m³**) comparativement à un béton à base de granulats naturels (**BT**) (**2400 Kg/m³**) [Topcu et Guncan, 1995, Katz, 2003].

Les résultats trouvés dans le présent travail sont corrélations avec des travaux antérieurs on ce qui concerne la réduction de la masse volumique des bétons à base des agrégats recyclés.

V.4.2 Teneur en air:

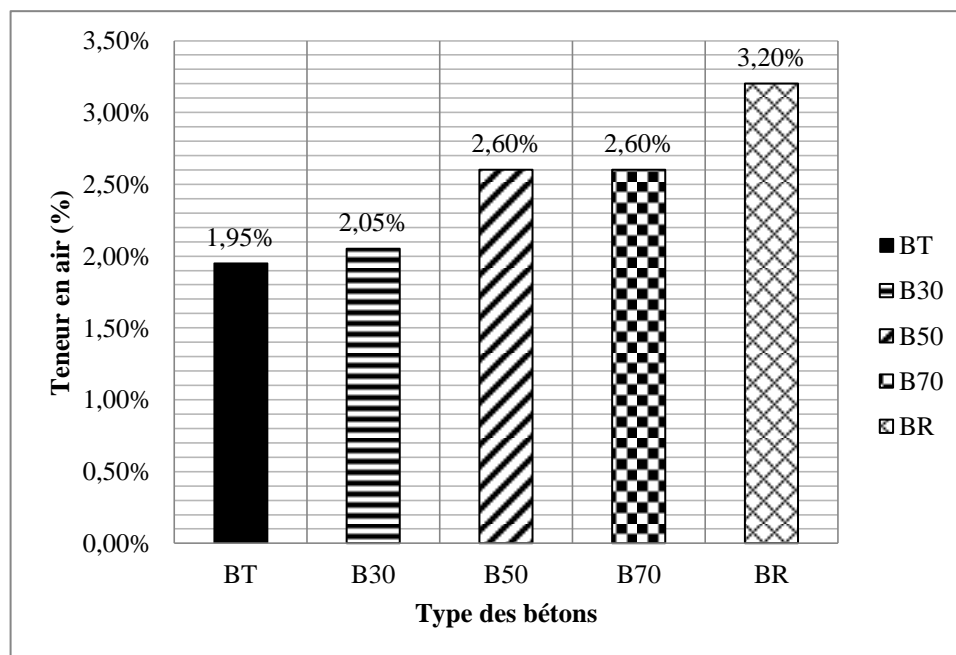


Figure V.2: La variation de la teneur en air en fonction des différents types des bétons.

L'utilisation des agrégats recyclés dans le béton conduit à une augmentation de l'air occlus, cette augmentation est présentée dans la figure [V.2], qui montre la variation du teneur en air en fonction des différents pourcentages d'agrégat recyclé.

On observe que la valeur obtenue de teneur en air est plus élevée pour le béton avec agrégats recyclés en comparaison avec le béton témoin (**BT**), la valeur maximale enregistrée est obtenue avec le béton de **100% agrégat recyclé (AR)** (**3.20%**).

Le béton témoin donne une teneur en air très faible on comparaison avec les autre types recyclé (1.95, 2.05, 2.60, 2..60 et 3.20) respectivement.

L'effet des taux agrégats recyclés est remarquable du fait que le taux d'absorption est élevé.

L'augmentation de la teneur en air du béton 100% recyclé (AR) d'ordre 40% par rapport au béton témoin (BT); Ce béton est moins dense et plus poreux par rapport aux autres types de béton testés.

Selon des études précédentes faites la teneur en air du béton recyclé à l'état frais est légèrement supérieure (4 à 5,5%) que le béton à base de granulats 100% naturel.

[Katz, 2003].

Les résultats trouvé dans le présent travail sont corrélations avec des travaux antérieurs on ce qui concerne l'augmentation de teneur en air des bétons a base des agrégats recyclés.

V.4.3 Rapport E/C :

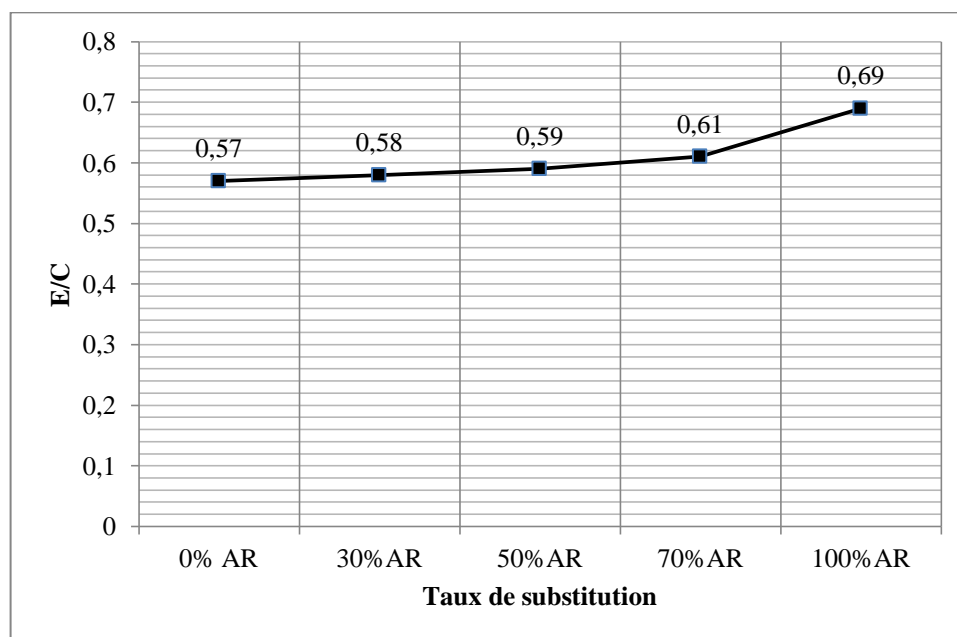


Figure V.3: La variation du rapport (E/C) en fonction du taux de substitution des agrégats recyclés

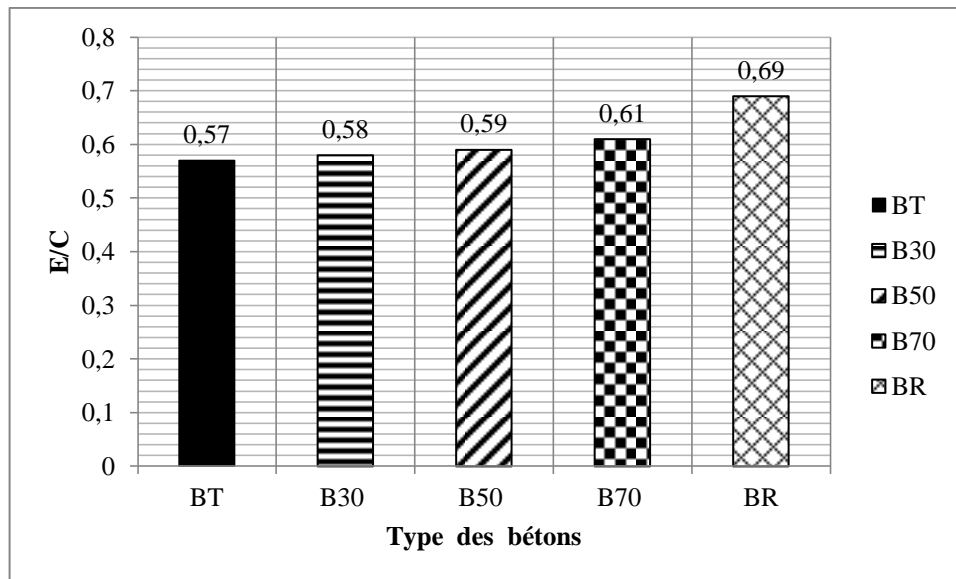


Figure V.4: La variation du rapport (E/C) en fonction des différents types des bétons.

L'utilisation des agrégats recyclés dans le béton conduit à une augmentation de la quantité d'eau dans le malaxage. Les figures [V.3, V.4], montrent la variation du rapport (E/C) en fonction des différents pourcentages des agrégats recyclé.

On observe que la valeur obtenue du rapport (E/C) est plus élevée pour le béton avec agrégats recyclé en comparaison avec le béton témoin (**BT**), la valeur maximale enregistrée est obtenue avec le béton **100%** de substitution ; ce béton donne une valeur supérieure à celle du béton témoin.

Le besoin en eau varie en fonction du taux de substitution par des agrégats recyclés **B₃₀**, **B₅₀**, **B₇₀** et **BR** nécessitent un rapport un rapport E/C de valeur (**0.58**, **0.59**, **0.6** et **0.69**) respectivement.

La différence est de l'ordre de **18%** entre **BR 100 %** de substitution et **BT 0%** de substitution.

C'est l'effet des taux agrégats recyclés, leurs porosités, leurs compacités; ces agrégats recyclés absorbent beaucoup plus d'eau.

Selon des études précédentes faites pour un même affaissement qu'un béton ordinaire la quantité d'eau ajoutée pour le cas des agrégats recyclé est approximativement de l'ordre de **5%**. [Rao, 2005], donc le rapport E/C augmente.

Les résultats trouvé dans le présent travail sont corrélations avec des travaux antérieurs on ce qui concerne l'augmentation de teneur en air des bétons a base des agrégats recyclés.

V.5 Etat durci :

V.5.1 Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés :

Tableau V.3: Taux d'absorption d'eau des différents bétons étudiés.

Les types des bétons	Taux d'absorption d'eau des bétons A(%)						
	Ep 1	Ep 2	Ep 3	Ep 4	Ep 5	Ep 6	moy
BT	6,23	6,16	6,19	6,53	6,10	6,18	6,23
B ₃₀	7,36	6,99	6,93	6,95	6,84	6,88	6,99
B ₅₀	7,95	8,09	8,09	7,97	7,76	8,25	8,02
B ₇₀	8,09	8,40	8,50	8,31	8,25	8,19	8,29
BR	8,87	9,56	8,92	8,66	9,02	10,16	9,20

Tableau V4 : Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200) mm		Rc MOY (MPa)
		T (μ s)	V (km/s)	
BT	2372	50.0	4.000	24.506
B ₃₀	2338	52..8	3.671	23.267
B ₅₀	2313	53.7	3.725	21.242
B ₇₀	2274	55.1	3.630	20.302
BR	2231	54.2	3.690	18.842

Tableau V.5: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200mm)		Scléromètre		Rus combiné (MPa)	Rc MOY (MPa)
		T (μ s)	V (km/s)	Is	Rs (MPa)		
BT	2385	48.3	4.138	33	23	24.74	28.037
B ₃₀	2350	51.4	3.891	32	22	20.91	28.028
B ₅₀	2315	52.1	3.842	31	20	19.55	25.960
B ₇₀	2287	52.6	3.800	28	16	16.65	25.582
BR	2248	54.2	3.690	30	18	17.33	22.969

Tableau V.6: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200mm)		Scléromètre		E_d (MPa)	Rus** combiné (MPa)	Rc_{MOY} (MPa)	Rf_{MOY} (MPa)
		T (μ s)	V (km/s)	Is	Rs* (MPa)				
BT	2384	49.3	4.056	32	22	29134	22.77	32.238	2.79
B ₃₀	2348	49.9	4.011	36	28	28061	25.83	30.122	2.45
B ₅₀	2321	50.5	3.962	35	26	27065	24.33	29.104	2.64
B ₇₀	2307	51.0	3.924	29	17	26388	18.64	27.597	2.60
BR	2250	53.4	3.749	27	15	23492	15.41	26.172	2.85

(*) Courbe d'indice scléromètre en fonction de la résistance mécanique. [DREUX.G et FESTA.J, 1998]

(**) Formule combinée proposée par FERET [DEGHFEL MOUSSA, 2010].

V.5.2 Taux d'absorption d'eau [A]:

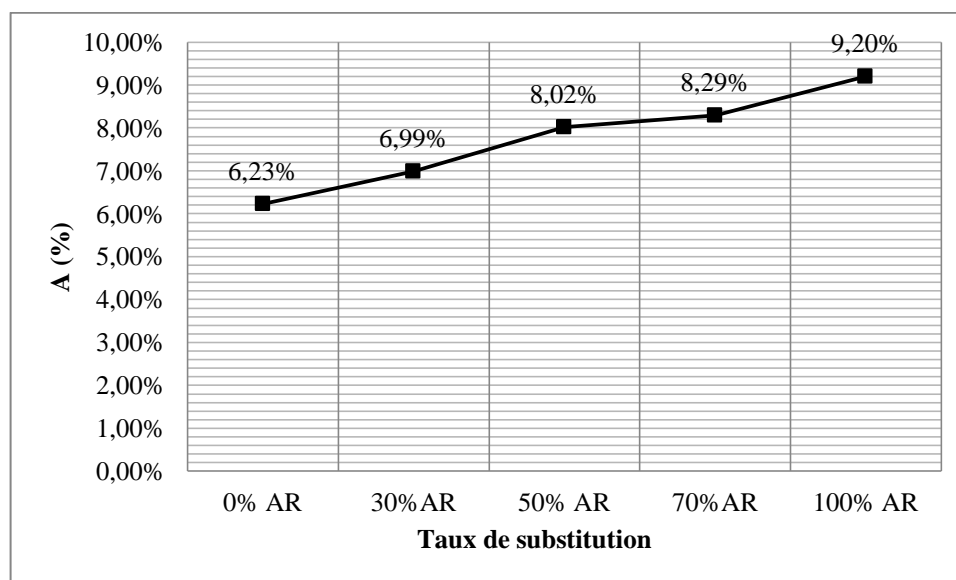


Figure V.5: La variation d'absorption d'eau pour les différents types des bétons.

D'après la figure [V.5], on constate la variation du taux d'absorption d'eau en fonction du pourcentage des agrégats recyclés.

On observe que le taux d'absorption d'eau croît avec l'augmentation du pourcentage des agrégats recyclés, selon une relation proportionnelle, le béton témoin (BT) donne un taux d'absorption le plus faible de (6,23%) par rapport les autres types des bétons.

Le béton B₃₀ donne une valeur du taux d'absorption comparable à celui du béton témoin (BT) (6,99%, 6,23%) respectivement.

Le taux d'absorption du béton (BR) 100% agrégats recyclé est supérieur par rapport les autres types des bétons; d'une valeur environ (9.20%), cette valeur permet de voir un béton perméable avec porosité élevé, c'est un béton moins compact et plus poreux par rapport au béton témoin.

On observe, que l'effet des agrégats recyclé sur le béton utilisés; c'est un effet négatifs car à 0 % des agrégats recyclés (BT), le taux d'absorption a une valeur minimum de (6.23%) par rapport béton 100% agrégats recyclé (BR) (9.20%). Donc les agrégats recyclés augmente le taux d'absorption jusqu'à 32%, est donne un béton perméables, moins résistant aux agents agressif et plus poreux (compacité faible), par ce qu'il y'a des microfissures dans la matrice du béton.

Selon des études précédentes faites sur l'absorption d'eau du béton recyclé est légèrement supérieure (2 à 12%) comparativement à un béton à base de granulats 100% naturel. [Gilpin et al., 2004; Khalaf et al., 2004].

Les résultats trouvé dans le présent travail sont corrélations avec des travaux antérieurs on ce qui concerne l'augmentation de l'absorption d'eau des bétons a base des agrégats recyclés.

V.5.3 Masse volumique :

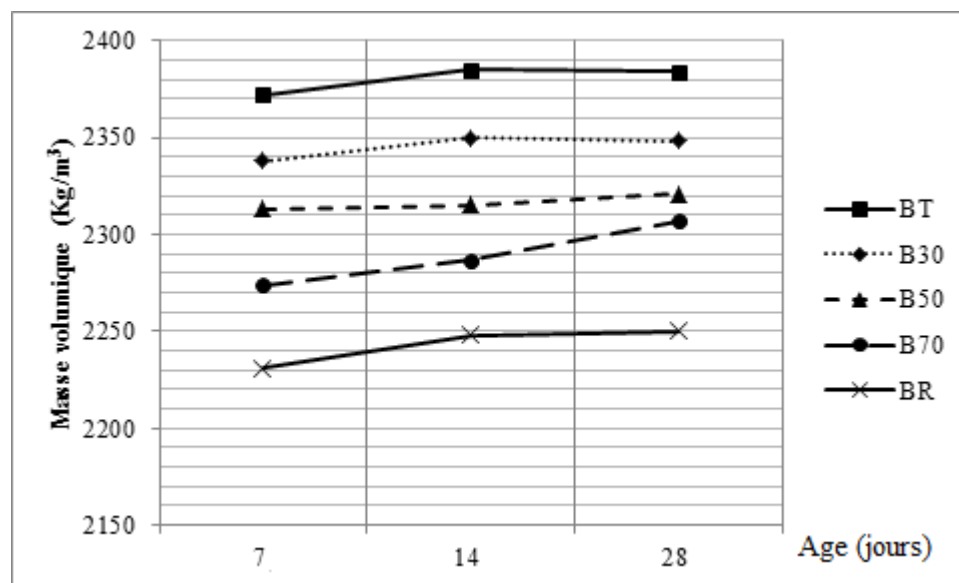


Figure V.6 La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28).

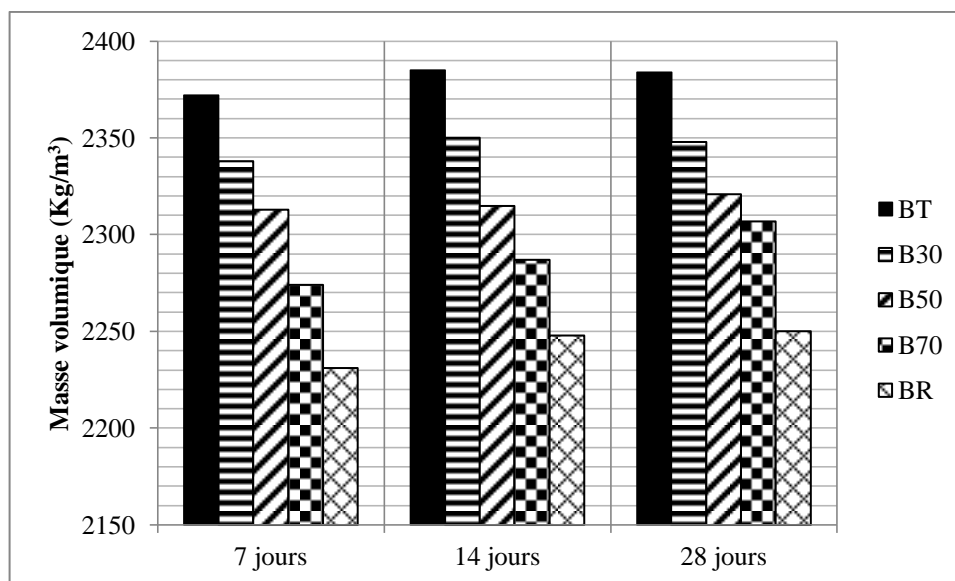


Figure V.7: La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28).

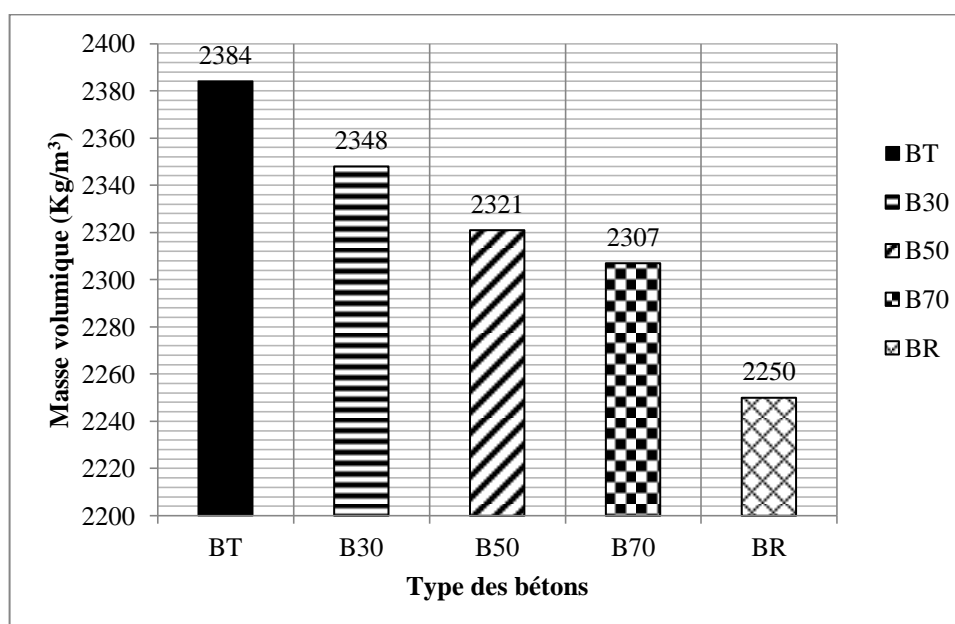


Figure V.8: La masse volumique des différents types des bétons à 28 jours.

Les figures [V.6, V.7], qui représentent le développement de la masse volumique à l'état durci des différents bétons (bétons recyclés, témoin) en fonction de l'âge du béton.

D'après la figure [V.6], on observe un même développement de la masse volumique du béton témoin, béton avec différents pourcentage d'agrégat recyclé à différents âges [7, 14 et 28 jours].

D'après la figure [V.8], On note, que la masse volumique des bétons avec différents pourcentage d'agrégat recyclé est inférieure en comparaison avec le béton témoin, la valeur optimale enregistrée est obtenue avec le béton témoin ; ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande (**2384 Kg/m³**) à 28 jours par rapport aux différents types de béton en agrégats recyclé.

Le béton avec **100 %** de remplacement agrégats recyclé (**BR**) donne la valeur de masse volumique la plus faible en comparaison avec le béton témoin environ (**2250 Kg/m³**) à 28 jours.

L'effet de substitution des agrégats recyclé présente une diminution constatable de la masse volumique des mélanges proposés à base d'agrégats recycle.

La réduction de la masse volumique de béton **100%** recyclé (**BR**) donne une diminution de masse volumique d'ordre **6%** par rapport au béton témoin (**BT**); Ceci dû à la nature d'agrégat.

Les agrégats récupérés d'ancien béton (BR) caractérisent par un taux d'absorption élevée ce qui donne une matrice poreuse du béton.

Le béton (**B₃₀**, **B₅₀**, **B₇₀** et **BR**) donne des faibles masses volumiques à 28 jours environ (**2348, 2321, 2307 et 2250 Kg/m³**) respectivement, par rapport au béton témoin (BT) environ (**2400 Kg/m³**).

Les agrégats récupérés d'ancien béton caractérisent par un taux d'absorption élevée ce qui donne une matrice poreuse du béton.

V.5.4 La résistance à la compression :

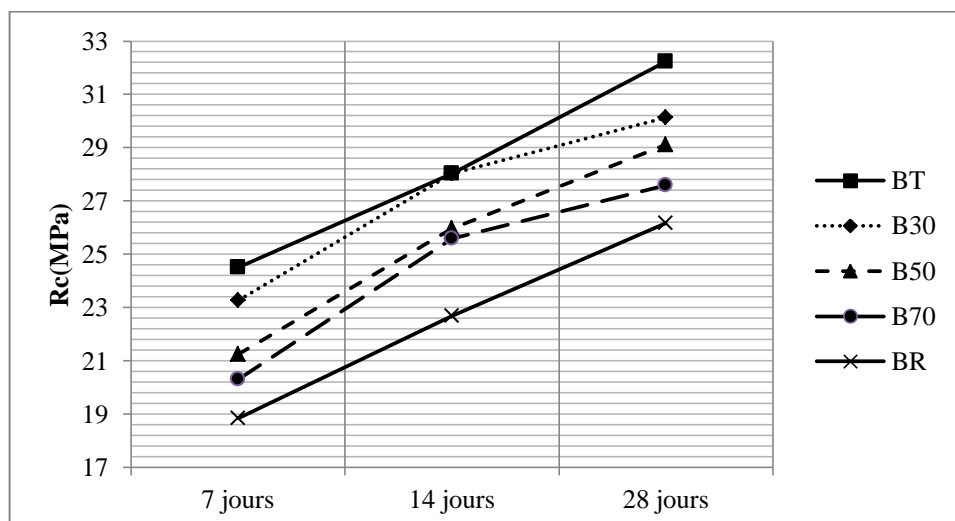


Figure V.9: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge des différents bétons (témoin, recyclé).

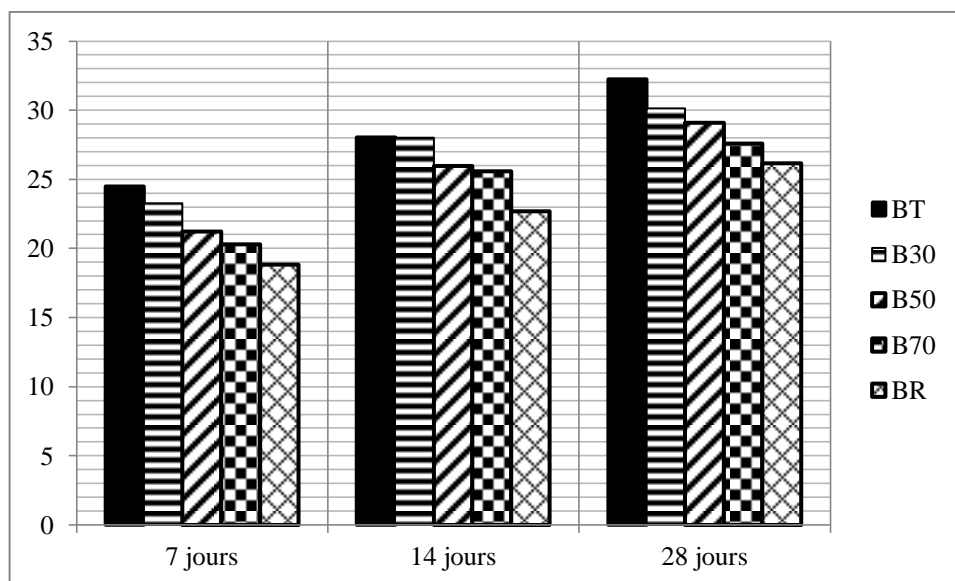


Figure V.10: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge des différents bétons (témoin, recyclé).

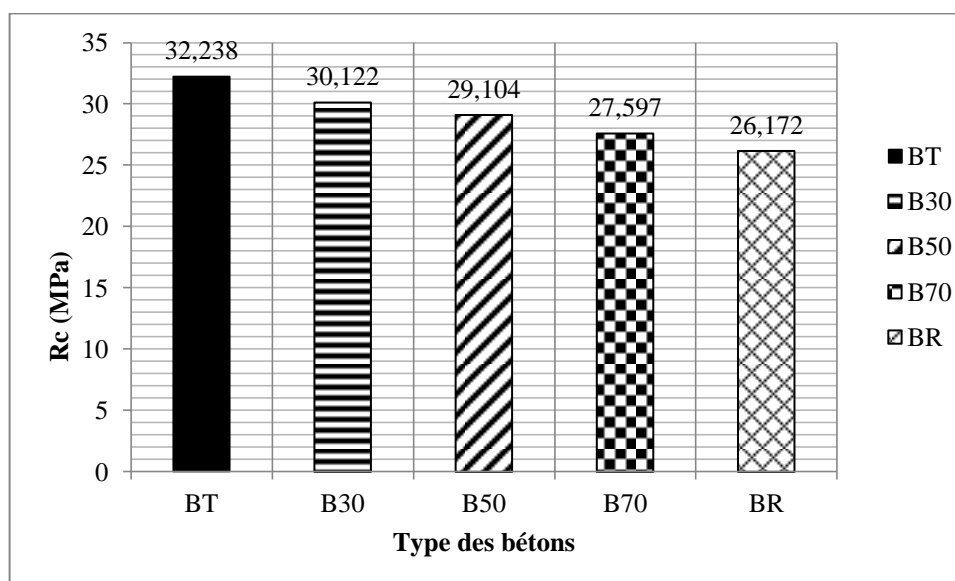


Figure V.11: Résistance à la compression en fonction du pourcentage des agrégats recyclés à 28 jours.

D'après les figures [V.9 à V.11], qui présentent le développement de la résistance à la compression (R_c) en fonction des différents pourcentages des agrégats recyclés et l'âge de béton. Sait une progression normale.

Généralement, les valeurs obtenues de la résistance à la compression (R_c) sont plus faibles pour un béton avec **100 %** agrégats recyclés (**BR**) en comparaison avec le béton

témoin (**BT**), cependant pour les autres types des bétons la valeur maximale enregistrée est toujours obtenue pour (**béton témoin**) c.-à-d. sans substitution.

Ce béton donne une meilleure résistance à la compression à 28 jours environ (**32 MPa**) par rapport aux autres types de béton (béton avec **30% ,50% ,70% et 100%** agrégats recyclé).

Le béton avec **100%** agrégats recyclés (**BR**) donne une résistance à 28 jours très faible (**26,17MPa**) en comparaison avec (**BT, B₃₀, B₅₀, et B₇₀**). (**32. 30,12. 29,10. et 27,59 MPa**) respectivement.

On note une diminution de la résistance à la compression du béton **100%** recyclé (**BR**) de l'ordre de **19%** par rapport au béton témoin (**BT**)

Le béton avec **30 %** agrégats recyclés (**B₃₀**) donne une valeur de résistance à la compression (**R_c**) à 28 jours similaire à celui du béton témoin (**BT**) (**30,12 MPa**).

Si on augmente le taux de substitution à un dosage supérieure à **50%** d'agrégat recyclé (**70 et 100 %**) on remarque une diminution et chute sur la résistance (**27,59. 26,17 MPa**) respectivement.

On constate l'effet de substitution des agrégats recyclés remarquable sur le développement de la résistance (**R_c**). Ceci peut être attribué à la nature des agrégats, notamment les granulats recyclés qui ont une porosité élevée et en teneur en air importante, et moins de compacité en comparaison avec les agrégats concassés (dense, compacte).

Selon des études précédentes faites sur la résistance à la compression du béton recyclé est légèrement supérieure (**10 à 30%**) comparativement à un béton à base de granulats 100% naturel. [**Quebaud, 1996**].

Les résultats trouvés dans le présent travail sont corrélations avec des travaux antérieurs on ce qui concerne la réduction de la résistance mécanique des bétons à base des agrégats recyclés.

V.5.5 La résistance à la traction par fendage : [Rt]

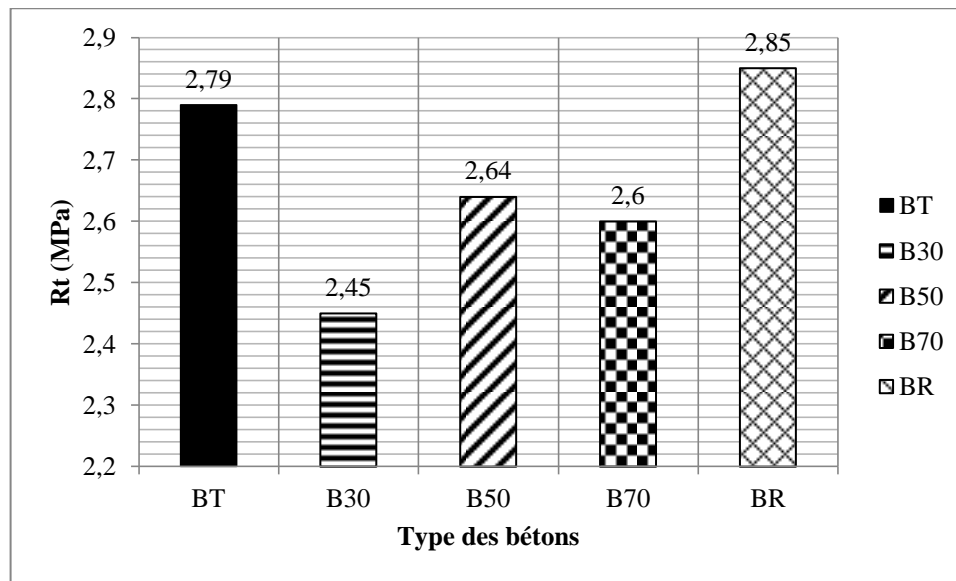


Figure V.12: La variation de la résistance à la traction par fendage pour les différents types des bétons à 28 jours.

D'après la figure [V.12], qui présentent la variation de la résistance à la traction par fendage en fonction des différents pourcentages des agrégats recyclés à 28 jours.

Généralement, la résistance à la traction par fendage (**Rt**) est plus faible pour un béton avec 30 % d'agrégats recyclés (**B₃₀**) en comparaison avec le béton témoin, cependant pour les autres types de béton la valeur maximale enregistrée obtenue avec (**BR**) à 100% de remplacement.

Ce béton donne une meilleure résistance à la traction par fendage à 28 jours environ (**2,85 MPa**) par rapport aux autres types du béton (**BT, B₃₀, B₅₀, B₇₀ et BR**) (**2,79, 2,45, 2,64, 2,6 MPa**) respectivement.

La résistance à la flexion par fendage du (**BR**) donne une légère augmentation de la résistance d'environ 2% par rapport au béton témoin (**BT**).

D'après la figure [V.12], on constate l'effet de substitution des agrégats recyclés remarquable sur le développement de la résistance à la traction par fendage (**Rt**).

Selon des études précédentes faites sur la résistance à la traction par flexion et par fendage du béton recyclé est légèrement supérieure (15 à 20%) comparativement à un béton à base de granulats 100% naturel. [Rao, 2005]. Dans une autre étude, où on a déterminé la résistance à la traction directe du béton, il a été constaté que cette différence dans la résistance à la traction du béton à base de granulats recyclés et du béton de référence à 28 jours est inférieure à 10% [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002].

Les résultats trouvés dans le présent travail sont corrélés avec des travaux antérieurs on ce qui concerne la réduction de la résistance à la traction par flexion des bétons à base des agrégats recyclés.

V.5.6 Les résultats de scléromètre : [R_s]

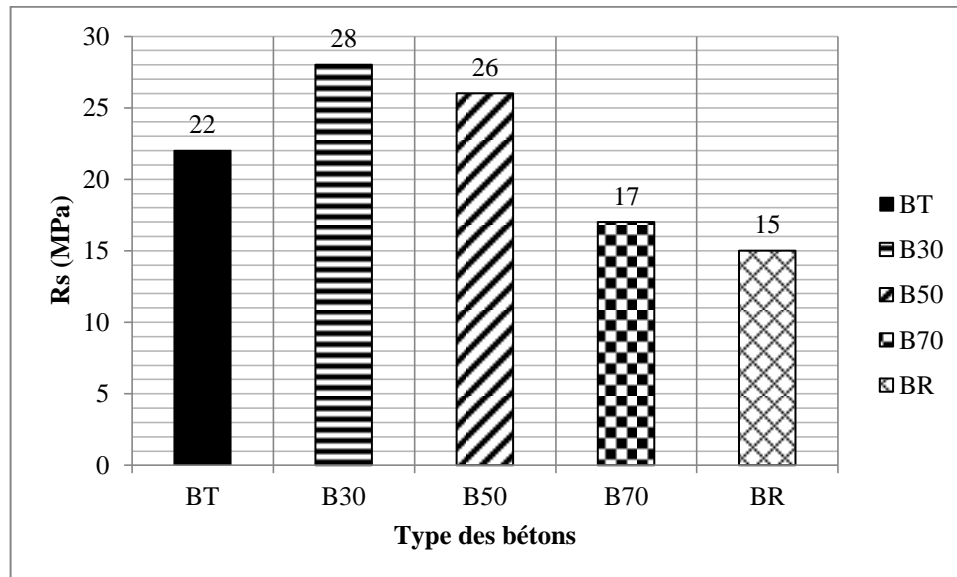


Figure V.13: La variation de la résistance de scléromètre (R_s) pour les différents types des bétons à 28 jours.

Les figures [V.13], montre que les valeurs de la résistance de scléromètre (R_s) de béton (**B₃₀**) sont supérieures par rapport béton témoin (**BT**); ce béton donne une meilleure résistance de scléromètre (R_s) à 28 jours environ (**28 MPa**) par rapport aux autres types des bétons à base d'agrégats recyclés.

On constate que les bétons (**B₃₀**, **B₅₀**, **B₇₀** et **BT**) donnent les meilleurs résultats (**28, 26, 17 et 22 MPa**) respectivement par rapport au béton (**BR**) (**15 MPa**) à 28 jours.

On note que le béton (**B₃₀**) donne une augmentation de résistance de **21 %** par rapport au béton témoin (**BT**) et de **46 %** par rapport un béton (**BR**).

Ce béton (**B₃₀**) présente des meilleures performances de (R_s) à 28 jours par rapport les autres types des bétons testés.

V.5.7 Les résultat d'ultrason : [V]

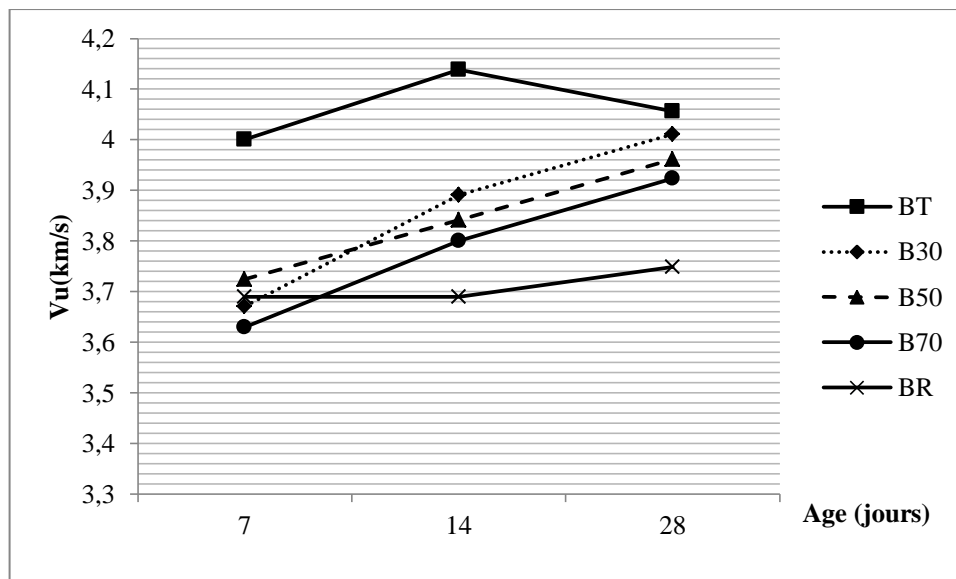


Figure V.14: vitesse de propagation d'ultrason (V) pour les différents types du béton (BT, B recyclé) en fonction de l'âge du béton.

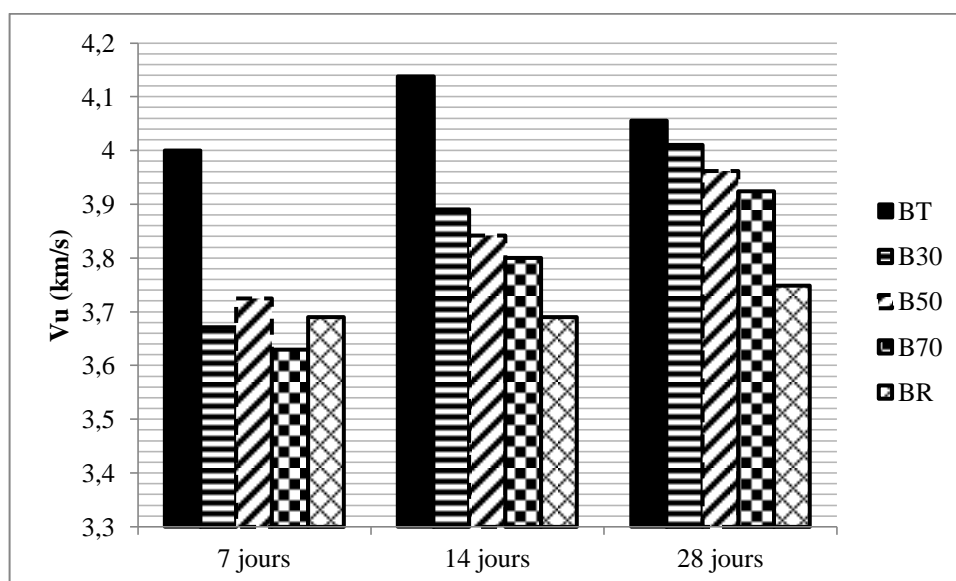


Figure V.15: La variation de la vitesse de propagation d'ultrason (V) en fonction de l'âge du béton.

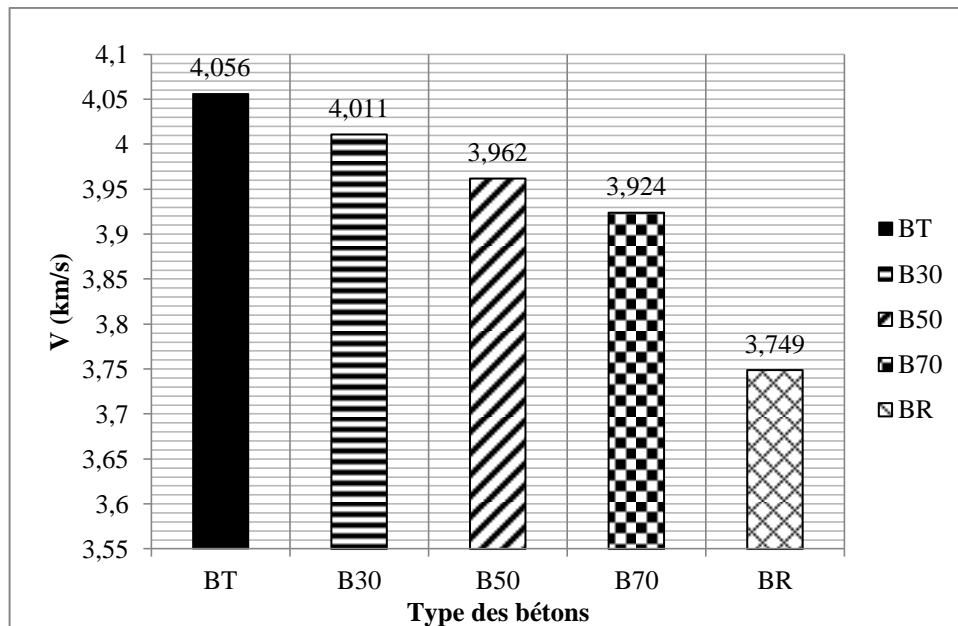


Figure V.16: Vitesse de propagation ultrason (V) à 28jours.

Selon les figures [V.14, V15] le développement de la vitesse de propagation ultrasonique (V) en fonction de différents pourcentages des agrégats recyclés et de l'âge du béton (7, 14, et 28 jours), présente une progression normale.

Selon la figure (V.16), on constate que le béton témoin (BT) présente la meilleure valeur de la vitesse ultrason (V) par rapport aux autres types des bétons testés.).

Généralement, les valeurs obtenues de la vitesse ultrason (V) sont plus élevées pour le béton témoin (BT) avec (4.00 Km/s) à 7 jours en comparaison avec les bétons (B₃₀, B₅₀, B₇₀ et BR) (3.671, 3.725, 3.630, et 3.690 Km/s) respectivement.

Le béton témoin (BT) 0% substitution donne une meilleure vitesse de propagation des ondes (V) à 28 jours environ (4,056Km/s) par rapport au béton (BR) 100% substitution (3.749 Km/s) à 28 jours.

D'après la figure [V.14 à V.15], on constate l'effet remarquable des agrégats recyclés sur le béton en matière de la vitesse ultrason (V) pour les différents âges [7, 14, et 28jours] du béton par rapport à un béton témoin (BT).

D'après la figure [V.15], On montre qu'il y'a, un développement normal de la vitesse ultrason (V) quel que soit le type de béton témoin et aux agrégats recyclés.

D'après la figure [V.16], on constate aussi que le remplacement des agrégats naturels par agrégats recyclés présente une diminution de la vitesse (V). Ceci est principalement, du fait que la présence des agrégats recyclés qui ont une porosité élevée et une teneur en air importante, qui freine et amortisse la propagation des ondes (vides et pores).

V.5.8 La résistance combinée [ultrason-scléromètre] : [R_{us}]

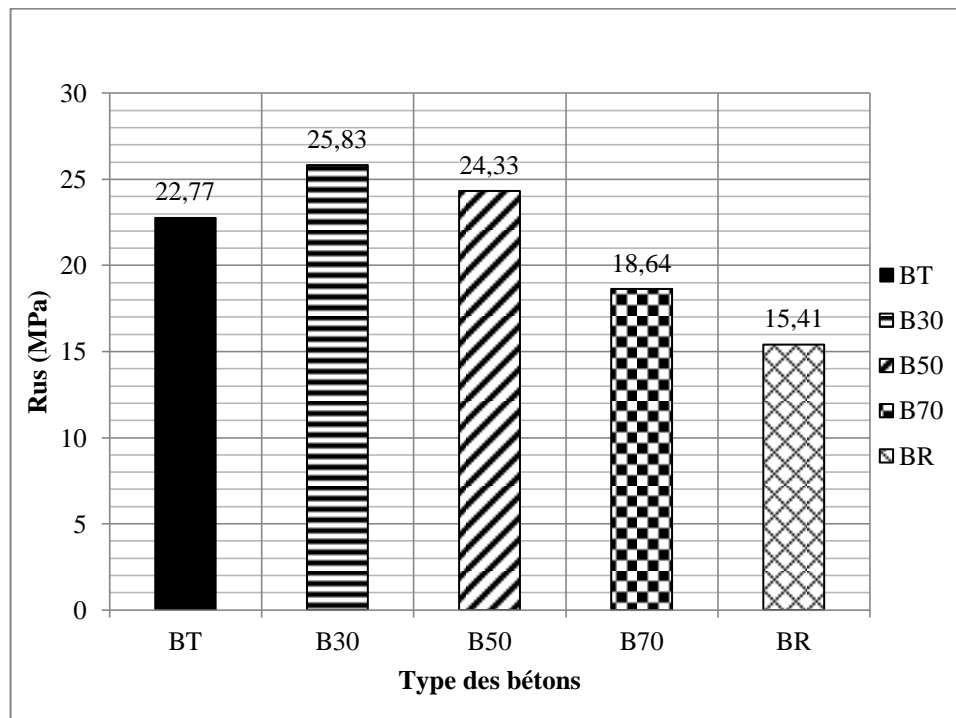


Figure V.17 : Résistance combinée [ultrason-scléromètre] (R_{us}) pour les différents types des bétons (témoin et recyclé) à 28 jours.

Selon la figure [IV.17], on constate que le béton [B₃₀] donne une meilleure résistance combinée (R_{us}) de [25.83 MPa], en comparaison avec les autres types des bétons, par ce qu'il y a une vraie semblance des agrégats.

Le béton [B₃₀] donne une augmentation de la résistance combinée (R_{us}) de 41 % par rapport au (BR).

La conclusion qu'on peut tirer c'est que la résistance du béton dépend de type d'agrégat d'une façon.

On constate d'autre part que les résultats de la résistance combinée (R_{us}) obtenus sont inférieurs à celle des résultats qu'on obtient par l'essai de l'écrasement sur le béton.

D'après les résultats obtenus par les essais non destructifs [ultrason, scléromètre] on peut conclure que ces résultats restent toujours approximatifs cependant que les résultats

obtenue par les essais destructifs permettent de donner des résultats plus fiables et réalistes en matière d'évaluation de la réponse mécanique du béton.

V.5.9 Module d'élasticité dynamique :

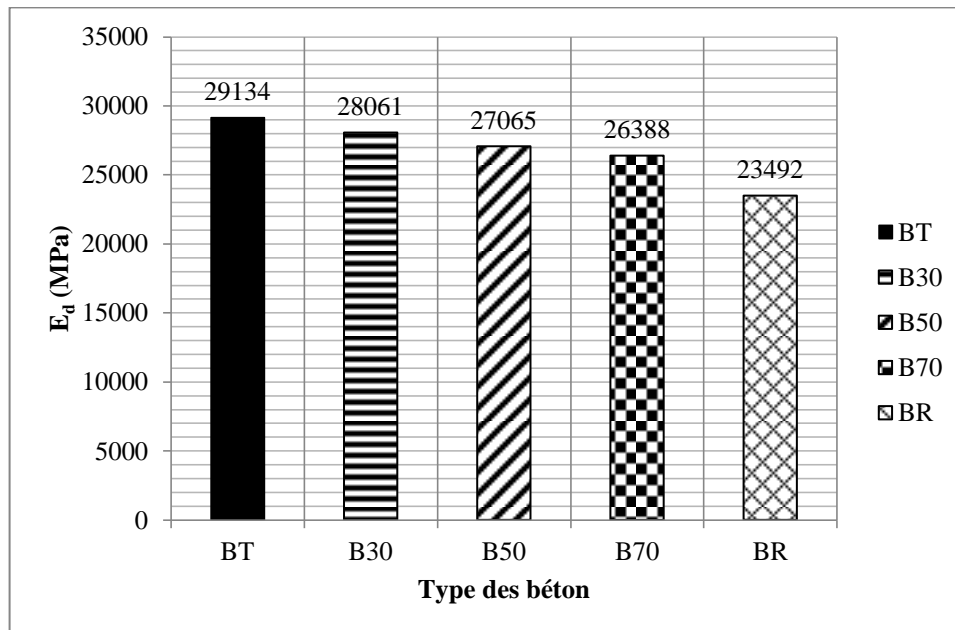


Figure V.18: La Variation du module d'élasticité pour les différents types des bétons à 28jours.

D'après la figure [V.18], On constate, que le module d'élasticité des bétons recyclés (**BR**) est inférieur en comparaison avec le béton témoin (**BT**), la valeur maximale enregistrée est obtenue avec (**BT**) ; ce béton donne une valeur de module d'élasticité plus grande (**29134 MPa**) par rapport aux autres types des bétons testé.

Le béton avec **100 %** agrégats recyclé (**BR**) donne une valeur de module d'élasticité faible en comparaison avec béton témoin environ (**23492 MPa**).

La réduction de module d'élasticité de béton 100% recyclé (**AR**) donne une diminution de module d'élasticité d'ordre **20%** par rapport au béton témoin (**BT**); Ce béton est moins dense et plus poreux par rapport les autres types des bétons testés.

L'effet de substitution des agrégats recyclés présenté une diminution du module d'élasticité pour les bétons recyclé selon le dosage.

Selon des études précédentes faites sur le module d'élasticité du béton recyclé est légèrement supérieure (**15 à 25%**) comparativement à un béton à base de granulats 100% naturel. [Oikonomou N.D, 2005].

Partie B: Béton recyclé avec adjuvant

V.6 Introduction :

Dans cette partie expérimentale, on a utilisé le béton recyclé avec 100% de remplacement avec un adjuvant **MEDAFLUID SF 150** à différents pourcentage (0%, 0,5%, 1%, 1.5% et 2%), afin de voir l'effet de cet addition sur les propriétés physico-mécaniques du béton recyclé adjuvanté

On note **BRA** comme étant le béton recyclé adjuvant.

Un béton à base de : (100% agrégat recyclé, 0% agrégat concassé) **BR**.

Tableau V.7: Les différents types des bétons utilisés.

Type des bétons	BR	BR _{0.5}	BR ₁	BR _{1.5}	BR ₂
% Adjuvant	0	0.5	1	1.5	2

V.7 Etat frais :

Tableau V.8: Propriétés des différents types des bétons à l'état frais.

Les types des bétons	La masse volumique apparente ρ_{app} (Kg/m ³)	La masse volumique absolue ρ_{abs} (Kg/m ³)	Affaissement Aff. (cm)	Rapport E/C efficace	Teneur en air du béton (%)	Compacité de béton C(%)
BR	2267	2342	6	0,69	3,2	96,8
BR_{0.5%}	2271	2329	5	0,63	2,5	97,5
BR_{1%}	2276	2340	5.5	0,61	2,75	97,25
BR_{1.5%}	2282	2347	5	0,59	2,75	97,25
BR_{2%}	2297	2375	6	0,53	2,3	97,7

V.7.1 Masse volumique :

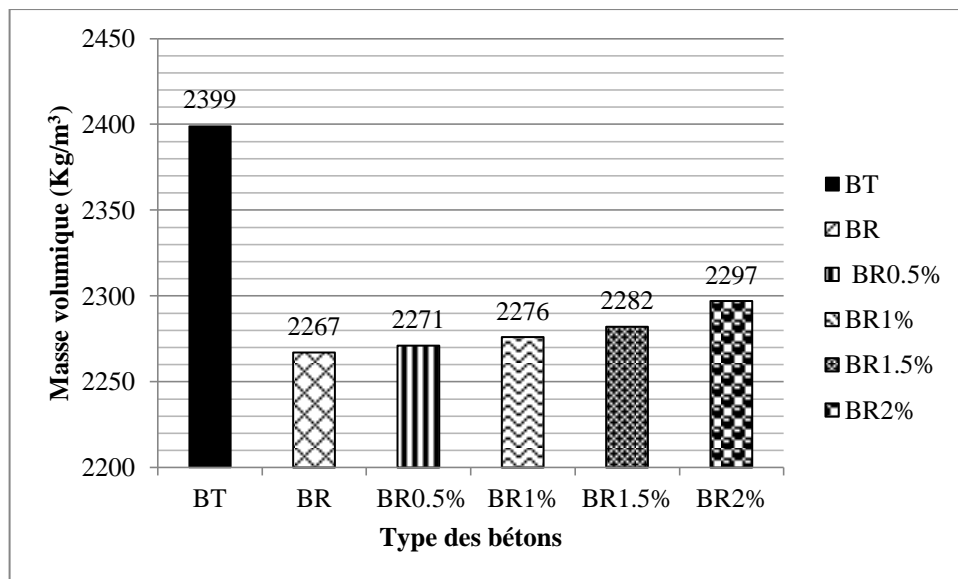


Figure V.19: La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons.

D'après la figure [V.19], On constate, que la masse volumique des bétons recyclé avec différents pourcentage adjuvant supérieur en comparaison avec béton recyclé témoin (**BR**), la valeur optimale enregistrée est obtenue avec (**BR_{2%}**) ; ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande (**2297 Kg/m³**) par rapport aux bétons recyclés testé. Est inférieure par rapport au béton témoin.

Béton (**BR**) donne une valeur de masse volumique faible en comparaison avec (**BR_{2%}**) (**2267 Kg/m³**) à 28 jours.

La réduction de la masse volumique de (**BR**) donne une diminution de masse volumique d'ordre **2%** par rapport au (**BR_{2%}**). Ce béton est moins dense et plus poreux par rapport aux autres types de béton testés.

L'effet de l'emploi de l'adjuvant présente une augmentation vis-à-vis de la masse volumique à l'état frais.

V.7.2 Teneur en air:

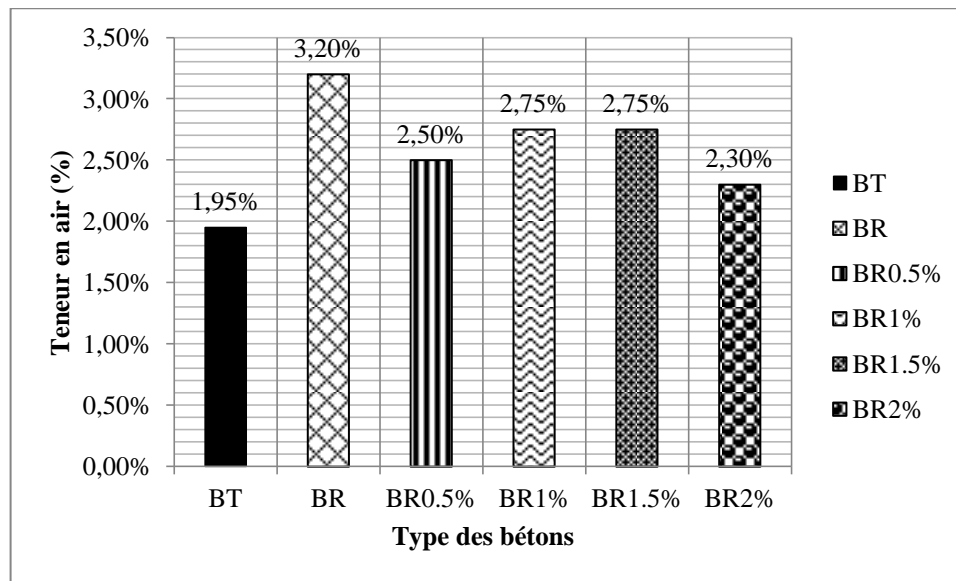


Figure V.20: La variation de teneur en air du béton en fonction du pourcentage d'adjuvant.

L'utilisation d'adjuvant dans le béton recyclé conduit à une diminution de la porosité, cette diminution est présentée dans la figure [V.20], qui montre la variation de la porosité en fonction des différents pourcentages d'adjuvants.

On observe que la valeur obtenue de la porosité est plus élevée pour le béton (BR) en comparaison par rapport aux autres types de bétons, la valeur maximale enregistrée est obtenue avec le béton (BR) (3.20%) ; ce béton donne une valeur supérieure à celle du béton recyclé adjuvanté [BR (3.20%) > BR (0.5%, 1%, 1.5% et 2%) et (BT), (2.5, 2.75, 2.75 et 2.3%) et (1.95%)] respectivement.

La diminution de la porosité du (BR_{2%}) d'ordre 29% par rapport au béton (BR).

C'est l'effet de l'emploi de l'adjuvant qui diminue la quantité d'eau dans le gâchage et le rapport E/C pour cela la porosité diminue.

V.7.3 Rapport E/C:

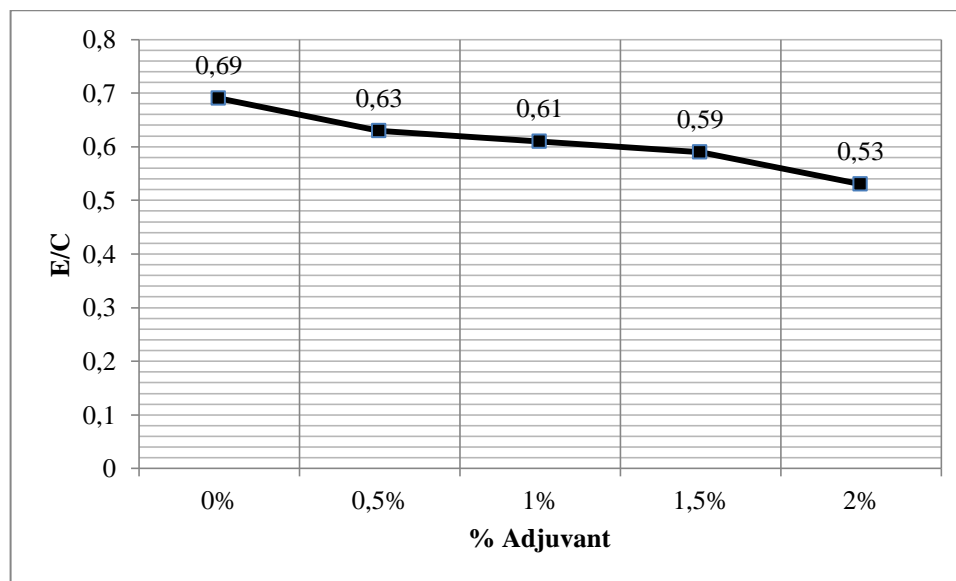


Figure V.21: La variation du rapport (E/C) en fonction du pourcentage de l'adjuvant.

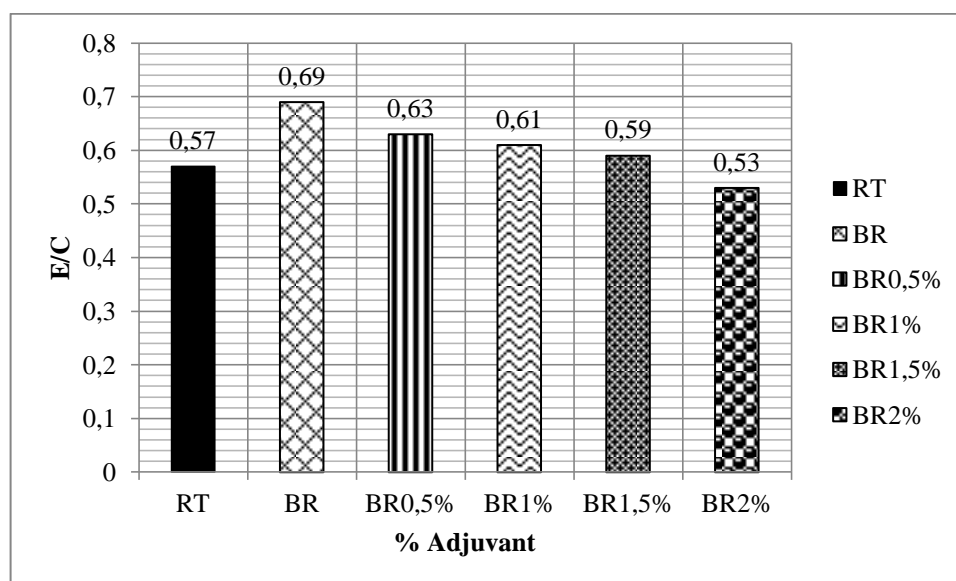


Figure V.22: La variation du rapport (E/C) en fonction du pourcentage de l'adjuvant (BT, BR adjuvanté)

L'utilisation de l'adjuvant dans le béton recyclé conduit à une réduction d'eau, la réduction est présentée dans les figures [V.21, V.22], qui montre la variation du rapport (E/C) en fonction des différents pourcentages d'adjuvant.

On observe que la valeur obtenue du rapport (E/C) est plus élevée pour le béton (BR) en comparaison avec les autres types des bétons. La valeur maximale enregistrée est obtenue

avec le béton (**BR**) ; ce béton donne une valeur supérieure par rapport aux autres types des bétons (**0.69, 0.63, 0.61, 0.59, 0.53 et 0.57**) respectivement.

La réduction de rapport E/C de (**BR_{2%}**) donne une diminution remarquable de rapport E/C d'environ **24%** par rapport au **BR** et environ **7%** par rapport au **BT**.

C'est l'effet l'emploi de l'adjuvant qui joue le rôle de haut réducteur d'eau et amélioré l'ouvrabilité et limite le besoin en eau de gâchage.

V.8 Etat durci :

V.8.1 Taux d'absorption d'eau des bétons:

Tableau V.9 : Taux d'absorption d'eau des bétons.

Les types des bétons	Taux d'absorption d'eau des bétons A(%)						
	Ep 1	Ep 2	Ep 3	Ep 4	Ep 5	Ep 6	moy
BR	8,87	9,56	8,92	8,66	9,02	10,16	9,20
BR_{0,5%}	7,08	7,00	7,85	8,42	8,42	7,15	7,65
BR_{1%}	7,73	7,22	7,45	6,61	7,52	7,42	7,32
BR_{1,5%}	7,29	7,08	7,51	6,82	7,33	7,6	7,27
BR_{2%}	7,67	8,83	6,75	6,95	6,57	6,52	7,22

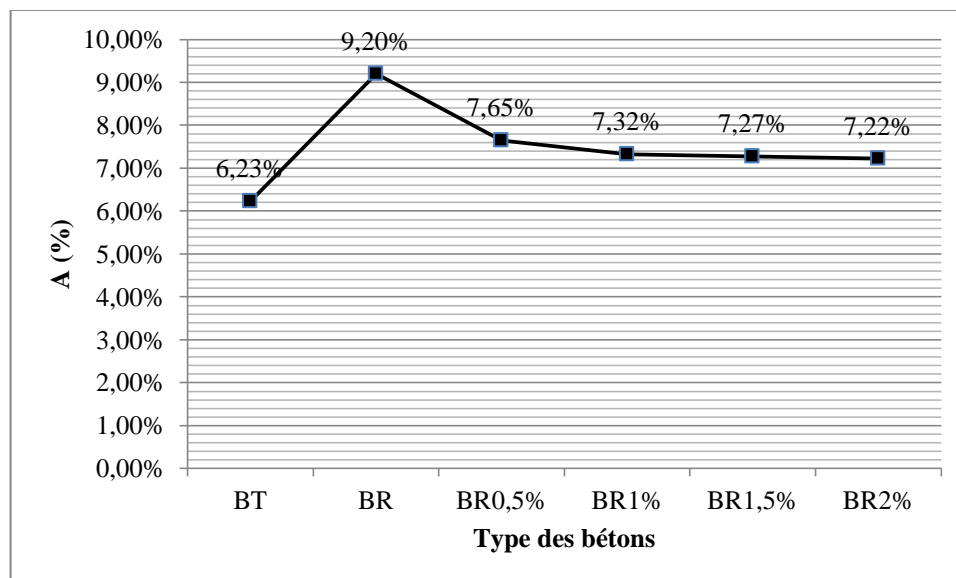


Figure V.23: La variation d'absorption d'eau pour les différents types des bétons.

D'après la figure [V.23], on constate la variation du taux d'absorption d'eau en fonction du pourcentage d'adjuvant.

On observe que le taux d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage d'adjuvant.

Le béton (**BR_{2%}**) donne un taux d'absorption faible de (**7.22%**) par rapport aux autres types des bétons d'agrégats recyclés adjuvanté et supérieur par rapport (**BT**).

Le béton (**BR_{1,5%}**) donne une valeur du taux d'absorption identique à celui du béton (**BR_{2%}**) (**7.27%**). Le taux d'absorption de béton (**BR**) est supérieur par rapport les autres types des bétons; d'une valeur environ (**9.20%**), cette valeur permet de voir un béton perméable avec porosité élevée et moins compact.

On observe, que l'effet de l'adjuvant sur le béton utilisés; c'est un effet positifs car à **2%** d'adjuvant, le taux d'absorption a une valeur minimum de (**7.22%**) par rapport au béton (**BR**) (**9.20%**). Donc l'adjuvant démuni le taux d'absorption jusqu'à **22%**.

V.8.2 Propriétés physiques et mécaniques des bétons

Tableau V.10 : Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200) mm		Rc MOY (MPa)
		T (μs)	V (km/s)	
BR	2231	54,2	3,690	18.842
BR _{0,5%}	2232	55,8	3,584	21.693
BR _{1%}	2256	54,4	3,676	22.980
BR _{1,5%}	2260	54,6	3,663	21.068
BR _{2%}	2278	52,3	3,824	25.926

Tableau V.11: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200mm)		Scléromètre		Rus combiné (MPa)	Rc MOY (MPa)
		T (μs)	V (km/s)	Is	Rs (MPa)		
BR	2231	54,2	3,690	30	18	17,33	22.696
BR _{0,5%}	2260	53,2	3,759	28	16	16,30	23.156
BR _{1%}	2270	52,7	3,795	30	18	18,26	23,406
BR _{1,5%}	2267	53,6	3,731	29	17	16,88	25.106
BR _{2%}	2286	51,7	3,868	32	22	20,67	27.990

Tableau V.12: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours à l'état durci.

Types des bétons	ρ durci (Kg/m ³)	Ultrason (L=200mm)		Scléromètre		E_d (MPa)	Rus combiné (MPa)	Rc_{MOY} (MPa)	Rt_{MOY} (MPa)
		T (μ s)	V (km/s)	Is	Rs (MPa)				
BR	2250	53,4	3,749	27	15	23492	15,41	26.172	2,850
BR _{0.5%}	2255	53,0	3,774	33	23	23859	20,55	25.474	2,537
BR _{1%}	2275	52,3	3,824	37	30	24713	24,41	26.650	2,394
BR _{1.5%}	2285	52,3	3,824	33	23	24821	21,06	27.550	2,542
BR _{2%}	2295	51,1	3,914	40	35	26117	28,05	34.983	3,090

V.8.3 Masse volumique :

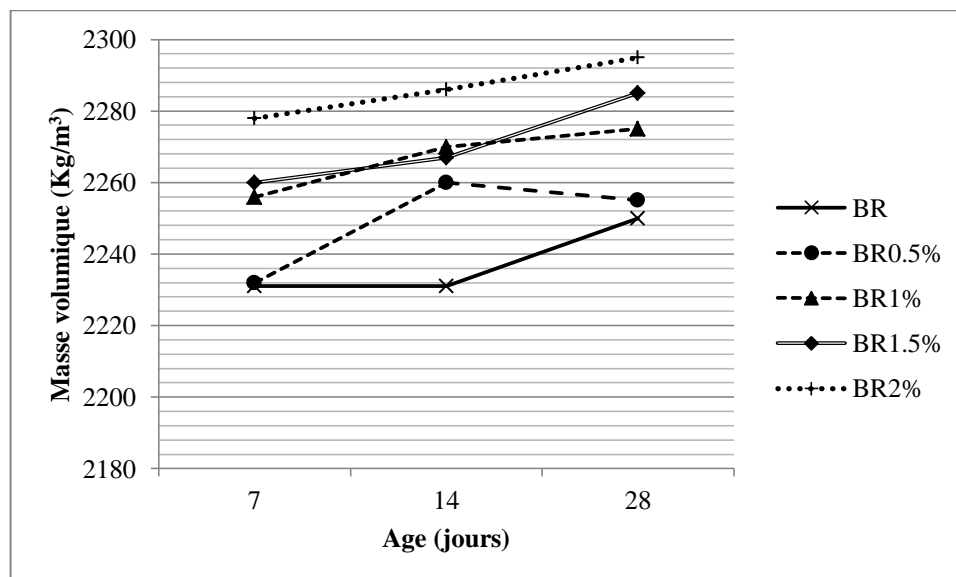


Figure V.24 : La variation de la masse volumique pour les différents types des bétons en fonction de l'âge.

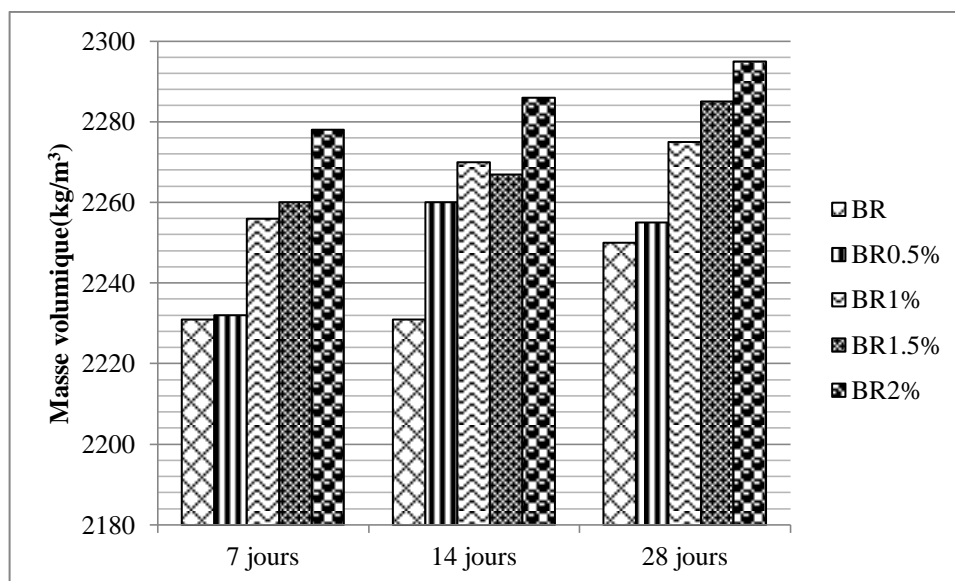


Figure V.25: Variation de la masse volumique apparente de bétons recyclé et bétons recyclés adjuvanté (BR et BRA) en fonction de l'âge.

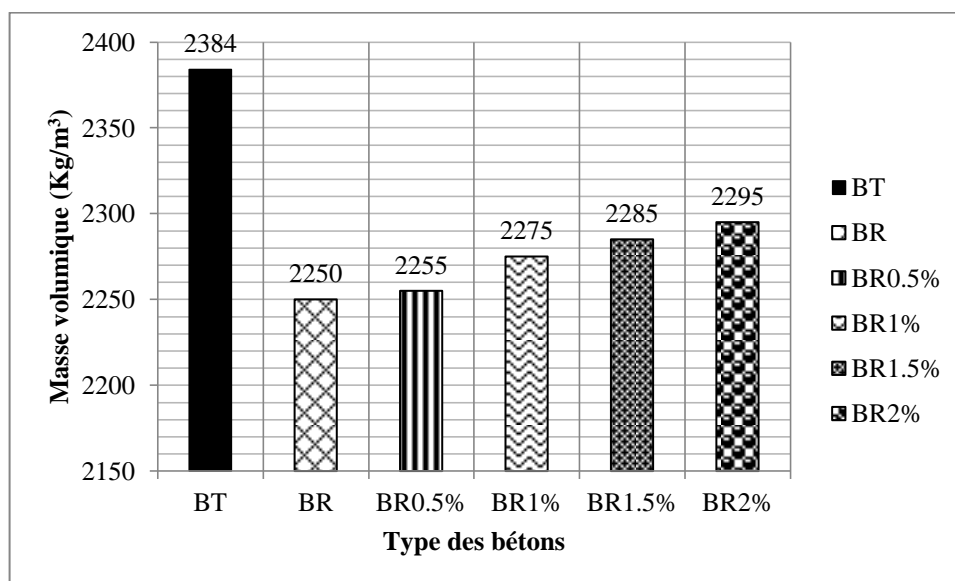


Figure V.26: La masse volumique des différents types des bétons à 28 jours.

D'après les figures [V.24 à V.26], on observe un développement normal de la masse volumique des bétons testés pour les différents âges [7, 14 et 28 jours].

D'après la figure [V.26], On constate, que la masse volumique des bétons recyclé (BR) est inférieure par rapport aux autres types des bétons, la valeur maximale enregistrée est obtenue avec (BR_{2%}) par rapport au béton 100% recyclé, et inférieure par rapport au béton témoin (BT) ; ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande (2295 kg/m³) à 28 jours par rapport aux autres types de béton testés.

Le béton (**BR**) donne une valeur de masse volumique faible en comparaison aux autres types de béton environ (**2250 Kg/m³**) à 28 jours d'âge.

On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant remarquable sur le développement de la masse volumique à l'état durci des bétons recyclés adjuvanté.

L'augmentation de la masse volumique de béton (**BR_{2%}**) par rapport au (**BR**); le taux de réduction de la masse volumique est d'environ (**2%**) pour béton (**BR_{2%}**) et (**BR**) respectivement.

V.8.4 La résistance à la compression :

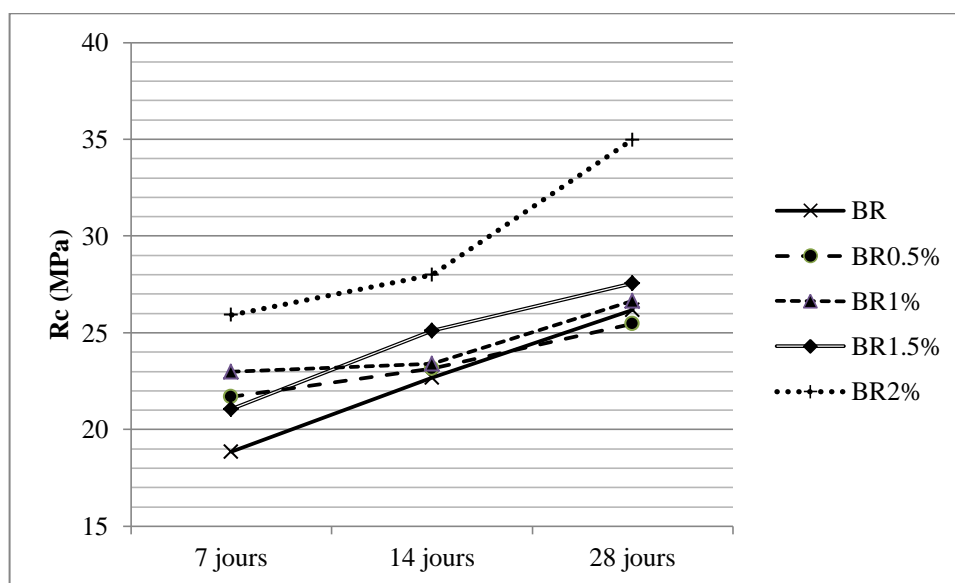


Figure V.27: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge du béton.

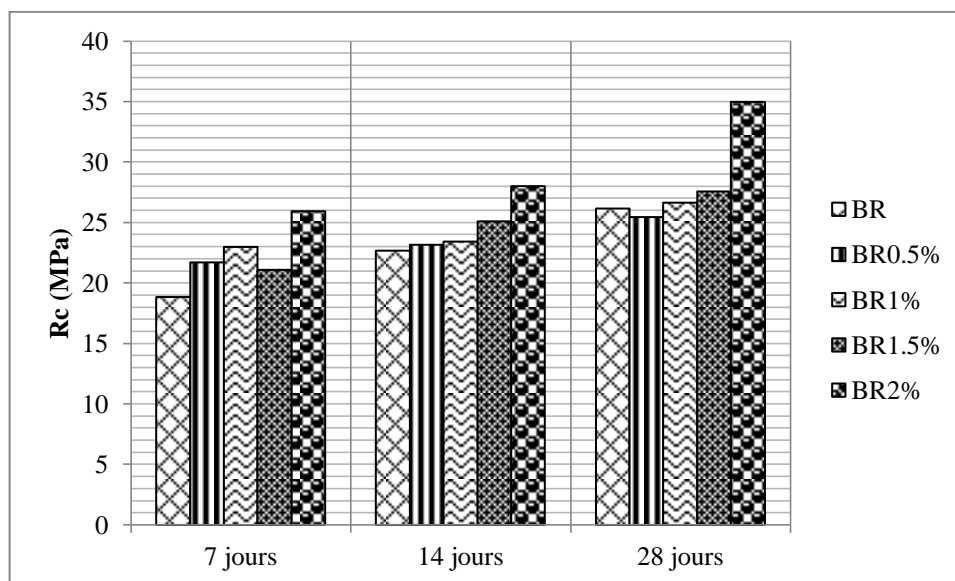


Figure V.28: La variation de la résistance de compression (R_c) en fonction de l'âge du béton.

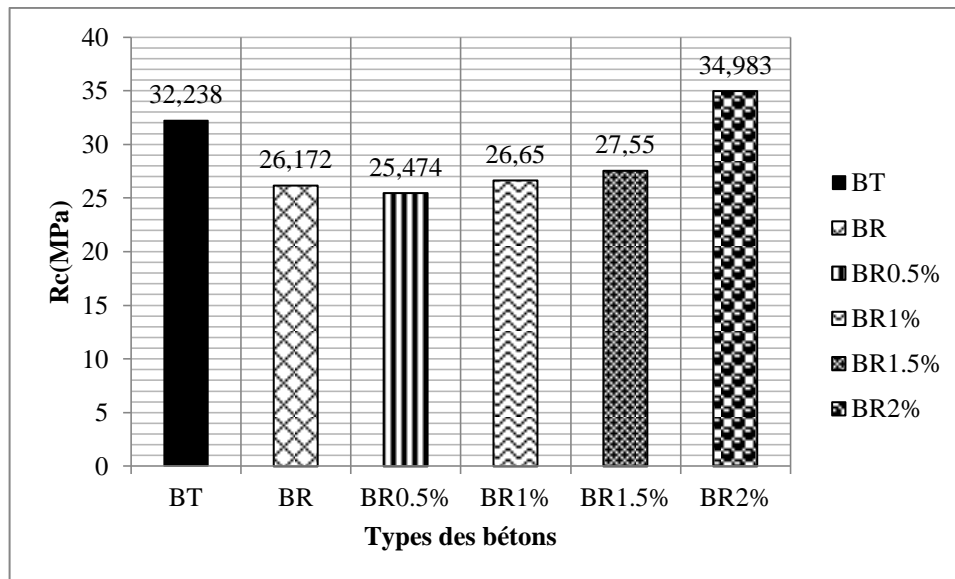


Figure V.29: Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant à 28 jours.

D'après les figures [V.27 à V.29], présentent le développement de la résistance à la compression (**Rc**) en fonction des différents pourcentages d'adjuvant et l'âge de béton.

Généralement, les valeurs obtenues de la résistance à la compression (**Rc**) sont plus faible pour un béton (**BR_{0,5%}**) par rapport aux autres types des bétons testés, cependant pour les types des bétons recyclés adjuvanté la valeur maximale enregistrée est obtenue avec (**BR_{2%}**).

Ce béton donne une meilleure résistance à la compression à 28 jours environ (**34.98 MPa**) par rapport aux autres types des bétons [(**BT, BR, BR (0.5%, 1%, et 1.5%)**)] (**32,24 26,17. 25,47. 26,65 et 27,55 MPa**) respectivement.

La résistance à la compression du béton (**BR_{2%}**) montre, une augmentation de la résistance d'environ **25%** par rapport au béton (**BR**).

Si on augmente le pourcentage d'addition de l'adjuvant à (**0.5%, 1%, 1.5% et 2%**), on remarque une augmentation sur la résistance de (**26.65, 27.55, et 34.98 MPa**) respectivement par rapport (**BR**), (**26.17 MPa**).

On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant remarquable sur le développement de la résistance (**Rc**), qui diminue **E/C**, favorisé l'ouvrabilité et par conséquent augmente la résistance du béton.

V.8.5 La résistance à la flexion par fendage :

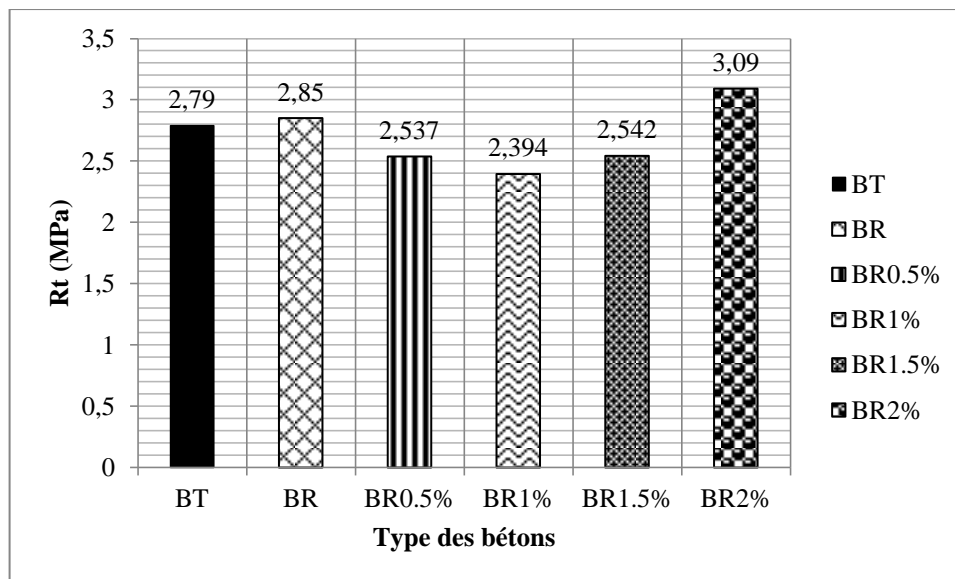


Figure V.30: La variation de la résistance à la flexion par fendage pour les différents types des bétons à 28 jours.

D'après les figures [V.30], qui présentent le développement de la résistance à la flexion par fendage en fonction des différents pourcentages d'adjuvant à 28 jours.

Généralement, la valeur obtenue de la résistance à la flexion par fendage (**Rt**) est plus faible pour un béton (**BR_{1%}**) en comparaison avec le béton (**BR**).

Cependant pour les autres types des bétons la valeur maximale enregistrée est obtenue avec le béton recyclé adjuvanté ayant un dosage élevé de **2%** d'adjuvant.

Le béton (**BR_{2%}**) donne une meilleure résistance à la flexion par fendage à 28 jours environ **3.09 MPa** par rapport les autres types des bétons [**BR, BR (0.5%, 1%, et 1.5%)**] (**2.85, 2.53, 2.394 et 2.54 MPa**) respectivement.

La résistance à la flexion par fendage du béton (**BR_{2%}**) donne une augmentation de la résistance d'ordre **8%** par rapport au béton (**BR**) et environ **10%** par rapport au béton (**BT**)

On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant remarquable sur le développement de la résistance à la flexion par fendage.

V.8.6 Les résultats de scléromètre :

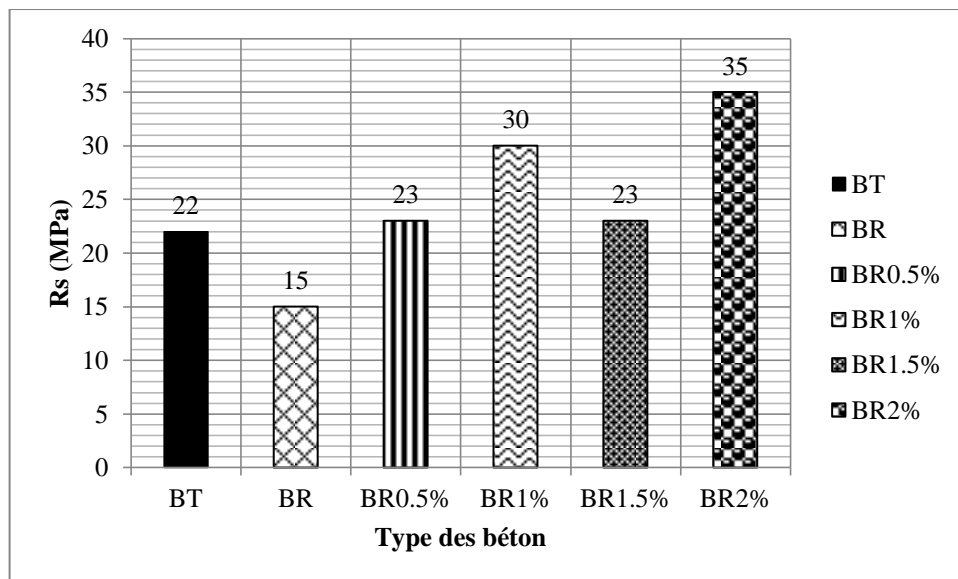


Figure V.31: La variation de la résistance de scléromètre (R_s) pour les différents types des bétons à 28 jours.

Selon la figure [V.31], on constate que les valeurs de la résistance de scléromètre (R_s) des différents types des bétons présentent un développement normal en fonction du pourcentage d'adjuvant et l'âge du béton.

Les valeurs de la résistance de scléromètre (R_s) de béton ($BR_{2\%}$) est supérieure par rapport aux bétons (BR); celui à donne une meilleure résistance de scléromètre (R_s) à 28 jours environ (**35 MPa**) par rapport aux autres types des bétons testés.

On constate que les bétons (**BT, BR (0.5%, 1%, 1.5% et 2%)**) donne les meilleurs résultats (**22, 23, 30, 23 et 35MPa**) respectivement par rapport au béton (**BR**) (**15 MPa**) à 28 jours.

On note que le béton ($BR_{2\%}$) donne une augmentation de résistance de **58 %** par rapport au béton (**BR**) et environ 38% par rapport au béton (**BT**).

Ce béton présente des meilleurs résultats à 28 jours par rapport aux autres types des bétons testés avec adjuvant.

V.8.7 Les résultats d’ultrasons :

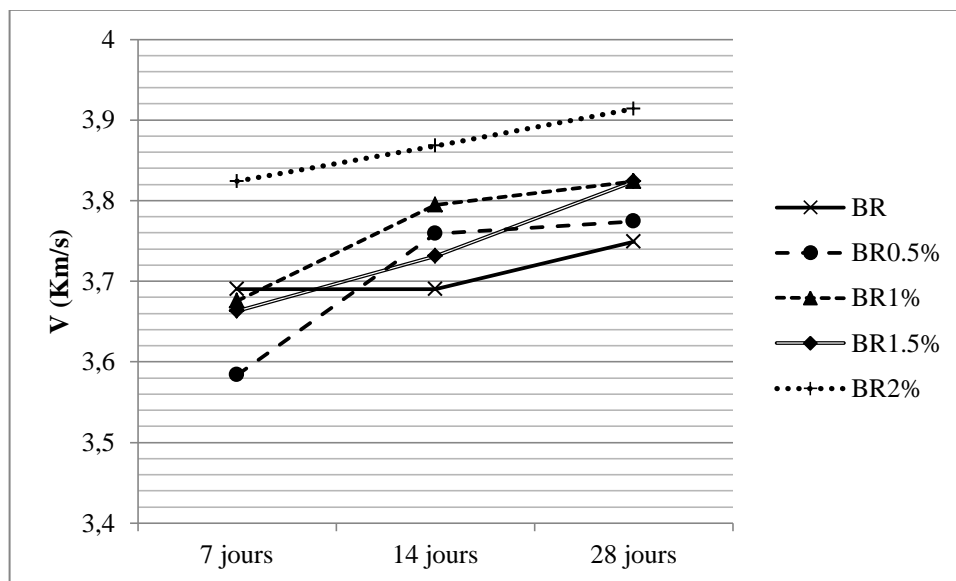


Figure V.32: vitesse de propagation d’ultrason (V) en fonction de l’âge du béton.

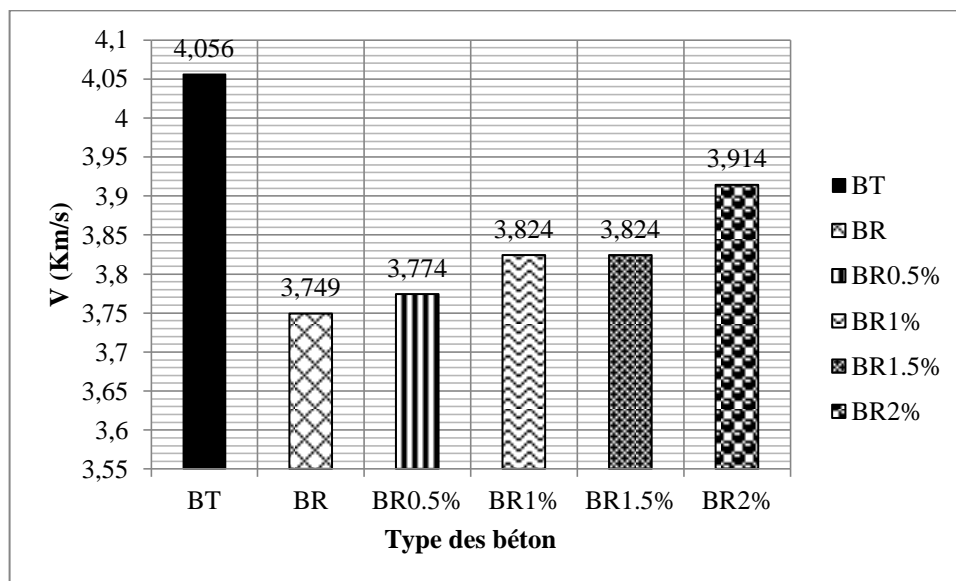


Figure V.33: Vitesse de propagation ultrason (V) à 28jours.

Le développement de la résistance ultrasonique (V) en fonction de différents pourcentages d’adjuvants et de l’âge du béton [7, 14, et 28 jours], présente une progression normale.

Généralement, les valeurs obtenues de la vitesse ultrason (V) sont plus élevées pour le béton (BR_{2%}) avec (3.824 Km/s) à 7 jours en comparaison avec les bétons (BR, BR ((0.5% ,1%, et 1.5%)) avec (3.690, 3.584, 3.676, et 3.636 Km/s), respectivement.

Le béton (**BR_{2%}**) donne une meilleure vitesse de propagation des ondes (**V**) à 28 jours environ (**3.914km/s**) par rapport au béton (**BR**) (**3.824 Km/s**) et faible par rapport aux (**BT**) (**4.056 Km/s**) à 28 jours.

D'après la figure [V.32], on constate l'effet remarquable de l'emploi de l'adjuvant sur le béton en matière de la vitesse ultrason (**V**) pour les différents âges [**7, 14, et 28journs**] du béton par rapport à un béton (**BR**).

D'après la figure [V.33], On montre qu'il y'a, une augmentation de la vitesse ultrason (**V**) quel que soit le type de béton surtout à 28 jours, qui donne des résultats plus élevés par rapport à jeune âge, est une vitesse de propagation presque de même valeurs pour tous les types de béton par rapport au béton (**BR**) environ (**3.749 Km/s**) à 28 jours.

Donc on peut déduire que l'emploi de l'adjuvant a une influence sur la propagation des ondes dans le béton.

V.8.8 Les résultats combinés [ultrason-scléromètre] :

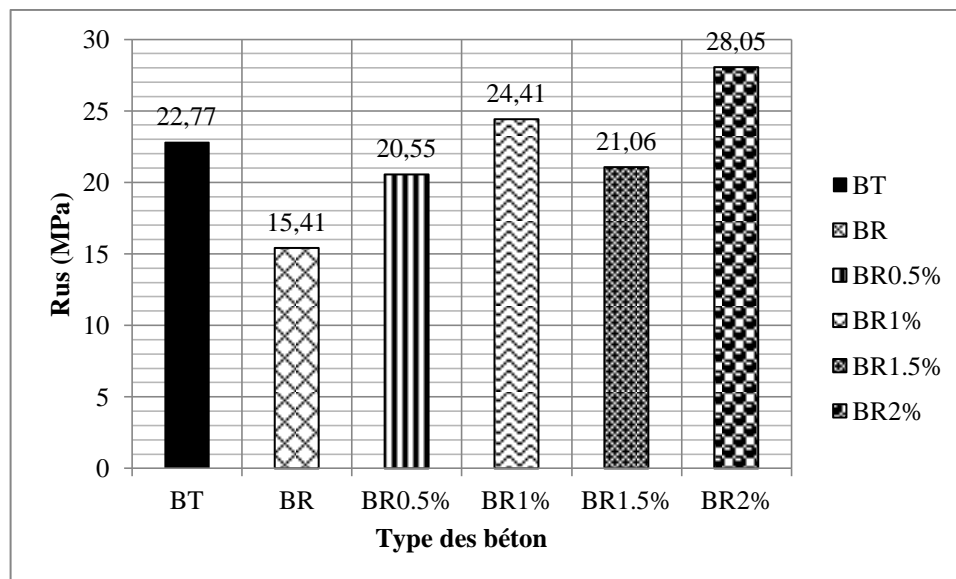


Figure V.34 la variation de la résistance combinée [ultrason-scléromètre] (**Rus**) à 28 jours

La figure [V.34], qui représente la variation de la résistance combinée (**Rus**), pour tous les types des bétons en fonction des différents pourcentages d'adjuvant et l'âge du béton .

Selon la figure [V.34], on observe un développement de la résistance combinée (**Rus**) des bétons **BR (0.5%, 1%, 1.5% et 2%)** pour les différents âges (**14 et 28 jours**). Par contre

on observe une chute dans la résistance du béton (**BR**) pour les différents âges (**14 et 28 jours**).

Ainsi, on constate que le béton (**BR_{2%}**) donne une meilleure résistance combinée (**Rus**) de (**28.05 MPa**), en comparaison avec les autres types des bétons, par ce qu'il y a vraisemblance des agrégats.

Le béton (**BR_{2%}**) donne une augmentation de la résistance combinée (**Rus**) d'ordre **45 %** par rapport au (**BR**) et environ **18%** par rapport (**BT**).

La conclusion qu'on peut tirer c'est que la résistance du béton dépend de type d'agrégat d'une façon .

On constate d'autre part que les résultats de la résistance combinée (**Rus**) obtenus sont inférieurs à celle des résultats qu'on obtient par l'essai de l'écrasement sur le béton.

V.8.9 Module d'élasticité dynamique :

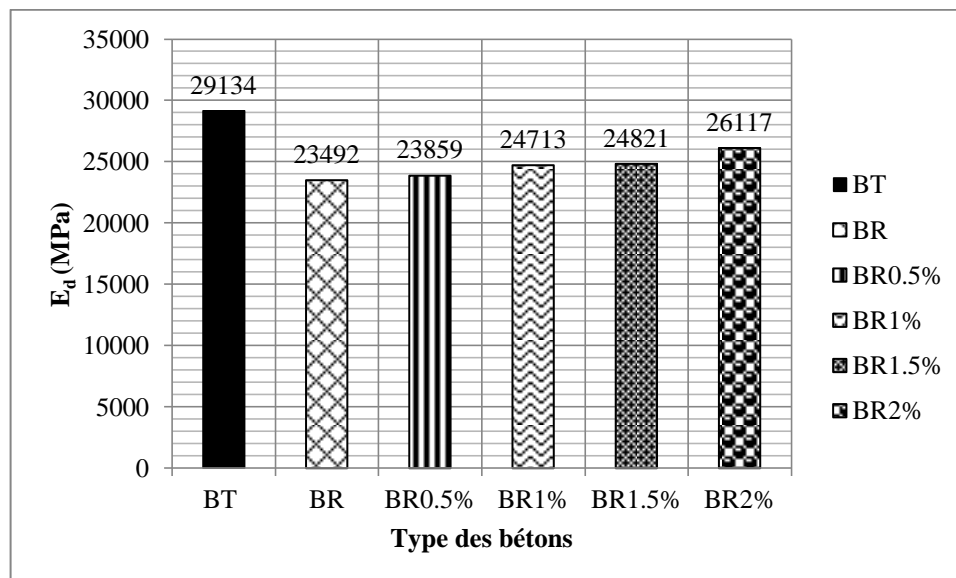


Figure V. 35: La Variation du module d'élasticité pour les différents types des bétons.

D'après la figure [V.35], On constate, que le module d'élasticité de (**BR**) est faible en comparaison avec les autres types des bétons, la valeur maximale enregistrée est obtenue avec (**BR_{2%}**) ; ce béton donne une valeur de module d'élasticité plus grande [**26117 MPa**] par rapport aux différents types de béton testé et inférieur par rapport (**BT**).

Béton (**BR**) donne une valeur de module d'élasticité faible en comparaison avec les autres types des bétons testés environ [**23492 MPa**].

L'effet de de l'emploi de l'adjuvant présenté une augmentation vis-à-vis de module d'élasticité.

L'augmentation de module d'élasticité de béton (**BR_{2%}**) donne une augmentation de module d'élasticité environ **11%** par rapport au (**BR**) Ce béton est moins dense et plus poreux par rapport les autres types de béton testés et par rapport au béton (**BT**).

Chapitre VI :

Conclusion et

recommandation

Conclusions:

D'après les résultats de cette étude sur les bétons recyclés et béton recyclé adjuvanté, les conclusions suivantes pourront être tirées:

- L'augmentation de taux substitution des agrégats recyclés dans les bétons provoque une diminution considérable de la masse volumique à l'état frais et durci.
- Le béton avec **100%** de substitution donne la valeur de la masse volumique la plus faible en comparaison avec le béton témoin et celui adjuvanté.
- L'augmentation de taux substitution des agrégats recyclés dans les bétons provoque une augmentation remarquable sur la teneur en air.
- Le béton à **100%** de remplacement, nécessitent un besoin d'eau de gâchage supplémentaire de **16%** par rapport au béton témoins.
- L'incorporation de l'adjuvant dans le béton **100%** recyclé diminue le rapport **E/C** qui permet la formulation de béton avec une bonne maniabilité et bonne résistance.
- On remarque que l'augmentation de pourcentage de l'adjuvant dans les bétons provoque une diminution considérable de la teneur en air.
- L'agrégat recyclé dans le béton augmente le taux d'absorption jusqu'à **32%** par rapport au béton témoin.
- L'adjuvant diminue le taux d'absorption jusqu'à **22%** pour le béton adjuvanté à **2%** par rapport au béton **100%** recyclé et avec **0%** adjuvant.
- Le taux substitution des agrégats recyclés influence négativement sur la résistance à la compression (**R_c**) des bétons.
- La résistance à la flexion par fendage du béton recyclé donne une légère augmentation de la résistance d'environ **2%** par rapport au béton témoin.
- D'après les résultats obtenus par les essais non destructifs [**ultrason, scléromètre**] on peut conclure que ces résultats restent toujours approximatifs. Cependant, les résultats obtenus par l'essai d'écrasement demeurent fiable pour l'évaluation de la qualité de béton (résistance mécanique).
- l'adjuvant superplastifiant réducteur d'eau influence positivement sur la réponse mécanique (**R_c**) des bétons recyclés adjuvanté.
- Le béton avec **2%** adjuvant donne la meilleure valeur de la résistance à la compression (**R_c**) par rapport au béton témoin [**35MPa**].
- On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant avantageux sur la résistance à la flexion par fendage du béton recyclé qui est parfois comparable au béton témoin.

Recommandations et perspectives :

Sur la base des résultats obtenus et conclusions tirées de cette étude; nous recommandons pour des futurs travaux de recherche futurs :

- Etude de la durabilité d'un béton à base d'agrégats recyclé à 100% de substitution.
- Etude de l'effet combiné d'adjuvants plus addition minéralogique sur un béton à base d'agrégat recyclé.
- Etude de corrélation aux moyens des essais non destructifs les propriétés mécaniques et physiques d'un béton recyclé.
- Influence de la granularité continue et discontinue sur les propriétés physiques et mécanique d'un béton recyclé.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

[1] **Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina** «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.

[2] **Alain BRETTE** : fascicule de cours réalisé par pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, 2007. LIEU.

[3] **ANDRIAMANANTSILVO.N.R:** «comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation », Thèse de doctorat, 2003 à l'Université de Bretagne sud.

[4] **AYADLB et HAMMACHE.Y:** « Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agrégats recyclés adjuvanté », mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

[5] **BACARA PROJET FRANÇAIS:** « le béton compacté au rouleau », 1996, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[6] **BARON ET SAUTEREY .R :** Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, 1982.

[7] **BELAGRAA. L:** cours matériau de construction, à l'Université El Bachir Ibrahim, 3ème année, département de génie civil, 2011.

[8] **BERNIER.G:** Formulation des bétons, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Doc C 2 210, 2005.

[9] **BOUTIBA.A :** « Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci », Thèse de Magister, *sino dato* à l'Université de M'Hamed Bougrra Boumerdes.

[10] **CASTEILLA-25**, rue Monge-75005 PARIS, 4eme édition actualisée, page : 31.

[11] **CHANVILLARD.G:** connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas, 1999.

[12] **CIM BETON:** construire avec les bétons, Ed du Moniteur, 2000.

[13] **CORMON.P:** Béton légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, 1973, Paris.

Références bibliographiques

- [14] **Crentsil Sagoe KK, Brown T, Taylor AH** «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate». *Cem Concr Res* 2001; 31:707-12.
- [15] **CYRILE GUERANDEL** : « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de lixiviation », Thèse de doctorat, 2009 à l'Université Paul Verlaine- METZ, 2009.
- [16] **De Brito J. et Alves F.** « Concrete with recycled aggregates», 2010 the Portuguese experimental research. RILEM.
- [17] **De Juan M.S. and Gutiérrez P.A.** «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009, *Construction and Building Materials*, 23 (2), pp. 872-877.
- [18] **DEGHFEL MOUSSA, 2010** : « Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton », Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.
- [19] **Douara T.H.**, « Caractérisation physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels ». 2009.
- [20] **DR. IR. P.BOERAEVE** : « Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belge du Béton.
- [21] **DREUX.G ET FESTA.J**: « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.
- [22] **Evangelista L., De Brito J**: «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*» 2010, 32, 9-14.
- [23] **MATINE**, Fiche technique de ciment, 2013, Hammam El Dalaa.
- [24] **GRANITEX**, Fiche technique, 2013 Zone industrielle Oued Smar 16270 Alger.
- [25] **G. Maucuit-Lecomte**, **CIMBÉTON** : Fiches techniques Tome 2 : « Les bétons, composition, fabrication et mise en œuvre », 2005.
- [26] **Gérard BERNIER**, *sino dato* : « Formulation des bétons », *sino dato* maître de conférences à l'école nationale supérieure de Cachan, C 2 210.

Références bibliographiques

- [27] **Gilpin Robinson Jr R, Menzie DW**, Hyun H. « Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region », USA. Resour Conserv Recycl 2004; 42(3):275-94.
- [28] **Gómez-Soberon J.M.V.** « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, Cement and concrete research », 32 (8), pp. 1301-1311, 2002.
- [29] **GRONDIN Aurélie** « valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des Bétons de granulats recyclés de béton » Mémoire Projet de fin d'étude, 2011 à Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg.
- [30] **HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A**, « Etude du comportement d'un béton en fibres Polypropylène aux moyens des essais non destructifs » mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [31] **J.-P. Lott, et al, 2005 CHAPITRE 2** : La norme béton NF EN 206-1.
- [32] **J.-P. Lott, et al, 2005 CIMBÉTON** : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation– Edition 2005, Amprincipe Paris.
- [33] **Jean Michel TORRENTI**: « Du béton frais au béton durci », sino dato, Eléments de comportement par Directeur scientifique de l'Ecole française du béton (EFB).
- [34] **Katz A.**, « Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and concrete research », 33 (5), pp. 703-711, 2003.
- [35] **Khalaf FM, DeVenny AlanS.** « Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review ». ASCE J Mater Civil Eng 2004:331-40.
- [36] **LALAMI Sallah Eddine** « l'effet des différents modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base des agrégats recyclés », Projet de fin d'étude de Master 2, 2012 à l'Université Mohamed Elbachir Elibrahimi.
- [37] **Levy Salomon M, Paulo Helene** « Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development ». Cem Concr Res 2004; 34(11):175-80.
- [38] **MAAREF.H et MAHBOUS.R 2007** : « L'effet des modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclés », PFE Ingéniorat, 2006, département de génie civil, université de M'sila, 2006, Algérie

Références bibliographiques

- [39] **MESSOUDENE. B** : Cours « durabilité du béton », 2013 à l'Université El Bachir Ibrahimi.
- [40] **NETTAH ZOHIR ET MESSADI DJAMEL**, « l'effet de fillers de marbre sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclé », PFE Ingéniorat, 2006, département de génie civil, université de M'sila, Algérie.
- [41] **Oikonomou N.D.** «Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 27 (2), pp. 315-318, 2005.
- [42] **Otsuki N, Miyazato S, Yodsudjai W.** « Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete». ASCE J Mater Civil Eng 2003.
- [43] **Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S.**, «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 829-836, 2009.
- [44] **Québaud M.**, «Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats », Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [45] **R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman** « Granulats, sols, ciments et bétons », édition, 2009.
- [46] **Rao A.**, «Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.
- [47] **Rasheeduzzafar, Khan A.** «Recycled concrete – a source of new aggregate. Cement, Concrete and Agrégeâtes» (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.
- [48] **RICHARD ET CHEYREZY.M** : « Les bétons de poudres réactives », Annales ITBTP. Série béton 320, 1995.
- [49] **Saïd BENCHERAI**: « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables » Mémoire de fin d'étude, 2007, Université Abd Errahmane MIRA de Bejaia.

Références bibliographiques

[50] Topcu Bekir Ilker, Guncan Fuat Nedim. «Using waste concrete as aggregate». Cem Concr Res 1995; 25(7):1385-90. Topcu BI, Sengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cem Concr Res 2004; 34(8): 1307-12.