Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de : Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil **SPECIALITE : Matériaux**

THEME

Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED) d'un béton recyclé adjuvanté a base des matériaux locaux

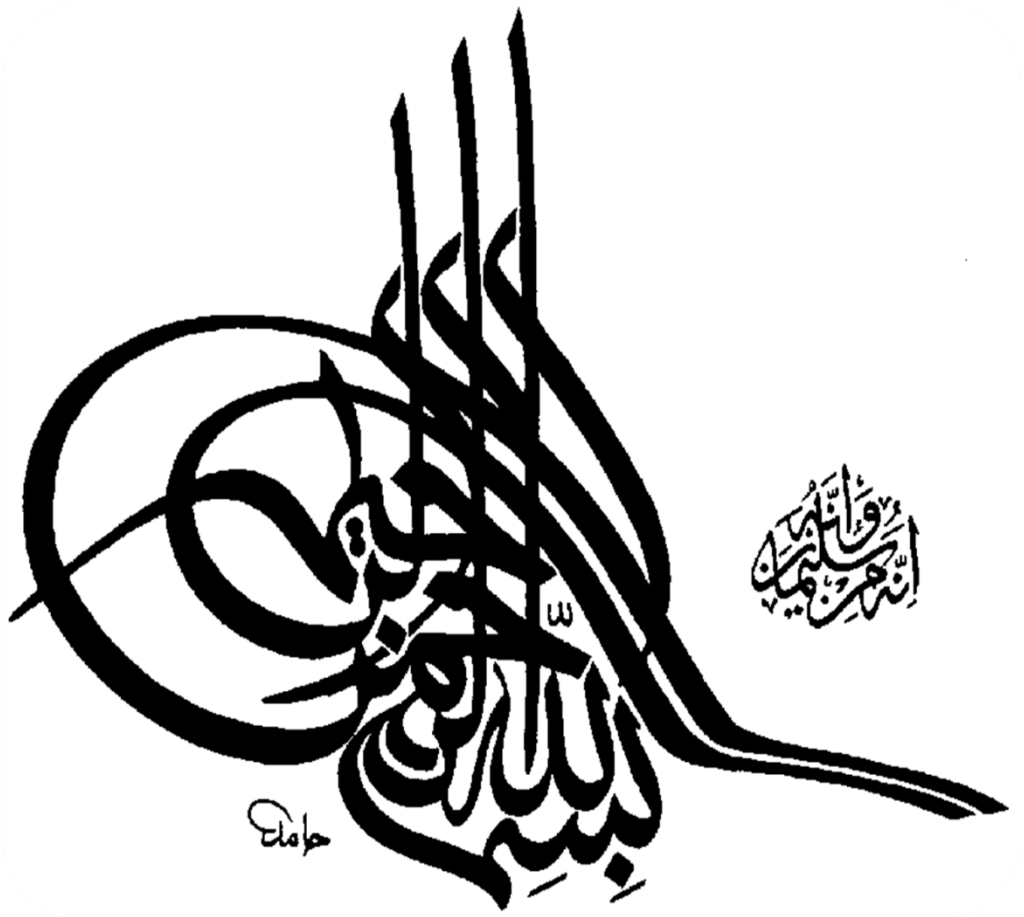
Dirigé par :

Mr. BELAGRAA Larbi

Présenté par :

BENAMRANE Toufik Amine

Promotion : 2014/2015.


بسم الله الرحمن الرحيم
إنه من سليمان وإنه

REMERCIEMENTS

*Je tiens profondément à remercier tout d'abord **ALLAH** l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.*

Je remercie infiniment mon encadreur pour son attention, ces conseille et ca précieuse aide.

BELAGRAA Larbi

Pour avoir bien voulu encadré ce travail et pour tous ses conseils précieux .
Je tiens à remercier aussi Nabil, Mohammed chrif, Antar, abdelatif et hakim des enseignants à l'université de bordj bou arreridj.
Je remercie également tous les enseignants du département de Génie civil ainsi que ceux du membre du jury et tous les professeurs qui ont participé à mon cursus (scolaires et universitaire).
Pour cette occasion je tiens a remercier les ingénieurs du laboratoire de génie civil surtout Yamna et Hanane.

En fin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à tous mes amis pour leurs soutiens moral et matériel …

BENAMRANE Toufik Amine



Dédicace

Je dédie ce mémoire de Master :

En signe de respect et de reconnaissance aux

Personnes les plus chères : ma mère et mon père.

A mes frères et mes sœurs.

A toute la famille BENAMRANE.

Aux étudiants de génie civil et toute la promotion 2015.

A vous mes amis : Ramdane, Zaki, Ismail, Khaled, Hakim,

Oussama.

Au monde du génie-civil.

A tous mes frères et sœurs en islam.

BENAMRANE Toufik Amine

Table des matières

Introduction générale

Introduction: 02

Problématique : 02

Objectifs de l'étude : 03

Structure de ce mémoire : 03

Chapitre I : Notions générales sur le béton hydraulique

Introduction : 06

I-1- Un peu d'histoire : 06

I-2- Description : 06

I-3- Classe de béton : 06

I-4- Formulation de béton : 07

I-5- Constituants du béton : 08

I-5-1- Le ciment : 08

I-6- Les granulats : 10

I-6-1- Les différents types des granulats : 11

I-6-2- Classifications des granulats : 11

I-7- Eau de gâchage : 13

I-8- Les adjuvants : 14

I-8-1- Les plastifiants : 14

I-8-2- Les retardateurs de prise du ciment : 14

I-8-3- Les accélérateurs de prise et de durcissement : 14

I-8-4- Les entraîneurs d'air : 14

I-9- Rôle des différents éléments constituants le béton : 14

I-9-1- Ciment : 14

I-9-2- L'eau : 14

I-9-3- Les granulats : 15

I-9-4- Le sable : 15

I-10- Propriétés des bétons : 15

I-10-1- Propriétés physiques : 15

I-10-2- Propriétés mécaniques : 17

I-11- Différents types de béton : 18

Chapitre II : Notions générales sur les bétons recyclés

Introduction : 20

II-1- Définition : 20

II-2- Processus de fabrication des granulats recyclés : 20

II-3- La classification des déchets : 22

II-3-1- Les déchets inertes désignés DI : 22

II-3-2- Les déchets industriels banals (DIB) : 22

II-3-3- Les déchets industriels spéciaux (DIS) : 22

II-3-4- Les déchets d'emballages : 23

II-4- Etat frais : 24

II-4-1- La teneur en air : 24

II-4-2- Masse volumique : 24

II-5- Etat durci : 25

II-5-1- Absorption : 25

II-5-2- Porosité : 25

II-5-3- Perméabilité : 25

II-5-4- Résistance à la compression : 26

II-5-5- Module d'élasticité : 26

II-5-6- Fluage et retrait : 27

II-6- Durabilité du béton à base de granulat recyclé : 27

II-7- Carbonatation : 27

Chapitre III : Essais non destructifs

Introduction : 30

III-1- Définition de méthodes non destructives : 30

III-2- Principales méthodes : 31

III-2-1- Mesures semi destructives : 31

III-2-2- Mesures non destructifs « utilisant la propagation d'ondes » : 31

III-3- Avantages et inconvénients des essais non destructifs : 33

III-4- Essai d'auscultation sonique : EN 12504-4 : 33

III-4-1- Principe de l'essai : 34

III-5- Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons : 34

III-5-1- Mesures en transparence directe : 34

III-5-2- Mesures en surface : 34

III-5-3- Mesures en transparence par rayonnement : 35

III-5-4- Interprétation des résultats mesurés : 37

III-5-5- Les avantage : 39

III-5-6- Les inconvénients : 39

III-6- Essai scléromètrique : (EN 12398) : 40

III-6-1- Principe de l'essai : 40

III-6-2- Appareillage : 41

III-6-3- Exécution des mesures : 43

III-6-4- Exploitation des résultats : 44

III-6-5- Les avantages : 44

III-6-6- Les inconvénients : 44

III-7- La méthode combinée : 45

III-7-1- Les avantages : 47

III-7-2- Les inconvénients : 47

III-8- Quelque recherches et corrélation existantes : 48

III-9- Caractérisation des propriétés du béton par l'essai d'ultrasons : 49

III-9-1- Estimation de la porosité, la perméabilité et la densité : 49

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

Introduction : 53

IV-1- Matériaux utilises : 53

IV-2- Caractéristiques des matériaux : 53

IV-2-1- Caractéristiques du gravier : 53

IV-2-2- Caractéristique du sable : 64

IV-2-3- Caractéristiques physiques du sable : 69

IV-2-4- Caractéristiques du ciment utilisé : 72

IV-2-5- L'eau de gâchage : [NA EN 1008] : 73

IV-2-6- Adjuvant : 74

IV-3- Méthode de calcul de la composition du béton : 76

IV-3-1- Méthodes de Dreux_Gorisse : 77

IV-4- Volume des mélanges d'essais : 84

IV-5- Matériels et essais : 85

IV-5-1- Les essais sur le béton à l'état frais : 85

IV-5-2- Les essais sur le béton durci : 86

IV-5-3- Détermination de la résistance par les essais non destructifs : 87

IV-5-4- La méthode combinée : 90

IV-5-5- Détermination de la résistance par les essais destructifs : 91

IV-6- Module d'élasticité dynamique : 92

IV-7- Mesure de taux d'absorption d'eau [NA EN 1097] : 93

IV-7-1- Préparation des éprouvettes : 93

IV-7-2- Expression des résultats : 94

Chapitre V : Résultats et discussions

Introduction : 96

V-1- Méthodologie adaptée pour les manipulations : 96

V-2- Présentation des résultats : 96

V-3- Propriétés physiques : 109

V-3-1- l'état frais : 109

V-3-2- l'état durci : 111

V-4- Propriétés mécaniques : 114

V-4-1- Résistance à la compression : 116

V-4-2- Résistance à la traction par flexion : 116

V-5- Etude de corrélation : 117

V-5-1- la corrélation (Rc) en fonction de (V) du béton recyclé : 117

V-5-2- la corrélation (Rc) en fonction de (V) du béton concassé : 118

V-5-3- la corrélation (Rc) en fonction de (Is) : 119

V-5-4- la corrélation (Rc) en fonction de (ρ) : 120

V-5-5- la corrélation (Rc) en fonction de (Ed) : 121

Conclusion générale : 122

Références bibliographiques.

Liste des tableaux

Chapitre I : Notion générale sur le béton hydraulique

Tableau I-1- Mode opératoire de l'essai de cône d'Abrams selon la NF18-451 :.....07

Tableau I-2- Classement de granulats.....12

Chapitre III : Essais non destructifs

Tableau III-1- Appréciation de la compacité du béton…….....38

Tableau III-2- Estimation de la contrainte de compression par quelques équations de corrélation…….....49

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

Tableau IV-1- L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) (8/16).....54

Tableau IV-2- L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) (8/16).....57

Tableau IV-3- La masse volumique apparente (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).....59

Tableau IV-4- La masse volumique apparente (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....59

Tableau IV-5- La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/15).....60

Tableau IV-6- La masse volumique absolue (ρ) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....60

Tableau IV-7- Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....61

Tableau IV-8- Porosité, compacité et indice des vides du gravier recyclé.....61

Tableau IV-9- Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie. [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012].....62

Tableau IV-10- Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA [HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012].....63

Tableau IV-11- Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (8/15).....63

Tableau IV-12- Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) concassé.....64

Tableau IV-13- Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) recyclé.....64

Tableau IV-14- Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.....64

Tableau IV-15- Module de finesse du sable.....65

Tableau IV-16- Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.....66

Tableau IV-17- Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP[BRETTE Alain,].....68

Tableau IV-18- Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.....69

Tableau IV-19- Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).....72

Tableau IV-20- Analyse chimiques du ciment MATINE.....73

73Tableau IV-21- Composition minéralogique du clinker.....73

Tableau IV-22- Propriétés physiques du ciment utilisé.....73

Tableau IV-23- Temps de prise à 20°C.....73

Tableau IV-24- Résistance mécanique à la compression.....73

Tableau IV-25- l'effet de l'adjuvant sur le béton. [GRANITEX, 2014].....75

Tableau IV- 26-Valeurs de G coefficient granulaire.....77

Tableau IV-27- Valeur du terme correcteur K.....79

Tableau IV-28- Coefficient de compacité.....80

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V-1- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 25 à base d'agrégats concassés.....97

Tableau V-2- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 30 à base d'agrégats concassés.....98

Tableau V-3- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 35 à base d'agrégats concassés.....99

Tableau V-4- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 25 à base d'agrégats recyclé.....100

Tableau V-5- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 30 à base d'agrégats recyclé.....101

Tableau V-6- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 35 à base d'agrégats recyclé.....102

Tableau V-7- Taux d'absorption d'eau (A) des bétons concassés (BAC).....103

Tableau V-8- Taux d'absorption d'eau (A) des bétons recyclés (BAR).....104

Tableau V-9-l'indice sclérometique Rc des bétons concassés à 28 jours. 105

Tableau V-10- l'indice sclérometique Rc des bétons recyclés à 28 jours.....105

Tableau V-11- E/C de béton concassé (BAC).....105

Tableau V-12- E/C de béton recyclé (BAR).....105

Tableau V-13- Module d'élasticité dynamique (BAC 25).....106

Tableau V-14- Module d'élasticité dynamique (BAC 30).....106

Tableau V-15- Module d'élasticité dynamique (BAC 35).....107

Tableau V-16- Module d'élasticité dynamique (BAR 35).....107

Tableau V-17- Module d'élasticité dynamique (BAR 25).....108

Tableau V-18- Module d'élasticité dynamique (BAR 30).....108

Liste des figures

Chapitre I : Notion générale sur le béton hydraulique

Figure I-1- Représentation schématique d'un solide poreux 09

Figure I-2- cuisson de clinker:.....09

Figure I-3- différents types de ciments courants.....12

Chapitre II : Notions générales sur les bétons recyclés

Figure II-1- Réception des bétons de démolition : 21

Figure II-2- Stock de matériaux destiné au recyclag : 21

Figure II-3- Préparation à la cisaille : 21

Figure II-4- dé ferraillage électromagnétique : 21

Figure II-5- Agrégats recyclés : 22

Figure II-6- Compositions des déchets de bâtiments : 23

Chapitre III : essais non destructifs :

Figure III-1- Mesures en transparence directe : 34

Figure III-2- Mesures en surfac : 35

Figure III-3- Mesures en transparence par rayonnement…….....35

Figure III-4- Points de mesures pour une dalle et un poteau….....36

Figure III-5- Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel…….....39

Figure III-6- Scléromètre digital…….....40

Figure III-7- La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ouangulaire)……..... 41

Figure III-8- Vu en coupe d'un scléromètre et ses composantes.....…..42

Figure III-9- Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm3…….....43

Figure III-10- La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides……...…….....……45

Figure III-11- Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice scléromètrique selon U.Bellander (1977)….....47

Figure III-12- Variation vitesse d'ultrason en fonction de la porosité…….....50

Figure III-13- Corrélation entre la densité et la vitesse d'ultrason…….....50

Figure III-14- La relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les modules :.....51

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

Figure IV-1- Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).....55

Figure IV-2- Procédure de préparation des granulats recyclés.....55

Figure IV-3- concassage, criblage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.....56

Figure IV-4- Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/15).....57

Figure IV-5- les boules avant l'essai.....63

Figure IV-6- Appareil de Los Angeles.....63

Figure IV-7- Courbe granulométrique du sable de dune.....66

Figure IV-8- Essais de l'équivalent de sable 67

Figure IV-9- Dosage en ciment.....78

Tableau IV-10- la courbe granulaire de référence.....80

Figure IV-11- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 25).....81

Figure IV-12- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 30).....81

Figure IV-13- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 35).....82

Figure IV-14- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 25).....82

Figure IV-15- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 30).....83

Figure IV-16- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 35).....83

Figure IV-17- Appareil ultrason.....88

Figure IV-18- Appareil Scléromètre.....89

Figure IV-19- Presse hydraulique capacité 3000 KN.....92

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V-1- La variation du rapport (E/C) pour les différents types du béton (recyclé, concassé).....109

Figure V-2- La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons (recyclé, concassé).....110

Figure V-3- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 7 jours.....111

Figure V-4- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 14 jours.....111

Figure V-5- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 28 jours.....112

Figure V-6- Absorption d'eau des bétons recyclés (BAR) et concassés (BAC).....113

Figure V-7- résistance à la compression des bétons étudiés à 7 jours.....114

Figure V-8- résistance à la compression des bétons étudiés à 14 jours.....114

Figure V-9- résistance à la compression des bétons étudiés à 28 jours.....115

Figure V-10- La variation de la résistance à la traction par flexion (Rt) à 28 jours.....116

Figure V-11- Résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons recyclé (BAR).....117

Figure V-12- Résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons concassé (BAC).....118

Figure V-13- Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérometique des bétons (BAC) et (BAR).....119

Figure V-14- Résistance à la compression en fonction de la masse volumique des bétons

(BAC) et (BAR).....120

Figure V-15- Résistance à la compression en fonction de Module d'élasticité dynamique des bétons (BAC) et (BAR).....121

Notations

C25 : classe 25.

C30 : classe 30.

C35 : classe 35.

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.

Ed: module d'élasticité dynamique.

Is : indice scléromètrique.

Dmax : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

ρ_{abs} **:** masse volumique absolue.

ρ_{app} **:** masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

e(%) : indice des vides.

Pc(%) : porosité à l'état compacte.

Cc(%) : compacité à l'état compacte.

ec(%) : indice des vides à l'état compacte.

LA : coefficient de Los Angeles.

A (%) : taux d'absorption.

Mh : La masse du matériau sature d'eau.

Ms : La masse du matériau sec.

MF : module de finesse du sable.

Esv : équivalent de sable visuel.

Esp : équivalent de sable par piston.

γc : masse volumique à l'état compacte.

γL : masse volumique à l'état lâche.

G : gravier.

S : sable.

Rus : résistance combinée.

R_f **:** résistance à la traction par flexion.

BAC : béton à base d'agrégats concassé.

BAR : béton à base d'agrégats recyclés.

ρ_{FRAIS} **:** la masse volumique à l'état frais.

ρ_{durci} **:** la masse volumique à l'état durci.

Rc : résistance à la compression.

0%,1% et 2% : pourcentage d'adjuvant.

P_L**(%) :** porosité à l'état lâche.

C_L**(%) :** compacité à l'état lâche.

eL(%) : indice des vides à l'état lâche.

SP : super plastifiant

ملخص

تعد الحصى من المكونات الضرورية في تركيب الخرسانة العادية أو الخاصة. إن استعمال الحصى المسترجعة ذات أهمية كبيرة من وجهة النظر الاقتصادية و البيئية. هذه الدراسة تهدف إلى تقدير تأثير المضافات الممتازة (**Super plastifiant**) **بالمزاوجة** مع الحصى المعادة من الخرسانة القديمة على سلوك الخرسانة المسترجعة

– **أولا:** البرنامج التجريبي في هذه الدراسة يهدف لرؤية مدى تأثير هذه المضافات **[SP 150]** بنسب (**0%، 1% و2%**) على الخصائص الفزيائية والميكانيكية للخرسانة التي تحتوي على حصى مسترجعة والخرسانة الشاهدة المكونة من الحصى المكسرة، تم اختيار ثلاثة أصناف خرسانية (**C35, C30, C25**) خلال برنامج التجارب.

– **ثانيا:** ماهية عملنا هذا هو دراسة الارتباط بين مقاومة الضغط (**Rc**) والموجة الصوتية (**V**) ومؤشر الصدم (**Is**) كوسائل غير تحطيمية على أنواع الخرسانة المدروسة وهذا بغية البحث عن علاقة رياضية بين القيم المحصلة في التجارب والمقاومة المتوقعة للضغط.

أظهرت النتائج المتحصل عليها بأن استعمال الاضافات يؤدي إلى تحسن طفيف (الكتلة الحجمية، نقص في الامتصاص والمقاومة الجيدة) للخرسانة المسترجعة والعادية . هذه الارتباطات بين الخصائص المتحصل عليها بين (**Rc**),(**V**),(**Is**) تعتبر مقبولة وهي تتبع قانون الدالة الأسية والخطية على التوالي.

كلمات مفاتيح : الحصى المسترجعة، الاضافات، الخصائص الفزيائية والميكانيكية، معامل المرونة الديناميكي، والاختبارات الغير التحطيمية.

Résumé

Les granulats sont considérés comme constituants essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux. L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue économique et environnemental.Cette étude vise à apprécier l'effet de l'incorporation de l'adjuvant super-plastifiants et en combinaison avec des granulats récupérés d'ancien béton sur le comportement de béton recyclé.

- **En premier lieu** ; le programme expérimental dans cette investigation a pour objectifs de voir l'effet de l'adjuvant super plastifiant [SP 150] avec différents dosages (0%, 1% et 2 %) sur les propriétés physico- mécaniques d'un béton à base d'agrégats recyclés et un béton témoin confectionné avec des graviers concassés. Le choix de trois classes de bétons (C25, C30 et C35) pour le Protocol expérimental a été arrêté.

- **En deuxième partie** ; la finalité de notre travail est de mener une étude de corrélation entre la résistance à la compression (Rc) en fonction de la vitesse ultrason (V) et l'indice scléromètrique (Is) comme moyens d'essais non-destructifs (END) pour les deux types de bétons étudiés. Ceci pour établir une relation mathématique entre les grandeurs mesurés et celles estimées pour la prédiction de la résistance à l'écrasement (Rc).

Les résultats obtenus ont montré que, l'adjuvant provoque une amélioration des propriétés physico-mécaniques (une légère amélioration de la masse volumique, diminution de l'absorption et une bonne résistance) des bétons recyclés (BAR) et concassé (BAC) adjuvantés. Les corrélations obtenues pour Rc en fonction de (V) et (E_d) sont acceptables et de types exponentielles et linéaire, respectivement.

Mots clés : Granulats recyclés, adjuvant, propriétés physico- mécaniques, module d'élasticité, essais non destructif.

Abstract

The aggregates are regarded as essential components in the composition of the ordinary concrete or the special concretes. The use of the recycled aggregates has a great importance from an economic and environmental point of view. This study aims at appreciating the effect of incorporation of the super-plasticizer as admixture and combined with recovered aggregates of old concrete on the recycled concrete behavior.

- Initially; the experimental program in this investigation aims to see the effect of the super-plasticizier admixture [SP 150] with various dosages (0%, 1% and 2%) on the physic-mechanical properties of a concrete based on recycled aggregates and a reference concrete made with crushed aggregates. The choice of three concrete grades (C25, C30 and C35) for experimental Protocol was made.

- For the second part; the present work is to undertake a study of correlation between the compressive strength (Rc) according to the ultrasonic velocity (V) and the rebound hammer number (Is) as nondestructive tests (NDT) for the two types of studied concretes. This to establish a mathematical relation between the measured values and those estimated for the prediction of the strength at compression (Rc).

The results obtained showed that the admixture causes an improvement of the physic-mechanical properties (a slight improvement of the density, reduction in the absorption and better strengths) of the recycled concretes (BAR) and crushed (BAC). The correlations obtained for Rc according to (V) and (E_d) are acceptable and of exponential and linear types , respectively.

Key words: Recycled aggregates, admixture, physic-mechanical properties, modulus of elasticity, non-destructive tests (NDT).

Introduction générale

Introduction générale

Introduction:

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ, 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment ; des bâtiments, d'immeubles d'habitation, ponts, routes, tunnels, aéroports, barrages, ports, centrales thermiques ,nucléaires et de plates-formes offshore,…etc.

Ce matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment d'eau et parfois d'adjuvants.

Il est alors évident que la conception correcte d'un ouvrage quel qu'il soit requiert ; la connaissance des propriétés des matériaux utilisés pour le calcul et dimensionnement des pièces des différentes structures. Cette connaissance des propriétés des matériaux implique que la constitution de celui-ci doit être connue en premier lieu. L' utilisation massive de quantités énormes dans l'industrie de fabrication du béton poussent les spécialistes du génie civil à chercher des alternatives comme le cas d'un béton à base d'agrégats recyclés qui peut présenter une solution pour réduire l'impact sur l'environnement et économiser les ressources de granulats naturels. Cet usage peut être combiné avec des additions telle que les adjuvants ; notamment les superplastifiants ; afin de surmonter certains inconvénients en matière de résistance ou de durabilité de ces produits dits bétons recyclés.

Problématique :

Les agrégats récupérés d'ancien béton peuvent provoquer la chute de résistance du béton recyclé en comparaison avec un béton ordinaire due à la nature des granulats recyclés de qualité inférieure. Cependant, cet handicap peut être remédié par l'usage d'autres additions comme les adjuvants superplastifiants pour améliorer certaines propriétés de ce béton recyclé et par conséquent avoir un béton alternatif ayant des performances en termes de résistance et durabilité similaire au béton conventionnel.

Cette étude vise l'investigation de l'effet de l'adjuvant superplastifiant avec différents dosages sur les propriétés physico- mécaniques d'un béton à base d'agrégats recyclés et le comparer

un béton témoin confectionné avec des graviers concassé. Il s'agit, d'apprécier l'influence de cette incorporation sur le comportement de celui-ci.

Une étude de corrélation a été menée entre la résistance à la compression (Rc) en fonction de la vitesse ultrason (V) et l'indice sclérometique (Is) comme moyens d'essais non-destructifs (END) pour les deux types de bétons étudiés.

Objectifs de l'étude :

Cette étude vise l'investigation de l'effet de l'adjuvant superplastifiant avec différents dosages (0%, 1% et 2 %) sur les propriétés physico- mécaniques d'un béton à base d'agrégats recyclés et un béton témoin confectionné avec des graviers concassés. Trois classes de bétons ont été choisies (C25, C30 et C35) pour le programme expérimental.

L'étude a pour but :

- Voir l'effet combiné de la classe de béton avec l'adjuvant sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un béton recyclé.
- Valoriser les déchets, telle que les agrégats récupérés de la démolition des constructions (C& D).
- Étude de comparaison des bétons recyclés avec des bétons conventionnels.
- Étudier la corrélation entre les grandeurs obtenues par les essais indirects ultrason (V) et l'indice sclérometique (Is) pour la prédiction de la valeur de la résistance à l'écrasement (Rc).

Structure de ce mémoire :

Ce mémoire est composé de Cinque chapitres qui sont les suivants :

- Introduction générale, Problématique, Objectifs et structure de mémoire.

Chapitre I : Revue bibliographique, notions générales sur le béton hydraulique : consiste à donner une idée générale sur l'apparition, la définition et le domaine d'application du béton.

Chapitre II : Notions générales sur les bétons recyclés.

Chapitre III : Un aperçu sur les essais directs (écrasement) et essais non destructifs (END).

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais : donne une idée sur les essais utilisés pour la caractérisation physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, ainsi que sur les matériels utilisés pour ces essais.

Chapitre V : Résultats et discussion : Présente les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations faites.

- Une conclusion générale : on va présenter les principales conclusions tirées à partir des résultats obtenus lors de cette étude ainsi que les futurs travaux suggérés en forme de perspectives.

CHAPITRE I :

Notions générales sur le béton hydraulique

Chapitre I : Notions générales sur le béton hydraulique

Introduction :

Sans aucun doute, le béton est un matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ces propriétés physiques, économiques et notamment mécaniques permis aux architecteurs et ingénieures de génie civil de libérer ses idées et ses imaginations en des ouvrages et édifices réels.

Dans ce première chapitre, on va donner un aperçue général sur le béton et ses composantes et voir quelques caractéristiques essentielles du béton.

I-1- Un peu d'histoire…

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite.

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 Aspdin** qui en **1824** fait breveter le ciment Portland.

I-2- Description :

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et de l'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci à pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I-3- Classe de béton :

La grande diversité des bétons a conduit à définir et préciser des critères de bases pour leur classification et leur désignation.

Les critères fondamentaux adoptés sont au nombre de cinq :

La résistance à la compression ; Cette résistance est mesurée sur des éprouvettes cylindrique, cubique et prismatique à l'âge de 7, 14, 21 et 28 jours.

La recommandation **CEB-FIR** classe les bétons, en fonction de leurs résistances caractéristique comme suit;

- **C12**……....utiliser seulement pour les bétons non armé.
- **C16, C20**……..utiliser pour les bétons armés.
- **C25, C30, C35**……...utiliser pour béton armé ou précontraint.
- **C40, C45, C50**……...utiliser pour le béton de précontrainte.
- **C60, C70, C80**……...utiliser dans les cas spéciaux.

La consistance : représentant l'aptitude à la mise en œuvre (ouvrabilité) et mesurée par un test de plasticité : l'essai d'affaissement ou cône d'Abrams.

ENV 206		NFP 18-305 et fascicule 65A CCTG		
Consistance	**Affaissement (mm)**	**Consistance**	**Affaissement (cm)**	**toléranc**
S_1	10 à 40	Ferme (F)	1 à	± 1 cm
S_2	50 à 90	Plastique(P)	5 à	± 2cm
S_3	100 à 150	Très plastique(TP)	10 à 15	± 3 cm
S_4	160 à 210	Fluide(F)	≥1	
S_5	≥220			

Tableau I-1- Mode opératoire de l'essai de cône d'Abrams selon la NF18-451

- La dimension des granulats utilisés 0/D, D étant la dimension maximale exprimée en (mm).
- Le dosage minimal de ciment en Kg par m^3 de béton.
- La désignation du ciment d'après les indications normalisées (par exemple CPJ **42.5**).

I-4- Formulation de béton :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- la méthode **Baron** ;

- la méthode **Bolomey** ;
- la méthode de **Féret** ;
- la méthode de **Faury** ;
- la méthode **Dreux-Gorisse**.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme **NF EN 206-1**, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats**.**

D'autres exigences de la norme **NF EN 206-1** imposent l'emploi de ciment particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc**.**

I-5- Constituants du béton :

I-5-1- Le 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 (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau.

a- Le ciment Portland (aussi appelé clinker Portland) :

Il s'agit d'un mélange, finement moulu de roche calcaire(**craie**) et de schiste (**argile**) , homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu(**1500°C**) dans un four rotatif. Ensuite ce mélange est refroidi rapidement et enfin broyé. On obtient ainsi le clinker Portland.

Le clinker est finement broyé pour donner un ciment. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, gros cylindres chargés de boulets d'acier et mis en rotation.

Lors de cette étape, le gypse (**3** à **5%**), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment.

Les matières premières (calcaire, argile) sont obtenues à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Elles sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. C'est la raison pour laquelle les cimenteries sont situées près de carrières de calcaire ou de craie. **[1]**

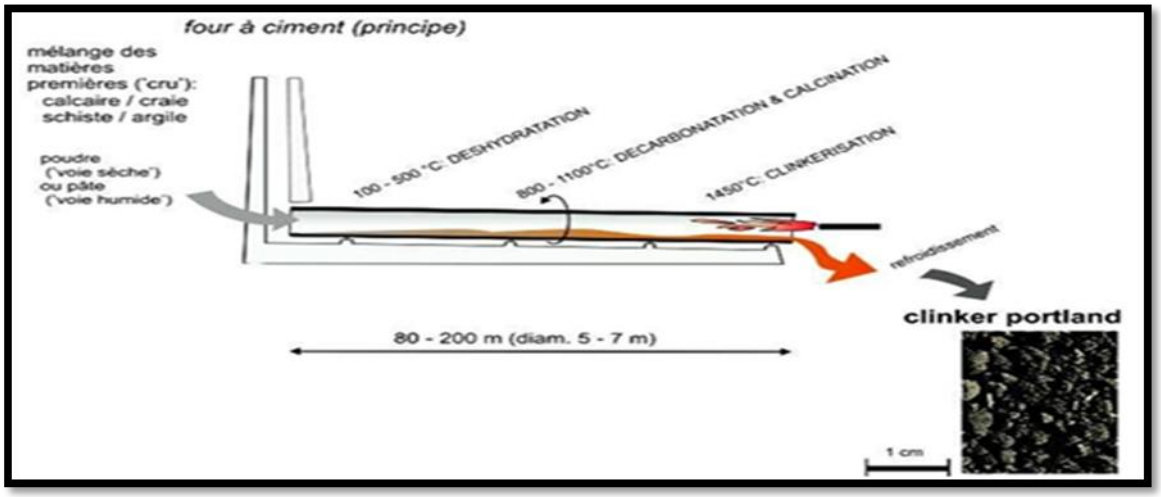


Figure I-1- cuisson de clinker. [1]

b- Autre type de ciment :

Au clinker Portland peuvent être ajoutés un ou plusieurs des ingrédients suivants :

- **laitier de haut-fourneau :** produit granulé qui est obtenu par le refroidissement brusque de la gangue en fusion des hauts fourneaux. Constituant à hydraulicité latente, c.-à-d. quel'hydratation doit être activée. Le rôle de démarreur est joué par le clinker Portland.
- **cendre volante :** réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du clincker.
- **calcaire :** constituant inerte. Intervient physiquement comme plastifiant dans le béton frais. **[1]**

c- Ciments courants :

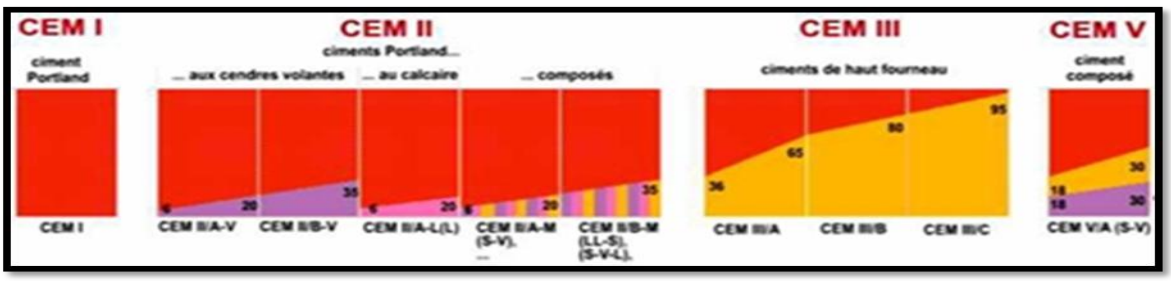


Figure I-2- Différents types de ciments courants. [1]

Clinker Portland (K) (calcaire cuit dans four a ciment : constituant hydraulique**).**

Laitier de haut-fourneau (S) (produit résiduel de l'industrie sidérurgique : constituant hydraulique).

Cendre volantes siliceuses (V) (produit résiduel des centrales thermiques alimentées au charbon : constituant pouzzolanique c.-à-d. réagissant avec la chaux libre).

Calcaire (L ou LL) (matière issue des carrières).

D'autres ciments font l'objet de normes spécifiques :

- Le ciment prompt naturel (**CNP**) **NF P 15-314** ;
- Le ciment alumineux fondu (**CA**) **NF P 15-315** ;
- Le ciment à maçonner (**MC**) **NF EN 413-1** ;
- Les ciments pour travaux à la mer (**PM**) **NF P 15-317** ;
- Les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (**ES**) **XP P 15-319** ;
- Les ciments à teneur en sulfures limitée (**CP**) **NF P 15-318. [3, 4,6]**

I-6- Les granulats :

(Sables, gravillons) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières (ou sablières) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

On utilise en général, pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par du sable et des gravillons.

On emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes (argiles expansées) et les silicates (vermiculite e et perlite). Les premiers permettent la fabrication de bétons de structure légers, dont la résistance peut atteindre de **40** à **50 MPa**. Les seconds servent à la fabrication de

parois en béton très léger, à fort pouvoir d'isolation thermique. Le poids volumique apparent de ces granulats varie d'environ **0.6** à **8 kN/m3**.

I-6-1- Les différents types des granulats :

Dans les normes récentes (**P 18-541** et **P 18-542**) basées sur les acquis de la recherche et de l'expérience fixe des spécifications réalistes qui prennent en compte utilisation, sécurité, fiabilité et coût. On distingue.

a- Granulats naturels :

Les granulats naturels Issus de déférentes roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (concassage, broyage, criblage, lavage, sélection).

Sable et gravier de revivre, sable de mer, et sable de dune dite de désert.

b- Granulats artificiels :

Qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

I-6-2- Classifications des granulats :

Les granulats sont classés en fonction leurs démontions par criblage sur des tamis à mailles carrées dont les dimensions intérieures sont en (mm).

Le terme (granulats d/D) est réservée granulats sont les dimensions s'étalent de d pour les petits à D pour les refus grands. **[2]**

Le tableau suivant détermine les classes des granulats

Appellation	**Mailles carrées des tamis (mm)**	
Chapitre I Farine, fillers		**<0.08**
Sable	Petits Moyens Gros	0.080 < D<0.310 0.310 < D < 1.250 1.250 < D < 5.00
Gravillons	Petits Moyens Gros	5.00 < D < 8.00 8.00 < D < 12.50 12.50 < D < 25.00
Pierres cassées	Petits moyens gros	25.00 <D < 40.00 40.00 < D < 63.00 63.00 < D <100.00

Tableau I-2- Classement de granulats. [2]

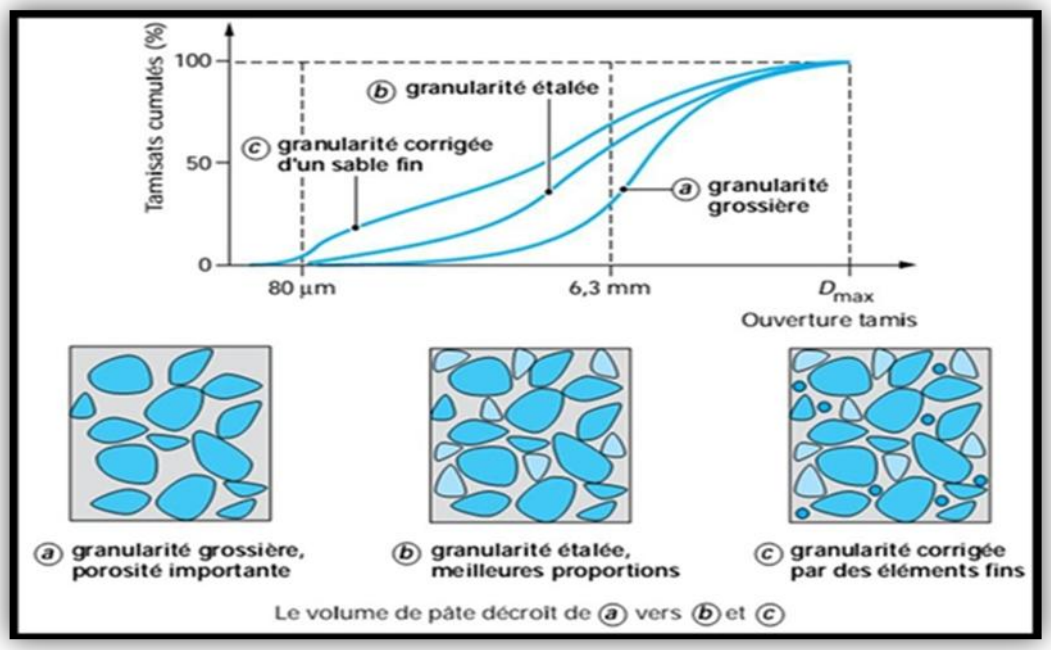


Figure I-3- Compacité d'un béton en fonction de la granulométrie du squelette granulaire. [10]

a- Le gravier :

Grains de dimensions allant de 1 à 125 mm, d'après la norme P18-591, l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments<0,5mm, le pourcentage de

vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être ≤1,5% pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et ≤ 3% pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau la norme NF P18 541 [8] fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

b- Le sable :

Grains de dimensions allant de 0 à D où 1< D ≤ 6,3 mm, à l'essai Equivalent de Sable (ES) la norme P 18-598 [9] sont préférable les sable ayant un ES compris entre 75 et 85 %, de granularité définie principalement par les paramètres suivant : teneur en fines (passant à 0,08mm ≤ 12%) ; le module de finesse (Mf = 1,8 à 3,2) le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité se situe à 2,5 ±0,35 environ; une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour la maniabilité du béton(norme P18-541)**.**

c- LES FILLERS :

Grains de dimensions allant de 0 à D ou D < 2 mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm d'après (la norme XP P 18-540**).**

I-7- Eau de gâchage :

Le "gâchage" est l'opération irréversible d'ajout de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage.

L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton.

La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) du mélange.

Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation).

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement le durcissement (matières organiques telles que huiles, graisses, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...).

L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir.

On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnantes odoriférantes.

I-8- Les adjuvants :

Sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont :

I-8-1- Les plastifiants :

Qui jouent un double rôle. Ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide, donc très maniables, par défloculation des grains de ciment. A maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton. La résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. La durée d'action de ces adjuvants est de 1 à 3 heures.

I-8-2- Les retardateurs de prise du ciment :

Qui prolongent la durée de vie du béton frais. Ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances ou la mise en place par pompage, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.

I-8-3- Les accélérateurs de prise et de durcissement :

Qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et, pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance au béton durci.

I-8-4- Les entraîneurs d'air :

Qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégel successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène. Le volume d'air occlus doit être de l'ordre de 6% de celui du béton durci.

I-9- Rôle des différents éléments constituants le béton :

I-9-1- Ciment : c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.

I-9-2- L'eau : c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.

I-9-3- Les granulats : ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.

I-9-4- Le sable : il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

I-10- Propriétés des bétons:

I-10-1- Propriétés physiques :

a- Ouvrabilité:

Est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ces caractéristiques. 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) Et l'essai d'étalement à la table à secousses. Mais les essais bébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes. **[3]**

b- 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 situé dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton cinq types de retrait :

Le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation. Ces retraits provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures micro et macroscopiques à la surface de l'élément de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, tels l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs. **[3]**

- Retrait plastique ;
- Retrait endogène ;
- Retrait de séchage ;
- Retrait thermique ;
- Retrait de carbonatation. **[3]**

c- 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.

On distingue les pores contenus dans les granulats leur taille et leur volume n'évoluent pas, par contre ceux se trouvant dans la pâte de ciment leur dimension diminue avec la progression d'hydratation on distingue :

Les pores capillaires (0,01 µm≤ diamètre≤ 0.5 µm) occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, leur taille et leur volume dépendent du rapport E/C. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante de ces pores.

Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels (0.01 µm<diamètre<5µm) sont présents dans le gel de C-S-H. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C. Ces pores sont divisés en pores inter cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même. **[4]**

Les bulles d'air occlus (10µ<diamètre<1mm) piégées non intentionnellement à l'intérieur du béton lors du malaxage du béton frais. **[4]**

d- La diffusivité :

Il est indispensable de pouvoir caractériser de façon précise et complète la microstructure des matériaux à base de ciment, dans la mesure où celle-ci conditionne non seulement les propriétés mécaniques, mais également celle liées à la durabilité de ces matériaux **[5].** La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré. Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse.

e- La perméabilité :

Elle est relative au déplacement d'un fluide sans l'effet d'une pression motrice; elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion [**6], [7].**

L'inconvénient majeur dans sa détermination réside dans le grand nombre d'infiltration possibles. En effet, selon la composition du fluide interstitiel (pluies, acides, eau de mer ou gaz), et le mode de préparation, nous obtiendrons des écoulements et donc des valeurs très différentes. D'où l'intérêt de préciser une valeur intrinsèque de perméabilité **[8].**

I-10-2- Propriétés mécaniques :

a- Résistance mécanique:

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir : la nature et la qualité des constituants (ciments, granulats, eau, adjuvant) ; les conditions de mise en œuvrent de ces constituants ; les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation. Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

b- Résistance à la compression :

Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages.

En béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression Rc28 mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3. **[9]**

c- Résistance à la traction :

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par Ft28. **[9]**

d- 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'isolé : 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 chlore (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 déverglace…), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides …etc.

I-11- Différents types de béton:

- Béton auto plaçant (BAP)
- Bétons de hautes performances (BHP)
- Béton de fibres
- Béton compacte au rouleau (BCR)
- Béton préfabriqué
- Bétons à durcissement rapide
- Béton de terre
- Béton léger
- Béton lourd
- Le béton extra lourd
- Le béton réfractaire
- Béton de poudre réactive (BPR)
- Béton ordinaire.

CHAPITRE II :

Notions générales sur les bétons recyclés

Chapitre II : Notions générales sur les bétons recyclé

Introduction :

Le développement durable est devenu un véritable enjeu stratégique dans ses trois dimensions. Il touche de façon directe les matériaux de construction, que ce soit du point de vue des émissions de CO_2, de la consommation d'énergie, de la consommation des matières premières naturelles et de l'accès à leur ressource, ou de la génération de déchets (au moment de la construction et lors de la déconstruction). Cela crée de nouveaux enjeux, importants pour les professionnels de la construction, et en particulier pour les utilisateurs des ouvrages.

Il s'agit alors de répondre aux questions sur la façon d'aboutir à :

- des diminutions importantes d'émissions de gaz,
- la réduction de la consommation énergétique,
- la protection des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus rare,
- la valorisation des matériaux de déconstruction pour limiter voire éliminer les mises en décharge**.**

II-1- 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.**[10]**

II-2- 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 et le Stockage.
- Analyses éventuelles avant utilisation.



Figure II-1- Réception des bétons de démolition



Figure II-2- Stock de matériaux destiné au recyclage



Figure II-3- Préparation à la cisaille



Figure II-4- dé ferraillage électromagnétique.



Figure II-5- Agrégats recyclés.

II-3- La 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…). Ces déchets de démolition font partis des déchets industriels dans la classification usuelle (à distinguer des déchets urbains et des déchets agroalimentaire). **[11]**

Il est nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets industriels. Quatre grandes catégories permettent de classer ces déchets industriels :

II-3-1- Les déchets inertes désignés DI: La Directive européenne **1999/31/CE** concernant la mise en décharge des déchets définit 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'entrainent pas de pollution de l'environnement et ne peuvent nuire à la santé humaine. **[11]**

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

II-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**). **[11]**

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

II-3-3- Les déchets industriels spéciaux (**DIS**) : ou déchets dangereux **(DD)**: En opposition avec les DIB, 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. **[11]**

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

II-3-4- Les déchets d'emballages : dont le traitement impose une valorisation au-delà d'une certaine quantité produite (volume hebdomadaire : 1100 litres : décret du 13 juillet 1994 modifié le 30 juillet 1998)

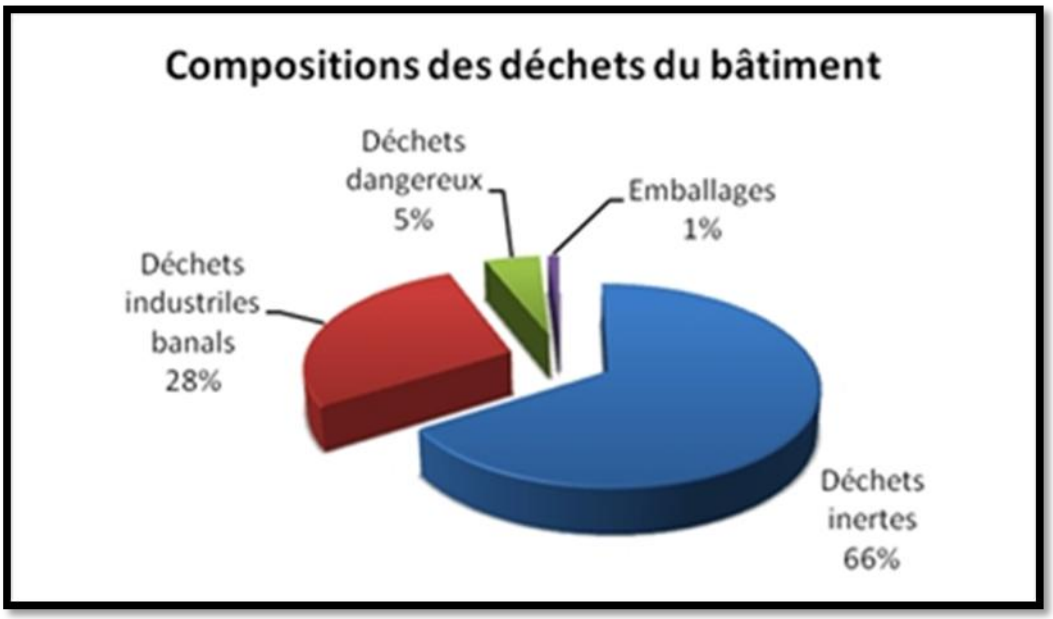


Figure II-6- Compositions des déchets de bâtiments

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets. **[12]**

En effet, la composition approximative des déchets de démolition en Grèce se répartit comme suit:

- béton (40 %),
- brique (30 %),
- bois (10 %),
- plastique (5 %),
- métaux (5 %),

- autres éléments (10 %).

La démolition des routes génère des déchets d'enrobés mais également des déchets de bétons hydrauliques.

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.

L'étude actuelle porte sur la caractérisation des propriétés des granulats recyclés de béton et leur valorisation dans la fabrication des bétons.

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.

II-4- Etat frais :

II-4-1- 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. **[13]**

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

II-4-2- 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 **[14 -13].**

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.

II-5- Etat durci :

II-5-1- 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 **[15].**

II-5-2- 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 **[13].**

II-5-3- Perméabilité :

Selon**,** 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.**[16]**

II-5-4- Résistance à la compression :

Des études antérieures montrées que lors du remplacement des agrégats naturels par des granulats recyclés, les caractéristiques et propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclé changent. Il provoque une réduction sur ces propriétés mécaniques.**[17].**

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 recyclé (élevé, moyen ou faible résistance), le ratio de remplacement, de l'eau / ciment et l'état d'humidité des granulats recyclés **[18-19].**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% **[13].** 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 **[20].**

Selon **[21]** la comparaison des performances du béton à base de granulat recyclé par rapport à un béton de même composition formulé avec des granulats naturels donne les indications suivantes résistances à la compression inférieure d'environ 10 à 30 %. 3.10.2.5 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 **[20].** 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 granulat recyclé et du béton de référence à 28 jours **[19].** 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 granulat recyclé **[19].**

II-5-5- 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 granulat recyclé (26,6 GPa) ne semble pas dépendent de l'âge de l'éprouvette de béton (à rappeler que la valeur conventionnellement utilisée pour un béton ordinaire est 35 GPa) **[12].**

II-5-6- 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 granulat recyclé 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 granulat naturel est seulement d'environ 0,30 mm / m **[13].**

Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évident, 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 granulat naturel **[19].** Bien que davantage de travaux de recherche sont nécessaires dans le domaine, il semble que le comportement global du béton à base de granulat recyclé et béton à base de granulat naturel peut être comparable lors de l'affichage de l'effet combiné du retrait et du fluage.

II-6- Durabilité du béton à base de granulat recyclé :

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 granulat recyclé est beaucoup plus perméable que le béton à base de granulat naturel, donc est un béton moins résistant à un degré satisfait 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.

II-7- 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 granulat naturel **[18-22].**On voit que pour le même ratio liant de l'eau, la profondeur de carbonatation du béton à base de granulat recyclé est légèrement plus élevée que celui du béton à base de granulat naturel **[23].**

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

D’une manière générale, les auteurs s’accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels **[24]**

CHAPITRE III :

Essais non destructifs

Chapitre III : Essais non destructifs

Introduction :

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont que les résultats ne sont pas obtenus immédiatement; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car le cure ou le compactage peuvent être différents; ainsi que les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme. **[25]**

Afin de contourner les inconvénients des méthodes destructives, une gamme d'essais in-situ, appelés essais non destructifs, a été développée, étant entendu que la structure peut être contrôlée sans toutefois modifier, ni sa performance ni son apparence. **[26]**

Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et la capacité de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma. **[25]**

Dans notre travail, en va essayer d'établir des corrélations entre la résistance à la compression et les résultats des essais d'ultrason et scléromètre, ainsi que la caractérisation de quelques propriétés mécaniques et physique du béton.

III-1- Définition de méthodes non destructives :

Ils représentent des méthodes de reconnaissances couramment appliquées aux ouvrages. Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les éléments de structure. Ces essais ont la particularité d'être rapides et faciles à mettre en œuvre**. [27]**

Les Contrôles Non Destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, sans les dégrader.

Ils peuvent être appliqués pratiquement à tous les stades de vie d'un élément:

- Production ;
- Utilisation ;
- Étude de vieillissement ;
- Maintenance. **[28]**

III-2- Principales méthodes :

L'utilisation de méthodes dites non destructives applicables in situ est primordiale dans les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées ci-après**. [28]**

III-2-1- Mesures semi destructives :

Une série de méthodes permet d'évaluer in situ la résistance mécanique en surface du béton. Leur utilisation est assez répandue et est normalisée (norme européenne EN 13791). Des scléromètres permettent de mesurer la dureté de la surface de béton. La hauteur de rebond d'une masse projetée avec une certaine vitesse sur la surface du béton permet de remonter à la résistance en surface du béton. Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton**. [29]**

D'autres méthodes telles que les essais de résistance à la pénétration (sonde Windsor) ou des essais d'arrachements d'une tige métallique scellée dans le béton (pull-out) fournissent également des informations locales sur la résistance à la compression du béton en surface. Ces méthodes sont partiellement destructrices car elles laissent des impacts et des trous dans le parement que l'on peut reboucher facilement**. [29]**

Ces méthodes sont couramment utilisées sur les ouvrages et peuvent donner des informations très utiles aux maîtres d'œuvres. Cependant, la précision reste faible et l'information n'est que locale**. [29]**

III-2-2- Mesures non destructifs « utilisant la propagation d'ondes » :

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes et l'interaction de ces ondes avec le béton sont parmi les méthodes ayant le plus grand potentiel pour l'évaluation non destructive du béton. En effet, les propriétés de la propagation des ondes sont directement liées aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces ondes peuvent être de

type électromagnétique ou mécanique et sont sensibles à des propriétés différentes du béton. Elles peuvent être utilisées pour obtenir des informations à différentes échelles (millimétrique centimétrique, ou de l'ordre de la dizaine de centimètres) en fonction de la longueur d'onde utilisée**. [29]**

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes électromagnétiques sont les méthodes capacitives, résistives, ou les méthodes GPR (Grounds Pénétration Radar). Les ondes électromagnétiques à basse fréquence peuvent être utilisées pour détecter des éléments métalliques, et permettre de localiser les armatures d'acier et d'en estimer le diamètre, ou la profondeur. Les gaines métalliques des câbles de précontraintes peuvent également être localisées, ou encore la présence des vides de grandes dimensions dans le béton (phénomène de « nid de cailloux »). Ces ondes sont sensibles aux constantes diélectriques du milieu, et peuvent être utilisées à plus hautes fréquences pour remonter, après étalonnage, à la teneur en eau**. [29]**

Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation d'ultrasons dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de porosité. Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho, l'auscultation sonique « pulse velocity » et l'émission acoustique. On peut également citer les méthodes basées sur la tomographie sismique ou les ondes de surface mais qui sont moins utilisées. Les ondes acoustiques peuvent être employées pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs. Les caractéristiques mécaniques du béton peuvent également être évaluées après étalonnage. Ces deux familles de méthodes fournissent des informations complémentaires mais néanmoins corrélées. La suite de ce travail porte uniquement sur la propagation des ondes mécaniques dans le béton**. [28]**

Dons notre étude, en s'intéresse que des essais d'ultrason et scléromètre afin de pouvoir caractériser notre béton et établir des corrélations entre les résultats obtenir par ces essais et la résistance à la compression.

III-3- Avantages et inconvénients des essais non destructifs :

Les essais non destructifs nous apportent plusieurs bénéfices et satisfaction, d'un point de vu de rapidité d'où en peut obtention des résultats dans quelques instants sur l'état de santé, des performances mécaniques ou des propriétés physiques d'une structure déjà existante. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes nous permettre d'effectuer un nombre d'essais pratiquement infinis sur un même échantillon et de ce fait, économisé du matériau testé, ce qui rendre ces méthodes plus économique et moins couteuse à c'elles destructifs.

Le désavantage essentiel de ces essais non destructifs est que les résultats obtenus ne sont pas à 100% fiables, car plusieurs facteurs influents ces derniers tel que la composition du béton et ces constituants, l'état de la surface testé, la façon de la mesure, la présence ou non des armatures, l'humidité et autres**. [26]**

III-4- Essai d'auscultation sonique : EN 12504-4

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (EN 12504-4) et américaines (ASTM-C597-02), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. **[28]**

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur. Cette méthode permet principalement de détecter :

- Un non uniformité des propriétés de la structure ;
- Des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de « nids de cailloux » ;
- La détérioration due au feu, au gel ou à des agressions chimiques**… [30]**
- Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations. **[30]**

Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par l'essai destructif de compression en laboratoire**. [31]**

III-4-1- Principe de l'essai :

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément de béton à contrôler. Après avoir passé une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrason (T). **[26]**

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule :

$$V = L/T$$

III-5- Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons :

III-5-1- Mesures en transparence directe :

Utilisées dans le cas des éprouvettes ou de poteaux ou dans certaines poutres, les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester**. [19]**

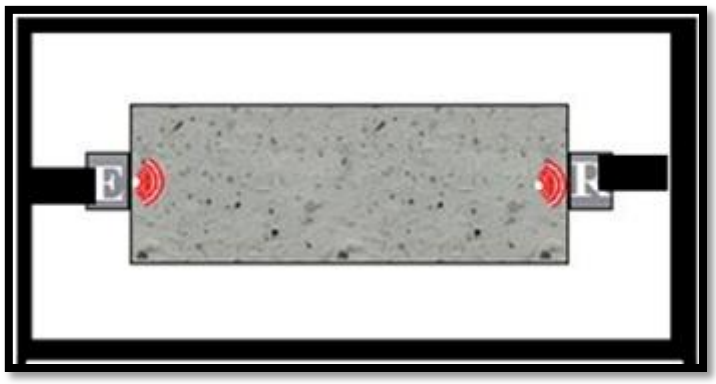


Figure III-1- Mesures en transparence directe.

III-5-2- Mesures en surface :

Utilisées sur tous les éléments de structure et sur éprouvettes, plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe ; le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant. Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré. **[26]**

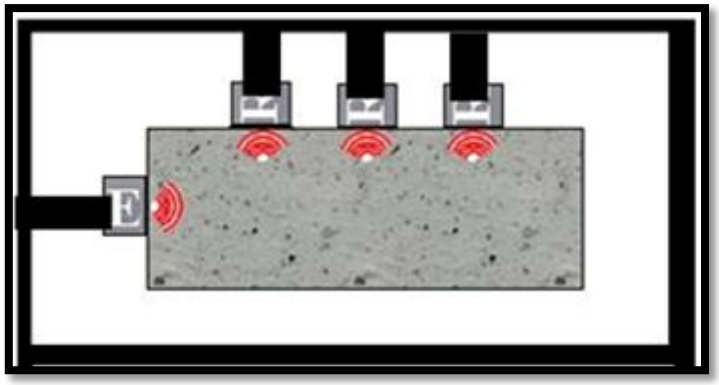


Figure III-2- Mesures en surface.

III-5-3- Mesures en transparence par rayonnement :

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne**. [26]**

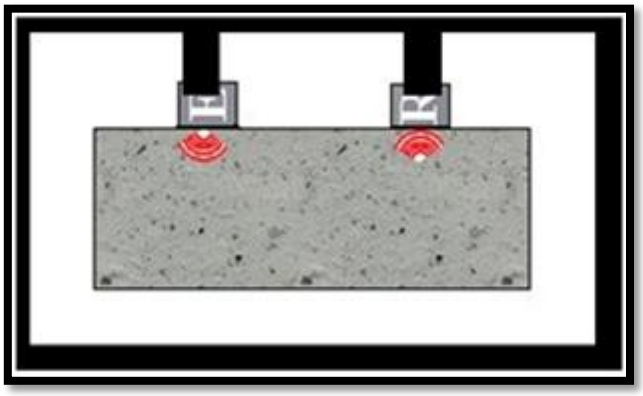


Figure III-3- Mesures en transparence par rayonnement.

a- Mode opératoire en transparence directe :

Dans ce travail, nous avons effectué les mesures en transparence directe sur des éprouvettes (10*20) cm3 en béton, donc en va présenter le mode opératoire de cette technique de mesure directe.

**** Préparation de l'élément :***

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire dit « couplent » entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé**. [26]**

**** Longueur minimal de parcours :***

La distance minimale séparant les transducteurs doit être supérieure ou égale à quatre fois la dimension du plus gros granulat de béton. **[32]**

**** Points de mesures :***

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, …) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres…). les mesures se font en six points, (voir figures ci-dessous). **[26]** Chaque mesure doit être répétée trois fois repositionnant les transducteurs avec, si cela est possible. **[32]**

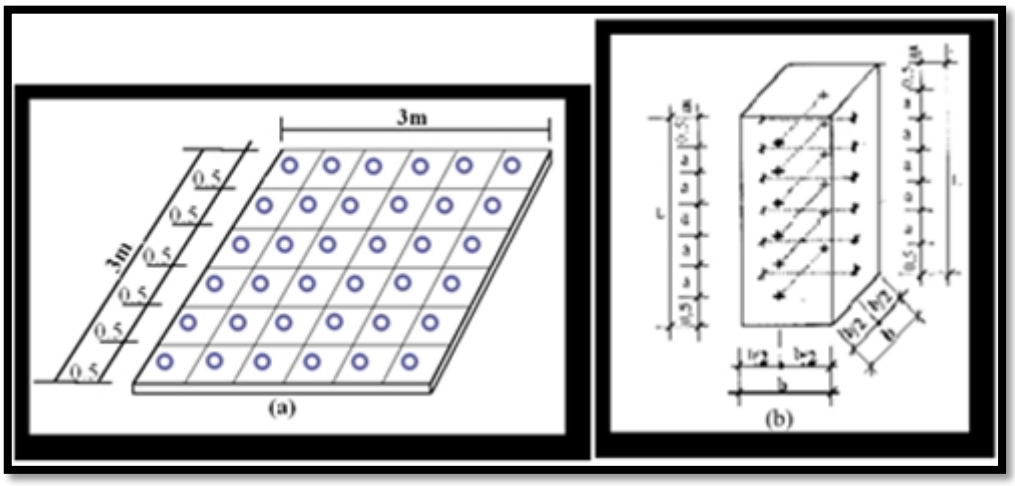


Figure III-4- Points de mesures pour une dalle et un poteau. [32]

a : un panneau (exemple : une dalle de 3 x 3 m2)

b : un petit élément (exemple : en poteau de section b x b et de hauteur h)

b- Influence des armatures :

La vitesse de propagation mesurée sur du béton armé, à proximité des armatures, est souvent plus élevée que celle que l'on mesure dans un béton de masse de même composition.

En effet, la vitesse de propagation dans l'acier est de 1,2 à 1,9 fois celle que l'on mesure dans du béton non armé.

Dans certains cas, la première impulsion qui arrive au transducteur s'est propagée en partie dans l'acier et en partie dans le béton.

L'accroissement apparent de la vitesse de propagation dépend de la proximité des armatures par rapport à l'emplacement des points de mesure, de la section et de nombre des armatures, de leur positionnement.

c- Influence des conditions d'essai :

**** Etat de surface :***

Le point ou la zone d'application des transducteurs ne doit pas être dégradée. Un décapage préalable à sera éventuellement réalisé.

Dans le cas d'emploi de transducteurs plan, la surface de contacte du béton doit être lisse. Un ponçage préalable à l'essai sera éventuellement réalisé. **[32]**

**** Humidité et température du béton :***

Les comparaisons de valeurs obtenues ne peuvent se faire que dans des conditions d'humidité ou de température du béton très voisines.

On a pu constater des écarts de temps de propagation sur un même béton sec ou saturé. On peut être confronté à ce problème dans le cas notamment des mesures en surface**. [32]**

III-5-4- Interprétation des résultats mesurés :

Lorsque de grands écarts de vitesse de propagation sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré. Par ailleurs, une grande vitesse de propagation est synonyme de bonne compacité du béton.

Le tableau (4.1) donne des informations sur la compacité en fonction de la vitesse de propagation. **[27]** vitesse de cette impulsion dans le béton d'enrobage. **[26]**

Compacité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200-4000
Douteuse	2500-3200
Mauvaise	1700-2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

Tableau III-1- Appréciation de la compacité du béton. [27]

Des études réalisées par le laboratoire RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Expert des Matériaux) ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression a pour forme :

$$Rc = a.e^{(b.v)}$$

Avec **a** et **b** des coefficients dépendant de la nature des granulats utilisés et V la vitesse de propagation.

De même, deux relations ont été établies entre la vitesse de propagation et le module d'élasticité dynamique du béton :

$$Ed=\frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)}.\gamma.V^2$$

V: Représente la vitesse des ondes (Km/s).

ɣ : La masse volumique du béton (kg/m3).

v : Coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0,15 pour un béton de haute résistance et de 0,3 pour un béton de faible résistance.

Ed: module d'élasticité dynamique (MPa).

En peut ensuite établir la relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression par la relation suivante **[27, 32] :**

$$\mathbf{Rc= 16,7e \left(\frac{ed}{122500} \right)}$$

III-5-5- Les avantage :

- Facilite la détermination de l'homogénéité et l'uniformité du béton.
- Donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton.
- Utilisé pour détecter la fissuration, les vides, les nids de caïeux et les détériorations dues au gel ou de feu.
- utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.
- Utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel. **[33]**

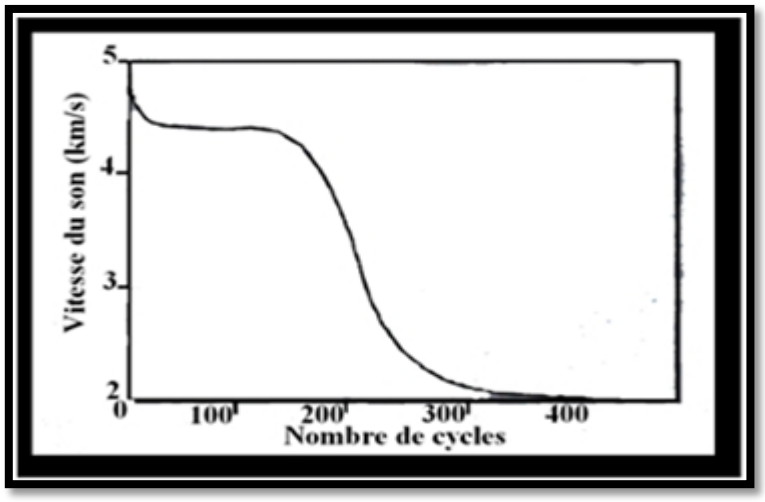


Figure III-5- Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel. [16]

III-5-6- Les inconvénients :

- Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

- La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage**. [33]**

III-6- Essai scléromètrique : (EN 12398)

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit ″indice scléromètrique″ et qui consiste à traduire la dureté du béton. **[34]**



Figure III-6- appareille scléromètrique

III-6-1- Principe de l'essai :

La tige du scléromètre étant appuyée contre la surface à tester, le ressort est compressé.

Quand la tige est complètement enfoncée dans le scléromètre, une masse se déclenche automatiquement, venant la frapper, et par là, la surface à tester. La tige réagit et retransmet à la masse le rebondissement. Le béton est d'autant dur et compact, que le rebondissement est important.

Sur un cadran gradué, un curseur lié à la masse (rebondie) indique le point maximal atteint. On peut alors lire directement la valeur de l'indice scléromètrique.

Une fois l'indice reporté sur un abaque de transformation la valeur de la résistance à la compression est obtenue et ce, en tenant compte de l'inclinaison de l'appareil. **[34,35]**

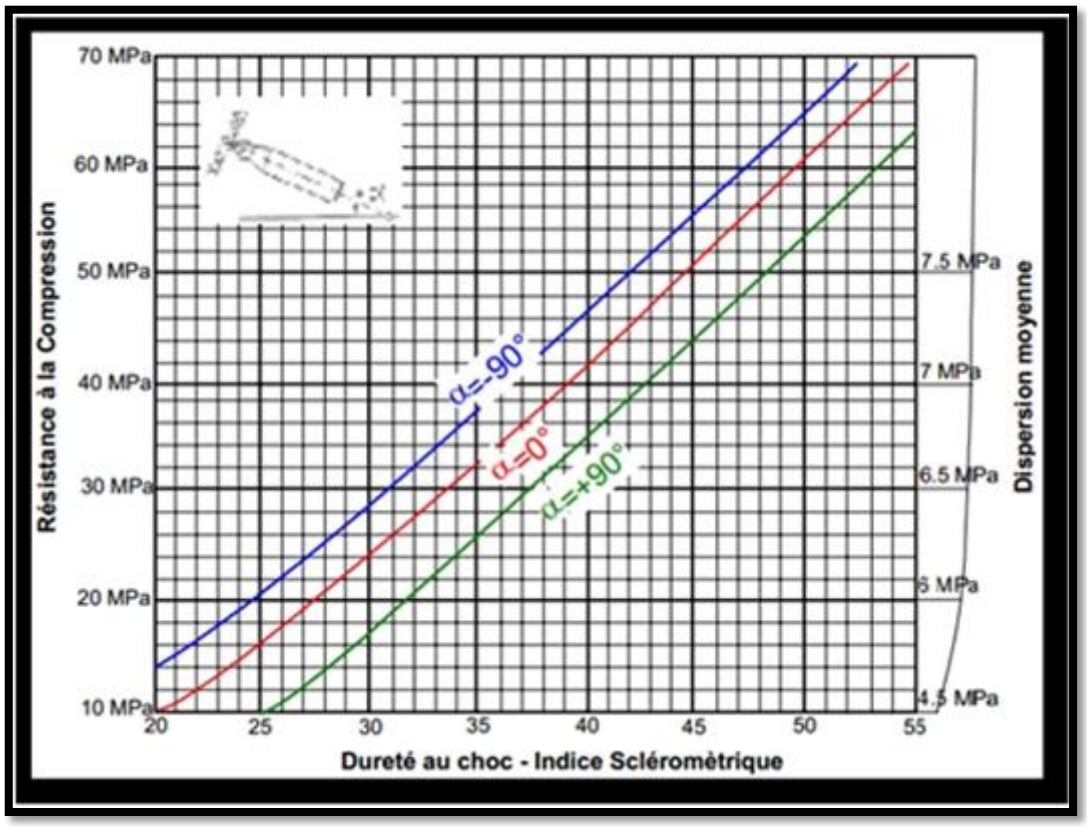


Figure III-7- La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire). [34]

III-6-2- Appareillage :

a- Scléromètre :

L'appareille est composé par les éléments suivants :

1. Elément vérificateur de contact ;

2. Surface à mesurer ;

3. Carcasse de l'appareil ;

4. Indicateur de la valeur de mesure ;

5. Echelle de mesure ;

6. Bouton ;

7. Baguette conductrice centrale ;

8. Flanc conducteur ;

9. Couvercle inférieur de la carcasse ;

10. Crochet ;

10. Couvercle supérieur de la carcasse ;

11. Carcasse du ressort ;

12. Suspension du ressort ;

13. Percuteur réel ;

14. Anneau amortisseur ;

15. Anneau percuteur léger ;

16. Emplacement de l'anneau tenseur ;

17. Anneau en feutre ;

18. Pivot ;

19. Ecrou ;

20. Taquet d'entraînement pour l'indicateur ;

21. Enclave du taquet d'entraînement ;

22. Suspension ;

24. Fixation de la suspension (coussin).

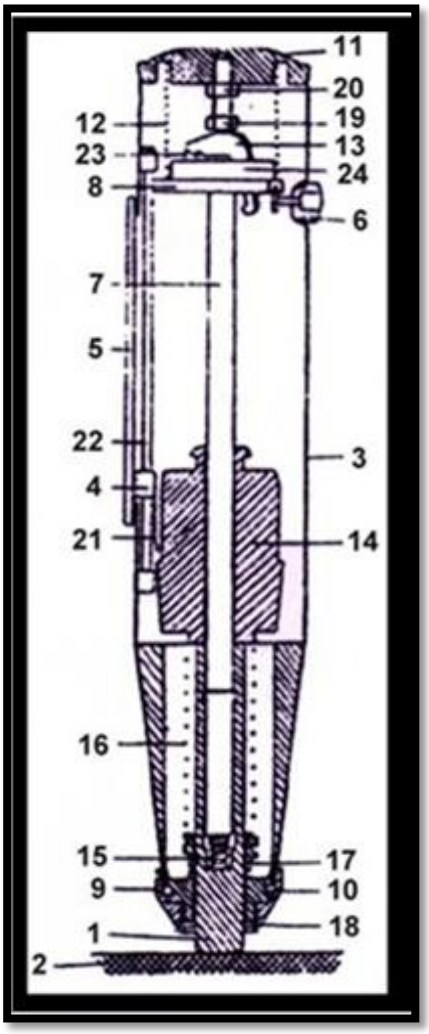


Figure III-8- composition de scléromètre

b- Pierre à polir :

Pierre à base de matière abrasive de texture à graine moyens telle que, par exemple, carbure de silicium aggloméré, son rôle est la préparation de la surface testée. **[34,35]**

III-6-3- Exécution des mesures :

La surface de l'ouvrage à tester est divisée en zones d'au moins 400 cm2 chacune. Il est nécessaire de faire une série de 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures est de 3 cm au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de 3 cm des bords de la surface testée.

Cette moyenne, reportée sur l'abaque qui tient compte de la position de l'appareil, ou sur un tableau, donne les valeurs minimum et maximum de la résistance à la compression du béton.

a- Mesures sur éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme cylindrique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm, ils doivent être maintenus entre les plateaux d'une presse hydraulique, sous une contrainte de 0,5 MPa.

Il est relevé 27 mesures réparties sur trois génératrices en 27 points distincts et distante entre eux de 30 mm, d'où aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces planes de l'éprouvette.

Dans tous les cas de conservation, les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après un délai d'au moins 48 h, après leur sortie de l'ambiance de conservation. **[34]**

On fait ensuite la moyenne de ces 27 mesures. Les valeurs qui correspondent à des anomalies doivent être éliminées.

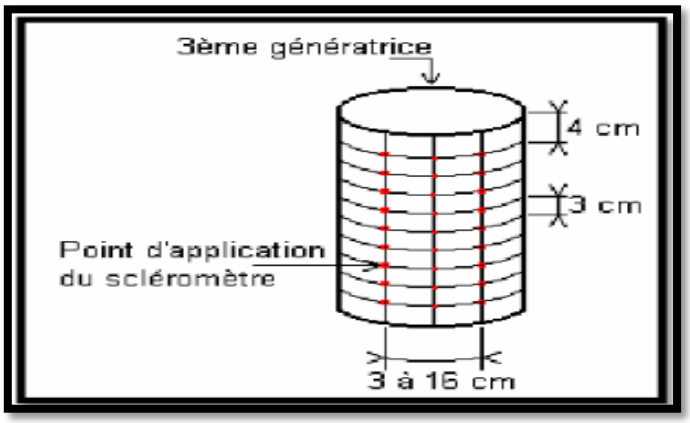


Figure III-9- Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm3. [36]

b- Mesures sur ouvrage :

Tout surface rugueuse, poreuse, écaillée, humide ou zone de nid de Caillaux doivent être traité ou évité. **[34,35]**

III-6-4- Exploitation des résultats :

Des études ont montré que la formule en question peut prendre la forme :

$$\mathbf{Rc = a\,(Is)\,2 + b\,(Is) + c}$$

Avec **:**

a, **b** et **c** : des coefficients dépendant de la nature des granulats,

Is : étant l'indice scléromètrique,

Rc : la résistance à la compression.

III-6-5- Les avantages :

C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide.

Utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'élément semblables des éléments préfabriqués.

Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé). **[33]**

III-6-6- Les inconvénients :

Une précision entre ± 15 et ± 20% n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont eté coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies.

La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881 : partie202 : 1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm. Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme le degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) ou la carbonatation (qui augmente cet indice).

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats et le degré de carbonatation de la surface. **[33]**

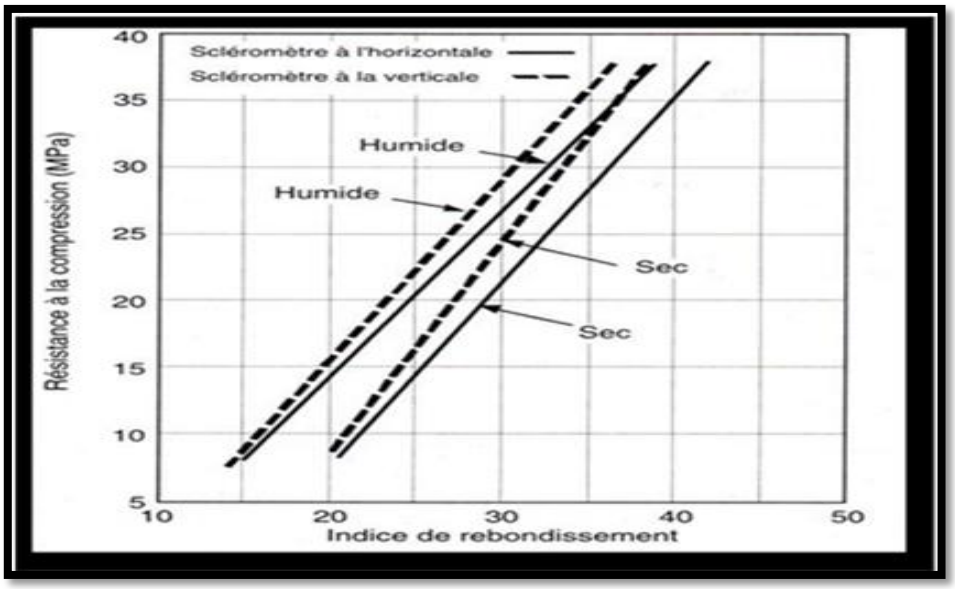


Figure III-10- La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. [29]

III-7- La méthode combinée :

Dans certains cas en combine les deux méthodes, essais scléromètrique et auscultation sonique, ce qui permettre en suit l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé**. [37]**

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 scléromètrique 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 scléromètrique 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). **[38]**

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

$$\mathbf{Rc} = \left(\frac{Is}{3.64+0.0235*Is+0.56*v}\right)^2$$

Avec :

Is : l'indice sclérometique.

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

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

On constate donc que cette méthode fait intervenir les résultats de deux méthodes différentes. En revanche, elle ne peut être appliquée que si l'indice scléromètrique est sensiblement précis. **[27,34]**

Ces méthodes sont particulièrement avantageuses lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité elle provoque une augmentation de la vitesse de son, mais

diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre Bellander (1977) montré sur la figure **(4.11).**

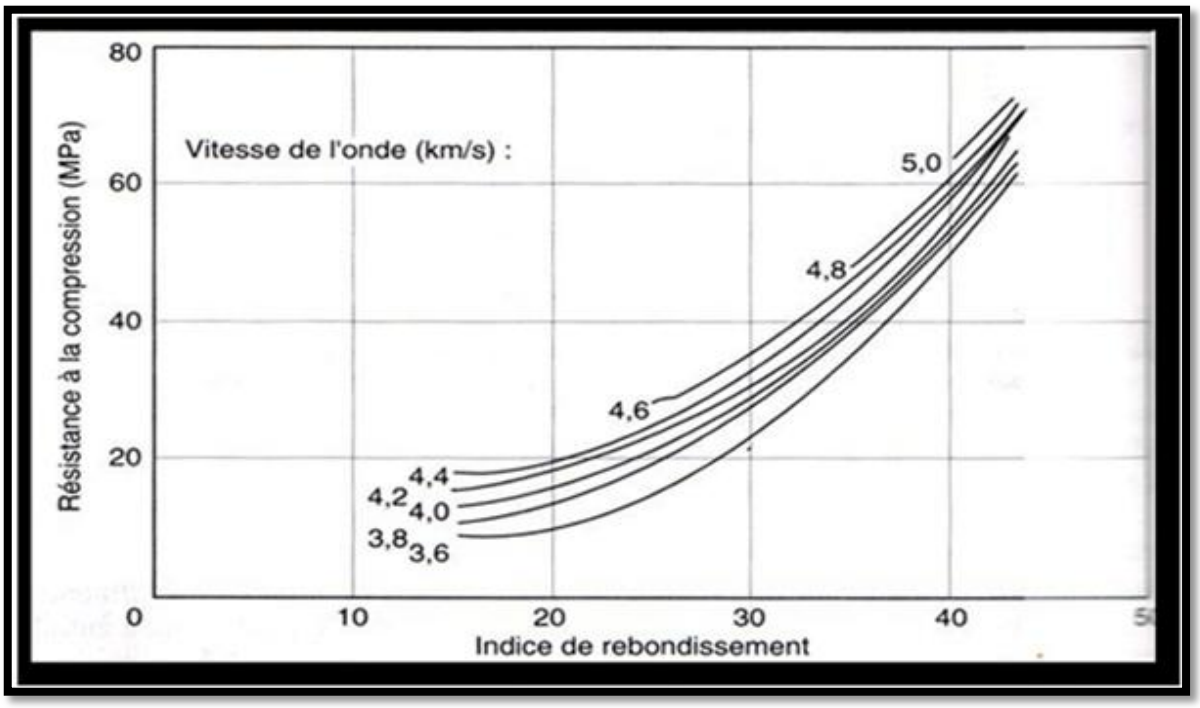


Figure III-11- Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice sclérometique selon U. Bellander (1977). [36]

III-7-1- Les avantages :

L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. Par exemple lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.

Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

Evaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiné**. [33]**

III-7-2- Les inconvénients :

Ette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes. **[33]**

III-8- Quelque recherches et corrélation existantes :

Les essais non destructifs ont une très grande importance à nos jours, grâce à leur facilité, rapidité et l'aspect économique, pour ses raisons, ils font un domaine de recherche très vaste et très intéressant, en peut citer par exemple :

Les travaux de Mr. KHEDER (1998) qui a trouvé des corrélations entre la vitesse de propagation des ondes ultrason, l'indice scléromètrique et la résistance à la compression.

BOUDINA.R et LOURADI.A(2012) ont pu proposer un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales.

Ms. HANNACHI.S et al (2012) à travers leur travail sur les applications des méthodes d'évaluation de la qualité du béton in-situ.

Les différentes corrélations citées et autres modèles proposés sont regroupés dans le tableau suivant :

La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. La propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton.

Equation	R^2	Méthode utilisé	Références
Rc=1.1843Is-9.5105	0.4976	Scléromètre	BOUDINA.R et LOURADI.A (2012) **[26]**
Rc=31.289V-110.28	0.0950	Ultrason	
Rc=7.401(Is/V)-25.467	0.7230	Scléromètre & Ultrason	
Rc=54.6389-0.7708Is	0.3983	Scléromètre	HANNACHI.S et al (2012) **[30]**
Rc=97.5409-0.0162V	0.5213	Ultrason	
Rc=121.2976-0.0261Is+0.5452V	0.5452	Scléromètre & Ultrason	
Rc=0.4030*Is1.2083	-	Scléromète	Les travaux de Mr. KHEDER (1998) **[30,31]**
Rc=1.2*10^{-5}*$V^{1.7447}$	0.4100	Ultrason	
Rc=0.0158*$V^{0.425}$* Is1.1171	-	Scléromètre & Ultrason	
Rc=1.146$e^{(0.77V)}$	0.8000	Ultrason	Turgut (2004) [31]
Rc=1.19 $e^{(0.715V)}$	0.5900	Ultrason	Nashn't et al. (2005) **[31]**

Tableau III-2- Estimation de la contrainte de compression par quelques équations de corrélation.

III-9- Caractérisation des propriétés du béton par l'essai d'ultrasons :

III-9-1- Estimation de la porosité, la perméabilité et la densité :

La détérioration du béton est généralement cause par la pénétration des agents agressifs à l'intérieure. La cinétique de la réaction du béton avec ces agents, donc sa durabilité est dépond des propriétés de transfère de son peau des premiers centimètres sous la surface.

L'essai ultrason est utilisé comme moyen non destructif d'estimation de pénétration des ions nuisible, trois degré de saturation est considéré :

- « Full saturation » FS: l'échantillon est saturé à 85%.
- « Partial saturation » PS: l'échantillon est saturé entre 45% et 55%.
- « Dry » D : le taux de saturation est inférieur à 10%.

La variation de la vitesse d'ultrason est manifeste comme montré la figure (4.12). **[39]**

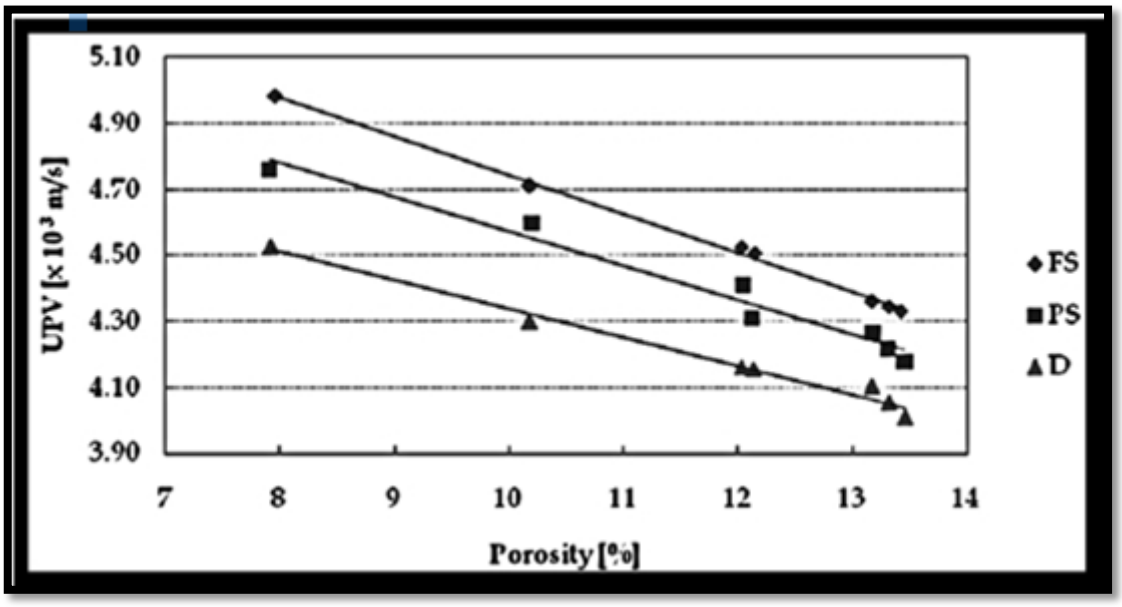


Figure III-12- Variation vitesse d'ultrason en fonction de la porosité. [39]

La vitesse de propagation des ondes sonores est diminuée avec l'augmentation de la porosité et la perméabilité, et augmente avec l'augmentation du taux de saturation.

Panzera et al (2008) a établi une corrélation qui lie la vitesse d'ultrason avec la densité du béton, plus le béton est dense plus la vitesse de propagation d'ultrason est grande.

La figure (4.13) présente la variation de la vitesse de propagation d'ultrason en fonction de la densité du béton**. [39]**

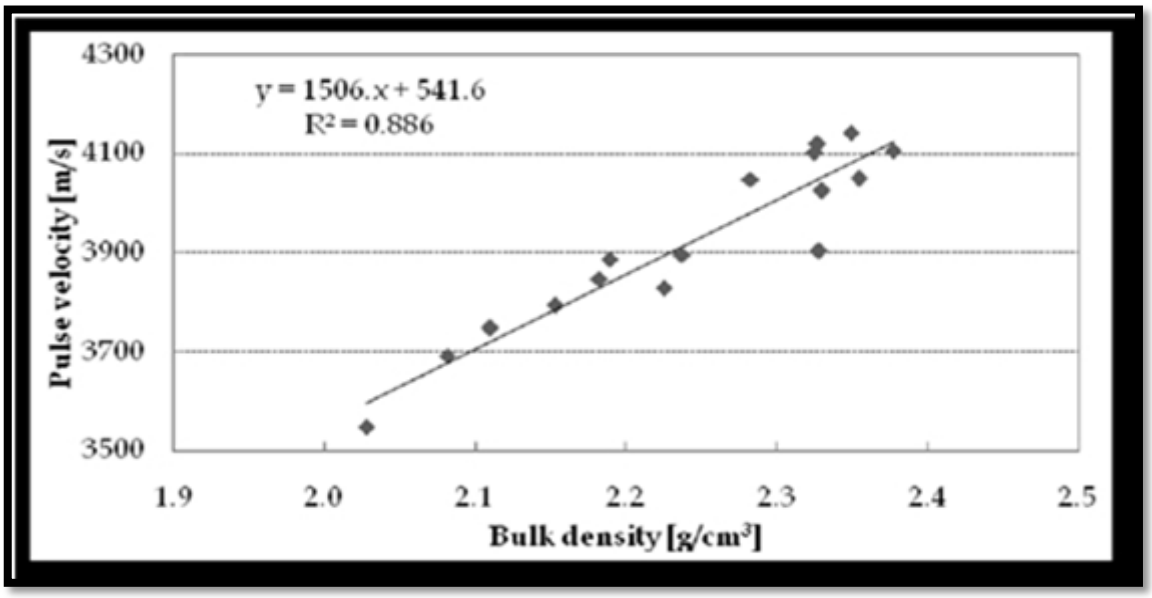


Figure III-13- Corrélation entre la densité et la vitesse d'ultrason. [39]

La figure (4.14) présente la relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les module d'élasticité statique (Es) et dynamique (Ed), ces résultats indique que les valeurs du module d'élasticité dynamique est approximativement supérieure de 30 % à celui statique obtenu à partir de l'essai de compression. L'explication de cette variation est que l'essai ultrasonique est effectué à une contrainte très faible. Néanmoins, les deux modules présentent un sens d'évolution semblable. **[39]**

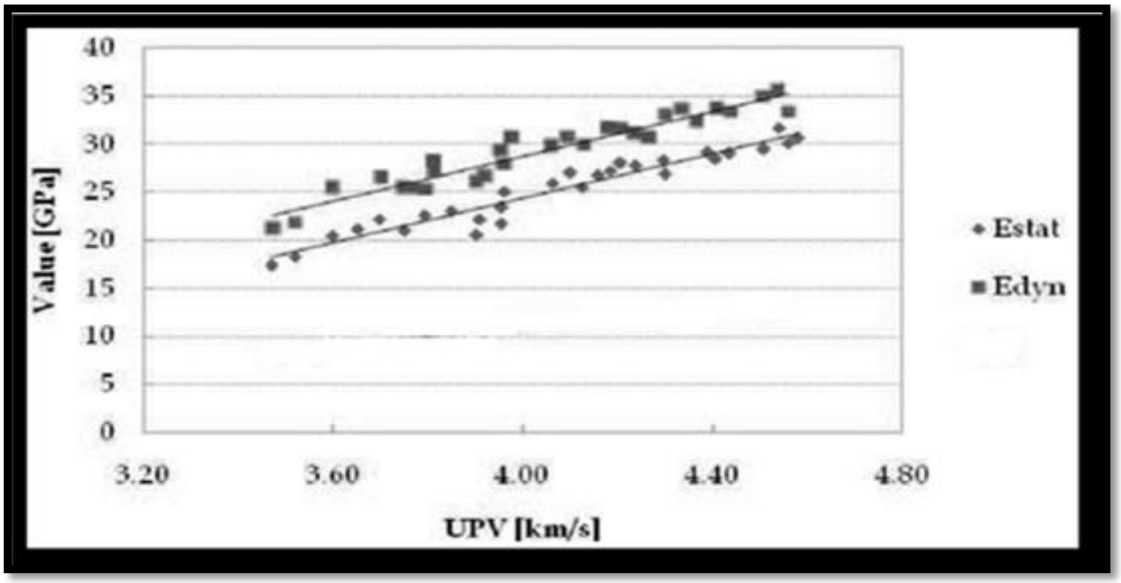


Figure III-14- La relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les modules

CHAPITRE IV :

Matériaux, matériels et essais

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

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-1- Matériaux utilises :

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de MOHAMMED BOUDIAF M'sila. 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-2- Caractéristiques des matériaux :

IV-2-1- 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).

a- Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5] :

gravier concassé :

- ✓ ***But de l'essai***

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituants 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 :

	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**	0	0	0.6	0.2	0.2	0.013	**99.87**
	6.3	280	291.3	286.7	286	286.2	17.890	**82.11**
	5	497.6	522.4	474.2	498.07	784.27	49.02	**50.98**
	4	412.1	432.5	450.9	431.83	1216.1	76.01	**23.99**
	3.15	289	251.9	264	268.3	1484.4	92.78	**7.22**
	2.5	106.8	89	106.9	100.9	1585.3	99.08	**0.92**
	fond	12.9	10.6	14.5	12.67	1597.97	99.87	**0.13**
Gravier 8/16 3200g	**16**	26	20	67	37.67	37.67	1.18	**98.82**
	12.5	726	771	823	773.33	811	25.34	**74.66**
	10	1270	1288	1185	1247.67	2058.67	64.33	**35.67**
	8	768	709	714	730.33	2789	87.16	**12.84**
	5	404	401	389	398	3187	99.59	**0.41**
	fond	06	10	17	11	3198	99.94	**0.06**

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

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

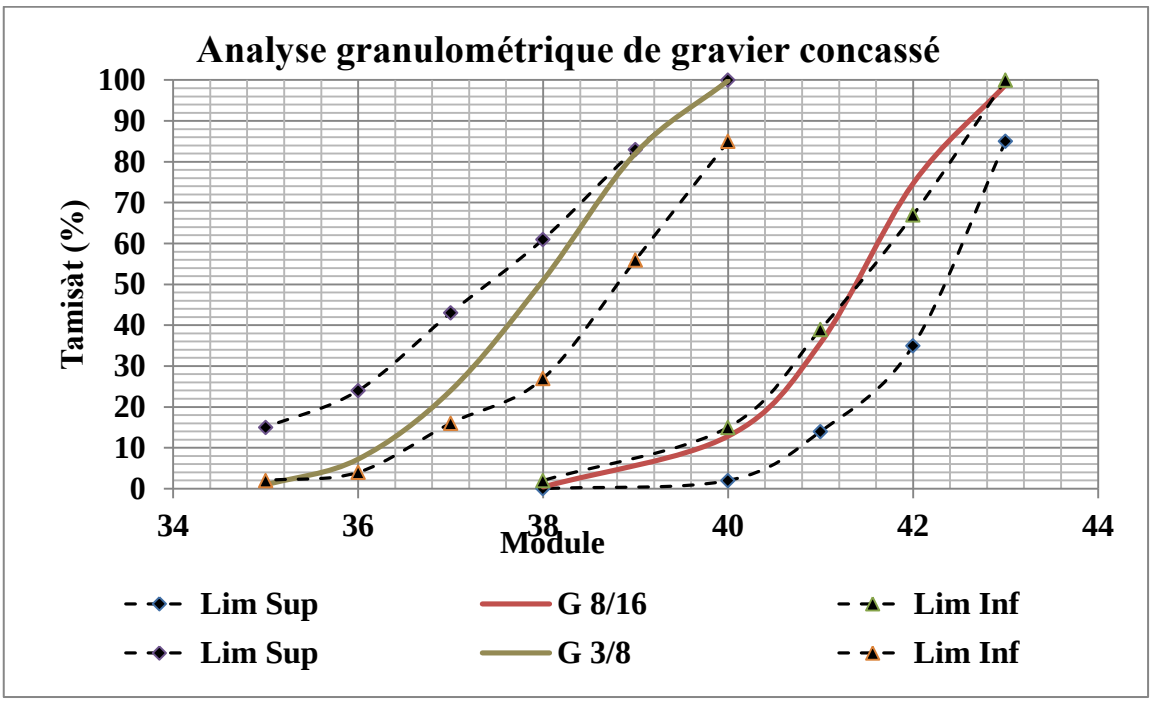


Figure IV-1- Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).

Gravier recyclé :

Les éprouvettes sont ramenées depuis bureau d'etudes et suivi technique de BERM de M'sila.

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

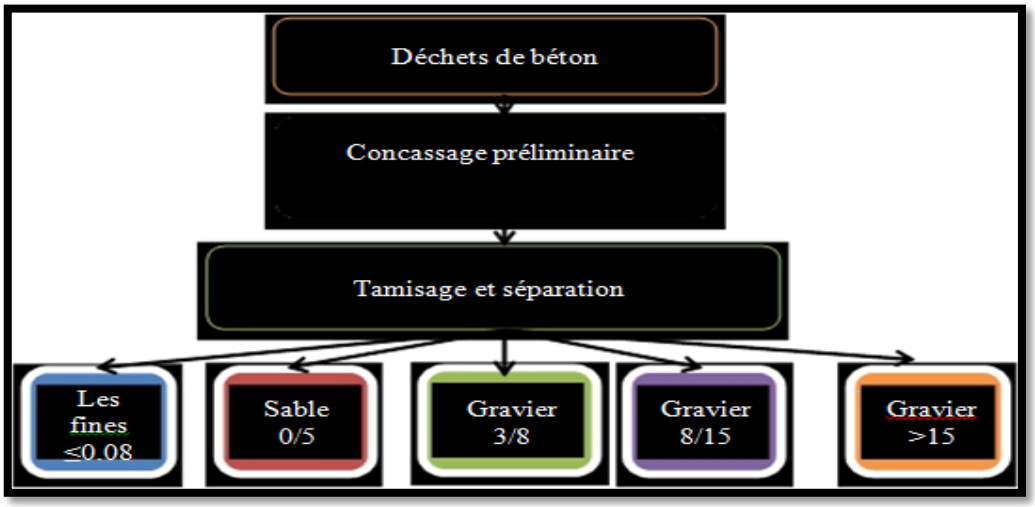


Figure IV-2- Procédure de préparation des granulats recyclés.



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

	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**	25	65	34	41.33	41.33	2.58	**97.42**
	6.3	814	839	827	826.67	867	54.25	**45.75**
	5	264	258	257	259.67	1127.67	70.48	**29.52**
	4	308	283	278	289.67	1417.34	88.58	**11.42**
	3.15	147	125	159	143.67	1561.01	97.56	**2.44**
	2.5	37	27	38	34	1595.01	99.69	**0.31**
	fond	04	02	05	3.87	1598.68	99.92	**0.08**
Gravier 8/16 3200g	**16**	100	204	165	156.33	156.33	4.89	**95.11**
	12.5	1674	1207	1392	1424.33	1580.66	49.4	**50.6**
	10	928	1219	1074	1073.67	2654.33	82.95	**17.05**
	8	402	472	438	437.33	3091.66	96.61	**3.39**
	5	88	89	122	99.67	3191.33	99.73	**0.27**
	fond	04	04	06	4.67	3196	99.88	**0.12**

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

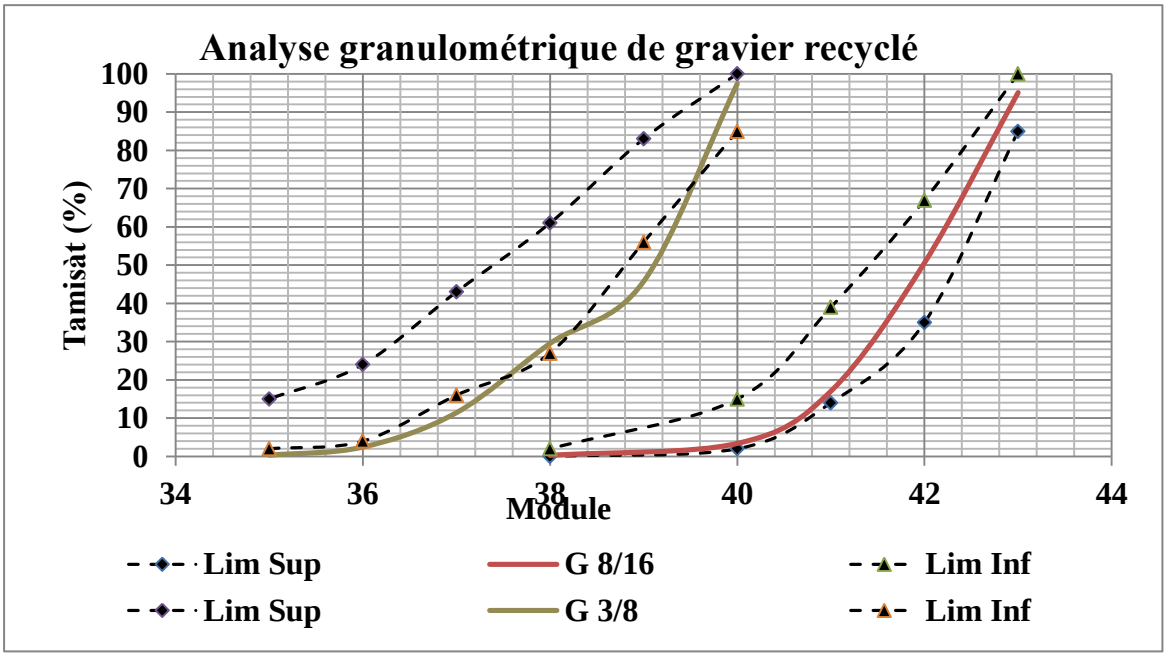


Figure IV-4- Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/15).

b- 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.

c- 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 :

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 à10 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 :

$$\gamma_{app} = (M2 - M1)/V$$

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 **:**

matériaux	M_1 (kg)	V (l)	M_2 (kg)	γ app	γmoy (kg/l)
3/8	**2.293**	**7**	11.751	1.351	**1.346**
			11.713	1.345	
			11.687	1.342	
8/16	**3.492**	**10**	17.41	1.391	**1.433**
			18.12	1.462	
			17.98	1.448	

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	γmoy (kg/l)
3/8	**2.923**	**7**	10.779	1.122	**1.107**
			10.668	1.106	
			10.580	1.093	
8/16	**3.492**	**10**	15.163	1.176	**1.171**
			15.273	1.178	
			15.185	1.169	

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

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 volumeV_2,
  - Le volume absolu ou réel est : **V = V2 - V1**
  - La masse volumique réelle est: **ρ = M / (V2 - V1)**

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

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

matériaux	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρabs	ρmoy (kg/l)
3/8	300	400	416	2.586	2.616
			414	2.631	
			414	2.631	
8/16	300	400	418	2.542	2.564
			416	2.586	
			417	2.564	

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

matériaux	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρabs	ρmoy (kg/l)
3/8	300	400	527	2.362	2.387
			524	2.419	
			526	2.381	
8/16	300	400	519	2.521	2.507
			521	2.479	
			519	2.521	

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

d- 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 :

$$P\ (\%) = (\ Vv / Vt\ ) x\ 100$$

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

$$P\ (\%) = (1 - (\ \gamma / \rho)) \times 100$$

e- 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 :

$$C(\%) = (Vs / Vt\ )\ \times 100$$

Aussi :

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

f- 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.

$$e(\%) = Vv / Vs$$

Aussi :

$$e(\%) = ((1-c) / c)$$

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	48.39	51.61	0.937
(8/16)	44.65	55.35	0.806

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

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	51.54	48.46	1.063
(8/16)	49.84	50.16	0.994

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

g- La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles [NA EN 1097- 2]:

✓ ***But de l'essai :***

Estimé 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 LAALAOUI.A, 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

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

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

✓ ***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 ؛gouttter 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 LA est donné par la relation suivante :

$$LA = 100\ (P/5000)$$

P : est le passant à 1.6mm.

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

Coefficient LA	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

Tableau IV-10- Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.

[HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012]

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

Fraction granulaire	LA (%)
8/16	18

Tableau IV-11- Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (8/16).

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

Fraction granulaire	LA (%)
8/16	26.9

Tableau IV-12- Résultats d'essai de Los Angeles du gravier recyclé (8/16).

h- 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 :

$$A\ (\%) = [(MH - MS)/MS].100$$

MH : La masse du matériau sature d'eau en (g).

MS : La masse du matériau sec en (g). **[HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A, 2012]** Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Fraction	MH (g)	MS (g)	A (%)
(3/8)	1000	973	2.77
(8/16)	1000	979	2.14

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

Fraction	MH (g)	MS (g)	A (%)
(3/8)	1000	921	8.57
(8/16)	1000	937	6.72

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

IV-2-2- 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 :

a- Analyse granulométrique [NA EN 933-1]

***But de l'essai :**

Permettre la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituants 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 :

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0.7	0.7	0.35	99.65
2.5	108.1	108.8	5.44	94.56
1.25	65.9	174.7	8.74	91.26
0.63	65.1	239.8	11.99	88.01
0.315	549.9	789.7	39.49	60.51
0.16	1054	1843.7	92.19	7.81
0.08	149.9	1993.6	99.68	0.32
fond	5.8	1999.4	99.97	0.03

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

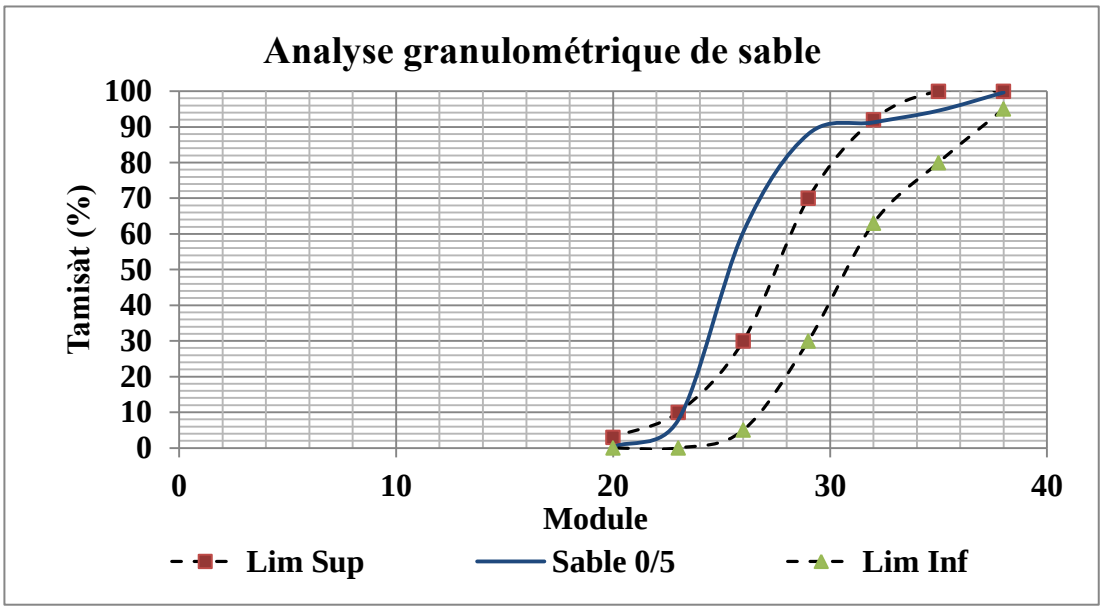


Figure IV-7- Courbe granulométrique du sable de dune.b)

b- 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]**

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

Tableau IV-16- Module de finesse du sable

MF =Σ Ri/100

MF = $\frac{1}{100}$ $\sum$ **(refus cumules de % des tamis [0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5])**

MF= (0.35+5.44+8.74+11.99+39.49+92.19) /100 MF= 1.58

Apres l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à : MF = 1.58 , MF < 2 donc : (C'est un sable fin).

c- 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±1g dons l'éprouvette et toper 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 pondant 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 h1, de niveau supérieure de floculat jusqu'au fonde l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesuré également avec la règle la hauteur h2 compris entre le niveau supérieude la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

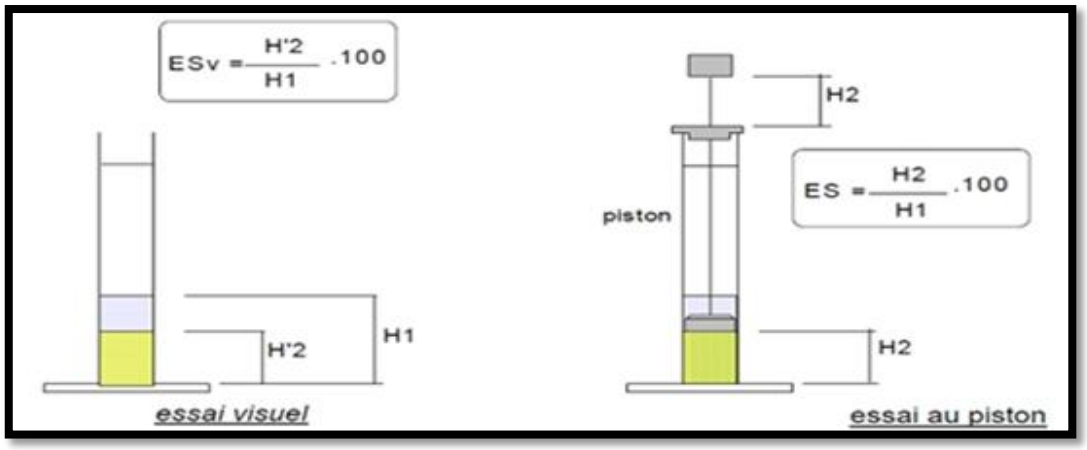


Figure IV-8- Essais de l'équivalent de sable

$$Esv = (h2/h1)\ 100\%$$

Avec **: h1 :** hauteur du sable plus floculat.

h2 : hauteur du sable.

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

$$Esp = (h'2/h1)\ 100\%$$

Avec **: h1 :** hauteur du sable plus floculat. **h2 :** hauteur du sable.

Esv	Esp	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 particulièrement le retrait.
75≤Es≤85	70≤Es≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
Es ≥85	Es>85	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entrainer un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau IV-17- Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP[BRETTE Alain,].

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

Hauteur (cm)	h_1	h_2	ESV (%)	ESVmoy (%)	h'_2	ESP(%)	ESPmoy (%)
Echantillon (1)	11.15	9.4	84	**82**	8.8	79	**79**
Echantillon (2)	11.5	8.9	77		8.7	76	
Echantillon (3)	10.9	9.35	85		9.00	82	

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

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv= 82

Esp= 79

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

IV-2-3- Caractéristiques physiques du sable :

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

a- Masse volumique apparent [EN 1097-6]

***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 M2 ce poids.

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

$$\rho_{app} = (M2-M1)/Vr$$

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient plus le sable.

Vr : Volume du récipient (Vr = 1L).

***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 M2 la masse de l'ensemble (sable +récipient) M1 la masse de le récipient.

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

$$\rho c = (M2 - M1)/Vr$$

M1 : Masse du récipient vide

M2 : Masse du récipient plus le sable

Vr : Volume du récipient (Vr = 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 :

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

***l'état lâche :**

$$PL = [1-(\gamma L/ \rho s) 100\%$$

***à l'état compact :**

$$Pc = [1-(\gamma C/ \rho s) 100\%$$

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 :

$$C = 1 - P$$

à l'état lâche :

$$CL = 1 - PL$$

à l'état compacte :

$$CC = 1 - PC$$

d- L'indice des vides :

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

$$\mathbf{e = p/ (1-p)}$$

à l'état lâche :

$$\mathbf{eL= PL/ (1-PL)}$$

à l'état compacte :

$$\mathbf{ec = Pc / (1-Pc)}$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau 5.19 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.

Propriété	**Valeurs**
Masse volumique apparente	1.449
Masse volumique absolue	2.60
Masse volumique à l'état lâche	1.449
Masse volumique à l'état compact	1.678
Compacité à l'état lâche	55.73 %
Porosité à l'état lâche	44.27 %

Indice des vides à l'état lâche	0.79 %
Compacité à l'état compact	64.54 %
Porosité à l'état compact	35.46 %
Indice des vides à l'état compact	0.54 %
Degré d'absorption	15.97 %

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

IV-2-4- Caractéristiques du ciment utilisé :

a- 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, 2014]**

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 conforment à la norme **[NA EN 197-1].**

b- 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, 2014]**

Les principales applications de se ciment sont :

• Secteur habitat (logements et d'autres constructions civils) ;

• Secteur travaux publiques (tunnels, ponts, port, aéroport, etc.) ;

• Secteur hydraulique (barrages, château d'eau, stations d'épuration, etc.) ; • Secteur industriel.

c- Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment MATINE obtenir du fournisseur. [MATINE, 2014]

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en sulfates SO3	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-20- Analyse chimiques du ciment MATINE.

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

Tableau IV-21- Composition minéralogique du clinker.

Propriété	Valeur
Consistance normale	25 à 28.50 (%)
Surface spécifique Blaine	4150 à 5250 (cm2/g)
Retrait à 28 jours	<1000 (µm/m)
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 (kg/dm3)
Masse volumique spécifique	3.02 (kg/dm3)

Tableau IV-22- Propriétés physiques du ciment utilisé.

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

Tableau IV23- Temps de prise à 20°C.

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

Tableau IV-24- Résistance mécanique à la compression.

IV-2-5- 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,

IV-2-6- Adjuvant :

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

a- 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. s

b- Domaines d'application :

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

c- Propriétés :

Grace à ses propriétés le MEDAFLUID SF 150 permet :

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 12à15cm).
- De diminuer la ségrégation.
- Réduire le début de durcissement.

Sur béton durci :

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

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

Tableau IV-25- l'effet de l'adjuvant sur le béton. [GRANITEX, 2014].

Résistances mécaniques en compression (béton confectionné sur chantier, dosé à 350kg/m3 E/C=0.35 et Aff.=11cm).

d- Caractéristiques :

- Aspect …….....…….liquide.
- Couleur…….....……...marron.
- pH.....….....9.5-10.5.
- Densité…….....….....1.19 ± 0.01.
- Teneur en chlore …….....<0.1g/L.
- Extrait sec…….....……..38%.

e- 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.

f- 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.

g- Conditionnement et stockage :

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

h- Délai de conservation :

1 année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel. **[GRANITEX, 2014].**

IV-3- 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 m3 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

✓ ***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-3-1- Méthodes de Dreux_Gorisse :

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants :

• Une méthode assez simple et facile à utiliser.

• C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C.Est, le L.T.P.Est et autres laboratoires privés

a- Détermination du dosage en ciment :

On évalue d'abord le rapport E /C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$\mathbf{Rb = G.Rc\left(\frac{C}{E} - 0.5\right)}$$

OU :

Rb : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars

G : Coefficient granulaire donné par le(Tableau 1.6) , en fonction de la qualité et de la dimension maximale (Dmax)du gravier

Rc : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars

Connaissant le rapport E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment

valeurs de G coefficient granulaire			
Qualité des granulats	**dimension des granulats D (mm)**		
	Fins D≤16mm	Moyen 25≤D≤40	Gros D≥63
Excellente	0.55	0.6	0.65
bonne, courante	0.45	0.5	0.55
passable	0.35	0.4	0.45

Tableau IV-26- Valeurs de G coefficient granulaire

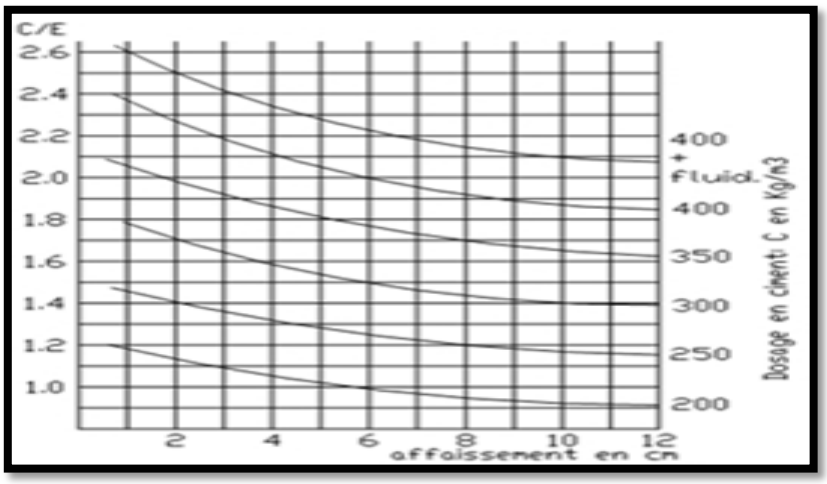


Figure IV-9- Dosage en ciment

b- Détermination du dosage en eau :

Connaissant E et le dosage en ciment (C) on débuit le dosage en eau total à prévoire par la formule :

$$E=\frac{C}{\frac{C}{E}}$$

c- Détermination du dosage en granulat :

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, (Figure 1.6) ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des cordonnées ainsi définies comme suit :

• En abscisse :

Si D ≤ 20mm l'abscisse est D/2,

Si D ≥ 20mm l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm)et le module correspond à(Dmax.)

• En ordonnée : Y donnée par la formule suivante :

$$Y=50-\sqrt{D}+K+Ks+Kp$$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (surtout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
Forme (s.t.sable)	roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	Concassé
400 + super plastif	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Tableau IV-27- valeur du terme correcteur K

la correction supplémentaire **Ks** : le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A , ce qui correspondant à majorer le dosage de sable et vice versa . La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur **Ks**= 6 Mf-15 (MF :étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimal de l'ordre de 2.5 laquelle la correction préconisée est alors nulle).

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g1, g2, g3 par exemple. Si c'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$\mathbf{C = \frac{C}{Pc}}$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

Ou:

$$\mathbf{V = 1000\gamma - c}$$

γ : coefficient de compacité

Consistance Du béton frais	Mode de serrage	Y						
		Dmax 5mm	Dmax 10mm	Dmax 12.5mm	Dmax 20mm	Dmax 31.5mm	Dmax 50mm	Dmax 80mm
molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
plastique	Piquage	0.760	0.790	.805	0.815	0.820	0.830	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.835	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.835
	Vibration puissant	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
ferme	Piquage	0.775	0.805	0.820	0.830	0.840	0.840	0.845
	Vibration faible	0.780	0.810	0.825	0.835	0.845	0.845	0.850
	Vibration normale	0.785	0.815	0.830	0.834	0.850	0.850	0.855

Tableau IV-28- coefficient de compacité.

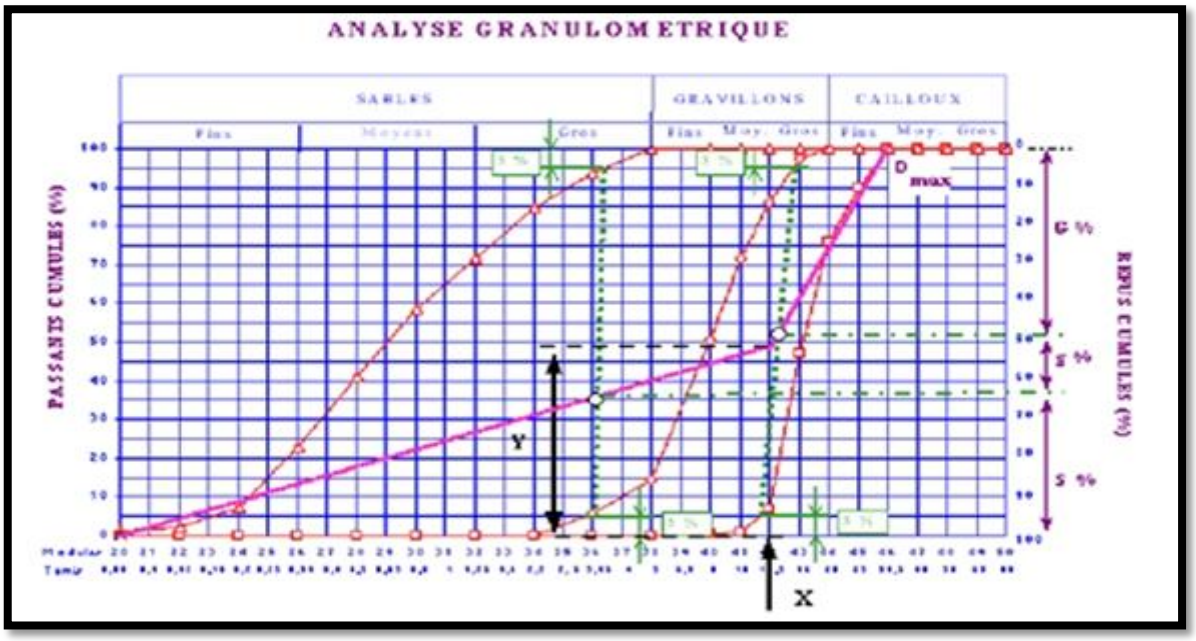


Tableau IV-10- la courbe granulaire de référence

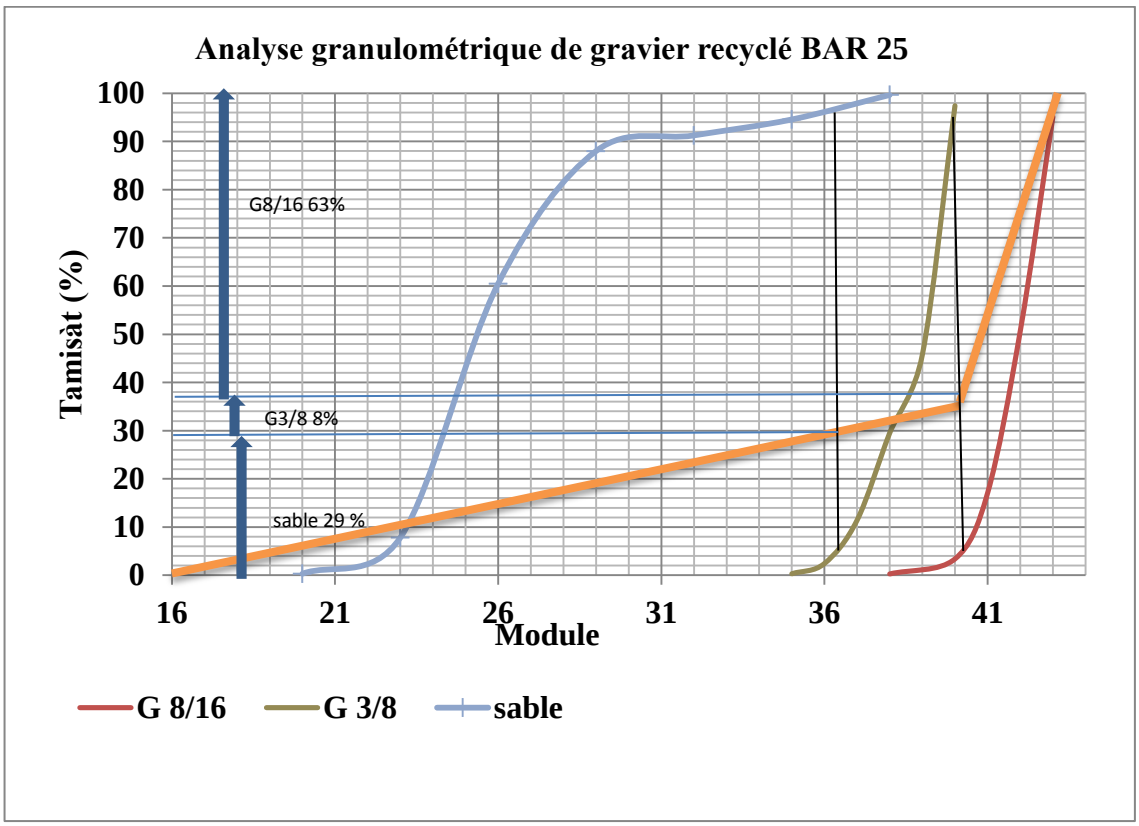


Figure IV-11- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 25)

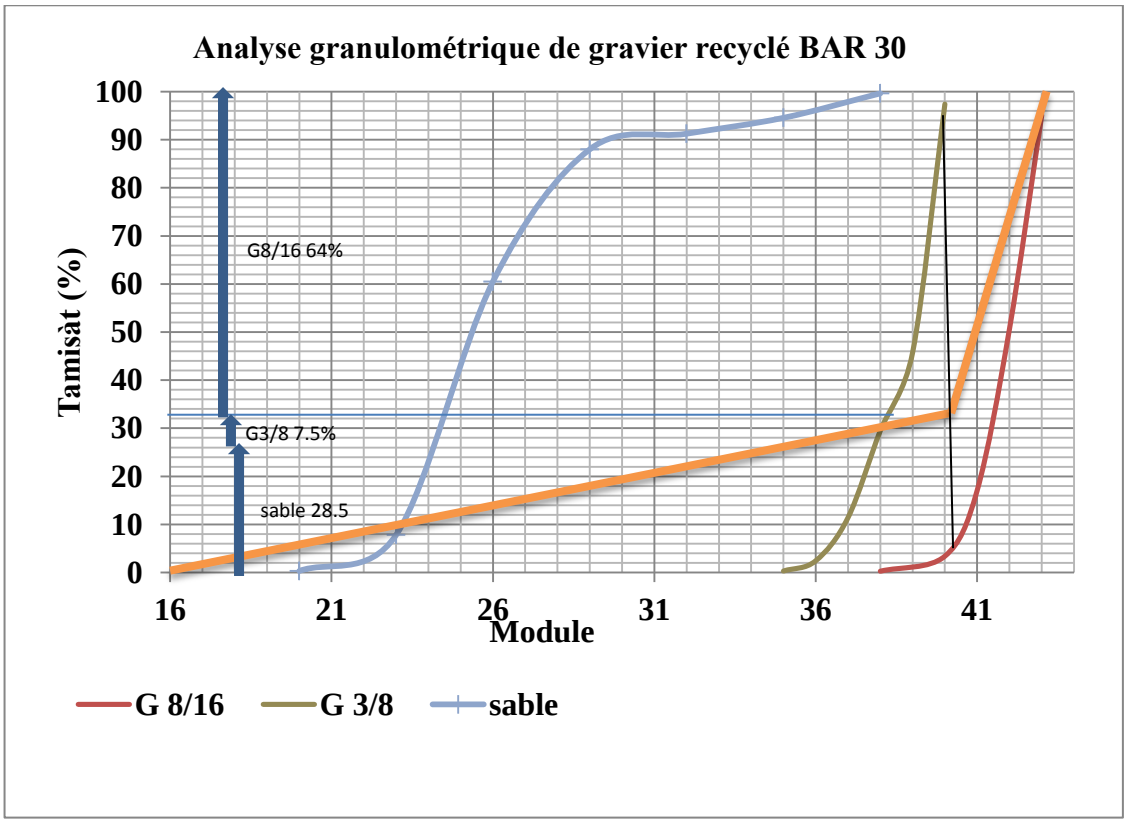


Figure IV-12- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 30)

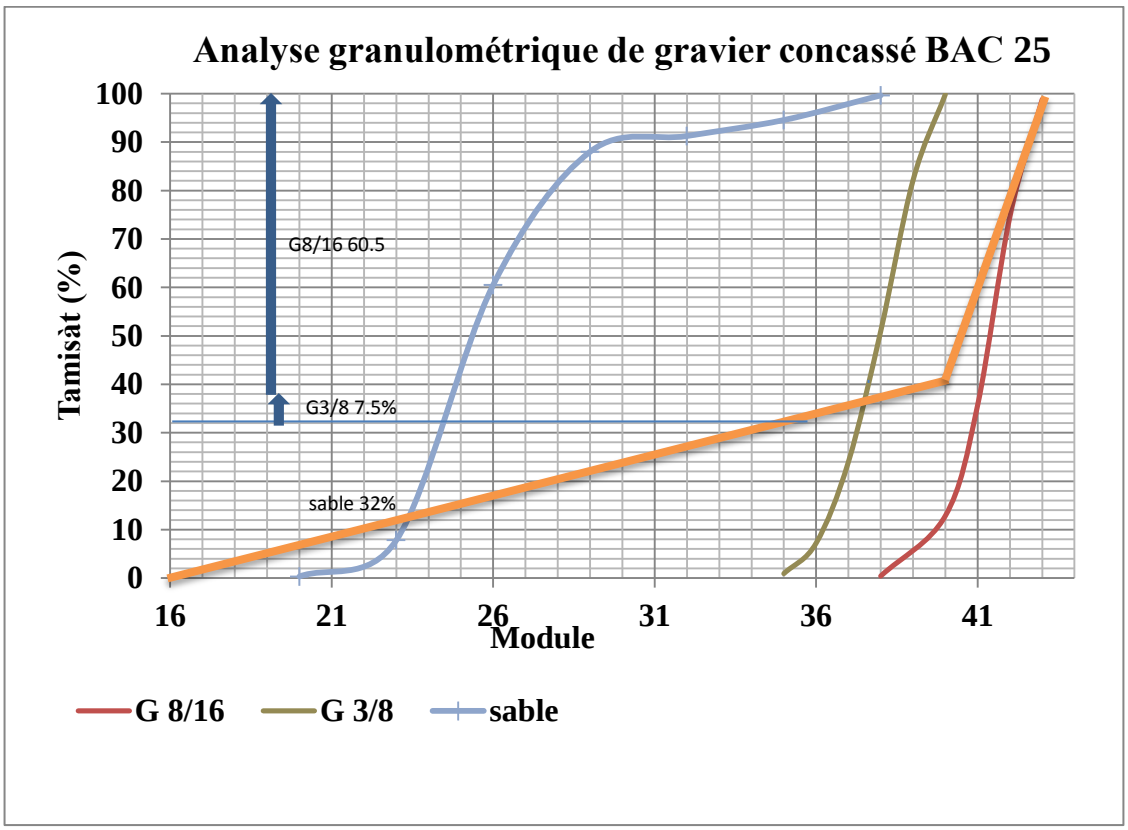


Figure IV-13- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAR 35)

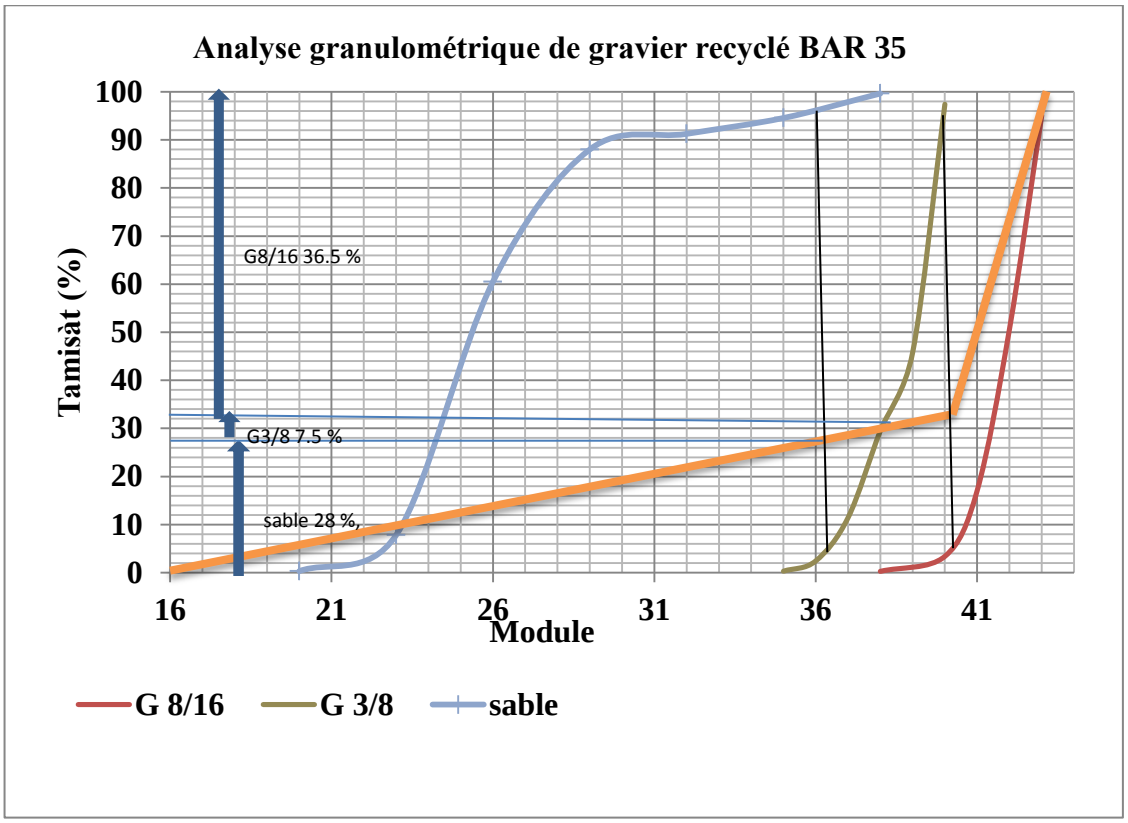


Figure IV-14- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 25)

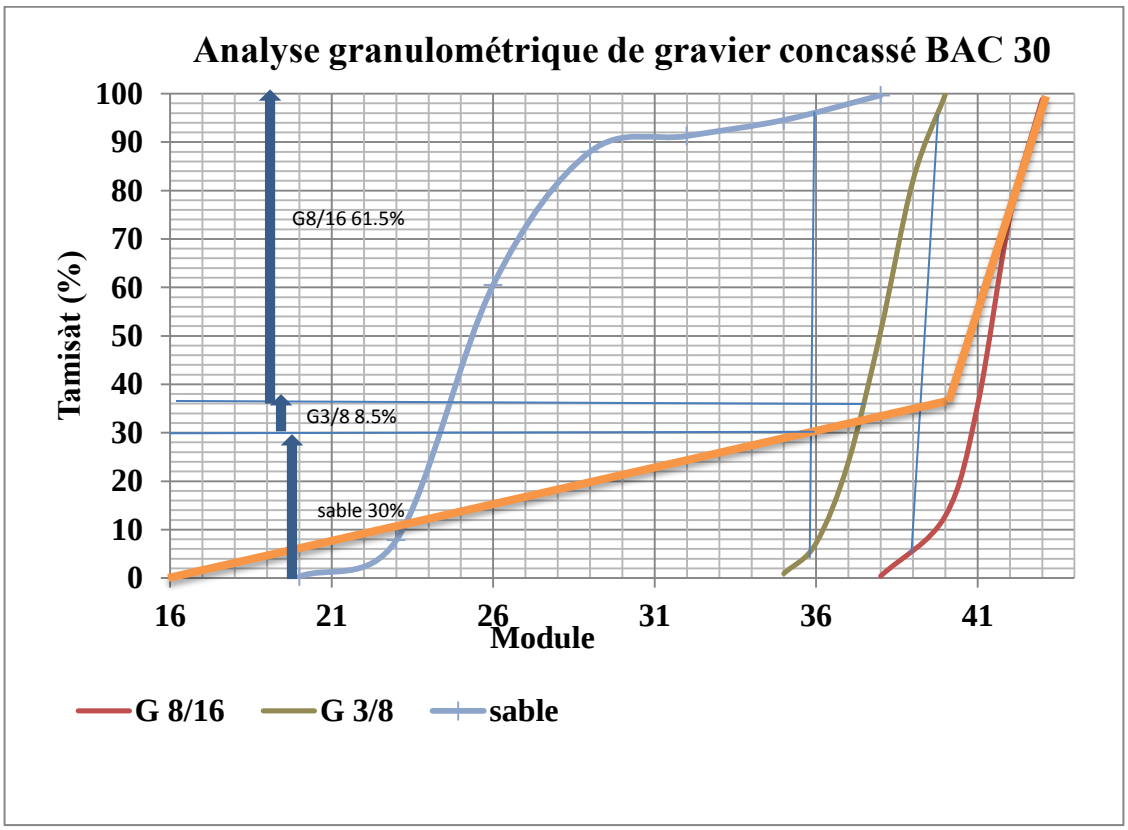


Figure IV-15- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 30)

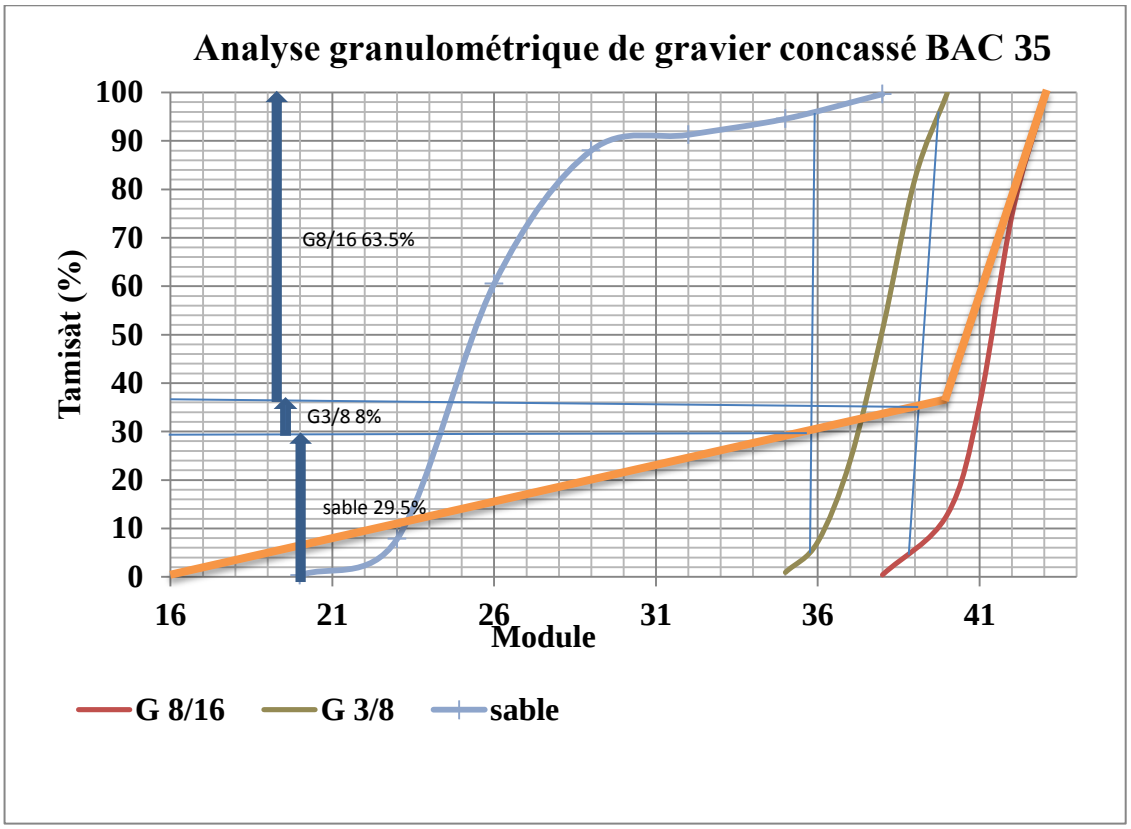


Figure IV-16- courbe granulométrique de la formulation du béton (BAC 35)

IV-4- Volume des mélanges d'essais :

Pour coulage de **9** éprouvettes cubiques et **3** éprouvettes prismatiques :

$[(0.1\times0.1\times0.1)\times9 + (0.07\times0.07\times0.28)\times3)]\times1.25 =$ **0.016395**

Formulation de Béton à base d'agrégats concassé : classe 25

$$\begin{cases} E = 209.31\,l \\ C = 336.11 kg/m^3 \\ S = 579.55 kg/m^3 \\ G_{3/8} = 128.24 kg/m^3 \\ G_{8/16} = 11.09.3 kg/m^3 \end{cases}$$

Formulation de Béton à base d'agrégats concassé : classe 30

$$\begin{cases} E = 206.9\,l \\ C = 380 kg/m^3 \\ S = 532.29 kg/m^3 \\ G_{3/8} = 152.55 kg/m^3 \\ G_{8/16} = 1095.38 kg/m^3 \end{cases}$$

Formulation de Béton à base d'agrégats concassé : classe 35

$$\begin{cases} E = 211.61\,l \\ C = 437.5 kg/m^3 \\ S = 517.81 kg/m^3 \\ S_{8/16} = 148.41 kg/m^3 \\ G_{16/25} = 1065.61 kg/m^3 \end{cases}$$

Formulation de Béton à base d'agrégats recyclé : classe 25

$$\begin{cases} E = 205.87 l \\ C = 390 kg/m^3 \\ S = 538.79 kg/m^3 \\ G_{3/8} = 130.45 kg/m^3 \\ G_{8/16} = 1007.02 kg/m^3 \end{cases}$$

Formulation de Béton à base d'agrégats recyclé : classe 30

$$\begin{cases} E = 211.67\ l \\ C = 460 kg/m^3 \\ S = 495.05 kg/m^3 \\ G_{3/8} = 118.19 kg/m^3 \\ G_{8/16} = 1004.85 kg/m^3 \end{cases}$$

Formulation de Béton à base d'agrégats recyclé : classe 35

$$\begin{cases} E = 198.24\ l \\ C = 488 kg/m^3 \\ S = 488.27 kg/m^3 \\ G_{3/8} = 116.56 kg/m^3 \\ G_{8/16} = 991.02 kg/m^3 \end{cases}$$

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 solidarisation par un liant de ciment, un squelette granulaire composé d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs gravies.

a- Le malaxage : [NA EN 12390-2]

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant : • Introduire gravier8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.

- Malaxer pend 1 min et 30 secs.
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendent 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.
- Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré

et visé. [R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman, 2009]

b- 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'égal 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 6 et 8 cm.

c- Vibration : [NA EN 12390-2]

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

• On commence par piqué de vibration qui utiliser pour vibrer le béton dans l'éprouvette dans 3 étapes et 3 couches à chaque fois en frape 25 frapes avec le même rythme à fin d'homogénéiser la forme 'déchantions.

• On faire 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 marquer par peinture et conserver dans l'eau.

IV-5-2- Les essais sur le béton durci :

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

a- Durcissement de béton :

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

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

b-Mode de conservation de béton : [NA EN 12390-2]

Le degré d'humide 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 ± 2°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.

a- 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-17- 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 (42.5µs). • 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).

b- 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 sclérometique).

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



Figure IV-18- 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 sclérometique horizontal 10 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 âpres l'élimination les valeurs très faible au très fortes.

Pour calculer la moyenne on a :

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

S : dureté au choc d'élément.

Si : dureté de la zone de l'élément.

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

IV-5-4- La méthode combinée :

Dans certains cas en combine les deux méthodes, essais scléromètrique et auscultation sonique, ce qui permettre en suit 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 scléromètrique 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 scléromètrique 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 :

$$Rc=\left(\frac{s}{3.64+0.02355*s+0.56*v}\right)^2$$

S : l'indice scléromètrique.

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

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

IV-5-5- Détermination de la résistance par les essais destructifs :

a- 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.

***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 cadrant 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-19- Presse hydraulique capacité 3000 KN.

-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

$$Rc = F/S$$

Rc: résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm2).

IV-6- Module d'élasticité dynamique :

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

$$Ed = V^2 . \gamma . \frac{(1+v)(1-2v)}{1-v}$$

Dans laquelle :

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

γ : la masse volumique du béton, exprimée en kg/m3

v : 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.

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

IV-7- Mesure de 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.

IV-7-1- Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont de forme , cubique ou prismatique.

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

Dans notre travail nous avons utilisés 2*1/2 de l'éprouvette obtenue en on a coupé l'éprouvette en deux coups après de la compression.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105 C^0 jusqu'à masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesés

effectuées à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15 heure 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 M1 (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 heurs], on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour que le niveau atteigne la moitié de la hauteur des éprouvettes.
- à [t+22 heurs] on ajoute de l'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient complètement immergées.

- à [t+48 heurs], 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 M2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique **[AYADI.B et HAMMACHE.Y, 2012].**

IV-7-2- Expression des résultats :

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est M2 -M1.

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

$$A_{abs} = (M2 - M1) / M1$$

Abs : taux d'absorption.

M1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M2 : masse d'éprouvette saturée d'eau

CHAPITRE V :

Résultats et discussions

Chapitre V : Résultats et discussions

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais et faire une analyse et une interprétation de ces résultats et aussi dans ce travail une étude de corrélation pour la prédiction de la résistance à l'écrasement (Rc) est considérée (les essais non destructifs « vitesse de propagation ultrason, scléromètre »), pour un béton recyclé comparé à un béton ordinaire.

V-1- Méthodologie adaptée pour les manipulations :

Rappelons que le but de notre travail est la caractérisation aux moyens des essais non destructifs (END) et essais direct d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux .Pour atteindre les objectifs on à adoptée pour les essais proposés la méthodologie suivante :

- Il fallait préparer des gâchés pour confectionner 162 éprouvettes (10×0×10) cm^3, et 54 éprouvettes (7×7×28) cm^3.
- La composition été déterminée par la méthode de Dreux Gorisse.
- Il y a trois classes de béton (25,30 et 35) type recyclé (BAR) et concassé (BAC).
- Les pourcentages d'adjuvant (MEDAFLUID SF 150) sont :(0%, 1% et 2%).
- Les essais étant exécuté à : 7 j, 14 j, et 28 jours.
- Les propriétés étudiées: (La masse volumique, E/C, Affaissement, l'absorption d'eau, l'indice sclérometique (I) ,la vitesse de propagation des ultrasons (V) et le résistance à l'écrasement (**Rc**),ainsi que la résistance à la traction par flexion (Rt)

V-2- Présentation des résultats :

Les résultats à l'État frais et durci ((E/C), la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état durci, la résistance à la compression, le temps et la vitesse de propagation ultrasonique, l'indice sclérometique, le taux d'absorption d'eau et la traction par flexion) sont présentés dans les tableaux ci-après.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube) (MPa)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAC$_{0\%}$ 25 (MPa)	2.443	7	2.401	2.402	26.83	25.95	22.26	21.53	27.65	28.13	3.616	3.556
	2.421		2.409		25.65		21.28		29.1		3.436	
	2.436		2.398		25.36		21.04		27.65		3.616	
	2.433 Moyenne	14	2.409	2.416	30.97	29.65	25.70	73.83	27.65	26.61	3.616	3.861
			2.414		28.93		24.01		26.9		4.016	
			2.427		29.06		24.12		25.3		3.952	
		28	2.415	2.423	31.86	31.54	26.44	26.18	24.3	24.26	4.115	4.120
			2.419		32.14		26.68		24		4.166	
			2.436		30.61		25.41		24.5		4.081	
BAC$_{1\%}$ 25 (MPa)	2.436	7	2.391	2.391	32.80	31.72	27.22		28.9	27.06	3.460	3.719
	2.421		2.402		30.94		25.68		26.65		3.752	
	2.429		2.382		31.44		26.10		25.65		3.944	
	2.432 Moyenne	14	2.399	2.400	41.61	40.24	34.53	33.40	25.25	26.18	3.960	3.823
			2.412		39.24		32.57		25.9		3861	
			2.389		39.88		33.10		27.4		3.649	
		28	2.416	2.425	48.95	47.35	40.63	39.30	25	24.56	4.000	4.071
			2.424		46.17		38.32		24.1		4.149	
			2.435		46.92		38.94		24.6		4.065	
BAC$_{2\%}$ 25 (MPa)	2.415	7	2.476	2.421	38.22	37.49	31.72	31.12	23.8	24.5	4201	4.083
	2.403		2.389		36.67		30.44		24.6		4.065	
	2.422		2.400		37.59		31.20		25.1		3984	
	2.414 Moyenne	14	2.453	2.440	48.48	47.44	40.24	39.38	24	23.86	4.166	4.190
			2.462		46.18		38.32		23.9		4.184	
			2.405		47.68		39.57		23.7		4.219	
		28	2.437	2.451	57.04	55.82	47.34	46.44	23.4	23.16	4273	4.316
			2.450		54.33		45.43		22.9		4.366	
			2.466		56.10		46.56		23.2		4.310	

Tableau V-1- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 25 à base d'agrégats concassés.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube) (MPa)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
	2.463		2.418		26.15		21.70		26.15		3.824	
	2.449		2.409		30.25		25.10		30.25		3.305	
	2.451	**7**	2.395	**2.407**	26.91	**27.77**	22.34	**23.05**	26.1	**27.5**	3.831	**3.653**
BAC$_{0\%}$			2.420		33.17		27.54		26.25		3.809	
			2.418		38.37		31.85		27.7		4.048	
30 (MPa)	**2.454**	**14**	2.396	**2.411**	34.13	**35.23**	28.33	**29.24**	25.3	**26.41**	3.952	**3.936**
	Moyenne		2.426		39.03		32.39		25		4.000	
			2.422		45.15		37.47		25.1		3.984	
		28	2.429	**2.425**	40.16	**41.45**	33.33	**34.40**	24.3	**24.8**	4.115	**4.033**
	2.430		2.423		28.51		23.66		28.5		3.508	
	2.445		2.403		28.9		23.98		25.4		3.937	
	2.437	**7**	2.388	**2.404**	28.12	**28.63**	23.33	23.76	25.3	**26.4**	3.952	**3.799**
BAC$_{1\%}$			2.427		36.16		30.01		24.9		4.016	
			2.417		36.66		30.42		26		3.846	
30 (MPa)	**2.437**	**14**	2.436	**2.426**	35.67	36.16	29.60	30.01	23.9	**24.93**	4.184	**4.015**
	Moyenne		2.431		42.55		35.31		23.6		4.237	
			2.427		43.13		35.79		24.8		4.032	
		28	2.430	**2.429**	41.97	42.55	34.83	35.31	24.9	**24.43**	4.016	**4.095**
	2.435		2.447		33.38		27.71		27.2		3.676	
	2.417		2.415		27.05		22.45		24.5		4.081	
	2.420	**7**	2.432	**2.431**	29.89	**30.11**	24.81	**24.99**	25	**25.56**	4.000	**3.919**
BAC$_{2\%}$			2.439		42.35		35.15		24.7		4.048	
			2.451		34.31		28.48		23.5		4.255	
30 (MPa)	**2.424**	**14**	2.428	**2.439**	37.91	**38.19**	31.47	**31.70**	24.1	**24.1**	4.149	**4.151**
	Moyenne		2.444		49.82		41.35		22.5		4.444	
			2.471		40.37		33.51		23.8		4.201	
		28	2.425	**2.446**	44.61	**44.93**	37.03	**27.30**	23.4	**23.23**	4.273	**4.306**

Tableau V-2- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 30 à base d'agrégats concassés.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube) (MPa)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAC$_{0\%}$ 35 (MPa)	2.467	7	2.428	2.426	28.96	30.77	24.03	25.54	28.3	27.43	3.533	3.649
	2.453		2.441		32.85		27.26		26.1		3.831	
	2.471		2.411		30.52		25.33		27.9		3.584	
	2.463 Moyenne	14	2.430	2.428	36.47	39.04	30.50	32.41	25.25	24.91	3.960	4.014
			2.439		41.67		34.58		24.9		4.016	
			2.417		38.71		32.14		24.6		4.065	
		28	2.437	2.427	43.22	45.93	35.87	38.12	23.9	23.21	4.184	4.310
			2.425		49.02		40.69		23.4		4.273	
			2.419		45.55		37.80		22.35		4.474	
BAC$_{1\%}$ 35 (MPa)	2.449	7	2.433	2.433	35.03	35.02	29.07	29.07	29.2	27.75	3.424	3.756
	2.462		2.442		34.32		28.49		27.65		4.056	
	2.457		2.426		35.71		29.64		26.4		3.787	
	2.456 Moyenne	14	2.448	2.444	44.44	44.42	36.88	36.87	24.1	24.45	4.149	4.090
			2.456		43.54		36.14		24.6		4.065	
			2.429		45.30		37.60		24.65		4.056	
		28	2.451	2.448	52.28	52.26	43.39	43.67	22.5	23.23	4.255	4.243
			2.463		51.22		42.51		23.85		4.192	
			2.431		53.29		44.23		23.35		4.282	
BAC$_{2\%}$ 35 (MPa)	2.431	7	2.431	2.430	38.39	40.86	31.86	33.91	24.3	25.25	4.115	3.965
	2.444		2.439		42.17		35.00		25.1		3.984	
	2.438		2.422		42.02		34.87		26.35		3.795	
	2.437 Moyenne	14	2.470	2.447	48.69	51.83	40.42	43.02	23.6	23.8	4.237	4.203
			2.446		53.50		44.40		24.5		4.081	
			2.426		53.30		44.24		23.3		4.291	
		28	2.476	2.458	57.29	60.98	47.55	50.61	23.2	22.71	4.310	4.403
			2.448		62.94		52.24		22.35		4.474	
			2.452		62.71		52.05		22.6		4.424	

Tableau V-3- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 35 à base d'agrégats concassés.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube) (MPa)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAR$_{0\%}$ 25 (MPa)	2.394	7	2.322	2.319	15.96	16.16	13.24	13.41	28.55	30.56	3.502	3.267
	2.400		2.304		17.03		14.13		33.1		3.021	
	2.381		2.332		15.50		12.86		30.5		3.278	
	2.391 Moyenne	14	2.313	2.323	21.15	22.05	17.55	18.30	27.4	29.13	3.649	3.611
			2.337		23.44		19.45		29.85		3.868	
			2.321		21.56		17.89		30.15		3.316	
		28	2.351	2.338	23.82	24.12	19.77	20.02	26.05	28.68	3.838	3.673
			2.317		25.42		21.09		27		3.703	
			2.347		23.13		19.20		28.75		3.478	
BAR$_{1\%}$ 25 (MPa)	2.378	7	2.346	2.326	21.95	21.68	18.21	17.99	28.6	29.3	3.496	3.429
	2.353		2.320		19.57		16.24		27.2		3.676	
	2.359		2.312		23.53		19.52		32.1		3.115	
	2.363 Moyenne	14	2.319	2.345	25.36	26.30	21.05	22.00	29.2	27.96	3.424	3.579
			2.364		26.29		22.34		27.75		3.603	
			2.353		27.24		22.61		26.95		3.710	
		28	2.341	2.353	32.76	32.36	27.19	26.86	27.65	26.43	3.616	3.788
			2.367		29.21		24.24		26.35		3.795	
			2.351		35.11		29.14		25.3		3.952	
BAR$_{2\%}$ 25 (MPa)	2.357	7	2.339	2.350	34.75	36.71	28.84	29.37	27.5	27.53	3.636	3.633
	2.369		2.346		36.65		30.42		28.2		3.546	
	2.352		2.367		38.75		32.16		26.9		3.717	
	2.359 Moyenne	14	2.358	2.353	46.63	46.58	38.70	41.64	28.75	27.4	3.478	3.654
			2.362		46.49		38.58		27		3.703	
			2.340		49.15		40.79		26.45		3.780	
		28	2.365	2.357	51.86	54.8	43.04	43.84	25.45	26.23	3.929	3.818
			2.359		54.70		45.40		25.45		3.929	
			2.347		57.83		47.99		27.8		3.597	

Tableau V-4- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 25 à base d'agrégats recyclé.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAR$_{0\%}$ 30 (MPa)	2.383	7	2.321	**2.327**	28.95	**26.62**	24.03	**21.29**	29.75	**29.76**	3.361	**3.366**
	2.379		2.319		26.28		21.81		28.15		3.552	
	2.399		2.342		24.63		20.44		31.4		3.184	
	2.387 Moyenn	14	2.333	**2.384**	36.72	**33.76**	30.48	**28.96**	28.2	**28.38**	3.546	**3.529**
			2.450		33.33		30.47		29.85		3.350	
			2.368		31.24		25.93		27.1		3.690	
		28	2.366	**2.369**	43.20	**39.72**	35.86	**33.34**	25.7	**25.96**	3.891	**3.852**
			2.346		39.22		32.55		26.4		3.787	
			2.395		36.76		31.61		26.8		3.731	
BAR$_{1\%}$ 30 (MPa)	2.350	7	2.315	**2.324**	31.66	**31.67**	26.28	**26.34**	27.2	**28.1**	3.676	**3.562**
	2.379		2.331		33.19		27.55		29.35		3.407	
	2.363		2.327		30.15		25.02		27.75		3.603	
	2.364 Moyenn	14	2.335	**2.347**	40.18	**40.18**	33.35	**33.35**	28.1	**26.75**	3.558	**3.743**
			2.364		42.11		34.95		26.15		3.824	
			2.341		38.25		31.75		26		3.846	
		28	2.340	**2.346**	49.27	**47.94**	40.89	**39.79**	25.15	**25.05**	3.976	**3.992**
			2.359		49.55		41.13		24.8		4.032	
			2.340		45.00		37.35		25.2		3.968	
BAR$_{2\%}$ 30 (MPa)	2.372	7	2.360	**2.352**	42.06	**46.21**	34.90	**38.35**	28.15	**26.75**	3.552	**3.743**
	2.371		2.354		49.35		40.96		26.1		3.831	
	2.349		2.343		47.23		39.20		26		3.846	
	2.364 Moyenn	14	2.379	**2.365**	53.35	**58.62**	44.28	**48.65**	25.45	**25.46**	3.929	**3.927**
			2.362		62.60		51.96		26.35		3.795	
			2.355		59.61		49.72		24.6		4.065	
		28	2.385	**2.371**	62.77	**68.97**	50.10	**57.25**	24.5	**24.1**	4.081	**4.149**
			2.370		73.65		61.93		24		4.166	
			2.358		70.49		58.50		**23.8**		4.201	

Tableau V-5- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 30 à base d'agrégats recyclé.

Type de béton	ρ_{frais} (Kg/m^3)	Age (jours)	ρ_{durci} (Kg/m^3)	Moy	Compression (Rc)				ultrason			
					(cube) (MPa)	Moy	(cyl) (MPa)	Moy	t (µs)	Moy	V(Km/s)	Moy
BAR$_{0\%}$ 35 (MPa)	2.367	7	2.319	2.321	**28.96**	30.68	**24.03**	25.46	27	26.58	3.703	3.762
	2.392		2.308		**32.55**		**27.01**		26.4		3.787	
	2.383		2.337		**30.50**		**25.31**		26.35		3.797	
	2.380 Moyenne	14	2.327	2.329	**36.73**	38.92	**30.48**	32.21	25.4	25.08	3.937	3.987
			2.315		**41.29**		**34.27**		25		4.000	
			2.347		**38.43**		**31.89**		24.85		4.024	
		28	2.331	2.341	**43.22**	45.79	**35.87**	38.00	24.15	24.12	4.140	4.146
			2.332		**48.58**		**40.32**		23.9		4.184	
			2.362		**45.52**		**35.87**		24.3		4.115	
BAR$_{1\%}$ 35 (MPa)	2.353	7	2.358	2.360	**35.35**	35.12	**29.34**	29.14	25.75	26.4	3.883	3.789
	2.368		2.367		**34.32**		**28.48**		27.05		3.696	
	2.361		2.355		**35.71**		**29.63**		26.4		3.787	
	2.360 Moyenne	14	2.374	2.373	**44.84**	44.55	**37.21**	36.97	24.4	24.53	4.098	4.022
			2.380		**43.53**		**36.12**		25.35		3.944	
			2.366		**45.29**		**37.59**		24.85		4.024	
		28	2.388	2.381	**52.76**	52.42	**43.79**	43.50	23.8	23.83	4.201	4.196
			2.383		**51.22**		**42.51**		24.2		4.132	
			2.373		**53.29**		**44.23**		23.5		4.255	
BAR$_{2\%}$ 35 (MPa)	2.341	7	2.377	2.375	39.78	39.73	33.02	32.97	24.60	25.35	4.065	3.948
	2.355		2.381		38.75		32.16		25.1		3.984	
	2.365		2.369		40.67		33.75		26.35		3.795	
	2.353 Moyenn	14	2.394	2.381	50.47	50.38	41.89	41.81	24.75	24.25	4.040	4.286
			2.368		49.07		40.72		23.85		4.192	
			2.382		51.60		42.82		24.15		4.140	
		28	2.364	2.357	59.38	59.31	49.28	49.23	22.85	23.33	4.376	4.286
			2.359		57.85		48.02		23.7		4.219	
			2.350		60.71		50.38		23.45		4.264	

Tableau V-6- Résultats des essais des propriétés physico-mécaniques des mélanges étudiés de la classe 35 à base d'agrégats recyclé.

Type de béton (MPa)	La masse sèche (Kg)[Ms]	La masse humide (Kg) [Mh]	A (%)	A(%) Moy
BAC_0 25	1.743	1.794	2.92	**2.78**
	1.758	1.811	3.01	
	1.849	1.894	2.43	
BAC_1 25	1.716	1.745	1.69	**1.74**
	1.927	1.960	1.71	
	1.756	1.788	1.82	
BAC_2 25	1.858	1.889	1.67	**1.54**
	1.781	1.811	1.68	
	2.026	2.052	1.28	
BAC_0 30	1.874	1.903	1.55	**2.4**
	1.088	1.122	3.13	
	2.023	2.074	2.52	
BAC_1 30	1.959	1.985	1.32	**1.75**
	1.696	1.721	1.47	
	1.861	1.907	2.47	
BAC_2 30	1.969	1.986	0.86	**0.86**
	1.767	1.782	0.85	
	1.841	1.857	0.86	
BAC_0 35	1.869	1.908	2.09	**2.16**
	1.770	1.814	2.46	
	1.852	1.888	1.94	
BAC_1 35	1.729	1.756	1.53	**1.67**
	1.737	1.771	1.96	
	1.825	1.853	1.53	
BAC_2 35	1.783	1.810	1.51	**1.40**
	1.794	1.818	1.34	
	1.923	1.949	1.35	

Tableau V-7- Taux d'absorption d'eau (A) des bétons concassés (BAC).

Type de béton (MPa)	La masse sèche (Kg) [Ms]	La masse humide (Kg) [Mh]	A (%)	A (%) Moy
BAR_0 25	1.818	1.864	2.53	**3.71**
	1.878	1.952	3.94	
	1.631	1.707	4.66	
BAR_1 25	1.802	1.845	2.39	**2.39**
	1.754	1.795	2.34	
	1.642	1.682	2.44	
BAR_2 25	1.670	1.695	1.50	**1.84**
	1.881	1.914	1.75	
	1.848	1.890	2.27	
BAR_0 30	1.738	1.814	4.37	**4.15**
	1.731	1.801	4.04	
	1.761	1.832	4.03	
BAR_1 30	1.897	1.968	3.74	**3.57**
	1.627	1.678	3.13	
	1.634	1.697	3.85	
BAR_2 30	1.755	1.790	1.99	**2.31**
	1.693	1.730	2.18	
	1.843	1.894	2.76	
BAR_0 35	1.712	1.782	4.09	**4.32**
	1.823	1.910	4.77	
	1.852	1.928	4.10	
BAR_1 35	1.745	1.803	3.32	**3.70**
	1.678	1.743	3.87	
	1.662	1.727	3.91	
BAR_2 35	1.901	1.970	3.62	**2.55**
	1.887	1.930	2.27	
	1.885	1.918	1.75	

Tableau V-8- Taux d'absorption d'eau (A) des bétons recyclés (BAR).

Is de scléro-metr	$BAC_{0\%}$ 25 (MPa)	$BAC_{1\%}$ 25 (MPa)	$BAC_{2\%}$ 25 (MPa)	$BAC_{0\%}$ 30 (MPa)	$BAC_{1\%}$ 30 (MPa)	$BAC_{2\%}$ 30 (MPa)	$BAC_{0\%}$ 35 (MPa)	$BAC_{1\%}$ 35 (MPa)	$BAC_{2\%}$ 35 (MPa)
Is 01	27	28	32	26	29	31	30	30	36
Is 02	27	30	31	29	33	34	30	33	33
Is 03	24	29	31	26	30	32	29	34	32
Moy	**26**	**29**	**31**	**27**	**31**	**32**	**30**	**32**	**34**

Tableau V-9- l'indice sclérometique Rc des bétons concassés à 28 jours.

Indice de sclero	BAR_0 25 (MPa)	BAR_1 25 (MPa)	BAR_2 25 (MPa)	BAR_0 30 (MPa)	BAR_1 30 (MPa)	BAR_2 30 (MPa)	BAR_0 35 (MPa)	BAR_1 35 (MPa)	BAR_2 35 (MPa)
Rs 01	23	25	28	28	28	31	26	33	34
Rs 02	26	25	25	26	28	28	27	29	34
Rs 03	24	27	29	27	28	30	31	32	32
Moy	**24**	**26**	**27**	**26**	**28**	**30**	**28**	**31**	**33**

Tableau V-10- l'indice sclérometique Rc des bétons recyclés à 28 jours.

Type de béton (MPa)	Adjuvant (%)	E/C
BAC 25	**0**	**0.64**
	1	**0.59**
	2	**0.55**
BAC 30	**0**	**0.56**
	1	**0.44**
	2	**0.36**
BAC 35	**0**	**0.48**
	1	**0.43**
	2	**0.37**

Tableau V-11- E/C de béton concassé (BAC)

Type de béton (MPa)	Adjuvant (%)	E/C
BAR 25	**0**	**0.67**
	1	**0.60**
	2	**0.56**
BAR 30	**0**	**0.61**
	1	**0.53**
	2	**0.46**
BAR 35	**0**	**0.54**
	1	**0.46**
	2	**0.39**

Tableau V-12- E/C de béton recyclé (BAR)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAC25 0%	2,401	3,616	13,07	30579,74
	2,409	3,436	11,80	27703,07
	2,398	3,616	13,07	30541,53
	2,409	3,616	13,07	30681,63
	2,414	4,016	16,12	37923,59
	2,427	3,952	15,61	36922,27
	2,415	4,115	16,93	39832,87
	2,419	4,166	17,35	40893,96
	2,436	4,081	16,65	39518,03
BAC25 1%	2,391	3,46	11,97	27881,52
	2,402	3,752	14,07	32936,95
	2,382	3,944	15,55	36091,12
	2,399	3,96	15,68	36644,21
	2,412	3,861	14,90	35023,67
	2,389	3,649	13,31	30984,79
	2,416	4	16,00	37653,18
	2,424	4,149	17,21	40644,73
	2,435	4,065	16,52	39192,67
BAC25 2%	2,476	4,201	17,64	42563,84
	2,389	4,065	16,52	38452,27
	2,4	3,984	15,87	37105,19
	2,453	4,166	17,35	41468,74
	2,462	4,184	17,50	41981,33
	2,405	4,219	17,79	41698,35
	2,437	4,273	18,25	43341,71
	2,45	4,366	19,06	45490,25
	2,466	4,31	18,57	44620,29

Tableau V-13- Module d'élasticité dynamique (BAC 25)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAC30 0%	2,418	3,824	14,62	30579,74
	2,409	3,305	10,92	27703,07
	2,395	3,831	14,67	30541,53
	2,42	3,809	14,50	30681,63
	2,418	4,048	16,38	37923,59
	2,396	3,952	15,61	36922,27
	2,426	4	16	39832,87
	2,422	3,984	15,87	40893,96
	2,429	4,115	16,93	39518,03
BAC30 1%	2,423	3,508	12,30	27881,52
	2,403	3,937	15,49	32936,95
	2,388	3,952	15,61	36091,12
	2,427	4,016	16,12	36644,21
	2,417	3,846	14,79	35023,67
	2,436	4,184	17,50	30984,79
	2,431	4,237	17,95	37653,18
	2,427	4,032	16,25	40644,73
	2,43	4,016	16,12	39192,67
BAC30 2%	2,447	3,676	13,51	42563,84
	2,415	4,081	16,65	38452,27
	2,432	4	16	37105,19
	2,439	4,048	16,38	41468,74
	2,451	4,255	18,10	41981,33
	2,428	4,149	17,21	41698,35
	2,444	4,444	19,74	43341,71
	2,471	4,201	17,64	45490,25
	2,425	4,273	18,25	44620,29

Tableau V-14- Module d'élasticité dynamique (BAC 30)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAC35 0%	2,428	3,533	12,48	29520,30
	2,441	3,831	14,68	34896,10
	2,411	3,584	12,85	30166,02
	2,43	3,96	15,68	37117,73
	2,439	4,016	16,13	38316,34
	2,417	4,065	16,52	38902,95
	2,437	4,184	17,51	41555,04
	2,425	4,273	18,26	43128,30
	2,419	4,474	20,02	47164,22
BAC35 1%	2,433	3,424	11,72	27783,98
	2,442	4,056	16,45	39131,49
	2,426	3,787	14,34	33889,58
	2,448	4,149	17,21	41047,16
	2,456	4,065	16,52	39530,68
	2,429	4,056	16,45	38923,17
	2,451	4,255	18,11	43224,23
	2,463	4,192	17,57	42159,14
	2,431	4,282	18,34	43417,33
BAC35 2%	2,431	4,115	16,93	40096,78
	2,439	3,984	15,87	37708,15
	2,422	3,795	14,40	33976,80
	2,47	4,237	17,95	43191,54
	2,446	4,081	16,65	39680,26
	2,426	4,291	18,41	43510,36
	2,476	4,31	18,58	44801,24
	2,448	4,474	20,02	47729,64
	2,452	4,424	19,57	46745,04

Tableau V-15- Module d'élasticité dynamique (BAC 35)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAR35 0%	2,319	3,703	13,71	30973,69
	2,308	3,787	14,34	32241,20
	2,337	3,797	14,42	32818,95
	2,327	3,937	15,50	35132,74
	2,315	4	16,00	36079,11
	2,347	4,024	16,19	37018,08
	2,331	4,14	17,14	38915,96
	2,332	4,184	17,51	39764,61
	2,362	4,115	16,93	38958,69
BAR35 1%	2,358	3,883	15,08	34630,87
	2,367	3,696	13,66	31495,39
	2,355	3,787	14,34	32897,76
	2,374	4,098	16,79	38833,76
	2,38	3,944	15,56	36060,82
	2,366	4,024	16,19	37317,75
	2,388	4,201	17,65	41051,07
	2,383	4,132	17,07	39630,49
	2,373	4,255	18,11	41848,67
BAR35 2%	2,377	4,065	16,52	38259,13
	2,381	3,984	15,87	36811,45
	2,369	3,795	14,40	33233,30
	2,394	4,04	16,32	38060,26
	2,368	4,192	17,57	40533,03
	2,382	4,14	17,14	39767,41
	2,364	4,376	19,15	44094,75
	2,359	4,219	17,80	40900,80
	2,35	4,264	18,18	41618,56

Tableau V-16- Module d'élasticité dynamique (BAR 35)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAR25 0%	2,322	3,502	12,26	27738,27
	2,304	3,021	9,13	20481,83
	2,332	3,278	10,75	24407,95
	2,313	3,649	13,32	29999,10
	2,337	3,868	14,96	34057,79
	2,321	3,316	11,00	24859,31
	2,351	3,838	14,73	33732,41
	2,317	3,703	13,71	30946,98
	2,347	3,478	12,10	27653,94
BAR25 1%	2,346	3,496	12,22	27929,02
	2,32	3,676	13,51	30536,82
	2,312	3,115	9,70	21851,88
	2,319	3,424	11,72	26482,14
	2,364	3,603	12,98	29892,40
	2,353	3,71	13,76	31546,75
	2,341	3,616	13,08	29815,57
	2,367	3,795	14,40	33205,24
	2,351	3,952	15,62	35766,08
BAR25 2%	2,339	3,636	13,22	30120,54
	2,346	3,546	12,57	28733,62
	2,367	3,717	13,82	31854,31
	2,358	3,478	12,10	27783,55
	2,362	3,703	13,71	31548,02
	2,34	3,78	14,29	32567,49
	2,365	3,929	15,44	35561,50
	2,359	3,929	15,44	35471,28
	2,347	3,597	12,94	29578,68

Tableau V-17- Module d'élasticité dynamique (BAR 25)

Classe de béton	ρ (t/m^3)	V (km/s)	V² (km/s)	E_d (MPa)
BAR30 0%	2,321	3,361	11,30	25538,59
	2,319	3,552	12,62	28499,12
	2,342	3,184	10,14	23126,92
	2,333	3,546	12,57	28574,39
	2,45	3,35	11,22	26781,85
	2,368	3,69	13,62	31406,48
	2,366	3,891	15,14	34891,69
	2,346	3,787	14,34	32772,04
	2,395	3,731	13,92	32474,38
BAR30 1%	2,315	3,676	13,51	30471,01
	2,331	3,407	11,61	26355,51
	2,327	3,603	12,98	29424,54
	2,335	3,558	12,66	28792,78
	2,364	3,824	14,62	33671,93
	2,341	3,846	14,79	33729,10
	2,34	3,976	15,81	36032,42
	2,359	4,032	16,26	37355,44
	2,34	3,968	15,75	35887,57
BAR30 2%	2,36	3,552	12,62	29002,99
	2,354	3,831	14,68	33652,36
	2,343	3,846	14,79	33757,92
	2,379	3,929	15,44	35772,01
	2,362	3,795	14,40	33135,10
	2,355	4,065	16,52	37905,03
	2,385	4,081	16,65	38690,68
	2,37	4,166	17,36	40065,60
	2,358	4,201	17,65	40535,36

Tableau V-18- Module d'élasticité dynamique (BAR 30)

V-3- Propriétés physiques :

VI-3-1- l'état frais :

a- le rapport E/C :

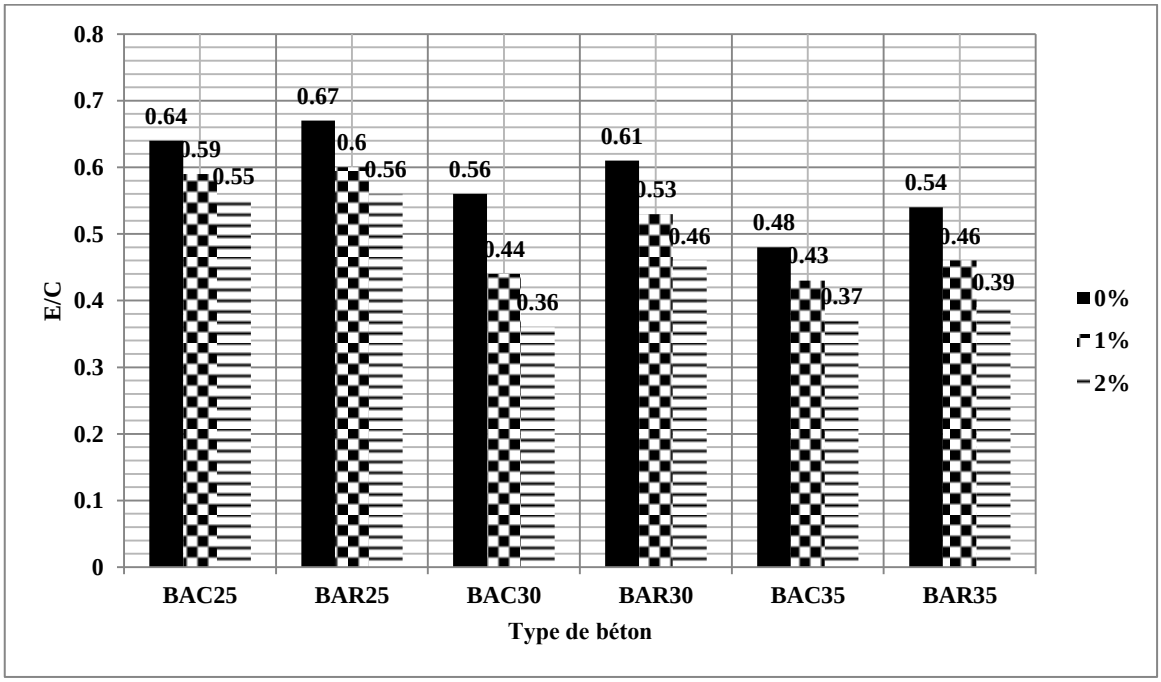


Figure V-1- La variation du rapport (E/C) pour les différents types du béton (recyclé, concassé)

D'après la **figure V.1**, on peut constater une diminution du rapport E/C avec l'augmentation du dosage d'adjuvant des différents types des bétons recyclés et concassés. Cependant, le béton (BAR) donne toujours un rapport d'eau plus élevés en comparaison avec les mélanges du béton concassés avec ou sans adjuvant.

La demande en eau de gâchage est presque similaire pour toutes les classes des bétons (recyclés et concassés).

Le béton (BAR25) enregistre une valeur de rapport E/C la plus grande de 0.67 par apport à tous les mélanges étudié.

Le mélange (BAR35) avec 2% d'adjuvant donne une réduction de l'ordre de 42 % comparé au BAR25, E/C=0.39 et E/C =0.67.

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.

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% pour 0% adjuvant. Donc le rapport E/C augmente.**[10]**

L'effet du type d'agrégats recyclés, la porosité élevée, ces agrégats recyclés absorbent beaucoup plus d'eau en comparaison avec les agrégats naturels.

b- Masse volumique (frais) :

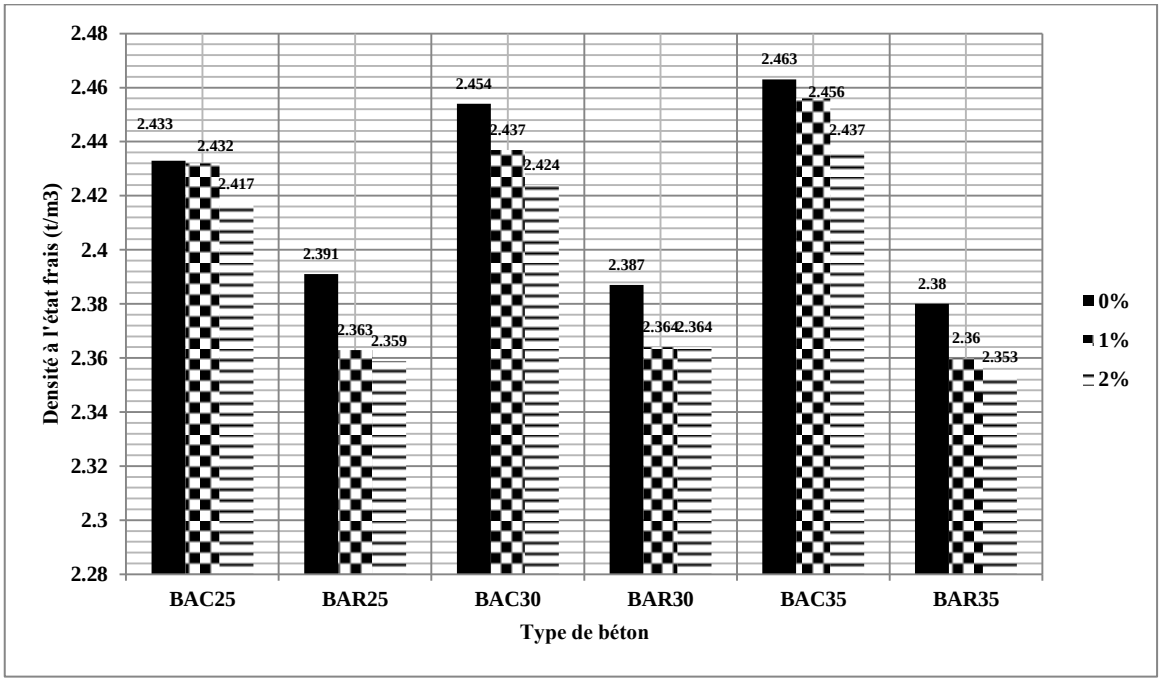


Figure V-2- La variation de la masse volumique apparente pour les différents types des bétons (recyclé, concassé).

D'après la **figure V-2**, On constate, que la masse volumique des bétons recyclé (BAR) avec différents pourcentage adjuvant son inferieures en comparaison avec béton concassé (BAC), la valeur optimale enregistrée est obtenue avec (BAC35) avec 0% d'adjuvant ; ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande (2.463 t/m^3) par rapport à tous les bétons testés.

Le béton (BAR 35) donne une valeur de masse volumique la plus faible en comparaison avec tous les mélanges testés.

L'effet de l'emploi de l'adjuvant présente une légère réduction vis-à-vis de la masse volumique à l'état frais pour les bétons recyclés et concasses.

V-3-2- l'état durci :

a- La masse volumique (durci) :

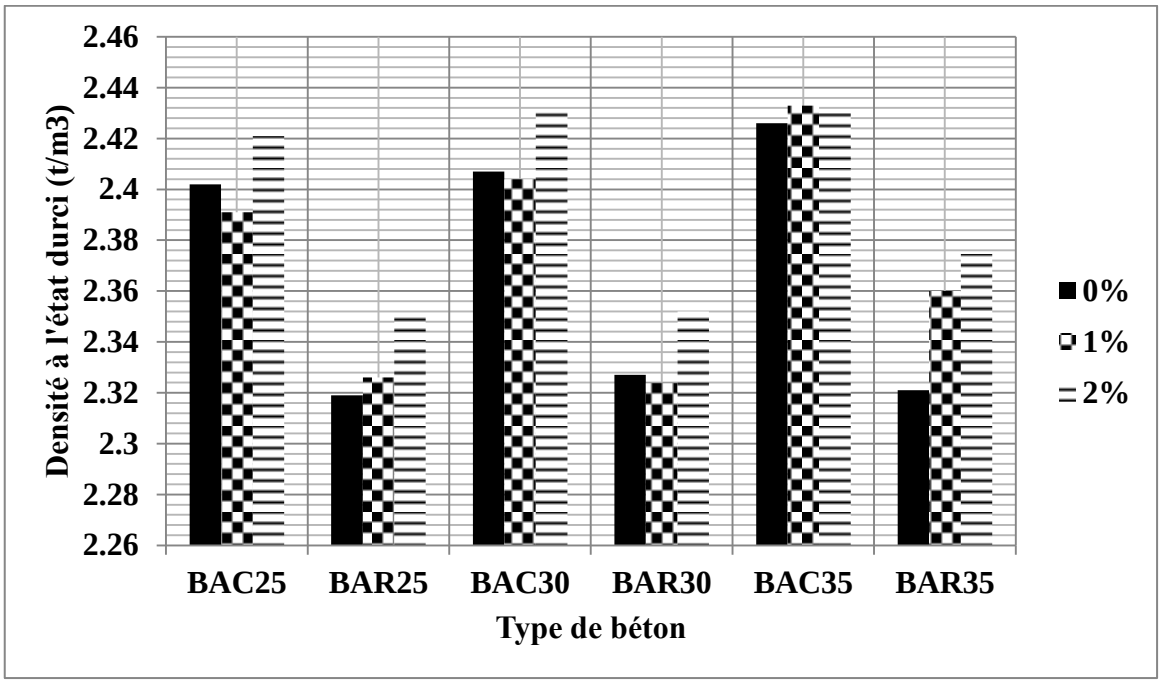


Figure V-3- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 7 jours.

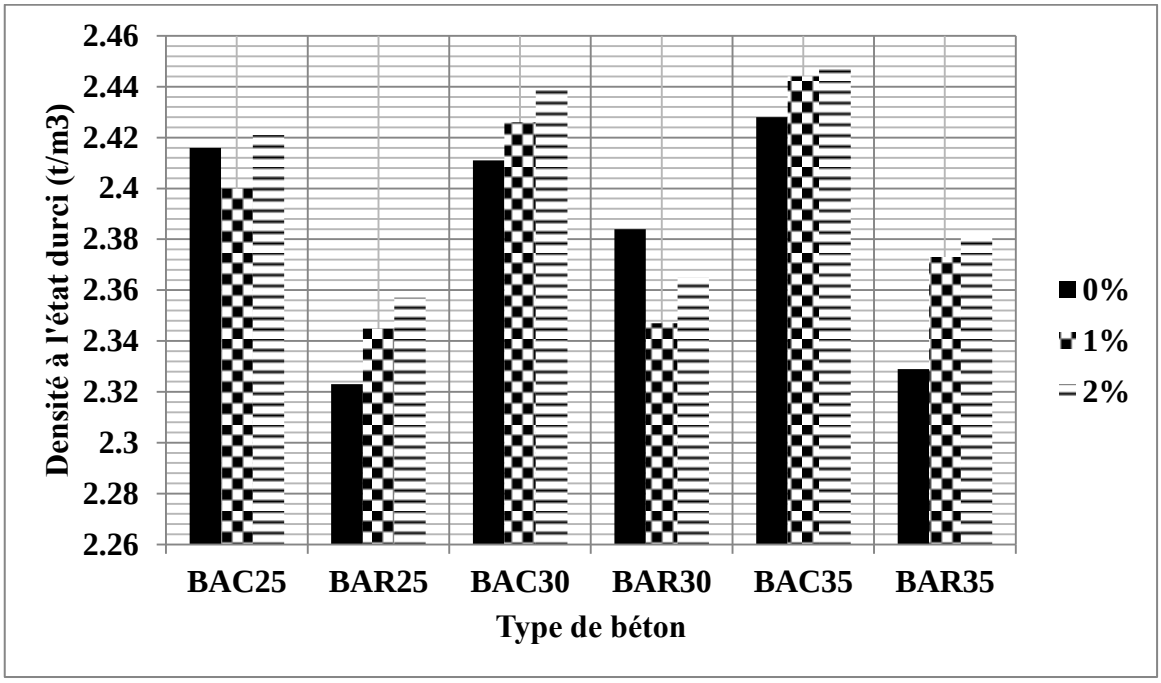


Figure V-4- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 14 jours.

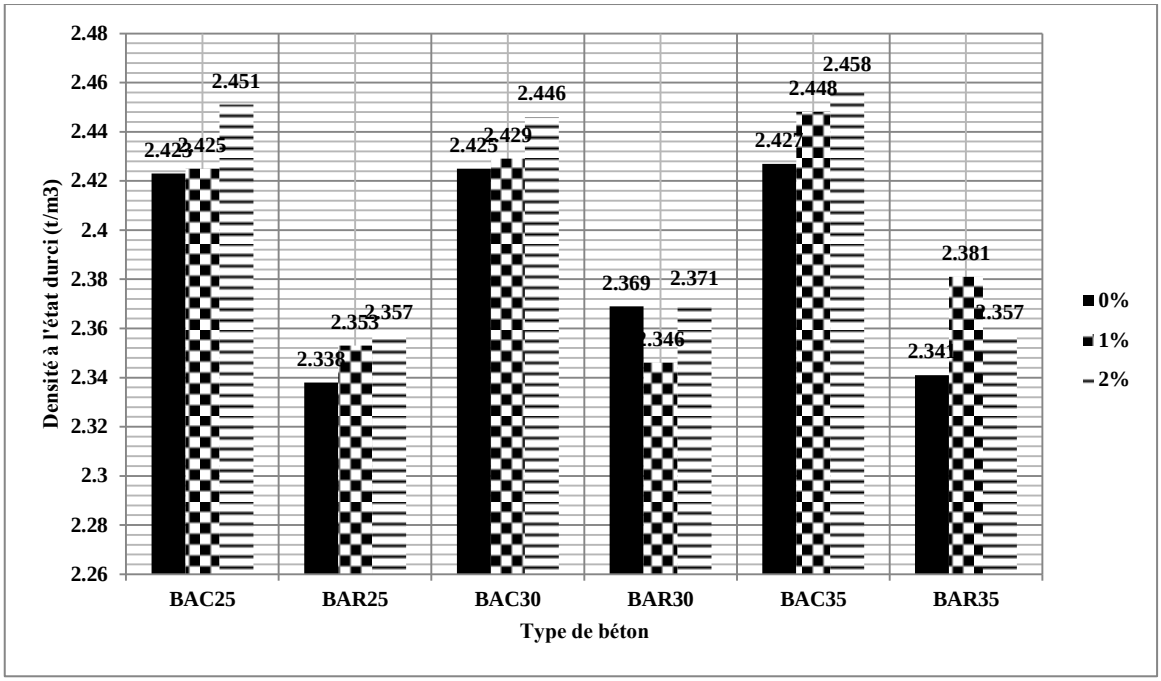


Figure V-5- La densité pour les différents types des bétons étudiés à 28 jours.

Selon, les **figures V-3, V-4** et **V-5,** qui représentent le développement de la masse volumique à l'état durci des différents types des bétons étudiés (recyclés, concassé) en fonction de l'âge du béton (7,14 et 28j), on note, que la masse volumique des bétons avec les différents pourcentage d'adjuvant pour les bétons recyclés est toujours inférieure en comparaison avec les bétons concassés, la valeur optimale enregistrée est obtenue avec le béton concassé (BAC 35); ce béton donne une valeur de masse volumique plus grande (2.258 t/m^3) à 28 jours par rapport au béton recyclé (BAR) de même classe.

D'après les figures 6.3, 6.4 et 6.5, on observe un développement normal de la masse volumique des bétons testés pour les différents âges 7, 14 et 28 jours.

On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant sur le développement de la masse volumique à l'état durci des bétons recyclés adjuvanté avec une amélioration de 2 %.

Ceci est en concordance avec les résultats trouvés par d'autres études antérieures sur le sujet **[10].**

b- Taux d'absorption d'eau (A):

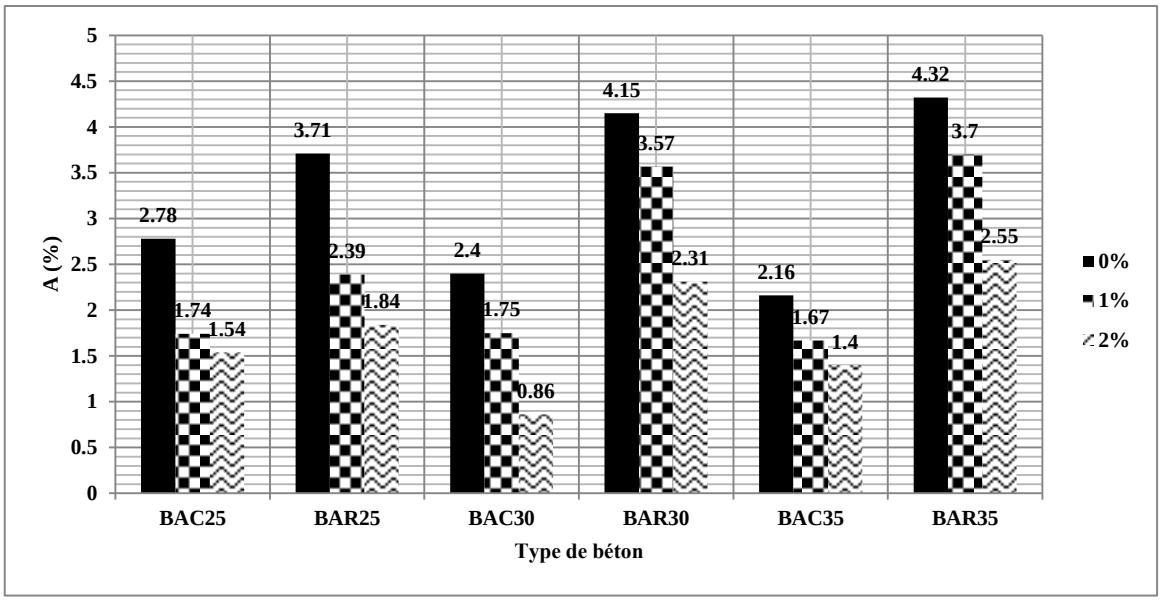


Figure V-6- Absorption d'eau des bétons recyclés (BAR) et concassés (BAC)

D'âpre la **figure V-6**, on remarque que les différents mélanges du béton recyclé présente un taux d'absorption élevé en comparaison avec le béton à base d'agrégat concassé pour toutes les classe (25,30 et 35) pour (**$BAC_{0\%}$**) et (**$BAR_{0\%}$**) un taux d'absorption **(A)** de 15% est enregistré .

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 concassé (BAC 30) avec 2 % d'adjuvant donne un taux d'absorption faible de 60 % par rapport au béton recyclé de classe identique (BAR 30) à 2 % adjuvant.

On observe, que l'effet de l'adjuvant sur le béton utilisé; c'est un effet positif car à 2% d'adjuvant, le taux d'absorption a une valeur minimum de (2.55 %) par rapport au béton (BAR 35) (4.32). Donc l'adjuvant démuni le taux d'absorption jusqu'à 40 %.

V-4- Propriétés mécaniques :

V-4-1- Résistance à la compression :

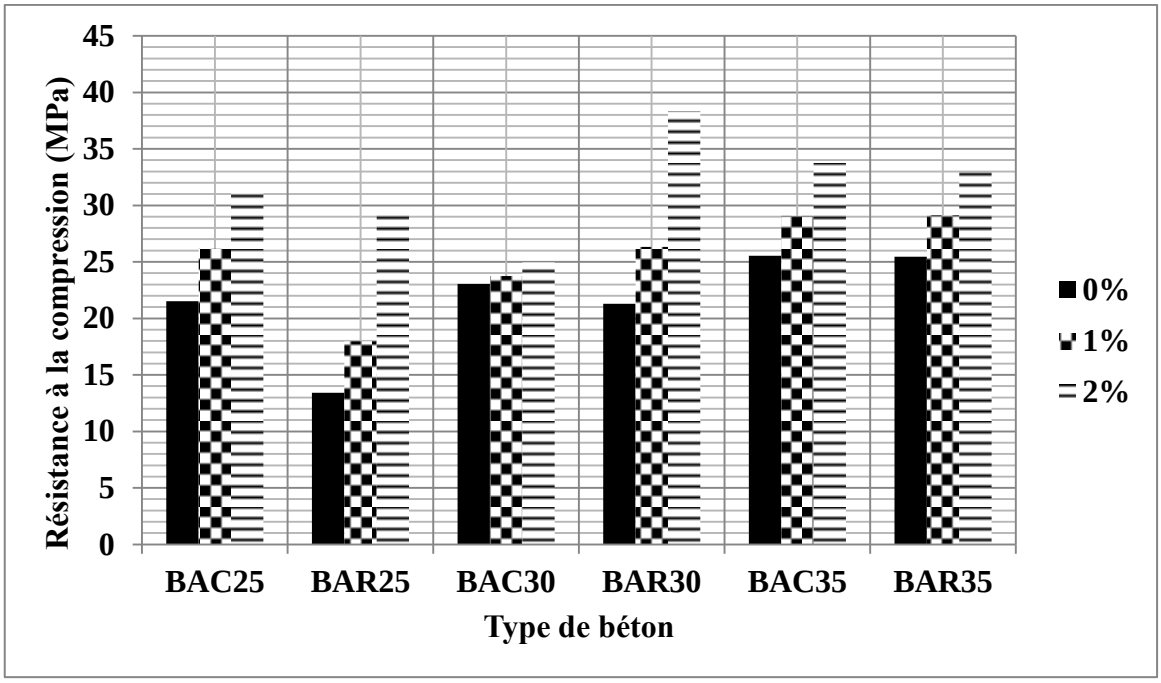


Figure V-7- résistance à la compression des bétons étudiés à 7 jours.

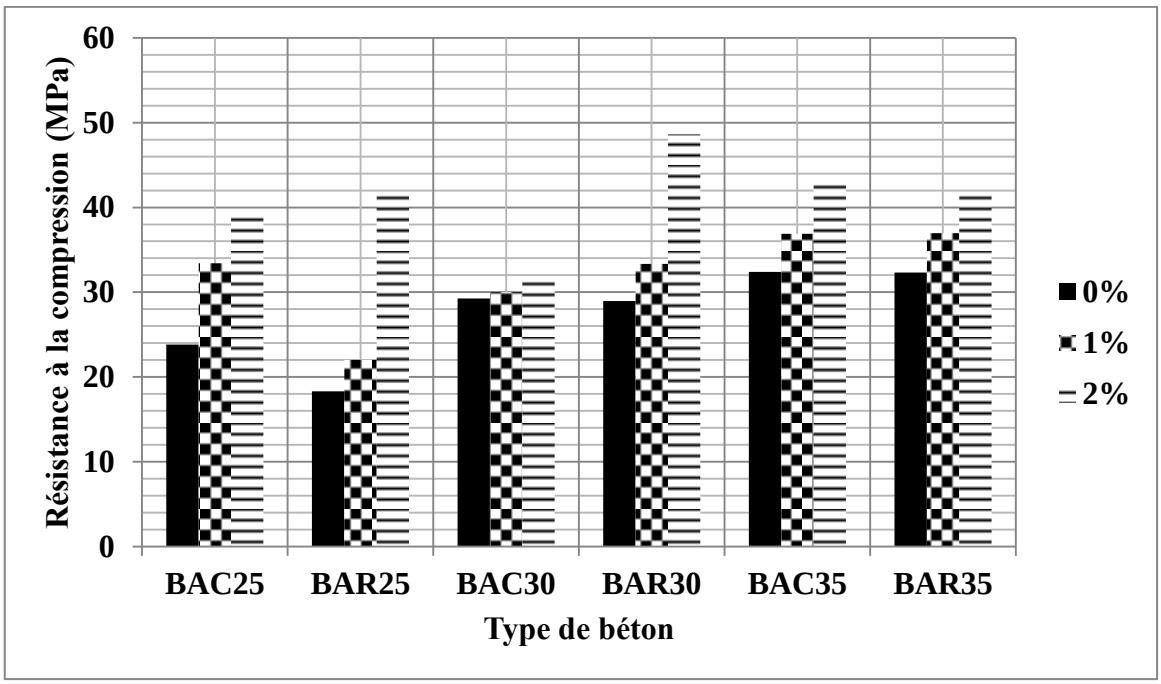


Figure V-8- résistance à la compression des bétons étudiés à 14 jours

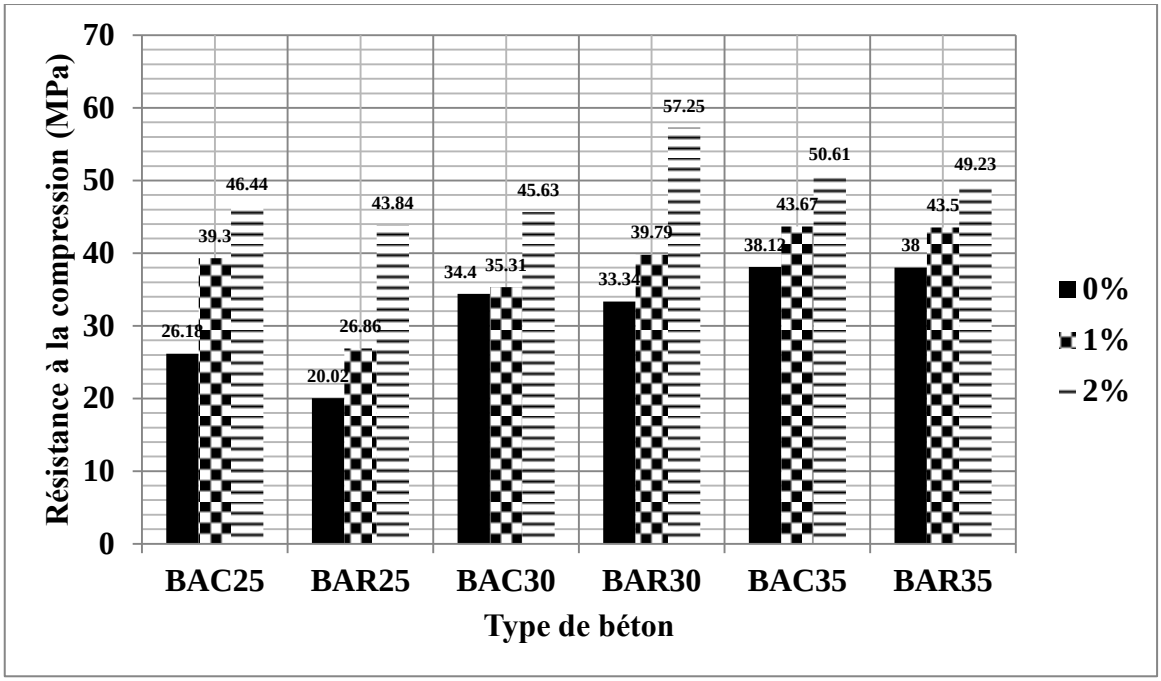


Figure V-9- résistance à la compression des bétons étudiés à 28 jours

Les **figures V.7, V.8 et V.9,** présentent les variations de la résistance à la compression (**Rc)** en fonction des différents types des bétons étudiés, on note que :

Le développement de la résistance à la compression (Rc) est normal en fonction des différents pourcentages d'adjuvant et l'âge de béton. Tous les mélanges des bétons recyclés **(BAR)** donnent de faible résistances mécaniques comparativement aux mélanges des bétons concassés **(BAC)** avec ou sans adjuvant. Généralement, les valeurs obtenues de la résistance à la compression (Rc) sont plus faible pour un béton recyclé (BAR) par rapport aux autres types des bétons concassé (BAC) testés, cependant pour les types des bétons recyclés adjuvanté la valeur maximale enregistrée est obtenue avec (BAR 30) à 2 % d'adjuvant (57.35 MPa) à 28 jours d'âge.

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, on note des résistances (Rc) presque similaires des bétons recyclés et concassés adjuvantés.

Pour la classe 35 MPa ; On a une diminution d'environ 0.32 % avec 0% adjuvant entre le béton recyclé et concassé.

Pour la classe **Rc**=30 MPa ; On a une diminution d'environ 3.17 % avec 0% adjuvant entre le béton recyclé et concassé.

Pour la classe **Rc**=25 MPa ; On a une diminution d'environ 23 % avec 0% adjuvant entre le béton recyclé et concassé.

V-4-2- Résistance à la traction par flexion :

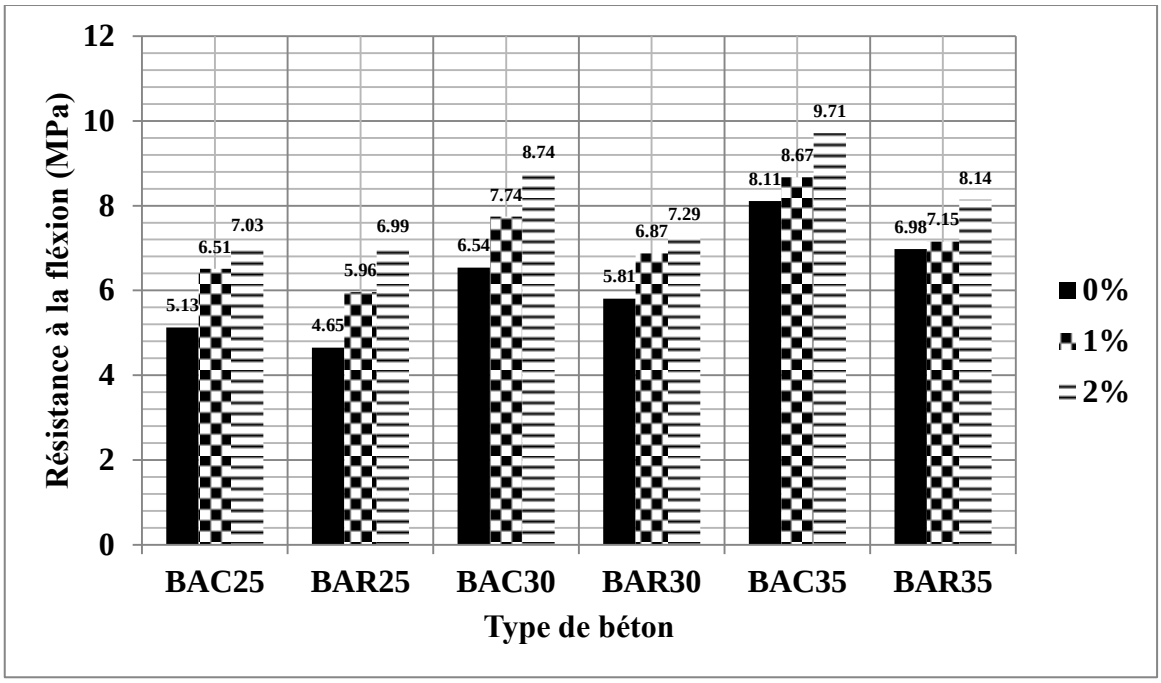


Figure V-10- La variation de la résistance à la traction par flexion (Rt) à 28 jours.

D'après la **figure V-10**, qui présente le développement de la résistance à la traction par flexion en fonction des différents pourcentages d'adjuvant à 28 jours on remarque que ; les différents bétons à base d'agrégats recyclés présentent une résistance à la traction par flexion faible diminution par rapport aux différents bétons à base d'agrégats concassés. aussi l'utilisation de d'adjuvant (SP 150) améliore la résistance de différents bétons étudiés

La résistance à la flexion du béton recyclé (BAR 35) avec 2 % de dosage d'adjuvant donne une augmentation de la résistance d'ordre 15 % par rapport au béton (BAR 35) avec 2 % adjuvant est environ 20 % par rapport au béton concassé (BAC) 35 MPa.

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

V-5- Etude de corrélation :

V-5-1- la corrélation (Rc) en fonction de (V) du béton recyclé :

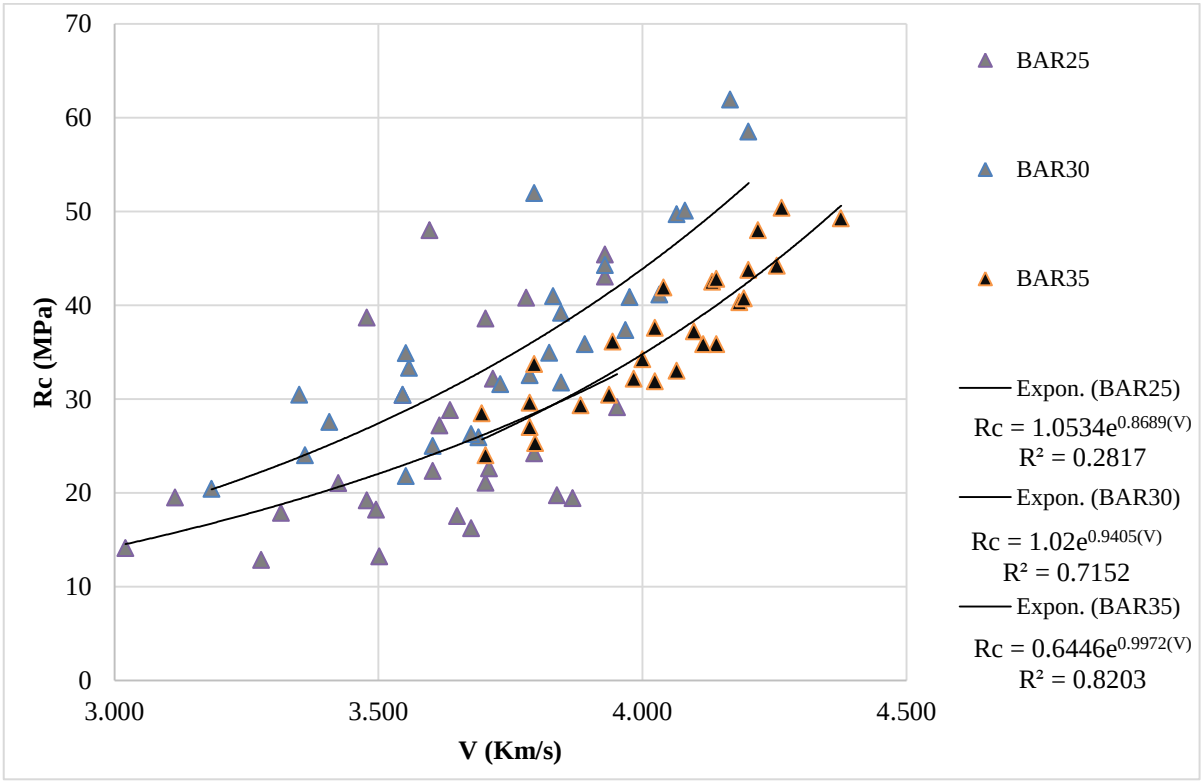


Figure V-11- Résistance à la compression (Rc) en fonction de la vitesse d'ultrason (V) des bétons recyclés (BAR).

On remarque d'après la **figure V-11**, une large dispersion pour le béton (BAR 25), ce qui est justifié par un faible coefficient de corrélation (R^2 =0.2817) et une dispersion acceptable pour les bétons (BAR 30 et 35) avec des coefficients de corrélation R^2=0.7152, R^2=0.8203 respectivement.

Les corrélations obtenues sont de type non linéaire (exponentielles).

Les formules obtenues prennent la forme :

(BAR 25): $Rc=1.0534\ e^{0.8699(v)}$ R^2=0.2817.

(BAR 30): $Rc=1.02\ e^{0.9405(v)}$ R^2=0.7152.

(BAR 35): $Rc=0.664\ e^{0.9972(v)}$ R^2=0.8202.

V-5-2- la corrélation (Rc) en fonction de (V) du béton concassé :

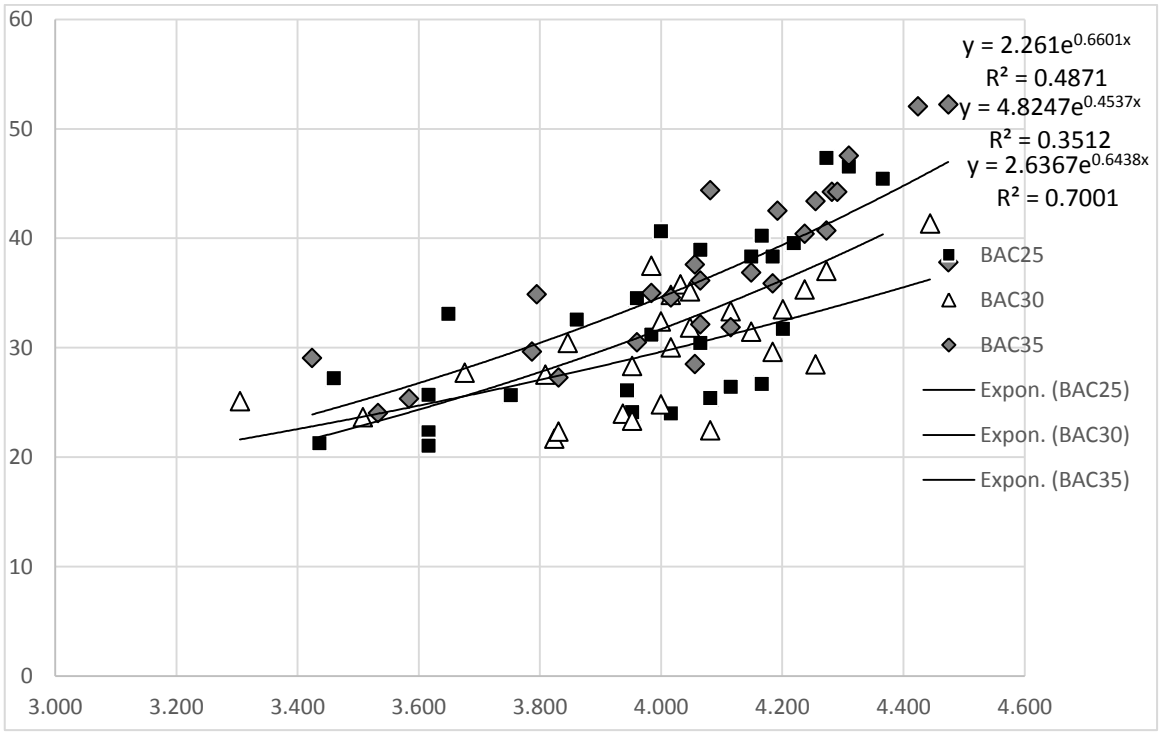


Figure V-12- La résistance à la compression en fonction de la vitesse d'ultrason des bétons concassé (BAC).

On remarque selon la **figure V-11**, une large dispersion pour les bétons (BAC 25) et (BAC 30) (R^2 =0.4871 et R^2=03511) respectivement une dispersion acceptable est constaté pour le béton (BAC 35) avec R^2=0.7001, ces résultats sont inferieur comparativement aux résultats constaté à partir des bétons à base d'agrégat recyclé.

Les corrélations obtenues sont similaire à ceux constaté dans les cas du béton recyclé.

Les formules sont les suivantes :

(BAC 25): $Rc=2.261 .e^{0.6601(v)}$ $R^2=0.4871$

(BAC 30): $Rc=2.6367 .e^{0.6438(v)}$ $R^2=0.3512$

(BAC 35): $Rc=2.8247 .e^{0.4537(v)}$ $R^2=0.7001$.

D'une façon général on remarque la vitesse du son est proportionnelle au dosage en super plastifiant et aussi la résistance mécanique.

V-5-3- la corrélation (Rc) en fonction de (Is) :

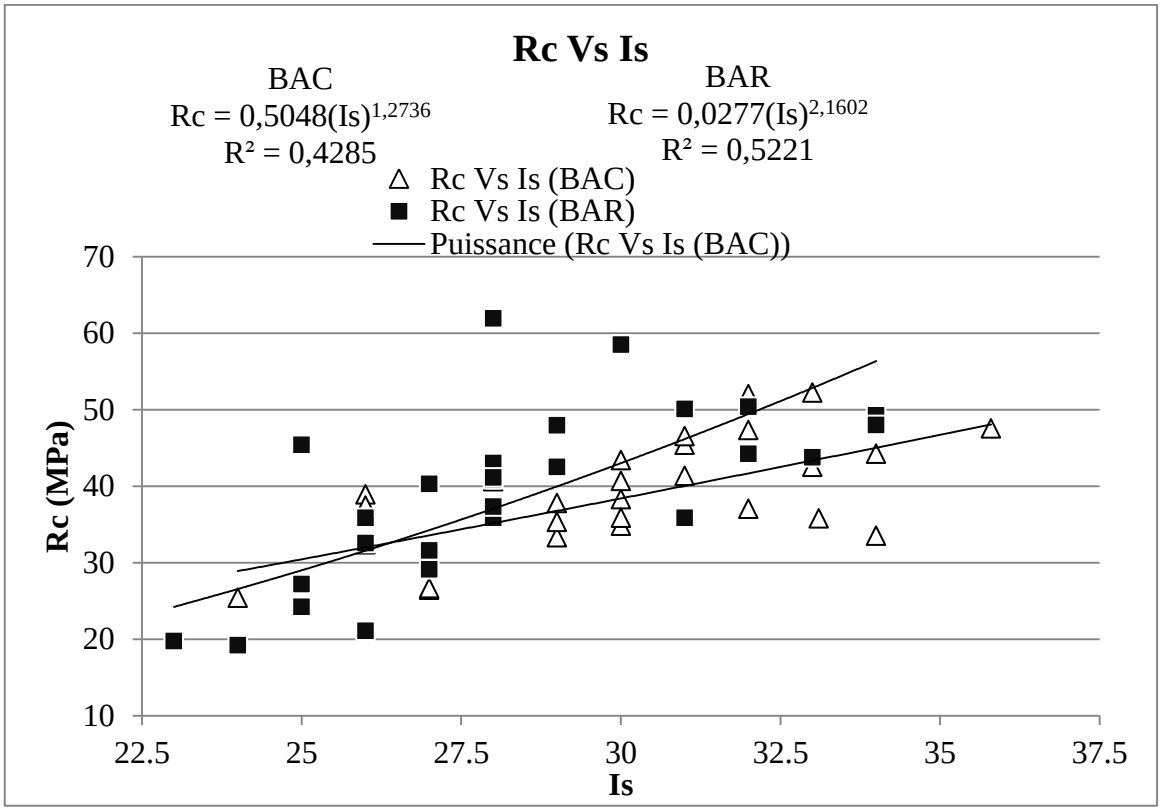


Figure V-13- Résistance à la compression (Rc) en fonction de l'indice sclérometique (Is) des bétons Recyclés et concassés.

D'après la **figure V-12**, on remarque des larges dispersions pour les deux types du béton Recyclés et concassés (BAC et BAR) en fonction de l'indice sclérometique, les coefficients de corrélation sont de l'ordre : R^2=0.5221, R^2=0.4285 pour le béton recyclé (BAR) et concassé (BAC), respectivement.

La corrélation constatée pour (BAR) est meilleure que celle obtenue pour le béton concassé (BAC).

Les deux corrélations constatées sont de type non linéaires sous la forme ;

(BAR) : $Rc=0.0277(Is)\ e^{2.1602}$ et $R^2=0.5221$

(BAC) : $Rc=0.0277(Is)\ e^{1.2736}$ et $R^2=0.4285$

Comparativement aux corrélations Rc= f(v) ont a constaté que dans les corrélations obtenues l'indice sclérometique suit un développement progressif par apport au dosage de super plastifiant et la classe du béton ; par conséquent, on trouve que la résistance est proportionnelle à l'indice sclérometique.

V-5-4- la corrélation (Rc) en fonction de (ρ) :

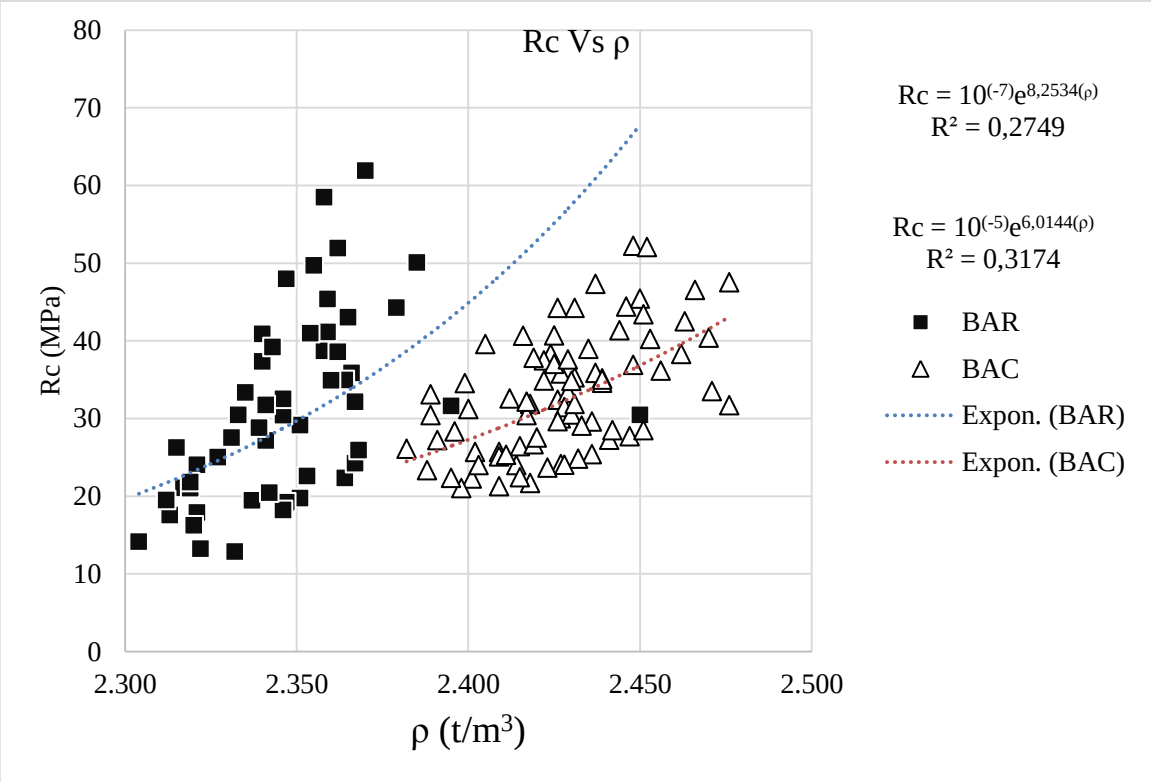


Figure V-14- La résistance à la compression (Rc) en fonction de la masse volumique des bétons (BAC) et (BAR)

D'après la **figure V-13**, on remarque que le type d'agrégat à une influence direct sur la densité du béton d'où on remarque sur la figure deux nuages de point

On constat des très faibles corrélations entre la résistance mécanique et la densité du béton d'où on a obtenu un coefficient de corrélation d'ordre R^2=0.2749 et 0.3174 pour les bétons (BAR) et (BAC) respectivement.

Les corrélations obtenues sont de type non-linéaire (exponentiel) sous la forme :

(BAC) : $Rc=10^{-5}.e^{6.0144\rho}$ et $R^2=0.3174$

(BAR) : $Rc=10^{-7}.e^{8.2534\rho}$ et $R^2=0.3174$.

V-5-5- la corrélation (Rc) en fonction de (Ed) :

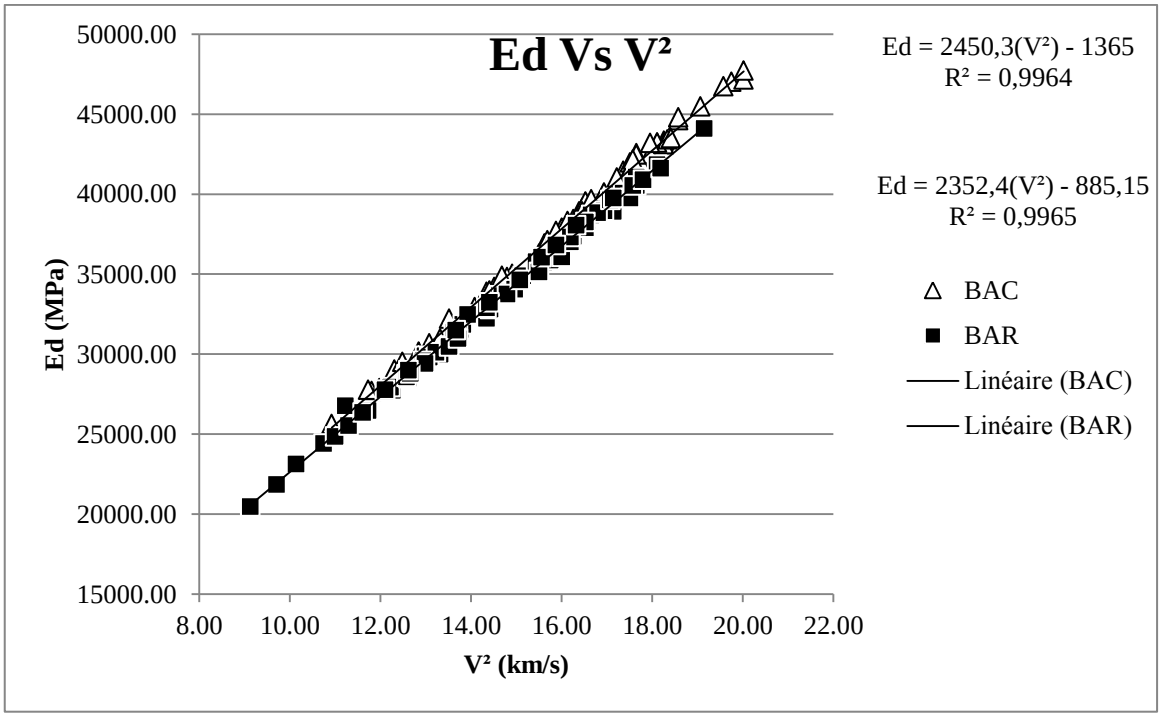


Figure V-15- Résistance à la compression en fonction de Module d'élasticité dynamique des bétons (BAC) et (BAR)

D'après la **figure V-14**, on constate une très bon corrélation entre le module dynamique et la vitesse d'ultrason ce qui justifier par le fort coefficient de corrélation qui sont proche de l'unité

Les corrélations obtenues sont de type linéaire.

Les formules obtenues sont les suivantes :

(BAC) : Ed=245,3*V2 -13 5 et R^2=0.9964

(BAR) : Ed=2352 ,4*V^2 -885.15 et R^2=0.9965

La corrélation obtenu pour le cas des bétons (BAC) est meilleur celle obtenues pour les bétons (BAR).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail on va résumer l'ensemble des conclusions et recommandations aux qu'elles on a abouti après l'interprétation des résultats obtenus des essais réalisés sur les différents bétons étudiés. Les objectifs de cette étude, faire une comparaison entre le béton recyclé (BAR) et le béton concassé (BAC) avec incorporation d'adjuvant, investiguer l'effet combiné sur les propriétés physico-mécaniques et vérifier la fiabilité des essais non destructifs (ultrason - scléromètre) par apport à l'essai direct d'écrasement. En finalité une corrélation entre les propriétés telle que la vitesse ultrason (V), l'indice sclérometique (Is), la masse volumique (ρ) et le module élastique dynamique (Ed) a été considérée.

A l'état frais :

* Une diminution de la masse volumique de béton recyclé à l'état frais est constatée par rapport au béton concassé, ceci est attribué principalement à la nature des agrégats recyclés avec une porosité élevée.

* La demande en eau de gâchage est presque similaire pour toutes les classes des bétons (recyclés et concassés).

* La diminution du rapport E/C est constatée avec l'augmentation des dosages d'adjuvants qui atteint 42 % pour BAR35 avec 2% d'adjuvant. C'est l'effet l'emploi de l'adjuvant qui joue le rôle de haut réducteur d'eau, améliore l'ouvrabilité et limite le besoin en eau de gâchage.

A l'état durci :

***** Un développement normal de la masse volumique des bétons testés à différents âges 7, 14 et 28 jours.

* On constate l'effet de l'emploi de l'adjuvant sur la masse volumique à l'état durci des bétons recyclés adjuvanté avec une amélioration de 2 %.

* Le taux d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage d'adjuvant. Le mélange de béton concassé BAC 30 avec 2 % d'adjuvant donne un taux d'absorption le plus faible de 60 % par rapport au béton recyclé de classe identique.

* Le développement de la résistance à la compression (Rc) est normal en fonction des différents pourcentages d'adjuvant et l'âge de béton 7, 14 et 28 jours.

* Tous les mélanges des bétons recyclés (BAR) donnent de faibles résistances mécaniques comparativement aux mélanges des bétons concassés (BAC) avec ou sans adjuvant.

* L'effet de l'emploi de l'adjuvant est remarquable sur le développement de la résistance (Rc), qui diminue le rapport E/C, favorise l'ouvrabilité et par conséquent augmente la résistance du béton qui sont presque similaires pour les bétons recyclés et concassés adjuvantés.

* La résistance à la flexion du béton recyclé (BAR 35) avec 2 % de dosage d'adjuvant donne une augmentation de la résistance d'ordre 15 % par rapport au béton (BAR 35) avec 2 % adjuvant est environ 20 % par rapport au béton concassé (BAC) 35 MPa.

* Les corrélations obtenues pour Rc en fonction de (V) sont acceptables et de type non linéaire (exponentielles).

* Une très bonne corrélation entre le module dynamique (E_d) et la vitesse d'ultrason (V); ce qui est justifié par les coefficients élevés de corrélation qui sont proches de l'unité

* Les résultats obtenus par les essais non destructif de scléromètre et l'ultrason restent approximatifs par rapport à ceux des essais d'écrasement dans le cas de la détermination de la réponse mécanique des bétons recyclés (BAR) et concassés (BAC) ou des coefficients de correction sont nécessaires afin d'aboutir à une bonne évaluation de la résistance.

* L'analyse de ce travail a prouvé que les paramètres qui influencent de manière significative la résistance du béton peuvent influencer les résultats d'essai non destructifs de la même manière.

Recommandations et perspectives :

Sur la base des résultats obtenus et conclusions tirées de cette étude; nous recommandons pour des futurs travaux de recherche futurs :

- Durabilité du béton à base des agrégats recyclés avec et sans adjuvants.
- Etude aux moyens non destructifs un béton recyclé avec ajouts minéraux.
- Influence de la granularité continue et discontinue sur les propriétés physiques et mécanique d'un béton recyclé.

Références bibliographiques

[1]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.

[2]G. Maucuit-Lecomte, CIMBÉTON : Fiches techniques Tome 2 : « Les bétons, composition, fabrication et mise en œuvre »,2005.

[3]DREUX.G ET FESTA.J: « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles**,** 1998.

[4] MESSOUDENE. B : Cours « durabilité du béton », 2013 à l'Université El Bachir Ibrahimi.

[5] V. MICHEL ‹‹ La pratique des ciments et des bétons ›› Editions Moniteur, Paris1976, PP

: 3-154.

[6] Y. BILLARD «Etudes expérimentales de béton : Etude de perméabilité » DEA, INSA, Lyon, France 1997.

[7] R. BARON, GAGNE ET J. P. OLIVIER «Viser la durabilité » Le béton bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, N: 2434875 Dépôt légal Janvier 1997 Paris, 2eme tirage, N: d'éditeur : 5820, Page : 309.

[8] J. MARGATE «perméabilité, perméable» Article Janvier 1999 PP : 1 – 25.

[9] Jean Michel TORRENTI: « Du béton frais au béton durci », sino dato, Eléments de comportement par Directeur scientifique de l'Ecole française du béton (EFB).

[10]MAAFI.N, ZEMMIT.A « l'effet des différents types d'agrégats sur le comportement mécanique d'un béton », Projet de fin d'étude de Master 2, 2013 à l'Université Mohamed Elbachir Elibrahimi.

[11]GRONDIN Aurélie « valorisation des granulats recycles de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des Bétons de granulats recycles de béton » Mémoire Projet de fin d'étude, 2011 à Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg.

[12]Oikonomou N.D. «Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 27 (2), pp. 315-318, 2005.

[13]Katz A., «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and concrete research», 33 (5), pp. 703-711, 2003.

[14]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.

[15]Evangelista L., De Brito J: «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 2010, 32, 9-14.

[16]Rasheeduzzafar, **Khan A**. «Recycled concrete – a source of new aggregate. Cement, Concrete and Agrégeâtes» (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.

[17]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.

[18]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.

[19]Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.

[20]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.

[21]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.

[**22]Levy Salomon M, Paulo Helene** « Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development». Cem Concr Res 2004; 34(11):175-80.

[23]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.

[**24]Khalaf FM, DeVenny AlanS**. « Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review». ASCE J Mater Civil Eng 2004:331-40.

[25] TOUKAL Abd Ennour, **2010** « influence du taux de chargement sur la caractérisation non destructif du béton par ultrason » Mémoire de Master, Université de M'hamed BOUGARA de BOUMERDACE.

[26] C.N.E.R.I.B,2004« Cycle de formation 2004 ».

[27] BENCHERAI Said,**2007** « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables »Mémoire de Master, Université Abd Errahmane MIRA de Béjaia.

[28] CHEKROUNMathieu, 2008«Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface»Thèse de Doctorat,École Centrale de Nantes.

[29] BREYSSE.D et ABRAHAM.O, 2005 « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons ». Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[30] J.S. Popovics, *sino dato* « Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves» Thèse de Doctorat, *sino loco*.

[31] «Auscultation sonique: Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton»P18-418, 1989.

[32] CHERAIT Yacine et ZAHREDINNE Nafa, 2007« élémentsde matériauxde construction et essais » Direction de la publication universitaire de Guelma, p273-279.

[33] BOUDINA Ridha et LOURADI AbdElouahab, 2012 « Proposition d'un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales. »Mémoire de Master,Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj.

[34] F.Gabrysak, *sino dato* « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.

[35] « Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre », P18 417, 1989.

[36] BELARIBI.W, 2007 « Evaluation de la qualité du béton de fibre par les essais non destructifs (méthode combinée ultrasons et scléromètre) » Thèse de Magistère, Biskra.

[37]JEAN FESTA – GEARGES DREUX, 2007: « Nouveau guide des bétons », livre, Huitième édition 1998, Troisième tirage.

[38] DEGHFEL MOUSSA, 2010« Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton »,Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.

[39] T. H. Panzera et al, 2011« Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. » Department of Mechanical Engineering, Federal University of São JoãodelRei - UFSJ, PraçaFrei Orlando, 170 São João Del Rei – MG.