

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Mohamed Boudiaf - M'SILA
Faculté de Technologie
Département de Génie-Civil**



THESE

Présentée en vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences
(Spécialité : Génie-Civil – Option : Matériaux)

Présentée par :
ZITOUNI Salim

THEME

**Effet de la granulométrie (grosseur et fraction granulaire) des
granulats concassés sur les caractéristiques du béton**

Soutenue Publiquement le 24/11/2016

Devant le jury :

KHEMISSA Mohamed : Professeur / Université de M'sila / Président de jury

NACERI Abdelghani : Professeur / Université de M'sila / Rapporteur

BENOUIS Abdelhalim : Professeur / Université de Guelma / Examineur

BOUDAUD Zine-Eddine : Professeur / Université d'Oum-El-Bouaghi / Examineur

RAHMOUNI Zine-El-Abidine : Professeur / Université de M'sila / Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail de thèse.

En second lieu, je tiens à remercier Monsieur NACERI Abdelghani, Professeur à l'université de M'sila pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur KHEMISSA Mohamed, Professeur à l'université de M'sila, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs : RAHMOUNI Zine-El-Abidine, Professeur à l'université de M'sila, BENOUIS Abdelhalim Professeur à l'université de Guelma et BOUDAUD Zine-Eddine Professeur à l'université d'Oum-El-Bouaghi, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et de participer à mon jury de soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous le personnel des laboratoires de la Cimenterie "LAFARGE" de Hammam Dalâa .

"Effet de la granulométrie (grosseur et fraction granulaire) des granulats concassés sur les caractéristiques du béton"

RESUME :

Aujourd'hui le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Il est bien connu que formuler un béton est avant tout un problème de compacité. Les granulats constituent le squelette granulaire et garantissent la résistance mécanique du béton. Les deux types de gros granulats utilisés présentent une morphologie différente en termes d'aspect de surface (rugueuse et lisse), de forme (anguleuse et arrondie) et de taille (grosseur). Les granulats représentent 60 à 80 % du volume total du béton. La compacité maximale (porosité minimale) du squelette granulaire joue donc un rôle « clé » sur les propriétés du béton, à l'état frais notamment sur l'ouvrabilité comme à l'état durci particulièrement sur les résistances mécaniques.

L'objectif de cette étude est de formuler et caractériser des bétons confectionnés à partir d'un mélange de différentes fractions granulaires de gros granulats naturels (concassés et roulés) de façon à minimiser la porosité. Pour cela, deux types de granulats ont été utilisés : granulats concassés de fractions granulaires 3/8, 8/16 et 16/25 mm et granulats roulés de fraction granulaire 3/8, 8/16 et 16/25 mm.

Deux séries d'essais ont été choisis et préparés pour mesurer la compacité des différents mélanges à base de granulats concassés. Le premier type des essais préliminaires (Série A) a été réalisé en préparant 09 combinaisons pour le mélange granulaire binaire de fraction 3/8 et 8/16 mm et 36 combinaisons pour le mélange granulaire ternaire de fraction 3/8, 8/16 et 16/25 mm en vue de déterminer l'optimum des mélanges granulaires binaire et ternaire de gros granulats concassés qui offrent les plus grandes compacités (faibles porosités). Les deux mélanges granulaires optimaux obtenus durant la première phase des essais préliminaires se composent de 40% de fraction (3/8 mm) et 60 % de fraction (8/16 mm) pour le mélange granulaire binaire et de 20% de fraction (3/8 mm), 40% de fraction (8/16 mm) et 40% de fraction (16/25 mm) pour le mélange granulaire ternaire. Ces deux mélanges optimaux de gros granulats concassés ont donné une porosité minimale et une compacité maximale.

Le deuxième type des essais principaux (Série B) a été préparé en mélangeant des gros granulats concassés et roulés de différentes fractions granulaires (3/8, 8/16 et 16/25 mm) pour les mélanges granulaires mixtes de fraction binaire et ternaire. Le mélange granulaire mixte pour le mélange binaire a été préparé avec deux fractions (3/8 et 8/16 mm) de gros granulats concassés et une seule fraction de 3/8 mm de gros granulats roulés. Ce mélange granulaire mixte de fraction binaire consiste à substituer les gros granulats concassés de fraction (3/8 mm) par les gros granulats roulés de fraction (3/8 mm) à différents pourcentages (0%, 8%, 16%, 20%, 24% et 40%) en fixant constant le pourcentage de la fraction granulaire 8/16 mm pour les gros granulats concassés à 60% pour tous les mélanges granulaires mixtes (mélanges binaires) préparés. Un autre mélange granulaire mixte de fraction ternaire (05 combinaisons) a été préparé avec trois fractions granulaires (3/8, 8/16 et 16/25 mm) pour les deux gros granulats concassés et roulés utilisés.

Cette étude expérimentale nous a permis de montrer l'influence des caractéristiques physico-chimiques des gros agrégats naturels sur le comportement mécanique du béton. La substitution de la fraction granulaire des gros granulats concassés par la fraction granulaire de gros granulats roulés 3/8 mm pour le mélange binaire et 3/8, 8/16 mm pour le mélange ternaire permet d'améliorer nettement les caractéristiques physique (réduction d'eau de gâchage et du rapport E/C) et mécanique (réponse mécanique) du béton préparé. L'incorporation de 1,5% d'adjuvant chimique (Medaflo 30) améliore nettement l'ouvrabilité du béton frais et la résistance mécanique du béton à l'état durci pour les deux mélanges granulaires mixtes de fraction binaire et ternaire testés.

Mots clés : Granulométrie, grosseur, fraction granulaire, granulats concassés et roulés, caractéristiques du béton.

"Effect of the granulometry (size and granular fraction) of crushed aggregates on the characteristics of concrete"

ABSTRACT :

Today the concrete is the building material more used in the world. It is well-known that to formulate a concrete is above all a problem of compactness. The aggregates constitute the granular skeleton and guarantee the mechanical strength of the concrete. The two types of coarse aggregates used have a morphology different in terms from aspect of surface texture (rough and smooth), of shape (angular and rounded) and of size. The aggregates account for 60 to 80 % of the total volume of the concrete. The maximum compactness (minimal porosity) of the granular skeleton thus exploits a role "key" the properties of the concrete, at the fresh state in particular on workability as in a state hardened particularly on the mechanical strengths.

The objective of this study is to formulate and characterize concretes made starting from a mixture of different granular fractions of natural coarse aggregates (crushed and rolled) in order to minimize porosity. For that, two types of aggregates were used: crushed coarse aggregates of granular fractions 3/8, 8/16 and 16/25 mm and rolled coarse aggregates of granular fraction 3/8, 8/16 and 16/25 mm.

Two series of tests were chosen and prepared to measure the compactness of various mixtures made with crushed aggregates. The first type of the preliminary tests (Series A) was carried out by preparing 09 combinations for the binary granular mixture of fraction 3/8 and 8/16 mm and 36 combinations for the ternary granular mixture of fraction 3/8, 8/16 and 16/25 mm in order to determine the optimum of the granular mixtures binary and ternary of coarse crushed aggregates which offer high compactnesses (low porosities). The two optimal granular mixtures obtained during the first phase of the preliminary tests are composed of 40% of fraction (3/8 mm) and 60 % of fraction (8/16 mm) for the binary granular mixture and of 20% from fraction (3/8 mm), 40% of fraction (8/16 mm) and 40% of fraction (16/25 mm) for the ternary granular mixture. These two optimal mixtures of coarse crushed aggregates gave a minimal porosity and a maximum compactness.

The second type of the principal tests (Series B) was prepared by mixing coarse crushed and rolled aggregates of various granular fractions (3/8, 8/16 and 16/25 mm) for the mixed granular mixtures of binary and ternary fraction. The mixed granular mixture for the binary mixture was prepared with two fractions (3/8 and 8/16 mm) of crushed coarse aggregates and only one fraction of 3/8 mm of rolled coarse aggregates. This mixed granular mixture of binary fraction consists with substituted the crushed coarse aggregates of fraction (3/8 mm) by the rolled coarse aggregates of fraction (3/8 mm) for various percentages (0%, 8%, 16%, 20%, 24% and 40%) by fixing constant the percentage of the granular fraction 8/16 mm for the crushed coarse aggregates at 60% for all the mixed granular mixtures (binary mixtures) prepared. Another mixed granular mixture of ternary fraction (05 combinations) was prepared with three granular fractions (3/8, 8/16 and 16/25 mm) for the two coarse crushed and rolled aggregates used.

This experimental study enabled us to show the influence of the physic-chemical characteristics of the natural coarse aggregates on the mechanical behavior of the concrete. The substitution of the granular fraction of the crushed coarse aggregates by the granular fraction of the rolled coarse aggregates 3/8 mm for the binary mixture and 3/8, 8/16 mm for the ternary mixture makes it possible to clearly improve the physical characteristics (reduction of water mixing and ratio E/C) and mechanical (mechanical response) of the manufactured concrete. The incorporation of chemical admixture (1,5% of superplasticizer or water reducing admixture Medaflow 30) clearly improves the workability of the freshly-mixed concrete and the mechanical strength of the concrete at the state hardened for the two mixed granular mixtures of binary and ternary granular fraction tested.

Key-words : Granulometry, size, granular fraction, crushed and rolled aggregates and properties of concrete.

تأثير التدرج الحبيبي للركام المكسر (المقاس و الجزء الحبيبي) على الخصائص الميكانيكية للخرسانة

ملخص:

تعتبر الخرسانة في الوقت الحالي من مواد البناء الأكثر استخداما في دول العالم. و من المعروف أن تحديد نسب المكونات الأساسية في الخلطة الخرسانية يتركز أساسا على مشكلة الإكتناز للخرسانة. يشكل الركام الهيكل الحبيبي بضمائه المقاومة الميكانيكية للخرسانة. كلا النوعين من الركام الخشن و الكبير المستخدمة لها تشكلات مختلفة من حيث المظهر السطحي لحبيبات الركام (سطح خشن و أملس) ، و الشكل (زاوي و مستدير) و مقاس أو حجم الحبيبات. إن لنوعية و خواص الركام تأثيرا كبيرا على خواص الخرسانة ونوعيتها لكونه يشغل حوالي 60 إلى 80% من الحجم الكلي للكتلة الخرسانية. إن الحد الأقصى للإكتناز (الحد الأدنى للمسامية) للهيكل الحبيبي للركام يلعب دورا "مفتاح" هاما على خواص الخرسانة في الحالة السائلة (قابلية التشغيل) و الصلبة (المقاومة الميكانيكية).

الهدف من هذه الدراسة هو صياغة و اختبار الخرسانة المحضرة من خليط من مختلف أجزاء الحبيبات للركام الطبيعي الكبير أو الخشن (الركام المكسر و المدور) من أجل تقليل المسامية. و لهذا، تم استخدام نوعين من الركام الخشن أو الكبير : الركام الخشن المكسر المتكون من الأجزاء الحبيبية 8/3 ملم و 16/8 ملم و 25/16 ملم و كذلك الركام الخشن المدور المتكون من الأجزاء الحبيبية 8/3 ملم و 16/8 ملم و 25/16 ملم. لقد تم اختيار سلسلتين من الاختبارات و ذلك لقياس الاكتناز لجميع الخلطات المحضرة من الركام الخشن المكسر. لقد أجريت الاختبارات الأولية (السلسلة أ) من خلال تحضير 09 مجموعات للخليط الحبيبي الثنائي المتكون من الأجزاء الحبيبية 8/3 ملم و 16/8 ملم و 25/16 ملم و تحضير 36 مجموعة للخليط الحبيبي الثلاثي المتكون من الأجزاء الحبيبية 8/3 ملم و 16/8 ملم و 25/16 ملم من أجل التحديد الأمثل للخلطات الحبيبية الثنائية والثلاثية المحضرة من الركام الخشن المكسر التي تعطي اكتناز عالي (مسامية منخفضة).

إن الخلطتين (المزيجين) المثالين للحبيبات التي تم الحصول عليهما خلال المرحلة الأولى من الاختبارات الأولية تتكون من 40% من الجزء الحبيبي (8/3 ملم) و 60% من الجزء الحبيبي (16/8 ملم) بالنسبة للخليط الحبيبي الثنائي و 20% من الجزء الحبيبي (3 / 8 ملم)، و 40% من الجزء الحبيبي (16/8 ملم) و 40% من الجزء الحبيبي (25/16 ملم) بالنسبة للخليط الحبيبي الثلاثي. كلا المزيجين أو الخلطتين المثلى المحضرة من الركام الخشن المكسر أعطت مسامية أدنى و اكتناز أقصى.

لقد تم تحضير نوع ثاني من الاختبارات الرئيسية (السلسلة ب) عن طريق عملية الخلط بين الركام الخشن المكسر و المدور المتكونة من مختلف الأجزاء الحبيبية (8/3 ملم، 16/8 ملم و 25/16 ملم) للخليط الحبيبي المزدوج الثنائي و الثلاثي. يتكون الخليط الحبيبي المزدوج للمزيج الحبيبي الثنائي من الأجزاء الحبيبية (8/3 ملم و 16/8 ملم) من الركام الخشن المكسر و جزء حبيبي واحد (8/3 ملم) من الركام الخشن المدور. لقد تم استبدال الجزء الحبيبي (8/3 ملم) للركام الخشن المكسر بالجزء الحبيبي (8/3 ملم) للركام الخشن المدور بنسب مختلفة (0%، 8%، 16%، 20%، 24% و 40%) للخلطة الحبيبية المزدوجة من الأجزاء الثنائية مع تحديد نسبة ثابتة (60%) من حبيبات الجزء 16/8 ملم للركام الخشن المكسر و ذلك لجميع الخلطات الحبيبية المختلطة (المزيج الثنائي) المحضرة.

لقد تم تحضير كذلك خليط أو مزيج حبيبي مزدوج آخر (05 مجموعات) المتكون من الجزء الحبيبي الثلاثي (8/3 ملم ، 16/8 ملم و 25/16 ملم) من الركام الخشن المكسر و المدور المستعمل خلال هذه الدراسة التجريبية.

لقد مكنتنا هذه الدراسة التجريبية من إظهار تأثير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للركام الطبيعي الخشن أو الكبير على السلوك الميكانيكي للخرسانة.

إن عملية استبدال الجزء الحبيبي للركام الخشن المكسر بجزء آخر من الركام الخشن المدور 8/3 ملم للخليط الثنائي و 8/3 ملم و 16/8 ملم للخليط الثلاثي تحسن بشكل كبير الخصائص الفيزيائية (تقليل من كمية ماء الخلط و ونسبة الماء/الإسمنت) وكذلك المقاومة الميكانيكية (السلوك الميكانيكي) للخرسانة المحضرة. إن إضافة المدن الكيميائي الفائق (Medaflo 30) بنسبة 1.5% من وزن الإسمنت يحسن بشكل واضح قابلية التشغيل للخرسانة الطازجة و كذلك المقاومة الميكانيكية للخرسانة في الحالة المتصلبة للخلطات الحبيبية المزدوجة المختبرة للخليط الثنائي و الثلاثي للأجزاء الحبيبية.

مفتاح: التدرج الحبيبي ، المقاس الحبيبي ، الجزء الحبيبي ، الركام المكسر و المدور ، خصائص الخرسانة.

Sommaire

	N° page
Introduction Générale	1
CHAPITRE I. Revue générale et Etat de connaissances	4
Introduction	4
Partie. A : Granulats	4
1.1 Définition des granulats	4
1.2 Les différents types de granulats	5
- Les granulats naturels.	5
- Les Granulats Alluvionnaires	6
- Les Granulats de Carrières	8
- Les granulats artificiels.....	8
- Les granulats recyclés.....	8
1.3 Caractéristiques des granulats	9
1.3.1 Caractéristiques de fabrication.....	9
- <i>Classifications des granulats</i>	10
- <i>L'influence de la granularité du gravier (composition granulométrique)</i>	11
1.3.2 Les caractéristiques géométriques des granulats	17
- <i>L'influence de la grosseur maximale du gravier</i>	17
- <i>L'influence de la forme des grains du gravier</i>	19
- <i>Le coefficient volumétrique</i>	20
- <i>Le coefficient d'aplatissement "A"</i>	23
- <i>Angularité</i>	23

1.3.3 Caractéristiques pétrographique	23
- <i>L'influence de la nature du gravier</i>	23
1.3.4 Caractéristiques mécaniques	25
- <i>Essai Los Angeles (LA)</i>	26
- <i>La fragmentation dynamique (FD)</i>	26
- <i>Résistance à l'attrition et à l'usure "essai micro-dévale humide"</i>	24
1.3.5. Caractéristiques physiques.....	28
- <i>Influence de la porosité (P)</i>	28
- <i>Masses volumiques des granulats</i>	29
- <i>L'absorption de l'eau du gravier</i>	29
- <i>L'influence de l'impureté du gravier</i>	31
1.3.6 Caractéristiques Chimiques.....	33
- <i>L'altérabilité du gravier et la réaction alcalis – granulats</i>	33
- <i>La teneur en chlorures</i>	34
- <i>La teneur en sulfate</i>	34
1.4 Influence de la Compacité et homogénéité des mélanges granulaires	35
- <i>Données de Joisel</i>	36
1.5 Choix des graviers	37
PARTIE. B. BETON	37
1.6 Propriétés du béton	37
1.7 Composition du béton	39
1.7.1 Méthodes de formulation des bétons sans additions	39
<i>a/ Méthodes de Dreux- Gorisse</i>	41
<i>b/ Méthode des volumes absolus</i>	45
1.7.2 Formulation des bétons avec additions	47
1.7.2.1	
<i>Normalisation</i>	47

1.7.2.2 <i>Les études récentes sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons</i>	49
1.8 Adjuvants, plastifiants, réducteurs d'eau	50
1.8.1 Définition	50
1.8.2 Description	50
1.8.3 Mécanismes d'action	51
1.8.4 Influence du dosage en plastifiant	52
1.9. Adjuvants superplastifiants haut réducteurs d'eau	54
1.9.1 Définition	54
1.9.2 Description	54
1.9.3 mécanismes d'action	56
1.9.4 Influence du dosage en superplastifiant	57
1.10 Notions sur le béton	63
1.10.1 La résistance du béton	63
1.10.2 La déformation des bétons	64
1.10.3 Le retrait	64
1.10.4 La dilatation	65
1.10.5 Le fluage	65
1.10.6 L'élasticité du béton	66
1.10.7 Effet «Poisson»	67
1.10.8 Mécanisme de la fissuration	67
1.10.9 Condition de fissuration d'un béton	67
1.11 Les propriétés essentielles des bétons	68
1.11.1 Les propriétés rhéologiques	68
- <i>Influence des granulats sur la maniabilité</i>	68
1.11.2 Les propriétés physiques	69
- <i>Influence de l'interface pate de ciment- granulat</i>	69

- Influence de la forme et la texture de surface des granulats	69
- Influence de la forme et la texture sur la liaison pate-granulat	70
- Perméabilité, porosité et absorption d'eau	71
- Retrait et fluage	73
1.11.3 Les propriétés mécaniques	74
- Relation entre la résistance a la compression a celle de traction	74
1.11.4 Influence des différents paramètres sur la qualité d'un béton	74
- Influence de la quantité de liant sur la résistance	74
- Influence du rapport G/C sur la résistance	75
- Influence des granulats sur le rapport E/C	75
- Influence de l'origine et résistance des granulats	76
- Influence de l'interaction des granulats avec la matrice cimentaire	76
- Influence de la maniabilité et mûrissement des bétons	77
CHAPITRE II. Caractérisation des matériaux utilisés	78
II.1. Introduction	78
II.2. Caractéristiques des matériaux	79
II.2.1. Sable alluvionnaire de « oued m'aiter »	79
- Caractéristiques physiques du sable de oued M'aiter	80
- Caractéristiques chimiques du sable alluvionnaire de oued M'aiter	85
II.2.2. graviers	86
II.2.2.1. Graviers concassés « Cosider »	87
- Caractéristiques physiques du gravier concassé « Cosider »	88
- Caractéristiques mécaniques du gravier concassé « Cosider »	90
- Caractéristiques chimiques du gravier concassé « Cosider »	90

- II.2.2.2.Graviers roulés « oued M'aïter »	94
- Caractéristiques physiques du gravier roulé « oued M'aïter »	95
- Caractéristiques mécaniques du gravier roulé « oued M'aïter »	97
- Caractéristiques chimiques du gravier roulé « oued M'aïter »	97
II.2.3 Le ciment CPJ utilisé	101
- Les caractéristiques chimiques du ciment CPJ utilisé	102
- Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ utilisé	103
II.2.4 Eau de gâchage	103
- Caractéristique chimique de l'eau utilisée	103
II.2.5 Adjuvant	104
CHAPITRE III : Essais sur la compacité des mélanges binaire et ternaire.	105
Introduction	105
III.1. : Mélange binaire (fractions 3/8 et 8/15)	105
- Mesure de la masse volumique et de la porosité des mélanges de fractions de graviers.	105
- Analyse granulométrique des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16	107
- Analyse granulométrique des mélanges de graviers roulé et concassé	109
III.2: Mélange ternaire (fractions 3/8, 8/16 et 16/25)	111
- Mesure de la masse volumique apparente, et calcul de la porosité	112
- Classification des mélanges d'après leurs masses volumiques apparentes	113
- Classification des mélanges d'après leurs porosités	114
- Mélange optimale des fractions du gravier	115
- Analyse granulométrique du mélange optimum	116
- Composition des mélanges optimaux de gravier roulé et gravier concasse.....	117
- Masse volumique et calcul de la porosité des mélanges de graviers.....	118

CHAPITRE IV : Essais sur béton frais et durcis avec mélanges de graviers	
binaires et ternaires.....	119
IV.1 Mélange Binaire	119
- <i>Mélanges optimums des graviers</i>	119
- <i>Calcul des proportions des constituants</i>	119
IV.1.1 Résultats des essaie sur béton frais	120
A/ Bétons sans adjuvants	120
- <i>Masse volumique du béton frais</i>	120
- <i>Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges</i>	121
B/ Bétons avec adjuvants	123
- <i>Masse volumique du béton frais avec adjuvants</i>	123
IV.1.2 Résultats des essaie sur béton durci	125
- <i>Mesure de la masse volumique du béton durci sans adjuvant</i>	126
- <i>Mesure de la masse volumique du béton durci avec adjuvant</i>	127
- <i>Essai de résistance mécanique à la compression</i>	130
- <i>Résistance mécanique à la compression en fonction du pourcentage de gravier roulé</i>	130
- <i>Résistance mécanique à la compression en fonction du temps</i>	131
- <i>Resistance à la compression en fonction de la porosité</i>	133
- <i>Coefficient d'amélioration de la résistance</i>	136
IV.1.3 Conclusions	137
IV.2. Mélange Ternaire	138
- <i>Mélanges optimums des graviers</i>	138
- <i>Calcul des proportions des constituants</i>	139
IV.2.1 Résultats des essaie sur béton frais	141
- <i>Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges</i>	142
- <i>Masse volumique du béton frais avec adjuvant</i>	143

-Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant	144
IV.2. 2 Résultats des essais sur béton durci	145
- Mesure de la masse volumique du béton durcis sans adjuvant	145
- Mesure de la masse volumique du béton durcis avec adjuvant	146
- Essais de résistance mécanique à la compression des bétons	148
- Résistance mécanique à la compression des mélanges de bétons en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué	151
- Coefficient d'amélioration de la résistance	152
- Résistance à la compression en fonction de la porosité	154
Conclusion générale	157
- Recommandations et perspectives	160
Bibliographie	161
Annexe 1	171
Annexe 2	174

LISTE DES FIGURES

Figure N° :	Titre	Page
CHAPITRE I :		
Figure I.1:	Photos des différents types de granulat.....	6
Figure I.2 :	Présentation du VDG40.	10
Figure I.3 :	Exemples de courbes granulaires des granulats pour béton.	11
Figure I.4 :	Fuseau de spécification pour la composition granulométrique du gravier.	12
Figure I.5 :	La forme des grains du gravier.	17
Figure I.6 :	Sphère contournant un gravier.	18
Figure I.7 :	Perméabilité élevée (Interconnexion des pores capillaires).	26
Figure I.8 :	Faible Perméabilité, (photos NEVIL) (Pores capillaires segmentés et partiellement connectés)	27
Figure I.9 :	Courbe délimitant la réactivité et non-réactivité des granulats	31
Figure I.10 :	Dosage en ciment ; méthode de Dreux – Goris.....	40
Figure I.11 :	Floc de ciment en l’absence de réducteur d’eau selon Rixom et Mailvaganam.....	49
Figure I.12 :	Mode d’action des molécules des réducteurs d’eau suivant leur nature ionique selon keijger	50
Figure I.13 :	Influences du dosage en réducteur d’eau sur le pourcentage de réduction d’eau selon Dodson.	51
Figure I.14 :	Relation entre l’étalement et le dosage en eau d’un béton	53
Figure I.15 :	Influence d’un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d’un béton.....	54
Figure I.16 :	Evolution de l’affaissement d’un BHP à base de deux types de ciment... ..	57
Figure I.17 :	Gain en résistance en fonction de la quantité de super plastifiant pour trois types de ciment, selon Erdogan.	58

Figure I.18 : Mécanismes de dispersions des superplastifiants traditionnels et nouveaux selon Corradi & al.	60
Figure I.19: Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons.	66
Figure I.20 : Photo Béton prise par le Microscope électronique à balayage (MEB).....	68
Figure 1.21: L'absorption d'eau des bétons.	69
Figure 1.22 : Rapport entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage. [8].....	71
Figure 1.23 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton.	72
Figure 1.24 : Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression.	73

CHAPITRE. II

Figure II.1 : Sable alluvionnaire de oued M'aiter (W de M'sila).	80
Figure II .2 : Courbe d'analyse granulométrique du sable.	84
Figure II.3 : DRX du sable alluvionnaire de oued M'aiter	86
Figure II.4 : La thermogravimétrie (TG) et la courbe dérivative Thermogravimétrie (DTG) du sable étudié.	86
Figure II.5 : Gravier concassé Cosider , (W de Bordj Bou Arreridj).	87
Figure II.6 : DRX du gravier concassé « Cosider ».....	91
Figure II.7 : Courbe granulométrique pour gravier concassé 3/8.	93
Figure II.8 : Courbe granulométrique gravier concassé 8/16	94
Figure II.9 : Courbe granulométrique gravier concassé 16/25.	94
Figure II.10 : Gravier roulé de « oued M'aiter ».	95
Figure II.11 : DRX du Gravier roulé de « oued M'aiter ».....	98
Figure II.12 : Courbe granulométrique du gravier roulés 3/8 de «oued M'aiter ».....	100
Figure II.13 : Courbe granulométrique du gravier roulés 8/16 de «oued M'aiter ».	101
Figure II.14 : Courbe granulométrique du gravier roulés 16/25 de «oued M'aiter »....	101

CHAPITRE. III.

Figure III.1 : Porosité des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16.	106
Figure.III.2 : masses volumiques des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16.....	107
Figure .III.3 : Courbe granulométrique des différents mélanges.	108
Figure III.4 : Courbe granulométrique du mélange optimum.	108
Figure III.5 : Analyse granulométrique des mélanges de graviers.	109
Figure III.6 : Variation de la masse volumique en fonction du % de gravier roulé....	110
Figure III.7 : Variation de la porosité en fonction du % de gravier roulé.	111
Figure III.8 : Courbe granulométrique du mélange optimum.	116

CHAPITRE .IV.

Figure IV.1 : Variation de la masse volumique à l'état frais des mélanges de bétons.	120
Figure IV.2 : Réduction d'eau en fonction du Pourcentage de gravier roulé substitué.	121
Figure IV. 3 : Rapport E/C en fonction du Pourcentage de gravier roulé substitué.....	122
Figure IV.4 : disposition des grains de graviers roulés de fraction 3/8 entre les grains de gravier concassé de fraction 8/16.	122
Figure IV.5 : Masse volumique du béton frais avec adjuvant.	123
Figure IV.6 : Rapport E/C du béton frais avec adjuvant.	124
Figure IV.7 : Réduction d'eau du béton frais avec adjuvant.	124
Figure IV.8 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué bétons sans adjuvants.....	127
Figure IV.9 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué, bétons avec adjuvants.	128
Figure IV.10 : Masse volumique du béton durcis B _{40/0/60} en fonction du temps.....	128
Figure IV.11 : Masse volumique du béton durcis à 28 jours En fonction du % de gravier roulé substitué.	129
Figure IV.12 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.	130
Figure IV.13 : Résistance à la compression pour bétons sans adjuvants.	131

Figure IV.14 : Résistance à la compression pour bétons avec adjuvant.....	132
Figure IV.15 : Résistance à la compression des bétons avec ou sans adjuvant en fonction des mélanges de fractions de graviers.	133
Figure IV.16 : Résistance à la compression en fonction de la porosité des mélanges, béton sans adjuvant.....	135
Figure IV.17 : Résistance à la compression en fonction des porosités des mélanges, béton avec adjuvant.	136
Figure IV.18 : Coefficient d'amélioration des mélanges de bétons.	137
Figure IV.19 : Masse volumique du béton frais sans adjuvant.....	141
Figure IV.20 : Rapport E/C, des différents mélanges de béton.	142
Figure IV.21 : Masse volumique du béton frais avec adjuvant.	143
Figure IV.22 : Rapport E/C des mélanges de béton frais avec adjuvant.	144
Figure IV.23 : Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant.	145
Figure IV.24 : Masse volumique des mélanges de béton durcis sans adjuvant.	146
Figure IV.25 : Masse volumique des mélanges de béton durcis avec adjuvant.	147
Figure IV.26 : Masse volumique du béton durcis sans adjuvant en fonction du temps.	147
Figure IV.27 : Masse volumique du béton durcis avec adjuvant en fonction du temps.	148
Figure IV.28 : Résistance à la compression en fonction du temps, des mélanges de béton sans adjuvant.	149
Figure IV.29 : Résistance à la compression en fonction du temps, des mélanges de béton avec adjuvant.....	150
Figure IV.30 : Résistance à la compression des mélanges de bétons avec Et sans adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.	152
Figure IV.31 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons sans adjuvant par rapport au béton témoin B ₁	153
Figure IV.32 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons avec adjuvant par rapport au béton témoin B ₁	153
Figure IV.33 : Résistance à la compression pour les mélanges de béton sans adjuvant en fonction des porosités des mélanges.	154
Figure IV.34 : Résistance à la compression pour les mélanges de béton avec adjuvant en fonction des porosités des mélanges..	155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N° :	Titre	Page
<hr/>		
CHAPITRE I :		
<hr/>		
Tableau I.1 :	Refus cumulés sur tamis.....	11
Tableau I.2 :	Granularité pour les granulats gros et moyens.....	12
Tableau 1.3 :	Caractéristiques de la pièce à fabriquer en fonction des dimensions maximales des granulats D_{max}	15
Tableau 1.4 :	Conditions auxquelles doit satisfaire un granulat de fraction d/D.....	17
Tableau 1.5 :	Classification des graviers d'après l'indice d'écrasement.....	24
Tableau 1.6 :	Valeur du coefficient G.....	39
Tableau 1.7 :	valeur du terme correcteur K.....	41
Tableau 1.8 :	coefficient de compacité.....	42
Tableau 1.9 :	Coefficients A et A`.....	43
Tableau 1.10 :	Dosage en eau dans 1 m ³ du béton.....	44
Tableau I.11 :	Causes, constatation et remèdes du retrait.....	62
<hr/>		
CHAPITRE II :		
<hr/>		
Tableau II.1 :	Masse volumique absolue du sable alluvionnaire de Boussaâda.....	80
Tableau II.2 :	Masse volumique apparente du sable alluvionnaire à l'état lâche.....	81
Tableau II.3 :	Masse volumique apparente du sable alluvionnaire à l'état compact...81	81
Tableau II.4 :	Caractéristiques physiques du sable alluvionnaire	82
Tableau II.5 :	Equivalent du sable, du sable alluvionnaire.....	82
Tableau II.6 :	Teneur en eau du sable alluvionnaire.....	83
Tableau II.7 :	Degré d'absorption du sable alluvionnaire.....	84
Tableau II.8 :	Analyse granulométrique du sable alluvionnaire de « oued M'aiter ».....	84
Tableau II.9 :	Analyse chimique du sable alluvionnaire de oued M'aiter	85

Tableau II.10.a : Masse volumiques apparentes des fractions de gravier concassée Cosider.....	89
Tableau II.10 : Masse volumique absolue du gravier concassé Cosider.....	89
Tableau II.11 : Porosité, Compacité et Indice des Vides du gravier concassé Cosider.....	89
Tableau II .12 : Degré d'absorption d'eau du gravier concassé Cosider.....	90
Tableau II .13 : Coefficients de Los Angeles du gravier concassé Cosider.....	90
Tableau II .14 : Composition chimique du gravier concassé Cosider.....	91
Tableau II .15 : Valeurs données par le DRX du gravier concassé Cosider.....	91
Tableau II.16 : Analyse granulométrique du gravier concassée 3/8.....	92
Tableau II.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 8/16.....	92
Tableau II.18 : Analyse granulométrique du gravier concassé 16/25.....	93
Tableau II.19. : Masse volumiques apparentes des fractions de gravier roulé.....	95
Tableau II.20. : Masse volumique absolue du gravier roulé «oued M'aiter ».....	96
Tableau II.21 : Porosité, Compacité et Indice des Vides du gravier roulé.....	96
Tableau II .22 : Degré d'absorption d'eau du gravier roulé.....	97
Tableau II .23 : Coefficients de Los Angeles du gravier roulé.....	97
Tableau II .24 : Composition chimiques du gravier roulé de «oued M'aiter ».....	98
Tableau II .25 : Valeurs données par le DRX du gravier roulé.	98
Tableau II.26 : Analyse granulométrique du gravier roulé 3/8	99
Tableau II.27 : Analyse granulométrique du gravier roulé 8/16	99
Tableau II.28: Analyse granulométrique du gravier roulé 16/25.....	100
Tableau II.29 : Caractéristiques du ciment utilisé dans notre recherche.....	102
Tableau II.30 : Caractéristiques chimiques du CPJ.....	102
Tableau II.31 : Caractéristiques minéralogique du CPJ.....	103
Tableau II .32: Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage.	103

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Proportions des fractions dans les mélanges.....	105
Tableau. III .2 : Masse volumique et porosité pour mélanges de fractions.....	106

Tableau III.3 : Pourcentage de gravier roulé dans les différents mélanges de gravier.....	109
Tableau III.4 : Masse volumique apparente et Porosité pour les différents mélanges de gravier.....	110
Tableau III.5 : proportions des fractions de gravier dans un mélange ternaire.....	112
Tableau III.6 : Masse volumique apparente et porosité des différents mélanges de fractions de gravier concassé Cosider.....	113
Tableau. III.7 : Classification des mélanges d'après les masses volumiques apparentes.....	114
Tableau III.8 : Classification des mélanges d'après leurs porosités.....	114
Tableau III.9 : Mélange optimal M12 du gravier Cosider	115
Tableau III.10 : Composition granulométrique du mélange optimum M12.	116
Tableau III.11 : Pourcentage de gravier roulé et concassé dans les différents mélanges de gravier.	117
Tableau III.12 : Masse volumique apparente et Porosité pour les différents mélanges de gravier.....	118

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Donnés de bases pour la formulation des bétons	119
Tableau IV.2 : Composition de béton pour 1 m ³	121
Tableau IV.3 : Masse volumique du béton frais.....	122
Tableau IV.4 : Réduction d'eau et Rapport E/C des différents mélanges.....	121
Tableau IV.5 : Masse volumique du béton frais avec adjuvants pour les différents mélanges.....	123
Tableau IV.6 : Réduction d'eau et rapport E/C du béton frais avec adjuvant.....	124
Tableau IV.7 : Masse volumique à l'état durci en fonction du type de béton sans adjuvant.....	126
Tableau IV.8 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué, bétons avec adjuvants.....	127
Tableau IV.9 : Résistance à la compression en fonction du temps pour bétons sans adjuvants.....	131
Tableau IV.10 : Résistance à la compression en fonction du temps, pour bétons	

avec adjuvants.....	132
Tableau IV.11 : Résistance à la compression du béton à 28 jours en fonction de la Porosité des mélanges de gravier.....	134
Tableau IV.12 : Résistance à la compression à 28 jours, bétons avec adjuvants.....	135
Tableau IV.13 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons par rapport au % de gravier roulé substitué.....	136
Tableau IV.14 : Donnés de bases pour la formulation des bétons.....	139
Tableau IV.15 : Composition pour 1 m ³ de béton.....	140
Tableau IV.16 : Compositions de béton pour 15 éprouvettes cubiques	140
Tableau IV.17 : Masse volumique du béton frais sans adjuvant.....	141
Tableau IV.18 : Réduction d'eau de gâchage, Rapport E/C des différents mélanges.....	142
Tableau IV.19 : Masse volumique du béton frais avec adjuvant.....	143
Tableau IV.20 : Rapport E/C et réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant.....	144
Tableau IV.21 : Mesure de la masse volumique du béton durcis en fonction du temps.....	145
Tableau IV.22 : Mesure de la masse volumique du béton durcis avec adjuvant en fonction du temps.....	146
Tableau IV.23 : Résistance à la compression des mélanges de béton sans adjuvant en fonction du temps.....	148
Tableau IV.24 : Résistance à la compression des mélanges de béton avec adjuvant en fonction du temps.....	149
Tableau IV.25 : Résistance à la compression des bétons sans adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.	151
Tableau IV.26 : Résistance mécanique à la compression des bétons avec adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.....	151
Tableau IV.27 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons par rapport au béton témoin B ₁	152
Tableau IV.28 : Résistance à la compression des bétons sans adjuvant en fonction de la Porosité des mélanges de graviers.....	154
Tableau IV.29 : Résistance à la compression du béton avec adjuvant en fonction de la Porosité des mélanges de graviers.....	155

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Introduction générale

Face à l'ampleur des déficits enregistrés en matière de construction (habitation ou autre) et à l'urgence des besoins, la recherche de nouvelles méthodes touchant de près ou de loin ce secteur s'impose.

La recherche scientifique et technique devient donc indispensable et doit être axée sur deux connaissances importantes :

- La recherche d'une œuvre rationnelle au point de vue type, dimensions, forme, compte tenu des conditions mécaniques et physiques qui s'impose.
- La recherche d'un matériau performant et économique axée sur une science expérimentale poussée. En ce sens, l'étude des matériaux de construction et la recherche de compositions de béton à base des matériaux locaux afin d'obtenir des matériaux performants et économiques s'avère plus que nécessaire.

Vu que l'exploitation des matériaux granulaires ne nécessite pas beaucoup de dépenses, ni de grande technologie, les bétons qu'on fabrique seront de surcroît économique.

Il est évident qu'il faut étudier profondément toutes les caractéristiques des graviers utilisés dans les bétons, ainsi qu'apporter les traitements nécessaires pour avoir des bétons de bonne qualité et de bonne performance .

De tels objectifs immédiats ou futurs, incitent à un sérieux effort de recherche et d'investigation, d'où le sens de notre travail.

Problématique

L'objectif de cette étude est de formuler et caractériser des bétons confectionnés à partir d'un mélange de différentes fractions granulaires de gros granulats naturels (concassés et roulés) de façon à minimiser la porosité. Pour cela, deux types de granulats ont été utilisés : granulats concassés de fractions granulaires 3/8, 8/16 et 16/25 mm et granulats roulés de fraction granulaire 3/8, 8/16 et 16/25 mm.

Deux séries d'essais ont été choisis et préparés pour mesurer la compacité des différents mélanges à base de granulats concassés. Le premier type des essais préliminaires (Série

A) a été réalisé en préparant 09 combinaisons pour le mélange granulaire binaire de fraction 3/8 et 8/16 mm et 36 combinaisons pour le mélange granulaire ternaire de fraction 3/8, 8/16 et 16/25 mm en vue de déterminer l'optimum des mélanges granulaires binaire et ternaire de gros granulats concassés qui offrent les plus grandes compacités (faibles porosités). Les deux mélanges granulaires optimaux obtenus durant la première phase des essais préliminaires se composent de 40% de fraction (3/8 mm) et 60 % de fraction (8/16 mm) pour le mélange granulaire binaire et de 20% de fraction (3/8 mm), 40% de fraction (8/16 mm) et 40% de fraction (16/25 mm) pour le mélange granulaire ternaire. Ces deux mélanges optimaux de gros granulats concassés ont donnés une porosité minimale et une compacité maximale.

Le deuxième type des essais principaux (Série B) a été préparé en mélangeant des gros granulats concassés et roulés de différentes fractions granulaires (3/8, 8/16 et 16/25 mm) pour les mélanges granulaires mixtes de fraction binaire et ternaire. Le mélange granulaire mixte pour le mélange binaire a été préparé avec deux fractions (3/8 et 8/16 mm) de gros granulats concassés et une seule fraction de 3/8 mm de gros granulats roulés. Ce mélange granulaire mixte de fraction binaire consiste à substitué les gros granulats concassés de fraction (3/8 mm) par les gros granulats roulés de fraction (3/8 mm) à différents pourcentages (0%, 8%, 16%, 20%, 24% et 40%) en fixant constant le pourcentage de la fraction granulaire 8/16 mm pour les gros granulats concassés à 60% pour tous les mélanges granulaires mixtes (mélanges binaires) préparés. Un autre mélange granulaire mixte de fraction ternaire (05 combinaisons) a été préparé avec trois fractions granulaires (3/8, 8/16 et 16/25 mm) pour les deux gros granulats concassés et roulés utilisés.

Cette étude expérimentale nous a permis de montrer l'influence des caractéristiques physico-chimiques des gros agrégats naturels sur le comportement mécanique du béton. La substitution de la fraction granulaire des gros granulats concassés par la fraction granulaire de gros granulats roulés 3/8 mm pour le mélange binaire et 3/8, 8/16 mm pour le mélange ternaire permet d'améliorer nettement les caractéristiques physique (réduction d'eau de gâchage et du rapport E/C) et mécanique (réponse mécanique) du béton préparé. L'incorporation de 1,5% d'adjuvant chimique (Medaflo 30) améliore nettement l'ouvrabilité du béton frais et la résistance mécanique du béton à l'état durci pour les deux mélanges granulaires mixtes de fraction binaire et ternaire testés.

Organisation de la thèse

Pour réaliser ce but, notre étude comporte les parties principales suivantes :

- Revue générale et synthèse bibliographique qui permet de présenter l'état des connaissances sur les recherches entreprises à travers le monde concernant les graviers en particulier et le béton et ces constituants de façon générale.
- Etude de toutes les caractéristiques possibles des deux graviers étudiés avec les équipements et matières disponibles aux laboratoires de l'université de M'sila, et de la cimenterie Lafarge implantée à Hammam Dalaa, Wilaya de M'Sila..
- Traitement des graviers étudiés, par méthode de mélange binaire et ternaire de différentes fractions pour avoir des mélanges optimaux avec une compacité maximale donc une porosité minimale.
- Etude des propriétés des bétons de classes courantes, confectionnés à base des mélanges optimaux de graviers.
- Valorisation des graviers roulés peu utilisés dans notre pays pour la confection des bétons, étude faite sur un gravier roulé d'origine alluvionnaire de « oued Maïter » dans la wilaya de M'sila.
- Utiliser un super plastifiant afin d'améliorer d'avantage nos Mélanges de bétons.

Nous terminerons ce mémoire de thèse par une conclusion générale de nos travaux, ainsi que des perspectives qui en découlent sur les améliorations nécessaires à apporter afin de déboucher vers un modèle fiable capable de reproduire des bétons de bonne qualité. Et enfin tirer quelques conclusions principales et recommandations générales.

Ce travail présente un aspect d'application pour son utilisation par les ingénieurs travaillant aux chantiers, aux centrales à béton et aux usines de fabrication des éléments en béton et béton armé préfabriqués.

J'espère que cette modeste recherche contribuera plus ou moins au progrès technologique dans le domaine de recherche et de construction et dans le domaine de fabrication des bétons en particulier dans notre région et dans notre pays.

CHAPITRE 1 : Revue générale et Etat de connaissances

Introduction :

L'aménagement de l'environnement et La construction font appel à trois secteurs d'activités, qui sont les industries de matériaux de construction, le bâtiment, et les travaux publics. Tous ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles (granulats) en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires, ou obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et aussi l'utilisation des déchets inertes. La nature de ces granulats et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Elles sont destinées à être mises en œuvre sans aucun apport de liant sous forme de pavais, ballastes des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais, et autres ...), ou agglomérées à l'aide d'un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés de chaussées).

Dans ce chapitre nous présenterons une revue générale en ce qui concerne le granulat, notamment le gros granulat (gravier et pierre concassée) et quelques notions sur les bétons dans lesquels est souvent utilisé le gravier ou pierre concassé et sur lesquels il exerce une influence considérable, nous passerons en revue quelques types d'adjuvants.

Dans ce chapitre sont mises en accent généralement toutes les influences du gravier sur les propriétés du béton. Sur la base de ces influences on peut juger probablement la qualité et le comportement de chaque type de gravier dans les bétons.

Partie. A : Granulats

1.1 Définition des granulats :

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sable gravier ou cailloux [1]ou filer (farine), sable gravillon et pierre [2], qui entre dans la composition des bétons et forment leurs squelettes ; tandis que le ciment joue le rôle de liant qui lie les grains de granulat pour former un corps solide (béton), d'où l'importance du rôle que joue le granulat dans la confection des bétons [3].

On appelle « gravier » l'accumulation des grains de 5 à 70 (150 mm) formés par destruction naturelle des roches, tandis que la pierre concassée (gravier concassé) est

obtenue par broyage des roches massives, de gravier, de moellons, ou de pierres artificielles en morceaux dont les dimensions varient de 5 à 70 mm.

Pour les bétons on se sert en général de la pierre concassée obtenue en broyant des roches compactes, de la pierre concassée de gravier, des laitiers de haut fourneau et de four Martin [4].

I.2 Les différents types de granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée : «Naturels», lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;

«Artificiels», lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;

«Recyclés», lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés [5].

- Les granulats naturels :

Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches :

- éruptives : granites, basaltes porphyres,
- sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- métamorphiques : gneiss, amphibolites.

Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles : les roches calcaires, les roches siliceuses et les silico-calcaires [5].



G. Naturel (Concassé) *G. Recyclé* (B. de démolition) *G. Artificiel* (Laitier Cristallisé)



G. Roulé (alluvionnaire) *Sable Naturel* (alluvionnaire) *Sable Naturel* (Concassé)

Figure I.1: Photos des différents types de granulat.

- **Les Granulats Alluvionnaires:**

Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Se sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière (et en mer éventuellement) [6]. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, et criblés pour obtenir différentes classes de granulats [7].

- **Les Granulats de Carrières:**

Les granulats sont obtenus par abatage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

Ces granulats ont une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [8].

- **Les granulats artificiels :**

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous produits industriels transformés, comme Le Laitier des hauts fourneaux , le laitier cristallisé concassé , le laitier expansé ou bouleté , les Scories d'aciérie, les Schistes houillers, qui sont des sous-produits et Déchets de L'industrie et enfin les Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement, comme les granulats réfractaire ou ferreux, ou les Granulats allégés par expansion ou frittage.

- **Les granulats recyclés :**

Les granulats recyclés sont les granulats résultants de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, les déchets de chantier, Les déchets de démolition, qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton.

1.3 Caractéristiques des granulats

Dans les travaux de bâtiment et de génie civil, Les granulats sont souvent utilisés dans la construction, ils doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication [5].

Le prélèvement d'un échantillon pour la caractérisation doit se faire conformément aux normes "NF P 18-553 et EN 932-1" relatives au prélèvement par "échantillonneur" ou par "quartage" [9].

1.3.1 Caractéristiques de fabrication :

- Fabrication de pierres concassées (gravier concassés)

La fabrication de la pierre concassée à la carrière se réalise comme présentée dans le document [10],

dans la nature, la décomposition des roches peut être naturelle sous l'action des éléments climatiques ou artificiels.

Pour la décomposition artificielle on choisit alors des affleurements d'un accès facile que l'on abat par tranches verticales de 3 à 6 m de haut en bas au moyens d'explosifs, Figure 1.4.

Figure 1.4 : Tir d'abattage d'une masse de roches pour la production de granulats.

les débris de l'explosion sont morcelés au marteau piqueur, puis envoyés dans des concasseurs successifs, qui les réduisent à la grosseur voulue.

Les produits concassés sont triés dans des passoires tournants appelés Trommels et les éléments trop gros sont retournés aux concasseurs, on obtient ainsi des granulats à arrêtes vives, qui suivant leurs grosseurs, sont appelés pierres concassées, gravillons, et sables concassés.

La norme expérimentale XP P 18-540 [11] définit les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons hydrauliques [12, 13].

- classifications des granulats

Les granulats sont classés en catégories en fonction de leurs dimensions.

L'AFNOR recommande la classification et les appellations suivantes en fonction des diamètres des trous des passoires [14] :

Farine, fines ou filer	de	0 – 0,1	mm
Sable fin		0,1 – 0,4	
Sable moyen		0,4 – 1,6	
Sable gros		1,6 – 6,3	
Gravillons petits		6,3 – 10	
Gravillons moyens		10 – 16	
Gravillons gros		16 – 25	
Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) petits		25 - 40	

Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) moyens	40 - 63
Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) gros	63 – 100

Cette classification s'avère très détaillé et la limite de séparation du sable (granulat fin) et de gros granulats est 6,3 mm, mais d'après [1], [2], [14], et [15] subsistera la pratique actuelle qui fixe à 5 mm la coupure entre le sable et les graviers, cette maille de 5 mm intervient d'ailleurs dans le calcul du module de finesse du sable.

La norme distingue quatre familles de granulats: les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D [11, 5]. Elle définit aussi les règles de conformité de la granularité en spécifiant les limites admissibles. [5, 12, 16]

Mais en réalité, aux carrières en Algérie on fabrique souvent des graviers de dimension 3 mm et plus (fraction 3/8 et plus grandes). Comme le montrent plusieurs recherches, les caractéristiques des granulats influent considérablement sur les propriétés du béton [1], [17], [18], [19].

Cependant les gros granulats (graviers et pierres concassé) influent plus sensiblement sur la résistance mécanique et moins sensiblement sur la maniabilité du béton que les granulats fins. [20], [126]

D'après [10] les granulats doivent provenir des roches :

- Stable, c'est-à-dire inaltérable à l'air, à l'eau et au gel, ce qui exclut les roches feldspathiques et les schistes ;
- Dures et n'ayant pas tendance à se feuilletter (comme nombreux calcaires et schistes) ;
- Inattaquables par les ciments (certaines roches alcalines sont attaquées par les ciments alumineux).
-
- **L'influence de la granularité du gravier (composition granulométrique)**

La granularité conditionne la porosité du mélange. Si tous les grains avaient la même dimension, on aurait une porosité maximale, s'ils étaient répartis suivant une courbe discontinue on pourrait avoir une porosité minimale pour assurer un béton plus compacte,

c'est-à-dire une bonne composition granulométrique correspond à un mélange des grains de différentes dimensions dont le volume entre les grains est plus petit. La granularité est donc, dans tout les cas, le paramètre fondamental [21]. L'analyse granulométrique est régie par les normes "EN 933-1 et EN 933-2" [12, 13 et 22]. Les granulats sont désignés par d et D , ou d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées. L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures au moyen de tamis. [5, 16].

Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (*courbe granulométrique*) [5, 16, 22].

Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [13]. Une nouvelle méthode plus sophistiquée est aussi utilisée pour la détermination de la granulométrie qui se base sur le traitement d'image.

La granulométrie est traitée par le logiciel *vidéo-granulomètre* VDG40 et son utilisation est couverte par la norme française "XP P 18-566" [23, 24].

La figure (I.5) illustre le principe de fonctionnement de cette technique.

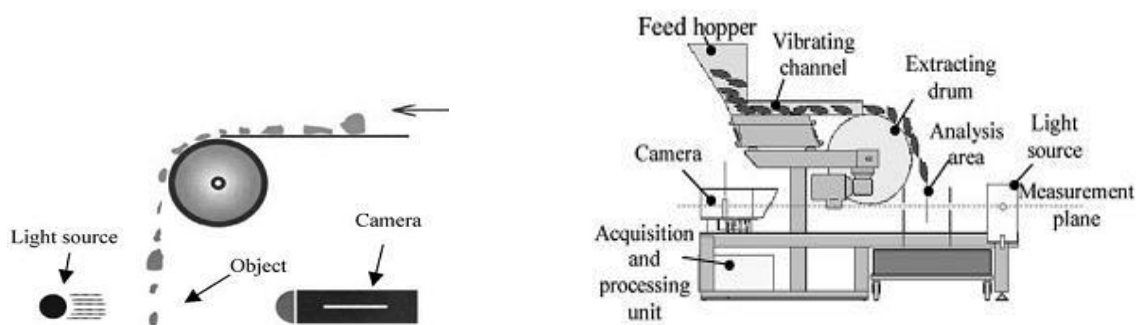


Figure I.2 : Présentation du VDG40 (L=1,60 m, l= 0,75 m et H= 1,20 m [23]).

D'après les normes de l'EX- URSS la composition granulométrique des gros granulats est déterminée en faisant passer l'échantillon sec du gravier à travers un jeu standard de tamis de 70, 40, 20, 10 et 5 mm. Une courbe granulométrique se forme en joignant tous les points correspondant aux refus cumulés et aux tamis utilisés. La courbe granulométrique de chaque fraction ou d'un mélange de plusieurs fractions doit se situer

dans les limites appelées « fuseau de spécification » qui est présenté sur le diagramme figure 1.1 [4].

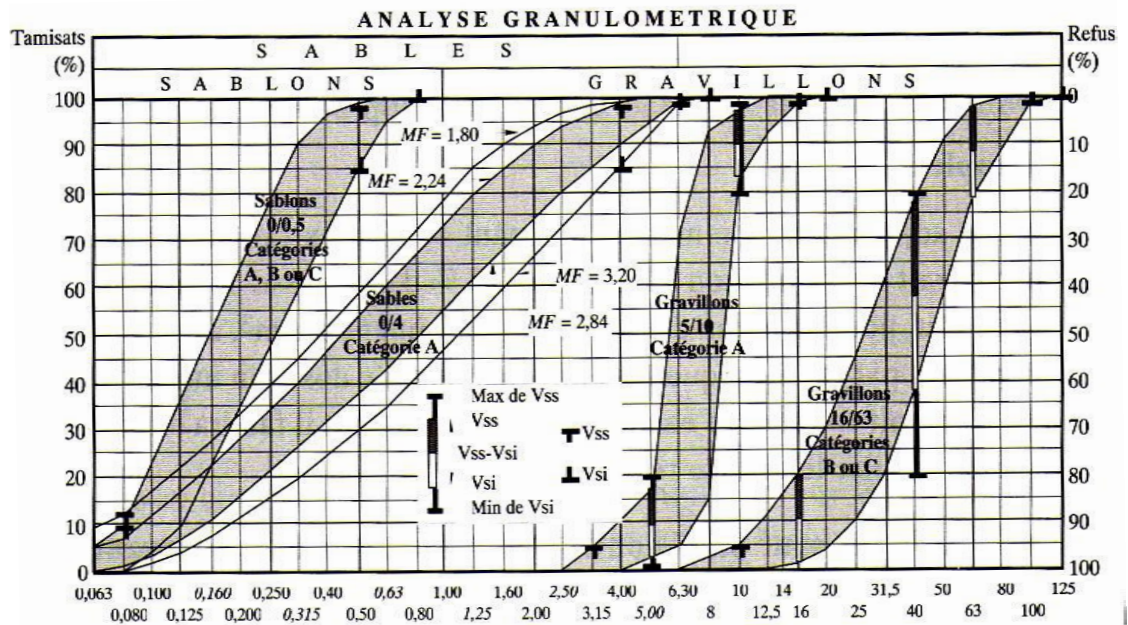


Figure I.3 : Exemples de courbes granulaires des granulats pour béton [4].

La dimension des trous du tamis, sur lequel le résidu total (refus cumulé) est de 10% du gravier pesé correspond à la grosseur maximale (D_{max}) et la grosseur minimale (D_{min}) correspond à la dimension des trous du tamis, à travers lequel le tamisât est 10%. Si le refus cumulé 10% et le tamisât 10% ne correspondent pas exactement à un tamis du jeu standard, il faut choisir le tamis Standardisé le plus proche [25].

C'est ainsi que les limites imposées pour les refus cumulés sur les tamis correspondant à D_{max} ; D_{min} ; $\frac{1}{2} (D_{max} + D_{min})$ et $1,25 D_{max}$ sont présentées au tableau 1-1.

Tamis	Limite des refus cumulés,(%)
D_{min}	90 – 100
D_{max}	0 – 10
$\frac{1}{2} (D_{max} + D_{min})$	40 – 70
$1,25 D_{max}$	0

Tableau I. 1 Refus cumulés sur tamis.

D’après les normes françaises la granularité du granulat d/D est définie comme dans le tableau 1.4 [9].

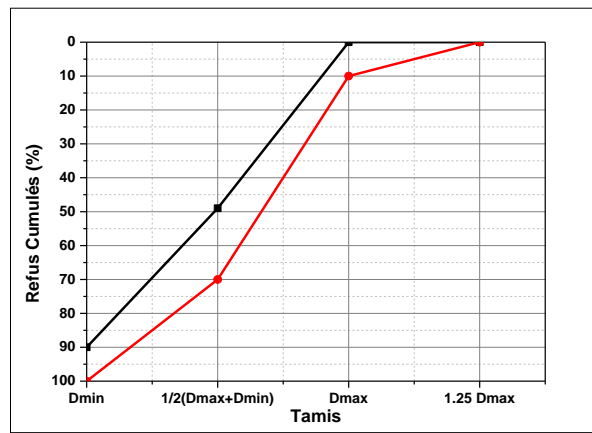


Figure 1.4 Fuseau de spécification pour la composition granulométrique du gravier [9].

Granularité	Niveau de valeur		
	A	B	C
	D et d conforme à NFP 18 304		
Passant à 1.25 D	100%	100%	100%
Refus à D	10%	15%	15%
Refus à (D+d)/2	Entre 1/3 et	Entre 1/3	/
Passant à d	2/3	et 2/3	15%
Passant à 0.63d	10%	15%	2%
	2%	2%	

Tableau I.2. Granularité pour les granulats gros et moyens [9].

La composition granulométrique de gros granulats dans le béton varie dans de larges limites à cause de différents contenus de chaque fraction.

Il est nécessaire de savoir comment de telles variations peuvent influencer sur les propriétés du béton et la dépense en ciment. L’expérience montre que la variation du contenu modéré de telle ou telle fraction dans les limites de 15 à 20% en masse n’influe que peu sur les paramètres et les propriétés du béton, les variations de 1.5 à 3 fois mènent à une forte influence. Dans une ancienne recherche de WEYMOUTH C.A, [26]

on présente les trois exemples suivants :

- La composition granulométrique de gros granulats avec la contenance abaissée (par rapport à l'optimum) de la plus grande fraction :

Ces essais montrent qu'une telle composition granulométrique entraîne une dépense élevée en ciment, et n'influe presque pas sur la résistance du béton.

- L'accroissement du contenu d'une fraction quelconque ; si la teneur en fraction maximale augmente, alors la résistance à la ségrégation et à la sédimentation diminue, la maniabilité et la capacité à l'expédition s'aggravent.
- L'augmentation brusque du contenu de la fraction intermédiaire provoque l'écartement des morceaux de la plus grande fraction et la compacité de la disposition des granulats de toutes les fractions dans la structure du mélange de béton ; ce qui provoque soit un excès dans la dépense en ciment, soit l'abaissement de la maniabilité.

On distingue la composition granulométrique continue et la composition granulométrique discontinue.

- La composition granulométrique continue comprend suffisamment de fractions successives qui s'arrangent de telle façon que théoriquement les grains moyens remplissent les vides entre les gros grains, les grains petits remplissent les vides entre les grains moyens, et les plus petits grains remplissent les vides entre les petits grains.

D'après les normes russes, dans la composition granulométrique continue le rapport des grosseurs maximales des fractions contiguës est :

$$\frac{D_j}{D_{j-1}} = \frac{1}{2}$$

Pratiquement les grains d'une fraction ne peuvent pas tous s'insérer dans les vides de grains de fraction plus grande, parce que les grosseurs de deux fractions successives ne se diffèrent pas considérablement.

- La composition granulométrique discontinue, a été prononcée par Valette dès 1940 en France. Depuis lors aux Etats-Unis, en Ex-URSS, en Chine etc, on continue la recherche et l'application de cette composition dans la pratique. Dans la composition

granulométrique discontinue, le rapport des grosseurs maximales des grains de fractions contiguës, est souvent égale à $1.6 - 2$ comme l'indique le schéma ci-dessous.

$$\begin{array}{ccc} D_1 & d_1 & D_2 & d_2 & D_3 & d_3 \\ & d_1/D_1 & & d_2/D_2 & & d_3/D_3 \end{array}$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{D_3}{D_2} = \dots = \frac{1}{8} - \frac{1}{6} \quad \text{Et} \quad \frac{D_1}{d_1} = \frac{D_2}{d_2} = \frac{D_3}{d_3} = \dots \mathbf{1.6 - 2}$$

C.à.d. : la grosseur de deux fractions contiguës se diffère considérablement. L'expérience de la production du béton d'après la théorie de la composition granulométrique discontinue montre que :

- On peut éliminer quelques fractions intermédiaires, par conséquent la surface spécifique du mélange de granulat diminue et par conséquent la dépense en ciment diminue aussi.
- La porosité du gravier diminue remarquablement, par conséquent la dépense en ciment sera encore réduite. C'est ainsi que l'avantage de la composition granulométrique discontinue résulte en un abaissement de la dépense en ciment et une diminution du besoin en eau et par conséquent une augmentation de la compacité du béton. En outre, dans la composition granulométrique discontinue il ya beaucoup de gros grains qui sont en contact les uns avec les autres en formant une squelette stable, ce qui peut augmenter la résistance du béton.

Dans la pratique on utilise les granulats de composition granulométrique discontinue pour diminuer le dosage en ciment sans changer les propriétés du béton, notamment sa résistance et son ouvrabilité. Beaucoup de travaux ont été consacrés à la détermination de l'influence négatif de la discontinuité de la granulométrie des granulats sur leur propriétés [27, 28].

Leurs analyses montrent que la discontinuité provoque la ségrégation du mélange de béton avec l'augmentation de la maniabilité. On sait que la ségrégation détériore la structure du béton, par contre si celle-ci n'aura pas lieu, la résistance du béton ne change pas même dans le cas de la granulométrie discontinue. Pour éviter la ségrégation il est

recommandé d'utiliser les mélanges du béton secs avec l'affaissement du cône d'abrams presque égal à zéro. [127]

A noter que la discontinuité du granulat demande:

- Des équipements de tamisage plus compliqués pour éliminer les fractions intermédiaires.
- Un mode de compactage plus intensive pour assurer la compacité du béton de fluidité assez faible.

1.3.2. Les caractéristiques géométriques des granulats :

- L'influence de la grosseur maximale du gravier

Le choix de la grosseur maximale de gravier dépend de différents facteurs, tels que les dimensions des éléments façonnés, le degré de ferrailage, la disposition de l'armature etc. Ces dépendances de la grosseur aux différents facteurs sont présentées au tableau 1.1 [1]

Caractéristiques de la pièce à fabriquer	D_{max} du granulat	
	Roulé	Concassé
e : espacement entre les armatures horizontales	0.9e	0.8e
c : couverture entre les armatures et le coffrage (couche de protection des armatures)	0.8c	0.7c
r: rayon moyen des mailles de ferrailage	1.8r	1.6r
R : rayon moyen du moule	1.2R	R
hm : épaisseur minimale	hm /4	hm /4

Tableau 1.3 Caractéristiques de la pièce à fabriquer en fonction des dimensions maximales des granulats D_{max}

Dans le cas général la dimension maximale du granulat ne doit pas dépasser 1/4 de la section minimale de l'élément à bétonner et ne doit pas surpassé 2/3 de la distance minimale entre les barres de l'armature [4], [3] pour chaque fraction d/D D : est la dimension pour les plus grands (D_{max}). [29]

Aux Etas -unis des recherches sur l'influence de la grosseur de gros granulats sur la résistance du béton ont été réalisées lors de la construction du barrage BOLDOWER. Ces résultats montrent qu'au cours de l'augmentation de D_{max} de 10 à 230mm, la

dépense en sable dans le béton diminue en volume absolu de 0.45 à 0.210, tandis que le contenu de gros granulats augmente de 0.136 à 0.6.

Avec l'augmentation de D_{max} des gros granulats, la dépense en ciment a diminué de deux fois pour les bétons de même résistance. C'est ainsi que dans les conditions considérées, l'augmentation de D_{max} accompagnée de la variation de la composition du béton s'avère efficace. L'accroissement de D_{max} est plus avantageux pour les bétons hydrauliques de résistance modérée, car l'abaissement du dosage en ciment sera plus important, cet accroissement de D_{max} est aussi avantageux pour la diminution de la chaleur d'hydratation, et par conséquent diminue le risque de fissuration.

D'après Brahma ; [29] le pourcentage des vides dans le béton dépend de la grosseur maximale D_{max} des graviers. L'augmentation de la grosseur du gros granulat apporte un abaissement plus important de la résistance pour le béton de haute résistance [30]. C.Nachtergal, insiste sur la relation entre la résistance du béton et la grosseur du granulat, en admettant que la résistance du béton est fonction de la grosseur :

$$R_b = f(\text{grosseur du granulat})$$

Nous nous entendons ici que le granulat comprend le sable et le gravier ou pierre concassée [31]. Pour les bétons maigres de classe faibles fabriqués à base de mélanges de mêmes résistances et mêmes ouvrabilités, il est plus avantageux d'utiliser les gros granulats de grosseur maximale, tandis que pour les bétons gras de haute résistance il vaut mieux utiliser les granulats de petites dimensions [27,32].

La variation de la dimension de gros granulats exerce une influence moins significative que la variation des types de granulats [27],

Les résultats d'autres recherches concordent seulement pour les granulats de dimensions entre 10 et 20 mm, pour ces granulats la résistance du béton appartenant à l'intervalle 170 à 500 bars ne dépend pas de la grosseur des granulats [17].

Pour les gros granulats naturels on peut utiliser le mélange de grains de différentes grosseurs sans fractionnement pour la fabrication des bétons. Alors la grosseur maximale D_{max} appartient aux grains les plus grands dans le mélange.

Pour les gros granulats concassés, on les sépare souvent en différentes fractions, tels que 3/8, 8/16, 16/25, 25/40 etc. Le terme « granulat d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de (d) pour les petits à (D) pour les grands.

L'appellation d/D doit satisfaire aux conditions indiquées au tableau 1.2 [1].

1 Refus sur le tamis de maille D		
et tamisât sous le tamis de maille d : $\leq 15\%$		si $D > 1,56 d$
$\leq 20\%$		si $D < 1,56 d$
à remarquer qu'en général $D > 1,56 d$		
2 Refus sur le tamis de maille	$1,56 d = 0$	
3 Tamisât sous le tamis de maille $0,63 d : < 3\%$		si $D > 5 \text{ mm}$
$\leq 5\%$		si $D \leq 5 \text{ mm}$
Si $d < 0,5 \text{ mm}$, le granulat est dit 0/D		

Tableau 1.4 conditions auxquelles doit satisfaire un granulat de fraction d/D

Dans la pratique on utilise une fraction ou un mélange de quelques fractions du gravier. Ca dépend de la dimension des éléments, la densité de l'armature dans le béton armé et de la dimension maximale recherchée du gravier (tableau 1.4).

- L'influence de la forme des grains du gravier

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistance des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissements potentiels .La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales, figure (I.8).

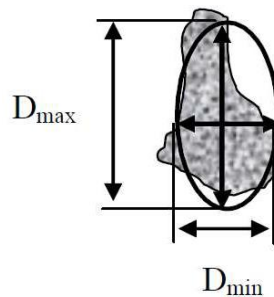


Figure I.5 : La forme des grains du gravier, [5].

L'épaisseur (E), la plus grande dimension (D_{\max}) et la plus petite dimension (D_{\min}).

Pour différents usages, il est conseillé d'utiliser des granulats les plus isotropes possibles. Une forme assez ramassée des granulats est très recommandée pour une utilisation dans le béton [5].

Pour évaluer l'influence de la forme des grains de gravier sur les propriétés du béton, différentes méthodes ont été proposées.

- **Le coefficient volumétrique.**

F. Gorisse recommande d'utiliser le coefficient volumétrique pour caractériser la forme des grains du gravier [9]. Le coefficient volumétrique d'un grain (C_v) est le rapport de son volume absolu au volume de la sphère circonscrite à la plus grande dimension de ce grain :

$$C_v^g = \frac{V}{\frac{\pi d^3}{6}} \quad \text{Où } V : \text{ volume absolu du grain de gravier ;}$$

d : la plus grande dimension du grain. Le coefficient est d'autant plus grand que le granulats est de forme plus arrondie (fig 1.9)

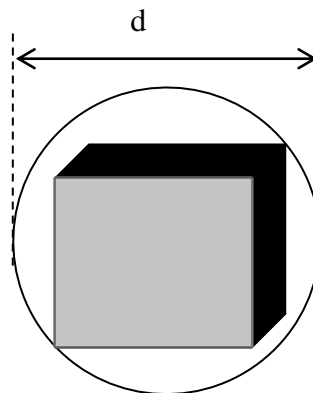


Figure I.6 : Sphère contournant un gravier

Le coefficient volumétrique du gravier est déterminé sur un ensemble des grains du gravier dont la masse est de 0.5 à 1 kg suivant la dimension (**d**) et la formule de calcul du coefficient volumétrique devient :

$$C_v = \frac{\sum V}{\frac{\pi}{6} \sum d^3}$$

Un coefficient faible correspond à un granulats présentant un certain nombre de plats, éclats et aiguille, un coefficient élevé correspond à un granulats dit « cubique » ou

« arrondi », le coefficient volumétrique d'un cube est égale à 0.37 ; celui d'une bille est évidemment 1.

La norme p18-301 [9], préconise :

$C_v \geq 0.15$ pour les gravillons de 12.5 à 25 mm.

$C_v \geq 0.11$ pour les cailloux de 25 à 50 mm.

En ex- URSS [33] on choisi pour ce but une autre méthode qui consiste plutôt à la détermination du coefficient K_f dont la formule est la suivante :

$$K_f = \frac{S_p}{S_b}$$

Où S_p = valeur de la surface du parallélépipède dont les faces sont planes et lisses et ayant un volume V , et les dimensions (longueur, largeur, et hauteur) du grain à essayer, mesurées à l'aide d'un pied à coulisse ;

S_b = surface minimale du corps de volume V .

La valeur de la surface du grain à essayer de volume V peut être présentée comme suit :

$$S = S_b \cdot K_f \cdot K_r$$

Par conséquent : $S = \frac{S_b \cdot S_p \cdot K_r}{S_b} = S_p K_r$,

Où K_r : coefficient de relief de la surface.

C'est ainsi qu'afin de déterminer le relief d'un morceau de granulat, il est nécessaire de connaître sa surface totale, son volume V et ses dimensions.

Ces deux méthodes ne permettent pas d'apprécier le caractère de relief de la surface qui influe considérablement sur la cohésion entre les grains du gravier et la pierre de ciment.

On distingue les formes des granulats suivantes :

- Forme cubique (avec le rapport de la longueur à l'épaisseur inférieur à 2)
- Forme irrégulière (avec le rapport de la longueur à l'épaisseur de 2 à 3)
- Forme anguleuse (avec le rapport de la longueur à l'épaisseur supérieur à 3)

Cette dernière forme incluse les formes d'aiguilles est de plaquette.

Dans la pratique c'est difficile de procurer les graviers de forme cubique.

Le gravier roulé avec des surfaces lisses et formes rondes donnent une bonne maniabilité, tandis que la pierre concassée avec des formes anguleuses et surfaces rugueuses donne une mauvaise maniabilité dans les mêmes conditions. [33] Des chercheurs [2] ont indiqué le comportement négatif des grains de forme d'aiguille et de plaquette qui peuvent rendre le gravier plus poreux, peuvent diminuer la maniabilité et la résistance du béton, et causer des difficultés pour le compactage, par conséquent la dépense en ciment sera plus grande, [33], [34], c'est pourquoi on préfère les granulats cubiques aux plaquettes et aux aiguilles [2].

L'utilisation des graviers sous formes d'aiguille et de plaquette n'est tolérée qu'en faible quantité.

D'autre part avec un bon compactage on peut obtenir des bétons de propriétés mécaniques élevées avec des graviers de forme de lamelle. Dans le document [35] on indique que la présence des graviers de forme de plaquette influe positivement sur la résistance du béton à la compression, flexion et fendage.

Pour une teneur en gravier de forme de plaquette égale à 30 % dans le béton la maniabilité ne change pas, tandis que la résistance à la compression augmente de 20%, celle à la flexion et fendage augmente de 5%.

Remarquons également que le gravier roulé contient des grains légèrement arrondis avec la surface lisse, tandis que les grains de la pierre concassée ont des formes irrégulières avec arêtes vives et surface rugueuse, ce qui influe considérablement sur la maniabilité du béton frais et sur la résistance du béton durci. D'après le document [36] le gravier roulé augmente de l'ordre de 10 % la fluidité du béton mais il diminue 10% sa résistance par rapport à la pierre concassée. C'est une comparaison seulement relative sur le comportement de deux sortes de gravier dans le béton frais et le béton durci.

Malgré qu'il existe des contradictions entre les différents documents, on limite toujours la teneur des grains de forme d'aiguille et de plaquette.

Remarquons que la limitation de la teneur des grains de forme d'aiguille et de plaquette tient compte non seulement de l'aspect technique de ce problème, mais aussi de l'aspect

technologique, en effet cette limitation peut causer des difficultés pour la fabrication des graviers, la granularité du gravier et aussi la forme des grains dépendent de la nature des produits d'entrée, du débit d'alimentation, de l'usure des pièces des broyeurs dans les carrières de concassage, et aussi la difficulté à séparer les grains de forme d'aiguille et de plaquette par criblage.

A titre d'exemple en Angleterre la limite de teneur de ces grains de forme d'aiguille et de plaquette ne doit pas dépasser 10-15%, [37], en EX- URSS elle est limitée à 15%, [3].

- **Le coefficient d'aplatissement "A" :**

Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm à partir de (G) et (E), est par définition le pourcentage d'élément tel que $G/E > 1,58$ [16].

G : petite arrête, E : épaisseur

Le coefficient d'aplatissement est déterminé selon la Norme NF EN 933-3 [38].

Un gravillon de forme défavorable (plate ou allongée) présente un coefficient d'aplatissement élevé (20 à 40 %). Un gravillon de forme favorable (sphérique, cubique, nodulaire) présente un coefficient d'aplatissement généralement compris entre 5 et 20 %.

- **Angularité :**

L'angularité des granulats est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et rapport de concassage. Mais peut être mesurée aussi par le temps d'écoulement d'un certain volume de granulats à travers un orifice donné caractérisant ainsi un coefficient d'écoulement des gravillons. Il en va de même pour les sables, la méthodologie étant la même, seul diffère les dimensions de l'appareillage de mesure [5].

1.3.3 Caractéristiques pétrographique

- **L'influence de la nature du gravier.**

La description pétrographique consiste à déterminer la nature des différents minéraux, leur abondance relative, leur degré d'altération, leur taille et leur agencement, ainsi que

l'existence éventuelle de pores. Elle permet aussi de définir l'état cristallin de la matière (cristallographie) pour décrire les roches [39].

Dans les roches, la matière peut se présenter sous deux états différents :

- l'état cristallin, le plus répandu : arrangement ordonné de la matière avec répétition périodique dans l'espace d'un atome ou d'un groupe d'atomes : le motif cristallin;
- l'état amorphe, beaucoup plus rare, où les molécules sont disposées de façon désordonnée: cas des verres volcaniques, de l'opale ou de la calcédoine qui sont des variétés de silice.

Les graviers proviennent des roches maternelles qui sont constituées de minéraux différents. Chaque roche a sa propre composition chimique et minéralogique, sa résistance, son adhérence avec le ciment et sa porosité.

On affirme que l'adhérence entre les granulats et la pierre du ciment influe sur la résistance du béton. La plus ou moins bonne adhérence de la pâte de ciment sur les surfaces des granulats est un facteur important de la résistance (en traction tout particulièrement) [1].

Cette adhérence est importante à la résistance à la traction et à la compression, pour lesquelles la rupture intervient par fissuration longitudinale [2].

L'interaction chimique des granulats avec la pierre de ciment se manifeste en cas des graviers d'origine calcaire [40].

Celle-ci augmente l'adhérence entre le granulats et la pierre.

En outre l'état de surface influe évidemment sur l'adhérence, en général les grains de gravier naturel (Gravier roulé) ont des surfaces lisses et les grains de gravier concassé ont des surfaces rugueuses. Par suite de la rugosité de leur surfaces , les grains de pierre concassé s'adhèrent mieux que le gravier naturel au ciment durci dans le béton ,mais en revanche le mélange du béton à base de pierres concassées est moins fluide.

Dans notre recherche on utilise un mélange de graviers concassés et graviers roulé, afin d'améliorer la fluidité de nos bétons et assurer en même temps une bonne adhérence entre les graviers et le liant.

D'après R.LACROIX et al, [2] le calcaire possède la meilleure adhérence. À l'exception des calcaires trop tendres, c'est-à-dire d'une résistance inférieure à 500 bars, qui sont souvent recouverts d'un filer qui nuit à leur adhérence.

1.3.4 Caractéristiques mécaniques :

La résistance du gravier est un facteur très important pour la résistance du béton, les normes de l'EX-URSS spécifie la résistance des graviers en fonction de la classe des bétons comme suit [33] :

- La résistance du gravier à l'état saturé doit être 1.5 fois plus grande que celle du béton de classe 300 et 2 fois plus grande pour les bétons de classe supérieurs.
- En outre, les pierres concassées fabriquées à partir des roches éruptives doivent avoir en tout cas une résistance supérieure à 800 bars : à partir des roches métamorphiques : 600 bars et à partir des roches sédimentaires comme le calcaire : 300 bars.
- L'utilisation des graviers concassés de résistance inférieure aux limites spécifiées, dans les cas particuliers, doit être accompagnée d'essais obligatoires sur les bétons, pour définir la dépense nécessaire en ciment ; dans ce cas seulement on peut assurer la résistance requise du béton avec ces granulats incompatibles.
- La résistance à la compression du gravier concassé est déterminée sur une éprouvette de la roche maternelle .dans [2] On donne les valeurs approximatives de la résistance à la compression de quelques roches utilisées dans les bétons :

Granit :	1900 bars
Basalte :	2500 bars
Porphyre :	2300 bars
Calcaire dur :	900 bars
Calcaire tendre :	400 bars.

D'après leurs résistances, les classes des pierres concassées sont définies comme suit : 1200,1000, 800, 600, 400, 300 et 200.

En cas de manque, des éprouvettes de la roche maternelle, la résistance du gravier peut être évaluée indirectement par l'indice d'écrasement dans un cylindre (voir chapitre II) [20] et [40], ou bien la qualité du gravier concassé peut être déterminée par des essais d'écrasement et d'usure [1].

D'après l'indice d'écrasement (I_e) on classifie trois classe de gravier :

I_e-8 , I_e-12 et I_e-16 qui sont utilisées pour les bétons de classes correspondantes comme dans le tableau 1.5, noter que les chiffres 8, 12, 16 sont les pourcentages en poids du gravier qui est écrasé après l'essai d'écrasement.

Classe du gravier	Domaine d'utilisation
I_e-8Pour les bétons de classe > 300 bars
I_e-12Pour les bétons de classe 200 - 300 bars
I_e-16Pour les bétons de classe < 200 bars

Tableau 1.5 : classification des graviers d'après l'indice d'écrasement

Dans le document [9] ,F.GORISSE présente les résultats des essais sur les bétons étuvés, à base des pierres concassées de nature différentes. Ces essais utilisent comme facteur de base une grande variabilité de la résistance des roches dont l'influence est plus grande par rapport à celle des autres facteurs, seulement pour des rapports E/C faible. Par contre, pour les rapports E/C élevés, la résistance des pierres concassées n'influe que faiblement sur la résistance du béton.

D'après les normes françaises la dureté du gravier peut être exprimée par le coefficient de LOS Angeles (CLA) qui est déterminé par l'essai de LOS Angeles

- Essai Los Angeles (LA) :

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

La valeur du coefficient Los-Angeles doit être ≤ 40 pour les granulats naturels type B et C suivant les normes "NF P18 573, EN 1097-2 § 5" [41, 42] et compris entre 30 (catégorie A) et 50 (catégorie D) selon les normes XP P 18 540 [11,13] et ASTM C-33 pour les granulats recyclés [43].

- **La fragmentation dynamique (FD):**

L'essai permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat "NF P 18-574" [44].

Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. Cette quantité est appelée coefficient de fragmentation dynamique. Cet essai a été conçu de manière à trouver, sur un même matériau, un résultat aussi proche que possible du coefficient Los- Angeles [22].

- **Résistance à l'attrition et à l'usure "essai micro-dévale humide":**

L'essai Micro Dévale peut être utilisé à sec ou en présence d'eau, méthode plus Représentatif [3]. Les granulats résistent d'autant mieux à l'attrition que la valeur du coefficient Micro-Dévale est faible [5].

La valeur du M_{DE} doit être ≤ 35 pour les granulats naturels selon "NF P18-577, NF EN 1097-1". [45,46].

La résistance de la pierre concassée dépend non seulement de la nature de la roche maternelle, mais aussi de sa porosité (P). En général la résistance est d'autant plus grande que la porosité est plus faible.

Mais la porosité à son tour dépend aussi de la masse volumique γ_0 et la masse spécifique ρ de la pierre, elle est calculée par la formule :

$$P = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\rho}\right) \cdot 100\%$$

D'après le document [17] la variation de la résistance du béton due à l'influence du type de gravier est plus significative que celle due à la variation de la dimension des graviers. La résistance et même la porosité du gravier ont une relation intime avec la dureté du béton. En général une grande dureté du gravier peut assurer une grande résistance du béton.

D'après R.LACROIX et all [2], il faut rechercher une dureté suffisante, des pierres concassées. Les graviers issues des roches dures cristalline sont les meilleures à cet égard, mais les calcaires peuvent donner des granulats très convenables pourvu que leur dureté soit suffisante, pour cela il faut choisir un calcaire dont la résistance à la compression soit supérieure à 500 bars environ, ce qui correspond à une densité de

l'ordre de 2.5. les meilleures calcaires sont ceux dont la résistance est de l'ordre de 800 à 900 bars, au-delà de ces valeurs nous aurons des calcaires à grains très fins appelés calcaires froides, ces calcaires ont une faible adhérence au mortier (ou pierre de ciment).

Aussi le choix d'un gravier pour béton peut être fait en fonction de plusieurs critères dont les principaux sont [2],

- La résistance aux ambiances agressives ;
- Les caractéristiques mécaniques ;
- L'adhérence au liant.

Remarquons qu'on insiste souvent sur l'utilisation des pierres concassées des roches calcaires et aussi des graviers roulés d'origine alluvionnaires, qui sont l'Object d'étude de cette thèse.

1.3.5. Caractéristiques physiques

- Influence de la porosité (P) :

C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes "NF P18 554, EN 1097-3" [47, 48].

La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface.

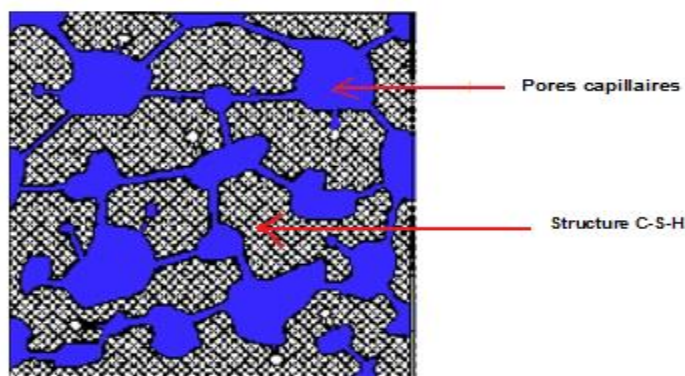


Figure 1.7 : Perméabilité élevée

(Interconnexion des pores capillaires) (photos NEVIL)

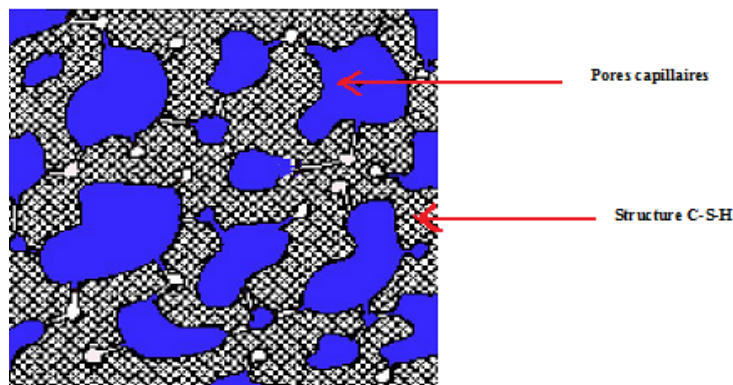


Figure 1.8 : Faible Perméabilité

(Pores capillaires segmentés et partiellement connectés) (photos NEVIL)

- **Masses volumiques des granulats:**

Les masses volumiques des granulats sont définies suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [47, 49, 50, 51, 52].

- **Masse volumique apparente (en vrac) :**

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores inter granulaires.

- **La Masse Volumique Absolue :**

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (sans pores). Il existe 3 façons généralement employées pour déterminer ces masses volumiques en fonction de la précision recherchée et de la nature du granulat:

- Méthode de l'éprouvette graduée,
- Méthode de la mesure au pycnomètre: La masse des particules solides est obtenue par pesage, le volume est mesuré au pycnomètre,
- Méthode de la pesée hydrostatique: Cette méthode est également utilisée pour déterminer des volumes apparents après paraffinage du matériau ou par graissage.

- **L'absorption de l'eau du gravier**

En général les graviers sont plus moins poreux. C'est rare de trouver des graviers entièrement compacts. Lors de leur contact avec l'eau cette dernière s'infiltré dans les grains de gravier à travers les pores et les vides. Normalement l'absorption est

d'autant plus grande que la porosité est plus grande, mais cette relation en ce sens n'est pas obligatoire, parce que l'infiltration de l'eau dans les grains elle dépend non seulement de leur porosité, mais encore de l'état des pores et des vides ; les pores ouvertes laissent entrer l'eau, tandis que les pores fermées ne laissent pas l'eau passer. L'eau pénètre profondément et facilement à travers les pores et les vides liées l'un à l'autre par des canaux.

Le gravier absorbant de l'eau de pluie devient humide. Il faut prendre en compte cette humidité qui comprend la quantité d'eau se trouvant dans le grain de gravier, sur ces surfaces et dans les vides entre les grains, car lors de la détermination de la composition du béton, si on ne tient pas compte de cette humidité, la quantité d'eau de gâchage devient superflue, ce qui diminue la résistance du béton d'après la loi « résistance = fonction du rapport E/C » mentionnée dans le document [47, 50].

Pendant et après le mélange du béton, le gravier poreux absorbe l'eau et rend le béton frais moins fluide, moins plastique, mais par la suite l'eau contenue dans le gravier, humecte le béton de l'intérieure, ce qui crée des conditions favorables pour la poursuite de l'hydratation du ciment dans le béton.

Parfois on juge la porosité sur la base de la capacité d'absorption, mais ce n'est pas toujours juste parce que comme l'on a vu au-dessus, entre la capacité d'absorption et la porosité du gravier il n'y a pas une relation vraiment proportionnelle.

Dans le document [20] on présente le besoin en eau du gravier que l'on détermine comme suit :

- On détermine le rapport $(E/C)_c$ requis pour une pâte de ciment ayant la consistance normale (l'étalement du cône sous l'action de vibration d'une table de secousse est égale à 170 mm).
- On détermine le rapport $(E/C)_m$ requis pour un mortier de composition pondérale 1/2 (c'est-à-dire une part de ciment et deux parts en poids de sable) ayant la fluidité normale
- comme la pâte de ciment (c.à.d l'étalement est aussi égale à 170mm). on détermine ensuite l'affaissement du cône d'abrams de ce mortier (A_m).

- On détermine le rapport $(E/C)_B$ requis pour un béton de composition pondérale 1/2/3.5 (C'est-à-dire 1 part de ciment, 2 parts de sable, 3.5 parts de graviers utilisés) ayant la même fluidité (affaissement du cône) que le mortier défini ci-dessus.

A la fin on calcule le besoin en eau du gravier d'après la formule :

$$B_e = \frac{\left(\frac{E}{C}\right)_b - \left(\frac{E}{C}\right)_m}{3.5}$$

3.5 : nombre de parts de gravier rapporté à une part de ciment dans le béton.

Le besoin en eau du gravier est un facteur technologique important qui peut exprimer l'influence du gravier sur les propriétés principales du béton telles que la fluidité et la résistance [20].

Avec le béton préparé, on moule des éprouvettes qu'on fait tester à la compression après 28 jours pour déterminer sa résistance à la compression (R_b). D'après les valeurs de R_b , $(E/C)_b$ et la classe du ciment R_c , on peut déterminer la valeur de (**A**) dans l'expression de la résistance à la compression comme suit :

$$A = \frac{R_b}{R_c \left(\left(\frac{E}{C} \right)_b - 0.5 \right)}$$

L'expérience montre que le besoin en eau du gravier (naturel) se trouve dans la limite de 1-4% , celui des pierres concassées provenant des roches éruptives de 2-6%, et celui des pierres concassées provenant des roches carbonatées de 5-10% (y compris l'eau d'absorption).

- **L'influence de l'impureté du gravier**

Le granulat en général et le gravier en particulier contient souvent une ou plusieurs matières, on distingue deux sortes d'impureté : impuretés prohibées, et impureté tolérée [14]. L'impureté prohibée se présente comme le charbon, les bois ou leurs résidus (cendre, mâchefer, etc), l'argile en morceaux et les scories de toutes provenances. Les matières organiques même en très petites quantités peuvent nuire au durcissement du ciment et les acides formés par la décomposition des déchets végétaux (acide humique) se combinent aux alcalins du ciment.

L'impureté tolérée se présente comme les sulfates (gypse) et sulfures (pyrite..). la teneur de ceux-ci dans le granulats est transformée en teneur en SO_3 , qui ne doit pas dépasser la limite autorisée de 1%.

La répartition de ces impuretés doit être uniforme. En aucun cas on ne doit trouver des morceaux d'impureté ayant un volume supérieur à 0.5 cm^3 . Les matières solubles et extra-fines sont tolérées à condition de ne pas dépasser 5%. Remarquons que les matières extra-fines comme l'argile et les poussières peuvent former une pellicule sur les surfaces des grains, ce qui empêche l'adhérence de ceux-ci à la pierre de ciment dans le béton, par conséquent on aura une diminution de la résistance du béton, surtout la résistance à la traction et à la flexion. En outre, l'argile et les poussières absorbent l'eau et augmentent ainsi le besoin en eau du gravier, ce qui conduit à l'abaissement plus ou moins fort de la résistance du béton [33].

La teneur autorisée des impuretés dans le granulats est spécifiée dans les normes de différents pays. En EX-URSS les normes spécifient que la teneur en argile et poussières dans le granulats ne doit pas dépasser 2% pour les bétons de classes inférieures à 300 et 1% pour les bétons de classes supérieures ou égales à 300.

Pour la pierre concassée d'origine calcaire, la teneur en poussière autorisée est 3% pour les bétons de classes inférieures à 300 et 2% pour les bétons de classes supérieures ou égales à 300.

La poussière calcaire s'avère utile pour les bétons maigres (avec faible dosage en ciment) [3, 53]. L'enlèvement entier ou partiel des impuretés du gravier se fait efficacement par lavage [1], [54]. (A .M. Neville) présente les impuretés qui peuvent être rencontrées dans les granulats en Trois grandes catégories : les matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leur présence à la surface des granulats interférant avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [8].

D'autres pollutions peuvent être rencontrées, Les normes relatives aux granulats définissent des seuils pour certaines impuretés comme: les éléments coquilliers dans

les gravillons alluvionnaires, les matières organiques dans les sables, les chlorures et les sulfates et sulfures.

1.3.6 Caractéristiques chimiques :

- L'altérabilité du gravier et la réaction alcalis - granulats

Le gravier (ou granulats en générale) peut contenir de l'opale et des calcaires dolomitiques ; ces derniers peuvent réagir avec l'alcali existant dans le ciment, en formant de nouveaux composés chimiques expansifs, ce qui peut causer des contraintes internes menant à la fissuration du béton. Ce problème a été profondément étudié aux ETATS-UNIS et au CANADA [55], [56].

Deux conditions nécessaires assurent la réaction alcalis- granulats :

La présence de SiO_2 hydraté dans le gravier et la teneur en alcalin à 0.6% dans le ciment utilisé dans le béton [13] on remarque que même pour une teneur en alcalin inférieure à cette limite le dégât causé par la réaction se produit, mais c'est un cas particulier [55]. La formule pour calculer la teneur en alcalin dans le ciment se présente comme suit :

$$\text{Alcalin \%} = \text{NaO}_2 + 0.658 \text{ K}_2\text{O} \quad (\text{Norme ASTM C 114.69}) [13]$$

Selon les normes Américaines ASTM C 114.69, la réaction alcalis-granulats est évaluée d'après le diagramme (Figure 1.12).

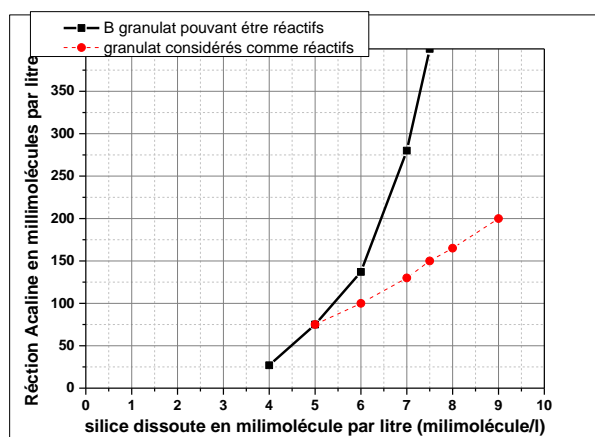


Figure 1.9 : Courbe délimitant la réactivité et non-réactivité des granulats. diagramme [ASTM C 114.69]

Les granulats ayant des réactions alcalines sont appelés granulats réactifs, les granulats n'ayant pas de réaction alcaline sont appelés granulats non réactif. La réaction commence par l'attaque de l'hydroxyde alcaline dérivée de l'alcali (Na_2 et K_2O) dans le ciment sur la silice dans ce granulats. Il résulte de cette réaction la formation d'un gel d'alcali-silicate et une altération des bords du granulats.

Le gel d'alcali-silicate est du type (d'expansion illimitée) il absorbe l'eau pour augmenter son volume. Le gel est entouré par la pâte du ciment, la pression intérieure provoque une expansion, une fissuration et une destruction de la pâte de ciment. Pour cette raison la présence de ce gel est nuisible au béton.

Une petite quantité de gel relativement tendre peut être emportée par l'eau et se dépose dans les fissures formées par l'expansion du granulats.

La dimension des particules de silice influe sur la vitesse de la réaction ; les particules fines (20-30 μm) causent l'expansion pendant un ou deux mois, les particules plus grandes causent l'expansion après quelques années.

- **La teneur en chlorures :**

Un sable provenant du bord de mer, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité [8].

La quantité d'ions chlore acceptable dans les granulats est limitée à: 1 % pour les bétons non armés; 0,40 % pour les bétons armés selon Neville [8] et selon la norme européenne NF EN 206-1 [58].

Il a été constaté sur des cas de bétons recyclés la présence de chlorures dépassant les limites recommandées [59].

Ceci est semblablement lié à la contamination des ouvrages par les chlorures au cours leurs exploitations avant démolition.

- **La teneur en sulfate :**

La norme européenne EN-12-620 définit la limite de la teneur en sulfate à 1 % [60]. La teneur en sulfate des granulats recyclés est en relation avec la quantité de la pâte cimentaire attachée aux granulats. La contrainte de compression du béton qui emploie 3% de plâtre est de 15 % inférieur à celui sans plâtre. Toutefois, les granulats doivent être lavés avant leur utilisation et la démolition sélective pourrait être considérée comme une alternative efficace [43].

1.4 Influence de la Compacité et homogénéité des mélanges granulaires.

La compacité d'un mélange granulaire est égale, au volume solide V_s dans le volume total unité V_T ,

$$C = 1 - V_s$$

La prévision de la compacité d'un mélange granulaire est un problème capital pour le béton et pour de nombreuses autres applications industrielles comme pour les matériaux composites qui sont fabriqués avec fractions granulaires noyées dans une matrice liante. L'objectif est de combiner les grains de façon à minimiser la porosité, dans le but de minimiser l'apport en liant.

Selon Larrard [61]: les compacités réelles augmentent avec la grosseur des grains, ce comportement peut s'expliquer par des différences de forme selon la taille, à taille égale, les grains arrondis sont plus compacts que les grains concassés.

La compacité d'un mélange de grains poly dispersés dépend des paramètres suivant :

- La forme des grains et leur état de surface.
- La taille des grains.
- L'empilement des grains.

La stratégie de formulation revient à proportionner les différents granulats pour obtenir une courbe granulométrique proche d'une courbe idéale qui pourra fournir une compacité maximale. L'optimisation finale est faite par ajustement expérimentaux, ce que nous essayons de faire dans notre recherche.

Le modèle d'empilement compressible (MEC) couvre la combinaison d'un nombre quelconque de granulats ; et de distributions granulaires également quelconque.

Les premiers modèles linéaires de compacité pour mélanges granulaires ont été élaborés Par Lee [Lee 1970], puis par Stovall [Stovall et al.1987], F Larrad à poser les fondements du (MEC) (modèle d'empilement compressible) [62], Larrad se base sur la compacité virtuelle qui est définie comme étant la compacité maximale atteinte pour un mélange granulaire donné (avec le maximum de serrage).

La compacité réelle est déduite de cette compacité virtuelle, par référence à un indice de serrage. Le calcul de la compacité réelle, est accompagné d'une série d'expériences d'étalonnage.

L'une des méthodes de formulation les plus connues [Dreux 1970] [63] est basée sur une courbe « idéale » dite Courbe type de Dreux [13], même principe que pour le modèle d'empilement compressible (MEC), le coefficient « A » (proportion de grains de taille moitié à celle de la taille maximale) est tabulée pour différents types de granulats et d'énergies de serrage. Cette approche suppose qu'un granulat idéal peut résulter du mélange binaire de deux granulats de base (gros et fin), chacun étant distribué régulièrement dans un diagramme semi-logarithmique. Dreux ne se réfère à aucune théorie pour fonder ses propos. Il a seulement rassemblé des courbes granulaires réelles de « bons bétons » réalisés sur chantier, et il a lissé ces courbes en utilisant son modèle. C'est le commentaire de F. DE. Larrard [64]

Plusieurs courbes granulaires ont été reconstituées, et la valeur optimale de « A » a été recherchée expérimentalement, pour chaque famille de granulats. L'accord entre modèle et expérience est excellent pour les granulats roulés. Il est encore bon pour les granulats concassés. [65]

Données de Joisel :

Joisel réalisa une série de mesures de compacité sur des mélanges secs, dans le but de construire une méthode de formulation de bétons.

Joisel obtint ainsi une riche collection de données expérimentales, sa recherche fut basée sur les granulats roulés de 0.2 à 12 mm, les échantillons furent mélangés manuellement à plat, déversés dans une boîte cubique de 14*14*14 cm, soumis à une vibration (sans pression), arasés à la truelle, puis pesés. [Joisel 1952].

Joisel a travaillé sur des mélanges binaires et sur des mélanges quaternaires et a concrétisé 165 mesures expérimentales aboutissant à une relation entre la compacité en fonction du pourcentage de grains fins.

D'autres travaux élaborés par Kanta Rao et Krishnamoorthy, [66, 128].

qui ont traité le cas du dosage optimum des bétons de polymère. Ils ont entrepris un grand nombre d'expériences basées sur des mélanges binaires, les mesures de compacité ont été faites selon une norme indienne, en compactant les mélanges par piquage avec une tige.

Le model a été validé successivement sur des mélanges binaires et ternaires ; sur six fractions discontinues de granulats et sur six autres fractions continues .les précisions obtenues sont aussi bonnes avec les données de la littérature qu'avec les donnés originales.

Notre travail dans la présente thèse consiste à étudier la compacité de mélanges binaires et ternaires en faisant un mélange entre gravier roulé et gravier concassée.

1.5 Choix des graviers

D'après le document [2] le choix d'un gravier pour le béton peut être fait en fonction de plusieurs critères dont les principaux sont :

- La résistance aux ambiances agressives ;
- Les caractéristiques mécaniques ;
- L'adhérence au liant.

Quand le choix est possible, il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la forme, la granulométrie, et l'absorption d'eau, [34].

En fait, dans bien des cas, le choix est restreint, du fait de la distance entre la Carrière et le chantier et de l'incidence du coût du transport sur le prix de revient.

Mais il est parfois nécessaire de s'approvisionner à une carrière plus éloignée afin de satisfaire aux exigences des cahiers des charges.

PARTIE. B. BETON

D'après sa structure le béton durci est considéré comme un conglomérat naturel, dans lequel les grains de granulat fin (sable) s'arrangent dans les vides entre les grains de gros granulat (gravier ou pierre concassée) et les grains sont liés les uns aux autres par couches minces de la pierre de ciment .Le gros granulat sert de squelette pour le béton, ce qui lui permet de résister aux charges.

1.6 Propriétés du béton

Le béton frais (obtenu après gâchage) et le béton durci (obtenu après durcissement) possèdent des propriétés importantes qu'on doit déterminer pour apprécier la qualité du béton [29].

Les propriétés les plus importantes sont : l'ouvrabilité (maniabilité), la résistance et la durabilité. D'après M.Venuat, [34], l'ouvrabilité est une caractéristique provisoire ; c'est l'aptitude que présente le béton à être transporté sans ségrégation est sans détachement ou ressuage de l'eau, et l'aptitude à être mis en œuvre facilement sans malfaçon (c'est-à-dire l'homogénéité est assurée).

Une bonne ouvrabilité a pour conséquence une garantie de qualité du béton durci. L'aspect principale de l'ouvrabilité est exprimé par la fluidité ; les facteurs principales qui influence la fluidité sont :

- La granulométrie du granulat (une bonne granulométrie correspondant à une porosité faible, donne une bonne fluidité comme c'est le cas d'une teneur élevée des grains fins), l'angularité des grains de granulat (forme ronde et surfaces lisse des grains donne une bonne fluidité) et d'autres facteurs .
- La résistance du béton se présente comme la capacité du béton de résister aux charges. La résistance du béton dépend nettement de la qualité du granulat, surtout du gros granulat.

L'influence du granulat sur la résistance du béton est indiquée par la valeur de (A) dans l'expression de la résistance du béton donnée par le professeur B.Xkramtaev [20] :

$$R_b = A R_c \left(\frac{C}{E} + 0.5 \right),$$

Où A est d'autant plus grand que la qualité des granulats est bonne d'après B.Xkramtaev [20]

La résistance des granulats n'exerce pas une influence sensible sur la résistance du béton, tant qu'elle est supérieure à la classe de résistance prévue par le projet. L'utilisation de granulats de faible résistance, inférieure à la classe de résistance nécessaire peut diminuer sensiblement la résistance du béton, ou nécessiter une grande dépense en ciment. La rugosité de la surface des granulats influe aussi sur la résistance

du béton. Contrairement au gravier roulé, les grains des pierres concassées ont une surface rugueuse, ce qui assure une meilleure adhérence avec la pierre de ciment, et les bétons préparés à partir de la pierre concassée sont plus résistants que les bétons fabriqués avec des graviers roulés, toutes les autres conditions étant égales.

On peut dire que la résistance assure l'existence des structures sous l'influence des charges, tandis que la durabilité assure l'existence des structures sous l'action de l'ambiance agressive. Ces deux propriétés assurent donc la longévité des structures.

1.7. Composition du béton

Pour assurer la fluidité, la résistance, et d'autres propriétés requises du béton, il faut lui trouver une composition convenable, c'est-à-dire il faut déterminer la dépense (en poids) en matériaux constituant 1 m³ du béton frais dans un cas déterminé pour obtenir un mélange ouvrable, un béton de résistance et d'autres propriétés imposées.

Si le béton est mal dosé, il ne pourra pas avoir les caractéristiques requises, ou bien donne naissance à un surdosage indésirable du ciment ; dans ce cas le coût du béton (prix de revient) augmente, d'où l'augmentation du pris de revient de l'ouvrage.

1.7.1 Méthodes de formulation des bétons sans additions

Les méthodes de formulation des bétons sont utilisées pour déterminer les quantités relatives des différents constituants du mélange dans une configuration simple permettant d'obtenir les propriétés rhéologiques souhaitées du mélange à l'état frais ainsi que les résistances mécaniques requises pour le matériau à l'état durci.

Ces méthodes sont basées sur des relations empiriques qui relient les paramètres de formulation et les propriétés requises du béton.

Les méthodes de formulation des bétons les plus utilisées en France sont celles de Dreux [13] [41] ou de Faury [67] qui s'appuient sur quatre relations principales : [68].

- Une relation entre la résistance en compression du béton et le rapport eau/ciment dans la matrice cimentaire en fonction de la classe des ciments et la nature des agrégats. Cette relation s'appuie sur des modèles prédictifs de la résistance en compression comme ceux de Bolomey ou de Féret.
- Une relation entre le rapport eau/ciment et le dosage en ciment, d'une part et sa consistance, d'autre part.

- Une relation entre la consistance du béton frais et la compacité ou la masse volumique apparente du mélange frais après la mise en place en fonction des moyens de serrage et la dimension maximale des granulats.
- Une relation qui permet de définir le rapport entre les classes granulaires grossières et les classes granulaires fines conduisant à l'optimisation du squelette granulaire du mélange et à l'obtention de la compacité maximale.

La première relation permet de relier les résistances requises pour le béton à un paramètre clef de la formulation du béton qui est le rapport E/C.

A partir de ce rapport et d'un dosage minimal en ciment fixé pour l'ouvrage ou de la consistance désirée, on détermine avec la deuxième relation soit le dosage en eau et la consistance, soit le dosage en ciment et en eau.

A partir du dosage en ciment, la troisième relation permet de déterminer le volume total des granulats et la quatrième relation permet de déterminer le volume relatif des différentes classes granulaires à mettre en œuvre dans le mélange.

Sur la base des relations précédentes, il paraît donc tout à fait possible de définir la composition de chaque constituant d'un béton courant en partant des valeurs requises pour la résistance en compression et la consistance ou le dosage en ciment.

De ce fait, ces méthodes sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats.

Il existe des méthodes différentes Dans le monde pour déterminer la composition du béton, parmi ces méthodes on peut citer :

- La méthode de Bolomey (Suisse).
- La méthode de Valette (France).
- La méthode de Joisel (France).
- La méthode d'Abrams (USA).
- La méthode Indienne . [69]
- La méthode des volumes absolus (Russe).
- La méthode des suppositions (Russe). [4] et d'autres.

Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important.

Dans le document [70] on présente l’application de différentes méthodes pour le calcul de la composition du béton sans additions en Algérie.

Nous présentons ici sommairement deux méthodes importantes : méthode pratique française de Dreux-Gorisse et méthode Russe dite méthode des volumes absolus.

a/ Méthodes de Dreux- Gorisse

Présentée dans le Nouveau guide du béton ,[1], elle comprend les parties suivantes :

- 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 :

$$R_b = G R_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Où R_b : résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars ;

R_c : classe vraie du ciment à 28 jours, en bars ;

E et C : dosage en eau et en ciment, en litre et kg.

G : Coefficient granulaire donné par le tableau 1.6 en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{max}) du gravier.

Connaissant le rapport C/E et la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d’après l’Abaque (fig. 1.16)

Qualité de granulats	Dimension maximale des granulats		
	Fins $D_{max} \leq 15$ mm	Moyens $25 \leq D_{max} < 40$ mm	Gros $D_{max} \geq 60$ mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
passable	0.35	0.40	0.45

Tableau 1.6. Valeur du coefficient G

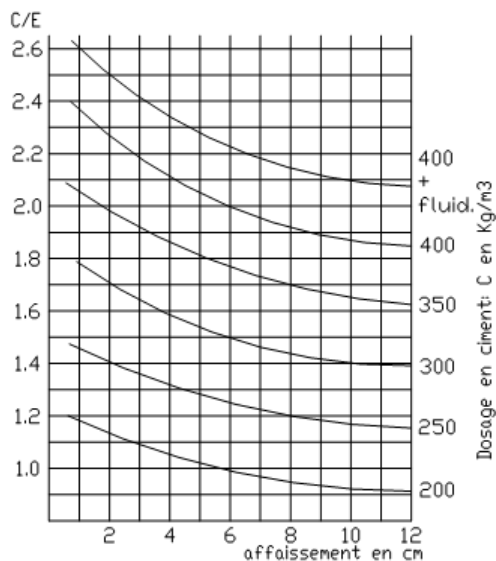


Figure 1.10 : Dosage en ciment [63]

- **Détermination du dosage en eau :**

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par

la formule :

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

- **Détermination du dosage en granulat:**

Sur un graphique d'analyse granulométrique (fig ...) on trace la courbe granulaire de référence OAB. Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension maximale du gravier (D_{\max}), le point (O) se trouve à l'origine des coordonnées et le point de brisure (A) a des coordonnées ainsi définies :

- **En abscisse :** (à partir de D_{\max})

Si $D_{\max} \leq 20\text{mm}$, l'abscisse est $D_{\max} / 2$;

Si $D_{\max} \geq 20\text{mm}$, l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à (D_{\max}).

- **En ordonnée:**

Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} - K,$$

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 ici prépondérante), ce coefficient dépend également du module de finesse du sable

vibration	Faible		normale		puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+ fluidifiants	-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 1.7 valeur du terme correcteur K. [63]

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 granulaire du sable, au point de 5% de la courbe granulaire du gravier (si on utilise le gravier de fraction unique) ou de la première fraction (si on utilise le gravier de plusieurs fractions) et ainsi de suite. On lit alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage les pourcentages en volume absolu de chacun des granulats (sable, première fraction et deuxième fraction du gravier).

Si (C) est le dosage pondéral en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$V_c = \frac{C}{\rho_c}$$

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

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est : $V_g = 1000K - V_c$

Où K : coefficient de compacité qui est donné par le (Tableau 1.8).

consistance du béton frais	mode de serrage	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}
		5 mm	10 mm	12.5 mm	20 mm	31.5 mm
molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810
	vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815

	vibration normal	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820
plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820
	vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825
	vibration normal	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830
	vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835
ferme	vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.840
	vibration normal	0.780	0.810	0.825	0.835	0.845
	vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.850

Tableau 1.8. Coefficient de compacité. [63]

Remarque :

Ces valeurs sont convenables pour les granulats roulés, sinon il convient d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassée on déduit 0.01
- Sable et gravier concassé on déduit 0.03

Pour $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on a le terme correctif $K = \frac{C-350}{5000}$,

Les volumes absolus de chacun des granulats sont alors donnés comme suit :

$$V_s = S \cdot V_{ag}$$

$$V_g^1 = G_1 V_{ag}$$

$$V_g^2 = G_2 V_{ag} \quad ; \text{ etc....}$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont $\rho_s, \rho_g^1, \rho_g^2$, leurs masses sont donc respectivement : $S = V_s \rho_s$; $G_1 = V_g^1 \cdot \rho_g^1$; $G_2 = V_g^2 \cdot \rho_g^2$ et on trouve la masse totale des granulats. Il reste à tester la composition ainsi définie par l'essai de fluidité et d'écrasement des éprouvettes et d'apporter, suivant les résultats des essais, les corrections nécessaires.

Cette méthode est simple et pratique, mais elle utilise les graphes et tableaux préétablis pour déterminer le dosage en ciment et granulats, cela peut conduire à une erreur possible.

b/ Méthode des volumes absolus [4], [71].

La méthode des volumes absolus comprend les opérations suivantes ;

- Détermination du rapport $\frac{C}{E}$:

a / pour béton à $\frac{C}{E} \leq 2.5$:

$$R_b = A R_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \text{d'où } \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A R_c} + 0.5$$

b/ pour béton à $\frac{C}{E} > 2.5$:

$$R_b = A' R_c \left(\frac{C}{E} + 0.5 \right) \quad \text{d'où } \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A' R_c} - 0.5$$

Les coefficients A et A' sont donnés au tableau 1.9.

Granulats et liants	A	A'
Qualité supérieure	0.65	0.43
Qualité ordinaires	0.60	0.40
Qualité inférieure	0.55	0.37

Tableau 1.9 Coefficients A et A' .[20]

Remarque :

Les matériaux de qualité supérieure sont : les pierres concassées provenant des roches compactes à haute résistance mécanique, le sable de grosseur optimale, et le ciment portland de classe élevée, les granulats lavés et fractionnés avec composition optimale du mélange des fractions.

Les matériaux ordinaires sont : les granulats de qualité moyenne y compris les graviers , le ciment d'activité moyenne (325 , 400), ou ciment portland aux laitiers.

Les matériaux de qualité inférieure sont : les gros granulats à faible résistance, les sables fins et les ciments de faible activité (< 325).

Détermination du dosage en eau pour 1 m³ de béton :

Il se fait en prenant la valeur convenable du tableau 1-10.

Fluidité du béton frais (affaissement du cône) (cm)	Dosage en eau (l) par rapport à D_{max} (cm)					
	Gravier concassé			Gravier roulé		
	10	20	40	10	20	40
1	195	185	170	185	170	155
2 – 2.5	200	190	175	190	175	160
3 - 4	205	195	180	195	180	165
5	210	200	185	200	185	170
7	215	205	190	205	190	175
8	220	210	195	210	195	180
10 - 12	225	215	200	215	200	190

Tableau 1.10 : Dosage en eau dans 1 m^3 du béton. [20]

Remarque :

Les valeurs du tableau 1-10 sont valables pour les bétons à ciment portland, sable moyen et gravier roulé. Avec la pierre concassé, une addition de $10 \text{ l} / \text{m}^3$ sera apportée.

- Détermination du dosage en ciment :

$$C = \frac{c}{E} \cdot E \quad , \quad (\text{kg})$$

- détermination du dosage en gravier :

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{S}{\rho_S} + \frac{G}{\rho_G} = 1000 \quad (1)$$

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{S}{\rho_S} + E = P_G \cdot \frac{G}{\rho_G} \cdot \alpha \quad (2)$$

Où, C, E, S, G : Dosage en ciment, eau, sable et gravier, $\rho_E = 1$

α : coefficient d'écartement des grains du gravier dans le béton.

α est pris égale à 1.05 – 1.10 pour les mélanges secs.

à 1.2 – 1.4 pour les mélanges fluides.

P_G : porosité du gravier.

En résolvant simultanément les deux équations (1) et (2) on trouve :

$$G = \frac{1000}{P_G \cdot \frac{\alpha + 1}{\rho_S}} \quad , \quad \text{en (kg)}$$

- Détermination du dosage en sable :

$$S = \left(1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + E + \frac{G}{\rho_G} \right) \right) \cdot \rho_S \quad , \quad \text{en (kg)}$$

Il reste à vérifier la composition ainsi définie par des essais de fluidité, et de résistance à la compression et apporter, si besoin les corrections nécessaires. Cette méthode s'avère logique et plus simple dans la pratique.

Toutes ces méthodes ont fait leurs preuves pour des bétons courants, par contre, la formulation des mélanges avec additions minérales pose encore de nombreuses questions malgré que de multitudes études sur les méthodologies de formulation des bétons avec additions minérales aient vues le jour pour optimiser la quantité d'addition ou définir les critères qui permettent d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques spécifiques pour les bétons.

1.7.2 Formulation des bétons avec additions :

1.7.2.1 Normalisation :

La norme européenne EN 206-1 définit les conditions de prise en compte des additions minérales en substitution partielle du ciment dans la formulation des bétons en considérant le concept de liant équivalent et définit un coefficient forfaitaire (k) de prise en compte des additions minérales qui est déterminé pour les cendres volantes et les fumées de silice utilisées avec un ciment de type CEM I.

Le concept du coefficient (k) et de liant équivalent autorise la prise en compte des additions de type II et de certaines additions de type I :

- En remplaçant le rapport eau/ciment par le rapport eau/ (ciment + k x addition).
- En remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent.

Le liant équivalent est constitué de ciment de type CEM I 42.5 N ou CEM I 42.5 R ou CEM I 52.5 N ou CEM I 52.5 R et d'une des additions normalisées substituables au ciment au sens et sous les conditions de la norme EN 206-1.

Ce coefficient définit la proportion de l'addition qui participe avec le ciment dans la notion du liant équivalent L_{eq} , comme suit :

$$L_{eq} = C + k \cdot F$$

(I.1)

C : la quantité de ciment dans le béton (kg/m³),

F : la quantité d'addition dans le béton (kg/m³),

K : un coefficient de prise en compte des additions minérales dans le liant.

Pour des bétons utilisés en France, par exemple, et par manque de données chez nous, l'aptitude générale à l'emploi des additions est établie pour les valeurs du coefficient (k) données. Il en résulte que la norme européenne EN 206-1 limite l'application de la notion du liant équivalent aux additions du type II et à d'autres types d'additions dans la mesure où l'aptitude à l'emploi est établie sans proposer aucune méthode permettant d'établir cette aptitude à l'emploi. La France étend son application aux additions calcaires et siliceuses qui sont considérées par la norme européenne comme étant des additions quasi inertes (type I). [129]

Dans ce cas, une addition calcaire ou siliceuse quasi inerte classée comme addition du type I selon la norme européenne EN 206-1, lui correspond selon la norme française P 18-305, un coefficient (k) égal à 0.25 lorsqu'elle est substituée à un ciment CEM I de classe 42.5 et supérieure. D'autre part, la valeur de (k) pour une addition de cendres volantes substituable à un ciment CEM I 42.5, prend une valeur de 0.4 selon la norme européenne EN 206-1, alors qu'elle peut atteindre une valeur de 0.6 selon la norme française P 18-305.

Les Additions de type II sont les Cendres volantes pour béton, Fumée de silice, Laitiers vitrifiés moulus de Hauts fourneau de classe B.

Les Additions de type I sont les Additions calcaires et les Additions siliceuses.

L'homogénéisation des conditions expérimentales pose toujours des problèmes dus à la modification des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires en présence d'additions.

En effet, la consistance des mélanges cimentaires en présence d'additions diffère souvent de celle des mélanges de référence sans additions, ce qui modifie très significativement les conditions de mise en place et de serrage et peut entraîner des variations importantes des propriétés mécaniques et de durabilité des matériaux confectionnés. Or, les méthodologies expérimentales les plus récentes ne tiennent pas compte de l'effet granulaire engendré par l'introduction des additions minérales dans

les mélanges cimentaires, alors qu'il peut influencer significativement les indices d'activité.

On peut donc avancer que les normes européennes ne proposent pas encore de cadre méthodologique rigoureux pour définir le coefficient d'activité (k) d'un liant comprenant un ciment plus une addition minérale normalisée.

1.7.2.2 Les études récentes sur la prise en compte des additions dans la formulation des bétons

Parmi les études réalisées dans le domaine de la formulation des bétons sont basées sur l'adaptation des modèles prédictifs de résistance en compression existants et ont considéré spécialement les fumées de silice fortement active qui sont utilisées dans les mélanges cimentaires pour obtenir des bétons de hautes performances.

Ainsi, sur la base du modèle prédictif de Féret [12], :

la résistance en compression à 28 jours est définie comme suit :

$$R_{C28} = G_F f_{C28} \left[\frac{C}{C+e+v} \right]^2 \quad (1.2)$$

C : désigne le volume de ciment dans le béton en l/m³ ;

e : désigne le volume d'eau dans le béton en l/m³ ;

v : désigne le volume d'air occlus dans le béton en l/m³ ;

G_F : désigne un coefficient qui dépend de la nature des granulats ;

f_{C28} : désigne la résistance en compression du mortier normal à 28 jours.

Nous donnons cette formule de Féret à titre d'exemple, il existe beaucoup d'autres formules selon différents modèles prédictifs, comme le modèle de Bolomey, le modèle De Larard [72], le modèle de Kadri [73].

Une approche plus générale a été avancée par Lawrence en étudiant l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires [74], dans laquelle il propose un schéma de principe pour l'évaluation de l'effet chimique et physico-chimique des cendres volantes et des additions calcaires et siliceuses sur la résistance en compression des mortiers. Dans cette approche, les additions sont introduites en substitution massique du ciment en conservant constant le rapport massique eau / (ciment+addition). [130]

Lawrence a montré que la considération d'un coefficient (k) qui désigne l'activité des additions de manière forfaitaire comme dans le cas de la normalisation française ou européenne ne pouvait pas être utilisé dans les modèles prédictif, car les résultats obtenus ont démontré que la valeur de ce coefficient est variable et dépendait de l'âge et des paramètres de formulation du béton ou du mortier tels que, la nature, le dosage et la finesse de l'addition, du type et du dosage en ciment et le dosage en eau et en granulats. Plusieurs études antérieures telles que celles de Cyr, Babu et Rao [45] et Goplan [46], avaient déjà confirmé ce point de vue.

1.8 Adjuvants, plastifiants, réducteurs d'eau

1.8.1 Définition [norme en 934-2]

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à des doses inférieures ou égales à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci.

Un adjuvant plastifiant réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement ou l'étalement, ou qui produit les deux à la fois.

Ces adjuvants doivent être conformes aux exigences du tableau 1 et aux exigences complémentaires du tableau 2 [norme EN 934-2].

1.8.2 Description

Les plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains de ciment ainsi que les autres fines et ultrafines. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C conduisant à une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité.

A même dosage, leur effet dépend de la réactivité du ciment, des ions en solution dans l'eau interstitielle du béton, de la durée de malaxage et du moment plus ou moins tardif de leur introduction [12,13].

Les plastifiants réducteurs d'eau peuvent être classés d'après leur nature ionique et on retrouve ainsi des réducteurs d'eau anioniques, cationiques ou non ioniques ; les réducteurs d'eau anioniques sont plutôt les plus utilisés dans le béton. Ils peuvent être

classés d'après leur nature chimique et on trouve les réducteurs d'eau à base de lignosulfonates, de sels d'acide carboxylique ou de carbohydrates.

Les plastifiants sont généralement utilisés à des doses comprises entre 0.3 et 0.5 % du poids de ciment et se caractérisent souvent par un effet secondaire de retardateur de prise à dosage plus élevé [13].

1.8.3 Mécanismes d'action

Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas ayant une structure en château de carte, c'est la floculation.

Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains qui tend à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des floes et empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment qui se trouvent en quelques sortes soudés les unes aux autres (figure I.17).

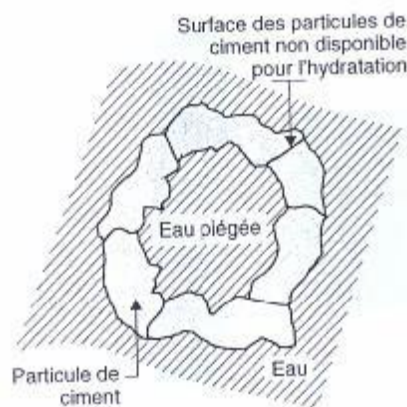


Figure I.11 : Floe de ciment en l'absence de réducteur d'eau selon Rixom et Mailvaganam, [75].

Les principaux constituants actifs de ces adjuvants sont des agents tensioactifs qui sont des substances se concentrant à l'interface de deux phases non miscibles en modifiant les forces physico-chimiques qui agissent sur cette interface. Ces substances sont adsorbées sur les grains fins de ciment ou d'additions en suspension dans l'eau leur conférant une charge négative qui conduit à une répulsion entre les grains qui sont ainsi défloculés et leur suspension se trouve stabilisée (figure I.18).

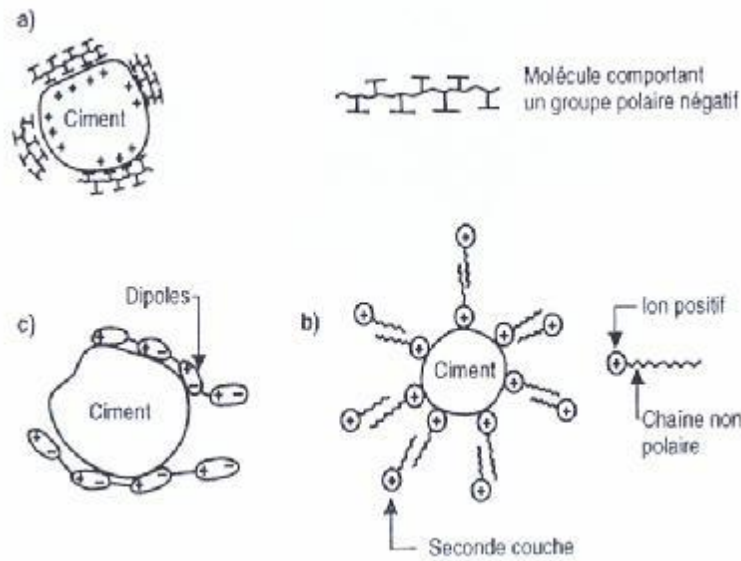


Figure I.12 : Mode d'action des molécules des réducteurs d'eau suivant leur nature ionique selon Keijger, [76].

a- Mode d'action d'un réducteur d'eau anionique.

b- Mode d'action d'un réducteur d'eau cationique comportant une chaîne non polaire.

c- Mode d'action des réducteurs d'eau non ioniques

Dans ce cas, les adjuvants réducteurs d'eau augmentent la surface des grains de ciment qui engendrent l'hydratation initiale, ainsi que la quantité d'eau disponible pour l'hydratation. De plus, les charges électrostatiques sont à l'origine du développement autour de chaque grain, d'une gaine formée de molécules d'eau orientées qui empêchent le rapprochement des grains les uns vers les autres et qui ont alors une plus grande mobilité et l'eau libérée du système floculé devient disponible pour lubrifier le béton et fait croître sa maniabilité [77].

1.8.4 Influence du dosage en plastifiant

La réduction d'eau augmente en général avec le dosage en plastifiant (figure I.19), mais dépend aussi de la teneur en C_3A du ciment, de la teneur en alcalins du ciment, du dosage en ciment, ainsi que de la surface spécifique du ciment et de la nature du sulfate de calcium utilisé lors du gypse du ciment.

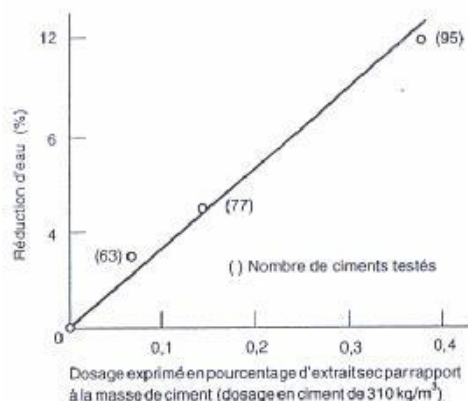


Figure I.13 : Influences du dosage en réducteur d'eau, sur le pourcentage de réduction d'eau selon Dodson [78]

Le pourcentage de réduction d'eau augmente linéairement avec le pourcentage d'extrait sec des bétons à même quantité de ciment. Ceci montre la prépondérance de l'effet de surface dans le mode d'action du réducteur d'eau utilisé.

Le pourcentage de réduction d'eau diminue linéairement avec la teneur en C3A dans le ciment, et donc, plus le ciment contient du C3A et moins le réducteur d'eau est efficace. Ceci est expliqué par le fait qu'un certain nombre de molécules du réducteur d'eau se combinent avec le C3A pour former des composés organo minéraux et ne contribuent plus à la dispersion des grains de ciment.

La teneur en alcalins tend à réduire l'efficacité des réducteurs d'eau, mais cet effet n'est pas très important.

Le pourcentage de réduction d'eau diminue avec l'augmentation du dosage en ciment. Ceci peut être expliqué par le fait que le sulfate de calcium se dissout de plus en plus difficilement dans une eau de gâchage de plus en plus chargée en ions de toutes sortes.

Comme le principal effet des adjuvants réducteur d'eau est la dispersion des grains de ciment entraînant l'augmentation de la surface disponible des grains pour l'hydratation ; cette dernière progresse à une plus grande vitesse les premiers instants, d'où une augmentation de la résistance du béton adjuvanté. Une répartition plus uniforme du ciment pourrait elle aussi contribuer à l'augmentation de la résistance, car le processus d'hydratation est amélioré [79].

Ceci est particulièrement perceptible dans les bétons à jeunes âges, mais peut se prolonger sous certaines conditions [80].

Bien que les adjuvants réducteurs d'eau influencent la vitesse d'hydratation du ciment, la nature des produits hydratés reste inchangée, de même que la structure de la pâte de ciment hydratée [81].

D'autre part, Emoto et Bier [82], ont montré en étudiant l'influence des plastifiants sur le comportement rhéologique et l'hydratation cinétique, que la fluidité des matériaux cimentaires était fortement influencée par le type de plastifiants qui retardent l'hydratation du ciment.

1.9. Adjuvants superplastifiants haut réducteurs d'eau

1.9.1. Définition [Norme EN 934-2]

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux à la fois.

1.9.2. Description

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau est la désignation qui se rapporte à des produits qu'on appelait auparavant fluidifiants" [13].

Ce sont des réducteurs d'eau beaucoup plus efficace et très différents des adjuvants plastifiants réducteurs d'eau. Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse, fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de poly-naphtalène sulfoné, de sel de sodium de poly-mélatamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester (polyacrylate), ou de lignosulfonate de grande pureté [12] ; les plus utilisés sont les deux premiers qui sont communément appelés superplastifiants à base de naphtalène

Les superplastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées [8].

Vers la fin des années 70, les superplastifiants étaient utilisés surtout pour fluidifier les bétons en utilisant des doses réduites qui ne dépassaient pas 01 à 02 litres

par mètre cube. Dans ce cas, l'action fluidifiante est limitée dans le temps, car les molécules de polymère ne se trouvent pas en nombre suffisant pour neutraliser tous les sites actifs libérés suite à la meilleure dispersion des grains de ciment

De nos jours, les superplastifiants sont utilisés à des dosages beaucoup plus élevés qui atteignent deux à vingt litres par mètre cube et permettent la confection de bétons de très grande maniabilité ou des bétons à hautes performances (figure I.20).

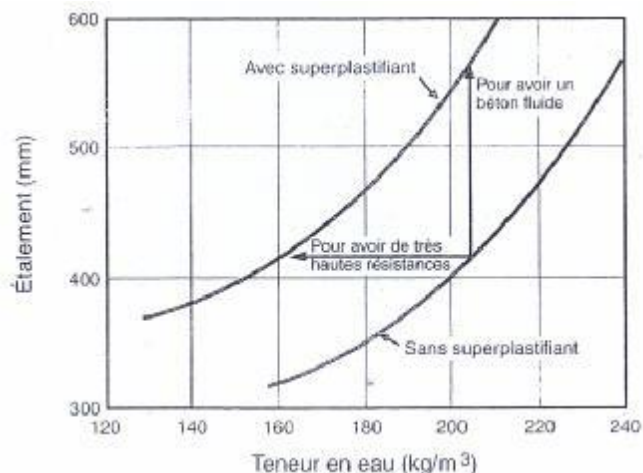


Figure I.14 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans Superplastifiant, selon Meyer [83]

Pour un rapport E/C et une teneur en eau donnés dans le béton, l'action dispersante des superplastifiants, augmente considérablement la maniabilité du béton sans qu'il perde sa cohésion. Un tel béton peut être mis en place avec peu ou pas de serrage et n'est sujet ni à au ressuage excessif ni à la ségrégation, d'où sa désignation de béton fluide.

La seconde utilisation des superplastifiants est la confection des bétons à maniabilité normale (figure I.21), mais ayant une très grande résistance en raison d'une réduction substantielle du rapport E/C.

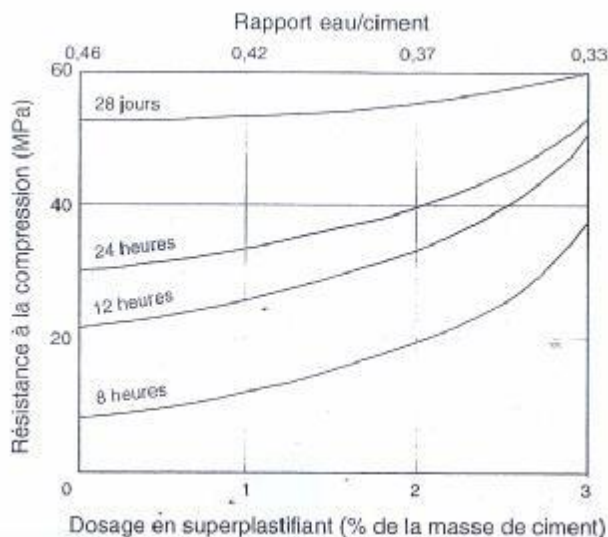


Figure I.15 : Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m³ de ciment à maniabilité constante, selon Meyer [83]

1.9 .3. Mécanismes d'action

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles viennent se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption). Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inter-particulaires de Van der Waals qui existent entre les atomes des différentes particules.

Si les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient également les forces d'interactions de double couche qui apparaissent suite à la réaction acide - base entre les atomes de surface et le liquide, en augmentant les forces de répulsions entre les particules et engendrent donc des effets importants de fluidification ou d'épaississement des suspensions

L'adsorption de grosses molécules crée des forces de répulsions, que les molécules de polymères soient chargées ou non. Les chaînes polymérisées ne peuvent pénétrer les Masse moléculaire unes dans les autres, empêchant ainsi toute floculation. Cet effet entropique s'amplifie avec la masse moléculaire et le degré de ramification du polymère [84].

Les différentes molécules de superplastifiants à longue chaîne agissent conformément aux différents mécanismes de base développés ci-dessus, en s'enroulant autour des grains de ciment et en leur conférant une charge hautement

négative de sorte qu'ils se repoussent les uns des autres, conduisant à une dispersion des grains de ciment.

Les superplastifiants à base de polynaphtalène et polymélamine sulfonés agissent surtout au niveau des forces de Van der Waals et de la force d'interaction de double couche.

Les superplastifiants à base de polyacrylates agissent principalement grâce à leur effet entropique. Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [85].

En effet, les superplastifiants constitués de molécules poly-chargées négatives, outre leur effet dispersant et leur effet secondaire retardateur, en général bénéfique, peuvent favoriser les réactions du type prise rapide. Ce comportement a pour origine l'effet inhibiteur des poly-électrolytes sur la nucléation de l'ettringite et leur aptitude à se combiner aux structures désordonnées des aluminates hydratés, dont ils favorisent la formation. Cette incompatibilité ciment– adjuvant dépend de la formulation complète du béton et notamment, le dosage en adjuvant, le rapport E/c, de la compacité et de la température ambiante et peut se maîtriser complètement.

1.9.4. Influence du dosage en superplastifiant

Pour augmenter la maniabilité d'un béton, le dosage normal des superplastifiants est compris entre 1 et 3 litres par mètre cube de béton, pour des superplastifiants sous forme liquide contenant 40 % de matériaux actifs. Lorsque les superplastifiants sont utilisés pour réduire la teneur en eau du béton, leur dosage est beaucoup plus élevé et se situe entre 5 et 20 litres par mètre cube de béton.

Pour déterminer le dosage optimal en superplastifiant, on peut étudier la rhéologie d'un coulis ayant un rapport E/C relativement faible, en mesurant l'étalement au mini cône ou l'écoulement au cône de Marsh. Les courbes obtenues pour différents dosages en superplastifiants, présentent une cassure très nette lorsque l'on atteint un certain dosage.

Cette cassure est appelée point de saturation [86], et au-delà de ce point, il est inutile de rajouter du superplastifiant parce que la fluidité du coulis ne peut plus être

améliorée et un dosage excessif risque de retarder indûment le durcissement du béton et de créer un phénomène de ségrégation.

L'introduction des superplastifiants dans les mélanges cimentaires a tout intérêt à se faire le plus tard possible lors du malaxage du béton. Dans ce cas, on laisse le temps au sulfate de calcium pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment avant que le superplastifiant soit introduit et de ce fait ses molécules n'entrent pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le **C3A** et demeurent disponibles pour jouer leur rôle de dispersant. Ceci n'est pas toujours possible, car dans certains cas de rapport E/C très faible (BHP), pour obtenir l'affaissement désiré, il est nécessaire de rajouter une quantité de superplastifiant. Dans ce cas, on procède par une double introduction en introduisant une première quantité de superplastifiant juste nécessaire pour obtenir un béton d'affaissement de 50 à 100 mm qu'on peut malaxer convenablement et on introduit le reste à la fin du malaxage [12].

Temkhajornkit et Nawa [87], ont avancé en étudiant la fluidité des pâtes de ciment contenant un superplastifiant à base de naphthalène sulfonaté, que l'introduction du superplastifiant entraîne une réduction de la contrainte d'écoulement qui tend vers zéro, mais la plasticité ne diminue pas beaucoup. Dans ce cas la pâte de ciment va avoir une bonne fluidité sans engendrer de ségrégations. Ils ont également avancé que lorsque le superplastifiant est adsorbé à la surface des particules de ciment, il change le signe du potentiel zéta de la surface des particules qui devient négatif et en augmente la valeur absolue [89].

Dans ce cas, les particules de ciment ayant le même signe du potentiel zéta, se repoussent électro statiquement.

Lorsque l'on utilise des superplastifiants à très forts dosages, Aitcin [90] a montré que leur effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains. En outre, il a mis en évidence l'allongement de la période dormante en étudiant l'évolution de la chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation et a montré que plus le dosage en superplastifiant est grand et plus l'effet retardateur est prononcé. De Larrard [91] a montré qu'en période dormante, l'hydratation se développe plus rapidement sans provoquer des changements majeurs dans le processus d'hydratation. Ramachandran [92] a montré que plus la quantité de superplastifiant est élevée, meilleur est l'effet dispersant.

Pallière [93] a montré en étudiant l'influence de la finesse du ciment sur l'effet des fluidifiants, que ces fluidifiants agissent sur la fraction granulaire 5/20 μm du ciment qui est principalement concernée par les phénomènes de floculation et défloculation. Hanna & al [94] ont montré en étudiant le maintien de la maniabilité des pâtes de différents ciments contenant 1 % et 2 % de naphthalène, que plus la finesse Blaine du ciment est élevée, plus faible est l'effet fluidifiant.

Uchikawa & al [95] ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants et de certaines additions minérales sur le comportement des mélanges cimentaires, que l'ajout de superplastifiant à base de naphthalène produit une très grande dispersion de toutes les particules de ciment dans la solution aqueuse et que les additions minérales se dispersent bien sans trop floculer au sein de la pâte de ciment.

Kadri [73] a montré en étudiant l'ouvrabilité des bétons à hautes performances, que la composition chimique du ciment et en particulier la teneur en $C3A$, joue un rôle majeur sur la consistance du béton en absorbant les molécules de superplastifiants (figure I.22).

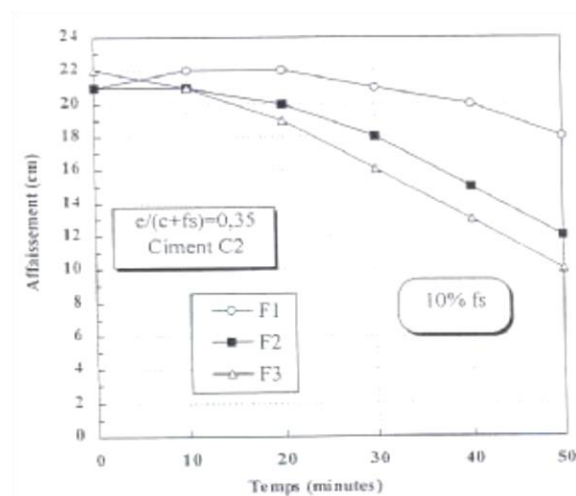


Figure I.16 : Evolution de l'affaissement d'un BHP à base de deux types de ciment en fonction du temps pour 3 superplastifiants différents, selon kadri [44]
 C1 : CPA-CEM I 52.5. C2 : CPA-CEM I 52.5 PM CP2, faible teneur en $C3A$.
 F1 : Superplastifiant à base de Naphthalène sulfonate.
 F2 : Superplastifiant à base de résine mélamine.
 F3 : Superplastifiant à base de résine vinyle.

Les ciments à faible teneur en $C3A$ ont un effet favorable sur la diminution du dosage de saturation et sur la perte d'ouvrabilité au cours du temps. D'autre part, il a montré que parmi les 3 superplastifiants considérés, le naphthalène sulfonaté était supérieur en termes de dosage de saturation et maintien de la consistance du BHP au cours du temps.

D'autre part, Erdogdu [96] a montré en étudiant la compatibilité des superplastifiants avec des ciments de différentes compositions, que l'effet du superplastifiant dépendait de la composition et de la quantité de ciment utilisé dans le mélange (figure I.23).

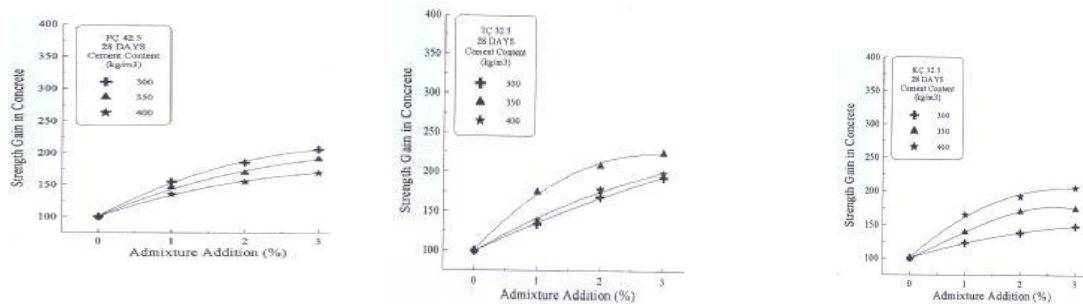


Figure I.17 : Gain en résistance en fonction de la quantité de superplastifiant pour trois types de ciment, selon Erdogdu [96].

Chandra et bjornstrom [97] ont montré en étudiant l'influence du type et du dosage en superplastifiant sur la fluidité des mortiers, que :

- Les superplastifiants ont des effets différents sur le comportement rhéologiques des mortiers, même s'ils sont de la même famille. Ceci est dû à leur composition de synthèse qui influence leur poids moléculaire et leur configuration chimique.
- La fluidité des mélanges cimentaires augmente avec le dosage en superplastifiants.
- L'augmentation de la fluidité des mortiers est due à l'adsorption du superplastifiant sur les particules de ciment qui retarde le processus d'hydratation du ciment.
- L'efficacité des superplastifiants a été établie dans l'ordre suivant : superplastifiant à base d'acide carboxylique, de lignosulfonate, de naphthalène sulfonates et de mélamine sulfonates.

Ismail Aiad [98] a montré en étudiant l'influence du temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment, que les superplastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et long termes et que la réduction de la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique dépend de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant dont le temps optimal était de 10 à 15 min après le début du malaxage.

Adnan Çolak [99] a montré en étudiant les caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant différentes quantité de pouzzolane naturelle, que :

- La substitution du ciment par la pouzzolane engendre une augmentation du besoin en eau des pâtes de ciment à maniabilité constante. L'addition de 1 % de superplastifiant à base de naphthalène entraîne une réduction significative du rapport eau / (ciment+pouzzolane).

- L'addition de 1 % de superplastifiant tend à retarder le processus d'hydratation et de prise.

- La porosité de la pâte augmente avec le taux de substitution du ciment par la pouzzolane.

- Les résistances en compression des mélanges à 20 % de pouzzolane et 1 % de superplastifiant sont très proches de celles des pâtes de ciment sans additions.

Golaszewski et Szwabowski [100] ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants sur le comportement rhéologique des mortiers de ciment à l'état frais en utilisant un rhéomètre rotationnel, que :

- Les superplastifiants à base de polycarboxylate étaient plus efficaces que les superplastifiants à base de naphthalène sur l'amélioration des propriétés rhéologiques des mélanges à l'état frais (réduction du besoin en eau et ségrégations).

- Le type de ciment (composition minéralogique et chimique) a une grande influence sur les performances des différents superplastifiants.

- La température influence les propriétés des mortiers avec superplastifiants.

Corradi & al [101] ont montré dans leur intervention sur les nouveaux superplastifiants pour le contrôle total des performances des bétons frais et durcis, qu'en raison de leur meilleure adsorption de l'étringite et de leur meilleure dispersion des particules, les principales caractéristiques de ces polymères (figure I.24), sont:

- Une plus grande réduction d'eau pour l'accroissement de la durabilité,

- Une vitesse d'hydratation plus rapide pour les performances à jeune âge,

- Une maniabilité de plus longue durée pour les mises en œuvre lentes

- Un meilleur contrôle de la rhéologie des bétons pour une meilleure mise en forme.

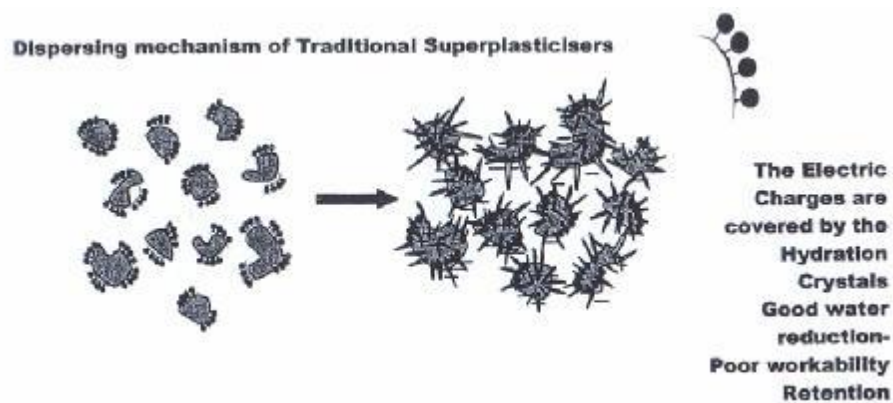


Figure I.18 : Mécanismes de dispersions des superplastifiants traditionnels et nouveaux selon Corradi & al [101].

Magratto & al [102] ont montré en étudiant l'amélioration de la compatibilité des nouveaux superplastifiants à base de polycarboxylates avec les ciments, que :

- La vitesse d'hydratation du ciment à jeune âge variait en fonction de sa composition chimique et spécialement la phase aluminatée et sulfate, qui constituent la clé de compréhension du maintien de la fluidité,
- La nouvelle génération de superplastifiants à base polycarboxylates entraîne une forte réduction d'eau et un maintien de l'ouvrabilité optimal.

Falikman & al [103] ont montré en étudiant les performances des superplastifiants à base de polycarboxylates, que ces derniers assuraient les mêmes performances rhéologiques et mécaniques avec des dosages de 2.7 à 3.3 fois plus inférieurs que les superplastifiants conventionnels à base de poly-naphtalène.

Sakai & al [104], ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants sur l'hydratation du ciment et la structure pores du ciment durci, que l'hydratation du ciment portland n'était pas influencé par l'addition de superplastifiants en dernier lieu.

Ceci suppose que c'est en relation avec la dispersion des particules de ciment et par conséquent avec la structure des pores du matériau à l'état frais avec superplastifiants. Il a été montré que le volume des pores du ciment durci avec les superplastifiants à base de naphtalène et ligno-sulfonate est plus grand que celui avec superplastifiants à base de polycarboxylates.

En fin, les superplastifiants n'influencent pas en général le retrait, le fluage, le module d'élasticité ni la résistance au gel - dégel du béton [105, 106].

De ce fait, ils n'ont pas d'effets négatifs sur la durabilité des bétons [107] et en particulier sur la résistance aux sulfates [108].

1.10. Notions sur le béton

1.10.1 La résistance du béton

Des résultats obtenus par NEVILLE, [77], Il note que : « l'influence du type de gros granulats sur la résistance du béton est fonction du rapport E/C. Pour des rapports E/C inférieurs à 0.4, les résistances obtenues peuvent être majorées de près de 38% lorsque des graviers concassés sont utilisés à la place de graviers roulés. Cette influence des granulats sur la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C. Pour un rapport E/C de 0.65 on ne constate plus de différences entre les résistances à la compression obtenues sur des bétons fabriqués avec des granulats concassés ou roulés ».

Dans tous nos plans expérimentaux, le béton témoin ou béton ordinaire, est à base de graviers ordinaires concassés.

En général, les performances des bétons sont dominées en premier lieu par le rapport E/C et par le rapport G/S. Mais l'ajout de sable permet un meilleur contrôle de la consistance du béton et d'écartier les risques de ressuage et de ségrégation. [77] [131].

1.10.2 La déformation des bétons.

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se compose comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en œuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques. Dès la fin de la mise en œuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

1.10.3 Le retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

Causes et constatation	Remèdes
Le retrait avant prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise, il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de sur doser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
- Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

Tableau I.11. Causes, constatation et remèdes du retrait.

1.10.4 La dilatation

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 1×10^{-5} , pour une variation de ± 20 °C on obtient: $\Delta l = \pm 2 \text{ ‰} \times \text{longueur}$.

1.10.5 Le fluage

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau viscoélastique. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage (Fig. 1.26). Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Estimation de la déformation de fluage:

$$\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰ longueur.}$$

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

1.10.6 L'élasticité du béton

Le module d'élasticité E est défini par le rapport:

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courant, on admet:

$$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$$

(Module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec :

f_{cj} = résistance caractéristique à « j » jours.

$E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$ (module de déformation différée)

avec $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$. Il s'ensuit que

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij}.$$

Notes : E_{ij} , E_{vj} , f_{c28} , f_{cj} sont exprimés en MPa.

1.10.7 Effet «Poisson»

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale.

Le coefficient « Poisson » est le rapport :

$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad \text{dont la valeur varie entre 0,15 et 0,30}$$

1.10.8 Mécanisme de la fissuration

Deux bétons ayant un même retrait final peuvent se comporter très différemment du point de vue de la fissuration.

Condition de fissuration d'un béton:

Le phénomène de retrait étire le béton de telle façon que l'allongement résultant compense le raccordement imposé par le retrait, si l'élément était libre de se déformer. Le retrait augmente avec le temps, la tension interne aussi: si elle dépasse la limite de rupture du béton, la fissuration se produit.

1.11. Les propriétés essentielles des bétons :

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Celle-ci est orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Un bon béton n'est acquis, que lorsque trois objectifs principaux sont atteints : obtenir une résistance mécanique, obtenir une rhéologie qui permet une mise en œuvre facile et un squelette granulaire donnant une compacité maximale, et qui peut être une propriété secondaire recherchée. Comme il n'existe pas une grande variété de granulats disponibles en un lieu donné, la formulation d'un béton devra tenir compte des ressources locales et des coûts. C'est pourquoi les propriétés intrinsèques des granulats ne sont pas toujours valorisées dans les bétons.

Les propriétés des bétons qui en découlent des granulats ne sont pas toujours observatrices.

1.11.1. Les propriétés rhéologiques:

a/ Influence des granulats sur la maniabilité :

La maniabilité est une caractéristique d'aptitude à la mise en œuvre d'un béton [12].

Sa mesure, est appréciée à l'aide de différents appareillages dont le plus répandu est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams encore appelé slump-test.

Pour un béton classique, cette caractéristique est souvent difficile à quantifier à cause de la conjugaison de plusieurs paramètres intrinsèques de la composition d'un béton (le dosage en eau, le dosage et la nature du liant, la forme et la texture des granulats, la granulométrie et la dimension maximale du granulat) [8, 109].

D'autres paramètres, s'ils ne sont pas contrôlés, peuvent affecter d'avantage la maniabilité tels que : le malaxage, transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants [12].

La quantité d'eau, nécessaire pour une maniabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats [110].

Il est préconisé de réduire le diamètre et la quantité des plus gros granulats afin d'éviter la ségrégation [111]. Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse (tels que les granulats concassés et recyclés) nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [13, 8], de plus, leur coefficient de frottement relativement important, les rend défavorables pour la maniabilité [112].

La présence de fillers favorise la maniabilité du béton, en facilitant le mouvement des granulats. L'influence des propriétés des granulats sur la maniabilité diminue à mesure que le mélange devient plus riche en ciment [113] [132] et peut même disparaître lorsque le rapport G/C est de l'ordre 2,5 ou de 2 [8, 110]. La forme et la texture des granulats peuvent également affecter l'efficacité de l'ouvrabilité des bétons, cela dépend du type de broyeur utilisé.

1.11.2 LES PROPRIETES PHYSIQUES

- **Influence de l'interface pate de ciment- granulat :**

Certaines observations montrent clairement que la microfissuration dans le béton provient de la zone inter faciale et que, à la rupture, le réseau de fissuration passe par ces interfaces. Les caractéristiques minéralogiques des granulats fins ainsi que les granulats ayant une couche externe poreuse ont une influence sur la microstructure de l'auréole de transition, ils entraînent la formation d'une zone plus dense [8].

- **Influence de la forme et la texture de surface des granulats :**

La forme et la texture des granulats influencent considérablement la résistance des bétons

Celle-ci dépend en grande partie des propriétés du gros granulat, elle est plus faible lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés, de forme angulaire et de surface rugueuse. [8].

La résistance à la compression des bétons à base des granulats lisse est 10 % inférieure à celle des bétons à base des granulats rugueux [8].

L'influence du type de gros granulats sur la résistance du béton est fonction du rapport E/C. Cette influence des granulats sur la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C [8,115],

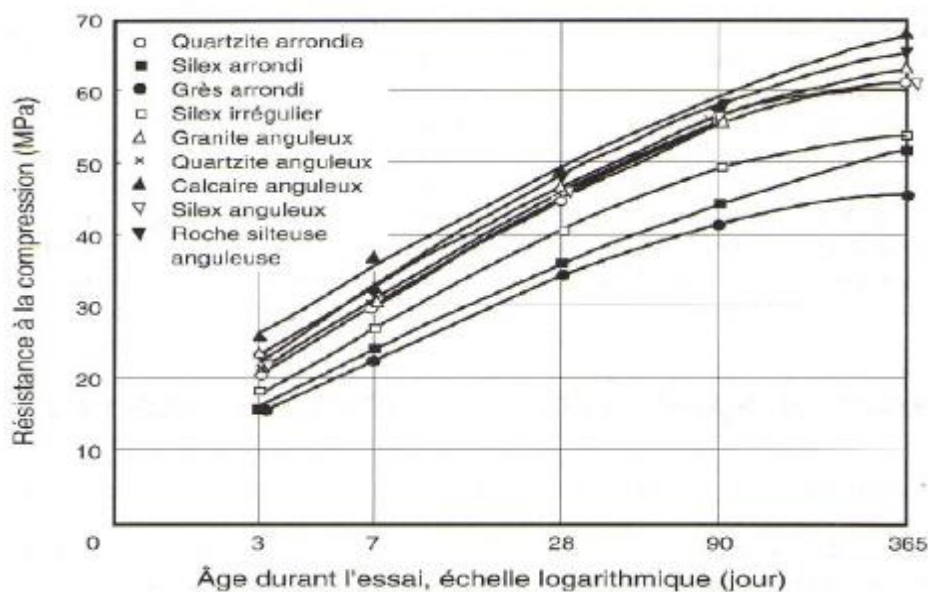


Figure I.19 : Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons [115], confectionnés avec différents granulats (E/C=0,50) [8].

L'influence des granulats sur la résistance à la flexion dépend également de l'état d'humidité du béton au moment de l'essai [8].

- **Influence de la forme et la texture sur la liaison pâte-granat :**

D'après des analyses microstructurales [13, 58] sur un béton, il a été démontré que l'interface pâte de ciment granulat présente la zone la plus poreuse et donc la plus critique pour la perméabilité et la durabilité du béton. La texture de la surface du granulat affecte cette liaison avec la pâte de ciment et par conséquent influence la résistance du béton (particulièrement celle de la traction) [8, 13, 114].

La texture des granulats concassés, entraîne une meilleure adhésion La liaison pâte de ciment-granat a été trouvée meilleure avec des granulats concassés, à cause de leur texture plus rugueuse, qu'avec des granulats roulés [7, 114].entre les granulats et la matrice de ciment, à condition que ceux-ci ne contiennent pas des matières nuisibles à l'adhérence telles que les poussières de concassage. Des granulats plats et allongés sont généralement friables, donc ils sont à proscrire. Il peut arriver que la résistance de la liaison soit inférieure à celle de la traction de la pâte de ciment hydraté ce qui provoque un décollement des granulats de la pâte [8, 116],un phénomène qui a été observé en utilisant des granulats de quartzite [116]. Bien que ces granulats possèdent une résistance élevée, la résistance du béton dans lequel ils ont été introduits, a été jugée très faible à cause de leur surface lisse entraînant le décollement de la pâte de ciment lors de l'application d'un effort. Une autre expérience [13] a été menée sur deux bétons du même dosage et même plasticité, l'un avec des granulats calcaire, l'autre avec des granulats siliceux. On a constaté que malgré la qualité de dureté du silex bien supérieur à celle du calcaire, on a en traction, une résistance nettement plus élevée avec du calcaire qui présente une rupture au niveau des grains contrairement au silex qui subit un décollement des graviers de la pâte de ciment. On peut conclure que les graviers calcaires génèrent une bonne adhérence à cause de leur surface rugueuse. Les granulats plats et allongés ont un effet défavorable pour la durabilité des bétons, car les granulats plats tendent à s'orienter dans une direction créant des drains et l'eau de ressuage ainsi que les vides d'air se concentrent autour d'eux [13].

- **Perméabilité, porosité et absorption d'eau:**

Pour la bonne conservation (durabilité) du béton, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité, à l'eau, à l'air ou à certains gaz et de résistance à la diffusion d'ions. Même si les mécanismes et les lois qui les régissent sont différents, les moyens d'action limitant ces effets sont les mêmes : limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire.

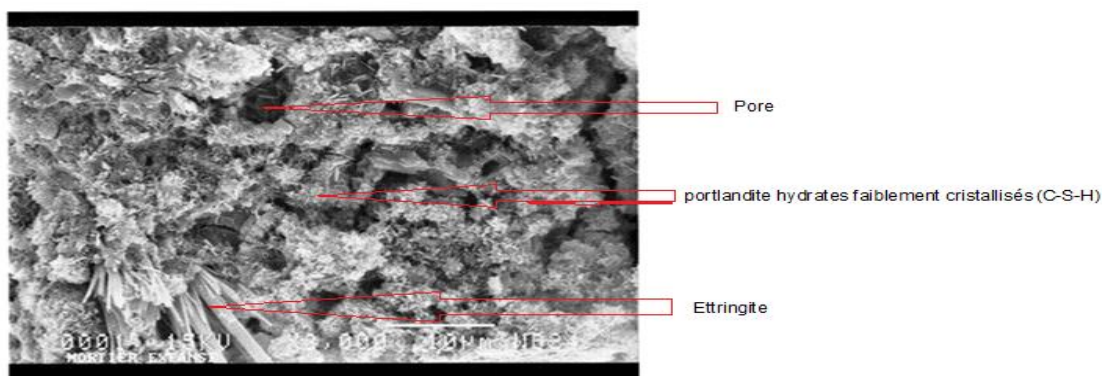


Figure I.20 : Photo Béton prise par le Microscope électronique à balayage (MEB) [8].

La perméabilité du béton se singularise par la perméabilité de la pâte de ciment et la Perméabilité des granulats. Si la perméabilité de la pâte de ciment hydraté est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. Tandis que celle des granulats naturels se distingue par la nature des pores qui sont habituellement non interconnectés en plus lorsque les granulats sont enrobés par la pâte de ciment, ceux-ci ne participent presque pas à la perméabilité du béton [8]. En revanche, l'utilisation de granulat de grand diamètre et avec une grande proportion augmente la perméabilité [117], qui a été remarquée plus aigue dans l'interface pâte granulat. Il est à noter que la perméabilité du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C. On ne peut parler de perméabilité sans évoquer la porosité dont le volume seul n'influe pas de manière significative sur la perméabilité. Celle-ci est en fonction de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et la continuité des pores. Etant

donné que cette relation perméabilité-porosité est très étroite, elle constitue un paramètre déterminant de la durabilité du béton.

Le volume des pores d'un béton, indépendamment de la facilité avec laquelle un fluide peut le traverser, se mesure par l'absorption d'eau. Celle-ci est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Le processus d'absorption d'eau peut être qualifié par deux paramètres :

L'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires, et l'absorptivité, représentative du volume des capillaires fins [118].

L'absorption d'eau un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agressions telles que l'attaque par les sulfates, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible. L'emploi du béton mixte à base de sable naturel et du gravier recyclé est fortement recommandé pour des conditions d'agressivité moyenne [118].

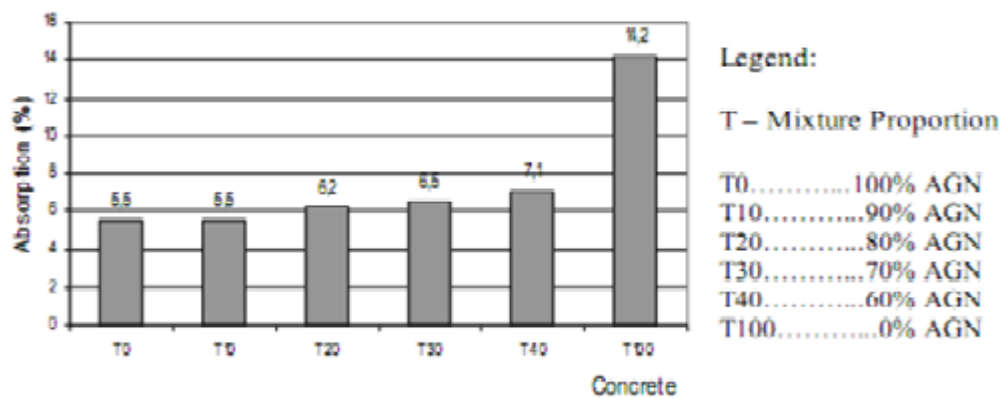


Figure 1.21 : L'absorption d'eau des bétons [118].

- **Retrait et fluage :**

Le retrait et le fluage sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Ces déformations doivent donc, en toute circonstance, être prises en compte. Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire, est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favorisée par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés [13], par la présence des argiles et fines dans les granulats et à la grandeur du module élastique de ces derniers [119].

Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment [119].

Généralement les granulats naturels ne sont pas sujets au retrait, mais il existe des roches dont le retrait voisine celui d'un béton à granulats sans retrait, le cas rencontré avec certaines roches sédimentaires [8].

Le calcaire est classé comme granulat sans retrait, en revanche, sa dilatation très faible diminue les propriétés thermiques du béton car les granulats calcaires peuvent présenter des différences significatives au niveau du coefficient de dilatation avec la pâte de ciment, qui peut rompre la liaison pâte granulat [8] éloignées. Des résultats du test de fluage mené dans des conditions normales en laboratoire sont à contre sens de ce qui a été avancé précédemment et après 1 an de chargement le fluage est donné environ 20% de moins que pour un béton [120]. Bien qu'un travail supplémentaire dans le domaine soit indispensable pour confronter les résultats,

1.11.3. LES PROPRIETES MECANIQUES:

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats [8], mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

- **Relation entre la résistance à la compression a celle de traction :**

La résistance à la traction (R_t) augmente avec la résistance en compression (R_c), mais à un taux allant en diminuant. Plusieurs facteurs influent sur la relation entre les deux résistances : les gros granulats concassés, les propriétés des granulats fins, la granulométrie des granulats et l'âge du béton [121]. Un certain nombre de formules empiriques reliant R_t et R_c ont été proposées. L'expression suivante semble donner la meilleure relation entre R_t et R_c :

$$R_t = 0.2 (R_c)^{0.7}$$

Où les résistances sont exprimées en MPa [8].

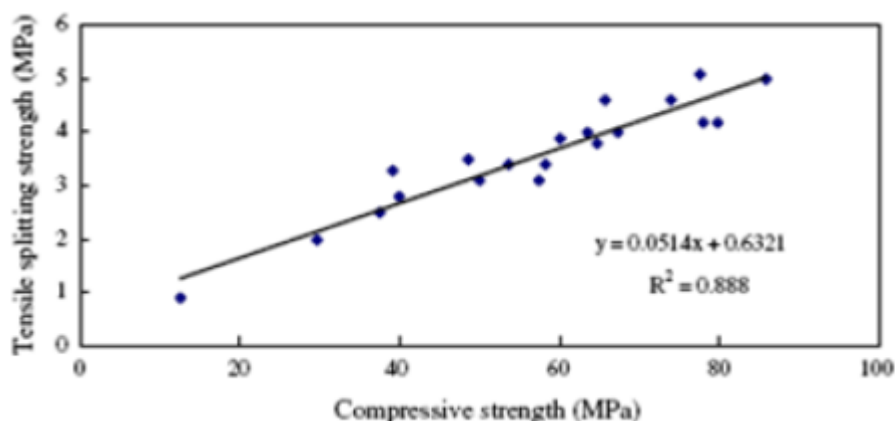


Figure 1.22: Rapport entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage [8].

1.11.4. Influence des différents paramètres sur la qualité d'un béton

- **Influence de la quantité de liant sur la résistance :**

Une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance surtout à court terme. La résistance du béton est liée au type et la classe de ciment [12], tandis que la forte teneur en ciment des bétons affecte la

résistance de tous les bétons de résistances moyennes ou très élevées (> 35 MPa). [133].

- **Influence du rapport G/C sur la résistance :**

Le rapport G/C est un facteur de moindre importance sur l'évolution de la résistance. Avec un rapport E/C constant, il a été démontré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant [8] figure (I.30). L'explication la plus probable est le faible pourcentage des vides par rapport au volume total de béton.

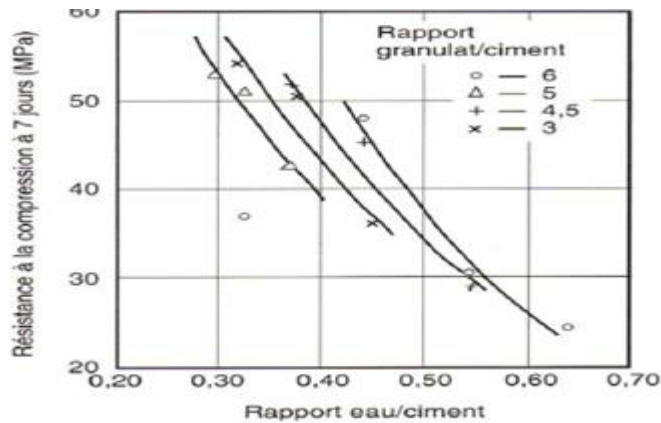


Figure 1.23 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton. [8].

Les études faites sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons indiquent que lorsque le pourcentage du volume des granulats augmente de 0 à 20 % par rapport au volume total, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, c'est une augmentation qui a été enregistrée [8].

- **Influence des granulats sur le rapport E/C :**

Il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance. Pour des rapports E/C $< 0,4$, la résistance à la compression est majorée de 38%, lorsque le béton est fabriqué avec des granulats concassés que ceux roulés et pour des rapports E/C = 0,65 la résistance ne varie pas [8].

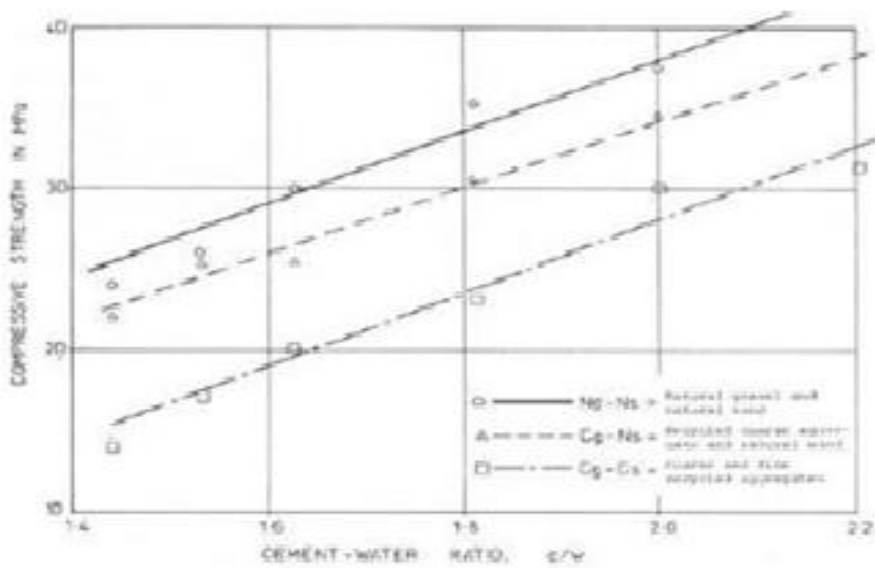


Figure 1.24 : Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression[8].

- Influence de l'origine et résistance des granulats:

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, ce qui revête que la qualité de ces derniers est d'une grande importance sur la résistance à la compression du béton. Celle-ci ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats et cela dépend d'une part, de la nature de la roche mère qui a été concassée ou usée à la dimension actuelle [122, 123] et d'autre part, du processus de concassage adopté [124].

Une éprouvette de béton soumise à la compression contient plusieurs granulats rompus, cela signifie que la résistance du granulat est inférieure à la résistance nominale du béton. Cas rencontré avec l'utilisation des latérites comme granulats beaucoup plus répandus dans les pays subsahariens [125].

- **Influence de l'interaction des granulats avec la matrice cimentaire**

Dans le cas des granulats classiques, des études physico-chimiques ont permis de mettre en évidence l'existence d'une auréole de transition au niveau de la liaison de la pâte de ciment et des granulats. Cette zone de transition, qui influence le comportement des bétons, se caractérise par une première couche très compacte et de texture très fine fixée au granulat et une deuxième couche très poreuse, de cohésion faible avec une orientation préférentielle des cristaux bien formés sur des distances importante. La seconde couche, en raison de sa faible résistance mécanique due à la présence de cristaux de grandes dimensions facilement clivable et par suite de sa forte porosité, constitue le point faible des bétons soumis à des actions mécaniques [7].

En effet, dans le cas des granulats classiques, à cause des effets de parois localisés, une certaine quantité d'eau de ressuage s'accumule à la surface des gros granulats. Par conséquent, le rapport eau sur ciment plus élevé à l'interface explique la plus grande porosité de cette zone dont la taille varie, d'après les auteurs, entre 50 et 100 μm pour les graviers [134].

- **Influence de la maniabilité et mûrissement des bétons**

La capacité d'absorption des granulats a une influence importante sur la maniabilité, la résistance et le mûrissement du béton. Cette influence dépend de l'état du granulat utilisé saturé et séché en surface ou bien sec.

Pour les granulats saturés mais séché en surface, on n'observe pratiquement aucune influence sur la maniabilité. L'eau absorbée n'est par conséquent pas à prendre en compte dans le rapport eau / ciment du béton. par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Cette situation pourrait être désignée par l'expression « mûrissement humide interne » [135] [136].

En revanche dans le cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats diminue la maniabilité. de plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats secs en soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et, à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée [77].

Conclusion

De cette étude bibliographique et en rapport avec notre sujet de recherche nous retiendrons les conclusions suivantes :

- Beaucoup de travaux ont été consacrés à la détermination de l'influence négative de la discontinuité de la granulométrie des granulats sur leurs propriétés qui provoque la ségrégation du mélange de béton avec l'augmentation de la maniabilité.
- D'après Brahma, le pourcentage des vides dans le béton dépend de la grosseur maximale D_{\max} des graviers.
- La variation de la dimension de gros granulats exerce une influence moins significative que la variation des types de granulats, selon Gordon WA et all.
- D'autres paramètres ont été évoqués comme l'adhérence entre les granulats et la pierre du ciment, la forme, l'absorption d'eau, la propreté, la teneur en sulfate et chlorure et autres comme le paramètre économique.
- Les différentes méthodes de composition du béton sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats. Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important.
- la formulation des mélanges avec additions minérales pose encore de nombreuses questions malgré que de multitudes études sur les méthodologies de formulation des bétons avec additions minérales aient vues le jour pour optimiser la quantité d'addition ou définir les critères qui permettent d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques spécifiques pour les bétons.

- L'introduction d'un certain pourcentage d'Adjuvant modifie les propriétés du mélange de béton frais et / ou durci. Les différentes molécules de superplastifiants à longue chaîne agissent conformément aux différents mécanismes de base, en s'enroulant autour des grains de ciment et en leur conférant une charge hautement négative de sorte qu'ils se repoussent les uns des autres, conduisant à une dispersion des grains de ciment. Les principales caractéristiques sont la réduction d'eau, la vitesse rapide d'hydratation, la maniabilité de plus longue durée, un meilleur contrôle de la rhéologie du béton et une meilleure mise en forme.

Chapitre II/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

II.1. Introduction :

De nombreux paramètres des granulats influencent les propriétés du béton, les caractéristiques de la roche mère, telles l'absorption d'eau, la résistance à la compression, l'adhérence à la pâte de ciment et le module d'élasticité, une autre série de paramètres dépend des procédés de production : ce sont les compacités monodimensionnels (tributaires de la forme) et la distribution des tailles. (F DE LARRARD) [62].

La dimension maximale d'un gravier utilisé dans un béton dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'élément, l'espacement des armatures etc. Suivant les conditions de chaque structure ou ouvrage en béton ou béton armé, on emploie un gravier d'une seule fraction ou de plusieurs fractions, on utilise également la granularité continue ou discontinue. L'évaluation de la granularité des mélanges de fractions, la mesure de leurs masses volumiques et leurs porosités devient nécessaire si on veut avoir un bon squelette granulaire de notre béton. Afin de minimiser la porosité du squelette granulaire de notre béton, nous avons procédé à un mélange de fractions de gravier (3/8 et 8/15) ainsi les petits grains viendront se positionner dans les interstices des gros graviers notre but c'est d'évaluer la granularité de ces mélanges à travers la masse volumique apparente et la porosité.

L'un des rôles de la vibration soit de ménager des moments d'apesanteur où la particule se déplaçant au hasard sous l'effet des impacts avec ses voisines essaie plusieurs configurations et retient la plus stable. [137]

Le schéma explicatif n'est pas éloigné de celui indiqué par Powers , « Apparemment ,lorsque le squelette granulaire baigne dans une matrice qui est maintenue fluide par vibration, chaque grain est capable de tourner sur lui –même de telle sorte qu'il interfère le moins possible avec ses voisins » [138].

Aussi l'introduction de différents pourcentages de gravier roulé de fraction 3/8, ces graviers ont une surface extérieure lisse et arrondi, ils vont jouer le rôle de billes dans un roulement mécanique cela va améliorer la maniabilité de notre béton et réduire ainsi le rapport E/c, vue la disponibilité de ces graviers qui restent souvent jetés dans la nature après tamisage des sables alluvionnaires destinés à la maçonnerie, nous participons ainsi à la préservation de notre environnement.

II.2. Caractéristiques des matériaux :

Dans notre travail de recherche élaboré aux laboratoires de génie civil de l'université de m'sila nous avons utilisé les matériaux locaux afin de les valoriser, l'origine et les caractéristiques sont présentés ci-dessous.

II.2.1. Sable alluvionnaire de « oued m'aïter »

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 µm et 05 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination. [139]

Le sable utilisé dans notre étude provient des abords de « l'OUED M'AÏTER », un court d'eau du côté de Bousaada dans la wilaya de M'SILA (ALGERIE) , c'est un sable moyen d'origine alluvionnaire.



Figure II.1 : Sable alluvionnaire de oued M'aiter (W de M'sila)

A- Caractéristiques physiques du sable de oued M'aiter:

Nous avons soumis notre sable étudié à une série d'analyses au niveau des laboratoires de génie civil de l'université de M'sila et aux laboratoires d'analyse au niveau de la cimenterie LAFARGE (M'sila), notamment les analyses chimiques et DRX.

- Masse volumique (absolue) : (NF P 18-555) :

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

Tableau II.1 : Masse volumique absolue du sable alluvionnaire de Boussaâda.

<i>N° d'essai</i>	M (g)	V _E (cm ³)	V ₁ (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
01	150	209	59	2.542	2.532
02	150	210	60	2.500	
03	150	208.5	58.5	2.554	

- Masse volumique apparente : (NF P 18-554) :

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris les vides existant entre les grains.

1 / à l'état lâche.**Tableau II.2 :** Masse volumique apparente du sable alluvionnaire de Boussaâda à l'état lâche.

N° d'essai	V (cm ³)	M (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
01	900	1382.2	1.535	1.532
02	900	1366.4	1.518	
03	900	1386.4	1.544	

2 / à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est Supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Tableau II.3: Masse volumique apparente du sable alluvionnaire de Boussaâda à l'état compact.

N° d'essai	V (cm ³)	M (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm ³)
01	900	1522	1,691	1,694
02	900	1527.4	1,697	
03	900	1525.2	1,694	

- Porosité : (NF P 18-554) :

$$P(\%) = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

- Porosité à l'état lâche : $PL = 39.48\%$
- Porosité à l'état compacte : $PC = 33.10\%$

- 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.

- Compacité à l'état lâche : $C_L = 60.52\%$

- Compacité à l'état compacte : $C_c = 66.90 \%$

- **L'indice des vides :**

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume du solide.

$$e = V_v / V_s = P / (100 - P).$$

- Etat lâche : $e = 0.652$
- Etat compacte : $e = 0.495$

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du sable alluvionnaire de Boussaâd utilisé.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique Apparente lâche /compacte (g/cm ³)	Porosité (%) lâche /compacte	Indice des vides lâche /compacte	Capacité d'absorption (%)	D _{abs} (%)	Module De finesse M _f
2.532	1.532/1.794	39.48/33.1	0.652 / 0.495	1.66	1.26	2.47

- **Equivalent de sable : NF P 18-598 :**

L'essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable.

Tableau II.5 : Equivalent du sable alluvionnaire de Boussaâda

N° d'essai	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ESV (%)	h' ₂ (cm)	ESP (%)
01	11.4	8.8	77.19	7.9	69.29
02	11.3	8.9	78.76	8	70.79
03	11	8.6	78.18	8.1	73.63

(ESV)_{moy} = 78.04 %

(ESP)_{moy} = 71.23 %

Notre sable est propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité, d'après les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX [1].

- Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable à la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20 à 25 %** de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0 à 3%**, on l'appelle sec.

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) \times 100 \text{ [%]}$$

- M_h : Poids du sable humide en (g).
- M_s : Poids du sable sec en (g).

Tableau II.6 : Teneur en eau du sable alluvionnaire de Boussaâda

<i>N° d'essai</i>	M_h (g)	M_s (g)	W (%)	W_{moy} (%)
1	300	293	2.33	1.66
2	300	295	1.67	
3	300	297	1	

- Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555 :

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définit en pourcentage d'après la formule suivante.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \text{ [%]}$$

- M_1 : La masse du matériau sec en (g).
- M_2 : La masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec en (g).

Tableau II.7 : Degré d'absorption du sable alluvionnaire de Boussaâda.

<i>N° d'essai</i>	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)
1	500	507	1.4	1.27
2	500	506	1.2	
3	500	506	1.2	

- **Analyse granulométrique du sable : (NF P 18-560)**

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau.

Tableau II.8 : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire de Boussaâda.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	23.9	23.9	1.59	98.41
2.5	170.6	194.5	12.97	87.03
1.25	170.7	365.2	24.35	75.65
0.63	147.4	512.6	34.17	65.83
0.315	655.3	1167.9	77.86	22.40
0.125	282.4	1450.3	96.68	3.32
0.08	44.8	1495.1	99.67	0.33
Fond	4.5	1499.6	99.97	0.03

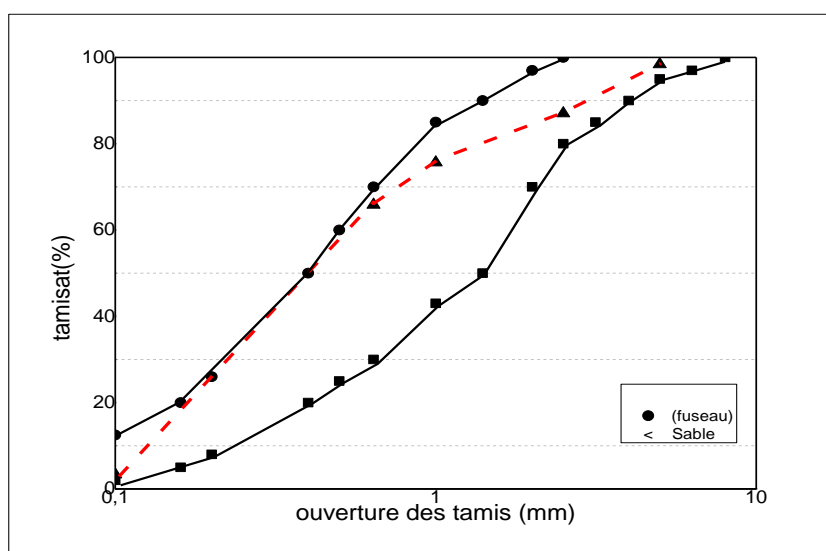


Figure. II .2 : courbe d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire de oued M'aiter.

- **Module de finesse :**

C'est un facteur qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm)] sur 100.

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

R_c : Refus cumulé.

Pour le sable alluvionnaire de Boussaâda on trouve : $Mf = 2.47$

*Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit : [4]

- Sable gros $Mf > 2.5$
- Sable moyen $2 < Mf < 2.5$
- Sable fin $1.5 < Mf < 2$
- Sable très fin $1 < Mf < 1.5$

D'après cette classification, le sable alluvionnaire de Boussaâda est un sable moyen.

- **Caractéristiques chimiques du sable alluvionnaire de oued M'aïter :**

L'échantillon du sable alluvionnaire de oued M'aïter à été examiné aux laboratoires de la cimenterie LAFARGE ex. ACC a Hammam Dhalaa (W de M'sila), Les caractéristiques chimiques montre que ce sable contient une grande proportion de Calcite (93.96 %),

Tableau II.9 : Analyse chimique du sable alluvionnaire de oued M'aïter

matière	R_wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO ₂ _XRD
%	6.04	93.96	0.52	4.57	0	0.79	0.05	0.08	0.03	41.56

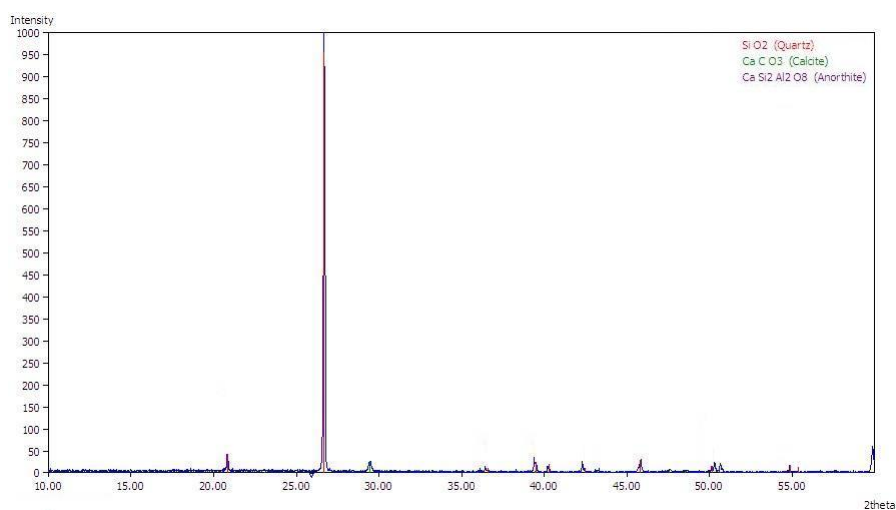


Figure II.3 : DRX du sable alluvionnaire de oued M'aiter .

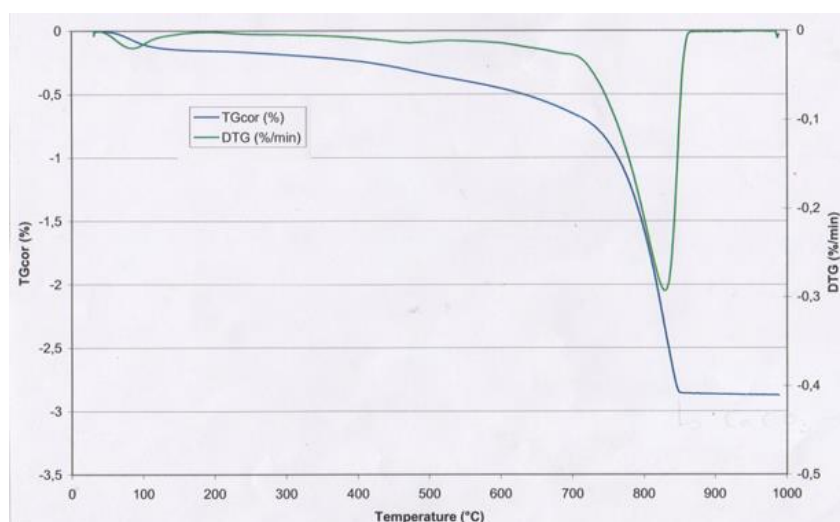


Figure II.4 : La thermogravimétrie (TG) et la courbe dérivative thermogravimétrie (DTG) du sable étudié.

Les spectres montrent la présence d'un pic relatif à l'élément Calcite (CaCO_3) avec 93.96% , et une faible présence de silice (SiO_2) .

II.2.2. GRAVIERS :

La qualité du béton est intimement liée à celle de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats

peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton. Les granulats sont donc,

un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. En fait, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres.

L'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats, car ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment à elle seule.

Les granulats utilisés dans nos bétons sont produits localement dans la région de m'sila et de b.b.arréridj, afin de valoriser les matériaux locaux, nous présentons ici les différents caractéristiques des matériaux utilisés dans nos bétons.

II.2.2.1. Grapiers concassés :

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches de porphyres, grés, calcaires, quartzites, de galets concassés et de laitiers.

Les granulats concassés utilisés dans notre recherche proviennent de la station de concassage de COSIDER (W de Bordj Bou Arreridj), située à 25Km de M'sila , en allant vers B.B.A (carrière COSIDER).



Figure II.5 : Gravier concassé Cosider , (W de Bordj Bou Arreridj),

- **Classes granulaires:**

Les fractions du gravier sont :

- Fraction 3/8 concassé.
- Fraction 3/8 roulé.
- Fraction 8/16 concassé.
- Fraction 8/16 roulé.
- Fraction 16/25 concassé.
- Fraction 16/25 roulé.

- **Caractéristiques physiques du gravier concassé utilisé dans notre recherche « Gravier Cosider »:**

- **Masse volumique apparente:**

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

- V: Volume du récipient.
- M₁: Le poids du récipient à l'état vide.
- M₂: Le poids du récipient plein de gravier.

Tableau II.10.a : Masse volumiques apparentes des fractions de gravier concassée Cosider.

Fraction	N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/l)	ρ_{moy} (g/l)
3/8 V = 7L	01	2.929	12.10	1.31	1.32
	02		12.15	1.32	
	03		12.21	1.33	
8/16 V = 10L	01	3.481	17.38	1.38	1.38
	02		17.65	1.41	
	03		17.21	1.37	
16/25 V = 20L	01	7.29	34.55	1.363	1.372
	02		35.58	1.414	
	03		34.10	1.340	

- Masse volumique absolue :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Tableau II.10 : Masse volumique absolue du gravier concassé Cosider.

Fraction	N° d'essai	M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
3/8 V=7L	01	300	300	419	2.52	2.52
	02			418	2.52	
	03			419	2.52	
8/16 V=10L	01	300	300	420	2.50	2.51
	02			418	2.52	
	03			418	2.52	
16/25 V=20L	01	300	300	420	2.50	2.53
	02			418	2.54	
	03			418	2.54	

- Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable. On calcule la

porosité selon la formule :

$$P(\%) = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

La compacité donnée par la formule : $C = (\rho_{ap} / \rho_{ab}) = 100 - P$

Tableau II.11 : Porosité, Compacité et Indice des Vides du gravier concassé Cosider.

fraction de gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	47.41	52.59	0.90
8/16	55.20	44.8	1.23
16/25	45.77	54.23	0.844

- Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulats permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton.

Des mesures de l'absorption d'eau par les granulats ont donc été menées suivant le mode opératoire de la norme [NF EN 1097-6, 2001].

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon.

Tableau II .12 : Degré d'absorption d'eau du gravier concassé Cosider

Fraction de gravier	N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)	
3/8	01	500	510	2	1.6	
	02		506	1.2		
	03		508	1.6		
8/16	01		509	1.8	1.33	
	02		507	1.4		
	03		504	0.8		
16/25	01		1400	1410	1.00	1.10
	02			1411	1.10	
	03			1412	1.20	

- Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

- Résistance à la fragmentation :

Tableau II .13 : Coefficients de Los Angeles du gravier concassé Cosider.

Fraction du gravier	M ₁ (g)	m (g)	N ^{bre} de boules en acier	L _A
3/8	5000	1118	7	22.36
8/16		1118	11	22.36
16/25		1050	11	21.00

Les fractions du gravier « Cosider » sont des graviers durs qui convient aux bétons ordinaires et même aux bétons BHP.

- Caractéristiques chimiques du gravier concassé « Cosider ».

Le gravier « COSIDER » utilisé dans notre étude a été soumis à l'analyse chimique et pétrographique, La composition chimique du gravier de la carrière « COSIDER » est établie en mars 2016, à la cimenterie de L'EX .ACC « Lafarge » (M'sila).

Tableau II .14 : Composition chimiques du gravier concassé « Cosider ».

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LSF	SM	AM
Teneur (%)	3.30	1.00	1.21	50.86	1.18	0.49	0.09	0.0	454.4	1.49	0.82

- Analyse par le DRX du gravier concassé Cosider :

Tableau II .15 : Valeurs données par le DRX du gravier concassé Cosider

Elément	R-wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO ₂ -XRD
Teneur (%)	5.7	95.1	0.4	1.92	0.34	0.78	0.76	0.69	0	42.01

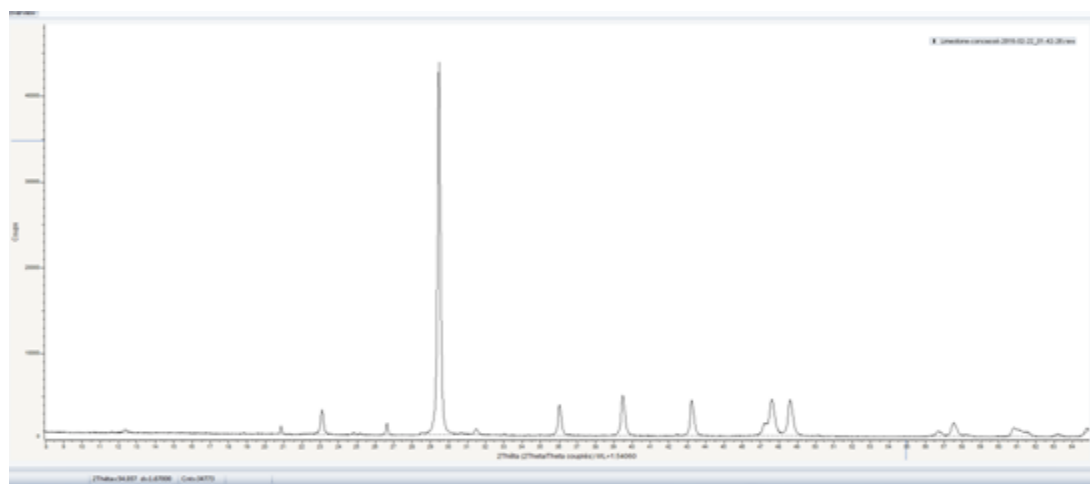


Figure II.6 : DRX du gravier concassé « Cosider »

Les spectres montrent la présence d'un pic relatifs à l'élément Calcite (CaCO_3) avec 95.1% , et une faible présence de silice (SiO_2) .

- Analyse granulométrique du gravier concassé « Cosider ».
- Fraction 3/8 :

Tableau II.16 : Analyse granulométrique du gravier concassée 3/8.

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	1	1	0.06	99.94
6,3	406.4	407.4	27.16	72.84
5	450	857.4	57.16	42.84
4	384.6	1242	82.8	17.2
3,15	176.8	1418.8	94.58	5.42
2,5	69.7	1488.5	99.2	0.8
Fond	10.5	1499	99,68	0.07

- Fraction 8/16 :

Tableau II.17 : Analyse granulométrique du gravier concassé 8/16.

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
16	26.5	26.6	1.77	98.23
12.5	315.9	342.5	22.83	77.17
10	563.5	906	60.4	39.6
8	444.8	1350.8	90.05	9.95
6,3	63.6	1414.4	94.29	5.71
5	80.8	1495.2	99.68	0.32
Fond	3.8	1499	99.93	0.066

- Fraction 16/25 :

Tableau II.18 : Analyse granulométrique du gravier concassé 16/25.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	46.5	46.6	3.1	96.9
20	362.5	409	27.33	72.76
16	929.8	1338	89.22	10.78
12.5	158.9	1497	99.81	0.18
Fond	0.4	1498	99.84	0.16

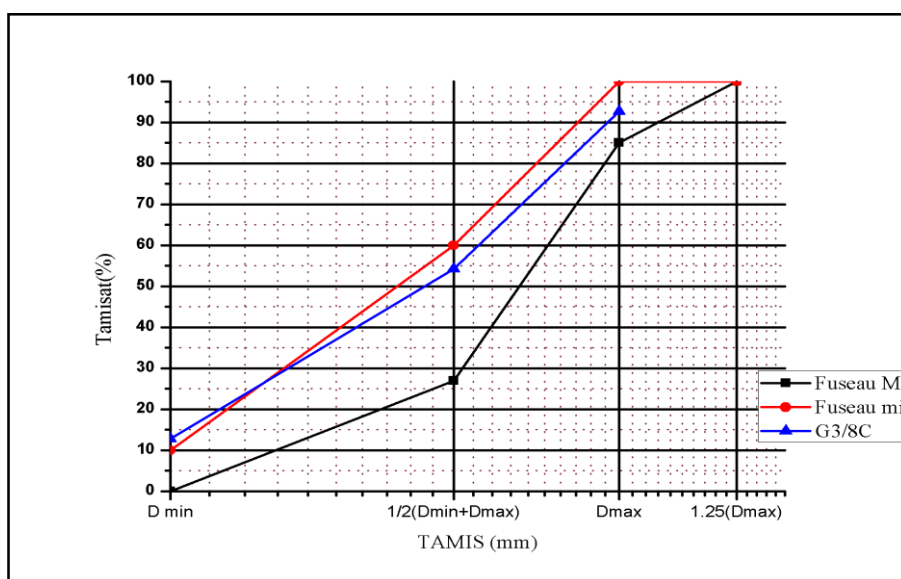


FIGURE II.7 : Courbe granulométrique pour gravier concassé 3/8.

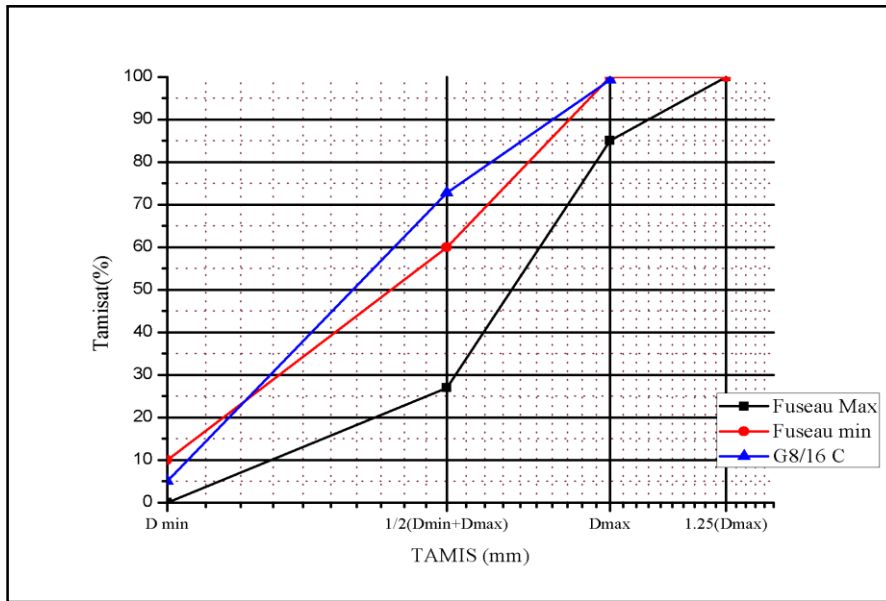


FIGURE II.8 : Courbe granulométrique gravier concassé 8/16.

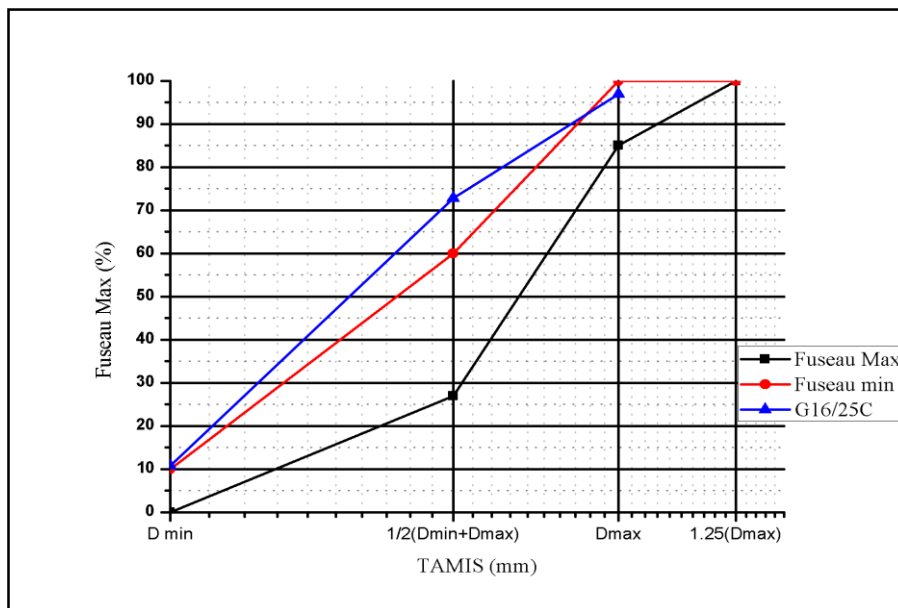


FIGURE II.9 : Courbe granulométrique gravier concassé 16/25.

II.2.2.2.Graviers roulés :

C'est des granulats ayant subis une altération naturelle mécanique due à l'eau, au vent, à l'usure réciproque des granulats lors de leur transportation dans la nature. Les granulats roulés sont de provenance alluvionnaire (Oued Maiter a 80km de la ville de m'sila) ils présentent des grains de surfaces lisses et arrondies



Figure II.10 : Gravier roulé de oued M'aiter.

La forme des granulats à une incidence sur la maniabilité du béton. La forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère ; une mauvaise forme (aiguilles, plats, etc) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect. [140] Dans une étude effectuée sur les bétons de hautes résistances [7], les auteurs ont constaté que les résistances à la compression du béton augmentent avec l'augmentation de la résistance à la compression de ses granulats. Cette constatation confirme le rôle bénéfique que jouent les grains de forme arrondi et qui ont une bonne dureté, dans l'amélioration du comportement à la compression des bétons.

- Caractéristiques physiques des graviers roulés

- Masse volumique apparente

Tableau II.19 : Masse volumiques apparentes des fractions de gravier roulé.

fraction	Essai	M1 (g)	M2 (g)	ρ_{app} (g/L)	ρ_{app} moyenne (g/L)
3/8 V = 7 l	1	2.92	13.80	1.554	1.554
	2		13.75	1.547	
	3		13.86	1.562	
8/16 V = 10 l	1	3.45	18.70	1.525	1.542
	2		18.75	1.530	
	3		18.62	1.517	
16/25 V = 20 l	1	7.29	37.55	1.513	1.514
	2		37.58	1.514	
	3		37.60	1.515	

- **Masses volumiques absolues :**

Tableau II.20 : Masse volumique absolue du gravier roulé.

Fraction	N° d'essai	M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ_{abs} (g / cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
3/8 V=7L	01	300	300	416	2.58	2.55
	02			416	2.54	
	03			418	2.54	
8/16 V=10L	01	300	300	416	2.58	2.54
	02			418	2.54	
	03			420	2.50	
16/25 V=20L	01	300	300	417	2.56	2.53
	02			420	2.50	
	03			418	2.54	

- **Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554**

Tableau II.21 : Porosité, Compacité et Indice des Vides du gravier roulé.

fraction de gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
<i>3/8</i>	39.06	60.94	0.64
<i>8/16</i>	39.29	60.71	0.65
<i>16/25</i>	40.16	59.84	0.67

- **Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554**

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton.

Des mesures de l'absorption d'eau par les granulats ont donc été menées suivant le mode opératoire de la norme [NF EN 1097-6].

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon.

Tableau II .22 : Degré d'absorption d'eau du gravier roulé

Fraction de gravier	N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)
3/8	01	700	707	0.990	0.943
	02		706	0.850	
	03		708	0.990	
8/16	01	1000	1008	0.794	0.662
	02		1007	0.695	
	03		1005	0.498	
16/25	01	1500	1506	0.398	0.486
	02		1507	0.464	
	03		1509	0.596	

- **Caractéristiques mécaniques du gravier roulé de «oued M'aïter ».**

- **Résistance à la fragmentation :**

$$L_A = \frac{m}{5000} * 100$$

« m » la masse d'élément < 1,6 mm, mesuré après la fin de l'essai.

Tableau II .23 : Coefficients de Los Angeles du gravier roulé.

Fraction du gravier	M ₁ (g)	m (g)	N ^{bre} de boules en acier	Coeff L _A
3/8	5000	1154	7	23.08
8/16		939	11	18.78
16/25		816	11	16.31

Les fractions du gravier roulé de «oued M'aïter » ont une dureté qui convient aux bétons ordinaires et même aux bétons BHP.

- **Caractéristiques chimiques du gravier roulé de «oued M'aïter ».**

Le gravier roulé de «oued M'aïter » utilisé dans notre étude à été soumis à l'analyse chimique et pétrographique, La composition chimique du gravier est établie en **mars 2016**, à la cimenterie de L'EX. ACC « Lafarge » (M'sila).

Tableau II .24 : Composition chimiques du gravier Roulé de «oued M’aiter ».

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LSF	SM	AM
Teneur (%)	4.13	0.38	0.55	51.55	0.93	0.06	0.11	0.00	417.1	4.43	0.70

Tableau II .25 : Valeurs données par le DRX du gravier Roulé de «oued M’aiter »

Eléments	R-wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO ₂ -XRD
Teneur (%)	6.04	93.96	0.52	4.57	0	0.79	0.05	0.08	0.03	41.56

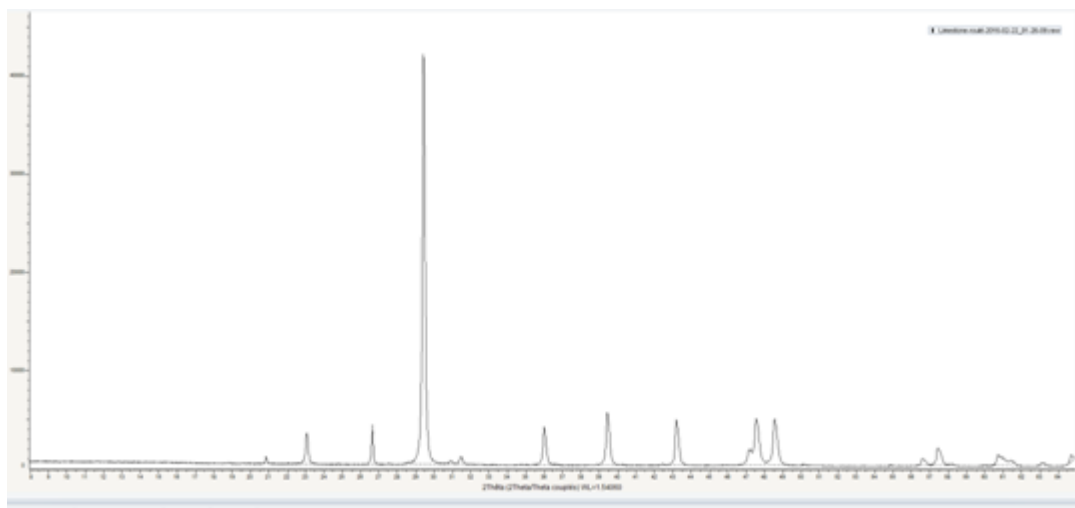


Figure II.11 : DRX du Gravier roulé de « oued M’aiter ».

Les spectres montrent la présence d’un pic relatif à l’élément Calcite ($CaCO_3$) avec 93.96% , et une faible présence de silice (SiO_2) de l’ordre de 4%..

- **Analyse granulométrique du gravier roulé de «oued M'aiter ».**

Les résultats obtenus par l'analyse granulométrique 3/8, 8/16 et 16/25 du gravier roulé, sont présentés figure II.24 –II.25-II.26.

- **Fraction 3/8 :**

Tableau II.26 : Analyse granulométrique du gravier roulé 3/8 de «oued M'aiter ».

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	5.9	5.9	0.59	99.41
6,3	296.7	302.6	30.26	69.74
5	296.2	598.8	59.88	40.12
4	262.8	861.6	86.16	13.84
3,15	110.4	972.0	97.20	2.80
2,5	22.3	994.3	99.43	0.57
Fond	1.5	995.8	99.58	0.42

- **Fraction 8/16 :**

Tableau II.27 : Analyse granulométrique du gravier roulé 8/16 de «oued M'aiter ».

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
16	2.4	2.4	0.24	99.76
12.5	172.2	174.6	17.46	82.54
10	427.2	601.8	60.18	39.82
8	333.6	935.4	93.54	6.46
6,3	60.1	995.5	99.55	.45
5	1.6	997.1	99.71	0.29
Fond	1.0	998.1	99.81	0.19

- Fraction 16/25

Tableau II.28: Analyse granulométrique du gravier roulé 16/25 «oued M'aiter »

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	54.5	54.5	3.63	96.36
20	351.9	406.4	27.09	72.90
16	1067.2	1473.6	98.24	1.76
12.5	21.9	1495.5	99.70	0.3
Fond	0.4	1495.9	99.72	0.27

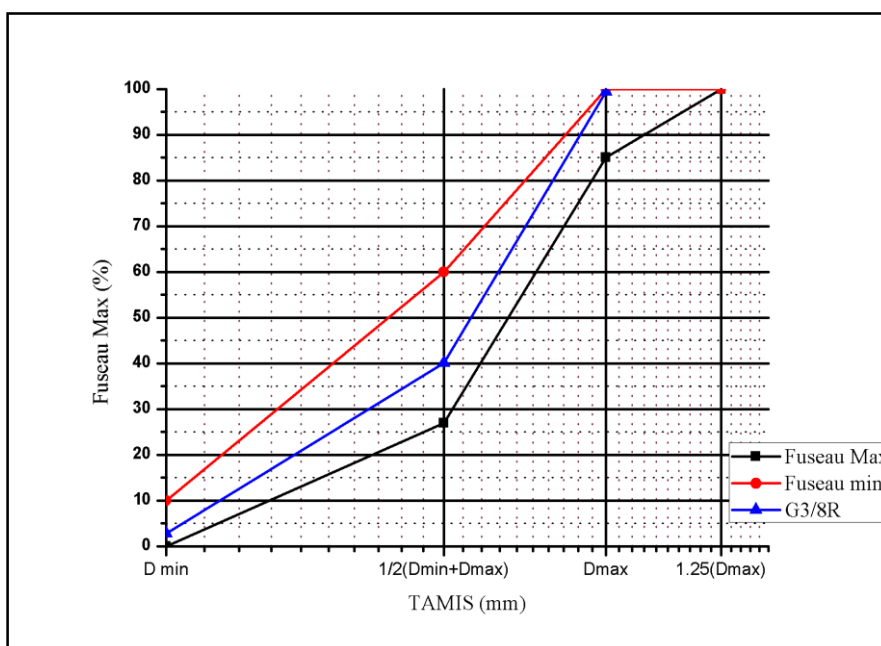


Figure II.12 : Courbe granulométrique du gravier roulés 3/8 de «oued M'aiter ».

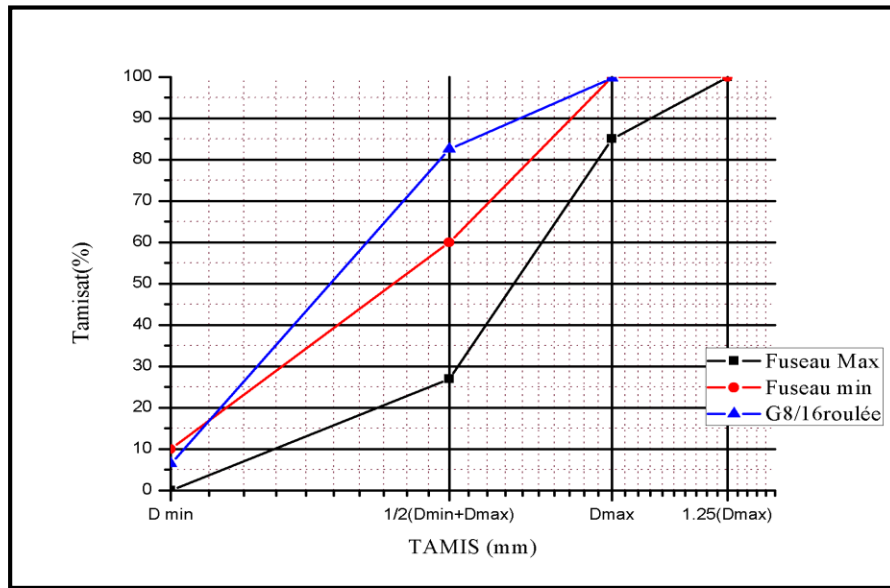


Figure II.13 : Courbe granulométrique du gravier roulés 8/16 de «oued M'aïter ».

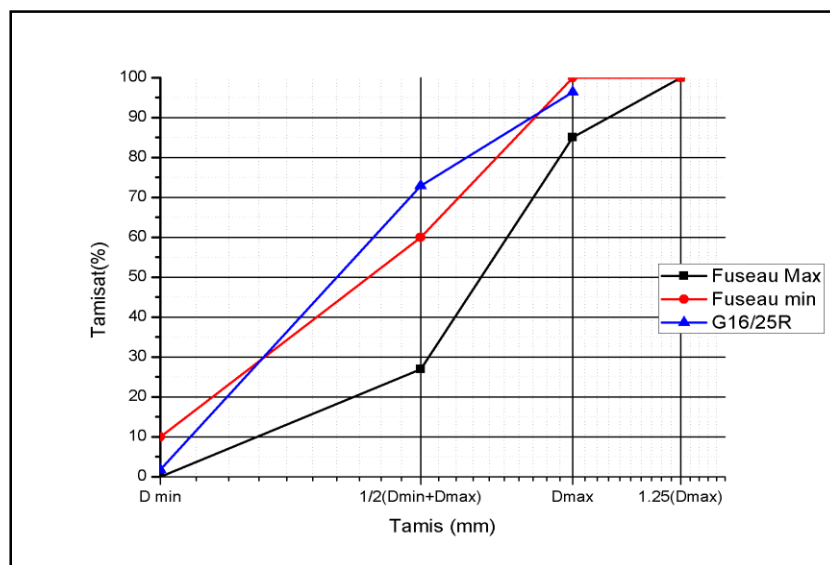


Figure II.14 : Courbe granulométrique du gravier roulés 16/25 de «oued M'aïter »

II.2.3 Le ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Il a une surface spécifique Blaine de

4120 cm²/g et une densité de 3,1 g/cm³. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Le ciment provient de l'usine (hammam Dhalaa).Le produit a comme identification CPJ-CEM II/A 42,5 et il a les caractéristiques suivantes :

Tableau II.29 : Caractéristiques du ciment utilisé dans notre recherche.

Caractéristique		Unités	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm ³	3,1
Consistance normale		%	26 - 28
La finesse (Blaine)		cm ³ / g	4000 - 4200
Le Chatelier	A froid / A chaud	mm	00 / 2
Temps de prise	Début / Fin	Heure : min	2 :30 / 3 :30
Résistance à la compression	2 jours	MPa	18
	7jours		32
	28 jours		plus de42.5

- Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé

L'analyse chimique et minéralogique du CPJ est établie au Laboratoire de la cimenterie « Lafarge » l'EX. ACC. A (hammam Dalaa) M'sila, Les résultats sont regroupés dans les tableaux Suivants :

Tableau II.30 : Caractéristiques chimiques du CPJ.

ELEMEN T	SiO2	AL2O3	CAO	FE2O3	MGO	SO3	Na2O
Teneur (%)	22.10	4.57	66.34	3.95	1.60	0.54	0.09

- Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ utilisé

Tableau II.31 : Caractéristiques minéralogique du CPJ.

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	3CaOSiO ₂	2CaOSiO ₂	3CaAL ₂ O ₃	4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
Teneur %	65.70	16.85	5.42	12.03

En conclusion, le ciment utilisé se présente comme suit :

- Désignation : Ciment Portland Composé
- Identification : CPJ-CEM II/A 42,5
- Composition : 80 à 94 % de Clinker et 6 à 20 % d'ajouts

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est une eau courante du laboratoire de département de génie civil.

- Caractéristique chimique de l'eau utilisée

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 2014 au laboratoire de département de chimie, université de M'sila.

Tableau II .32: Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage.

Les caractéristiques	La valeur
PH	7.71
conductibilité	1745
Chlore Cl ⁻	236.30 mg/l
Sulfate SO ₄ ⁻	349.60 mg/l
Magnésium Mg ²⁺	115.3 mg/l
Sodium Na ²⁺	néant
Calcium Ca ²⁺	269.50 mg/l

II.2.5 Adjuvant :

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex-NP implantée a ALGER , et commercialisé sous le nom de «MEDAFLOW 30», il est à base de poly carboxylates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5 à 2 % (en extrait sec) du poids de ciment.

Les caractéristiques du MEDAFLOW 30 sont :

- Formeliquide.
- Couleur.....jaunâtre.
- Densité1,07 ± 0,01.
- PH6 - 6,5.
- Teneur en chlore.....< 1 g/l.

Le super plastifiant «Medaflow 30» peut être utilisé dans plusieurs domaines comme pour les bétons auto-plaçant, les bétons précontraints, les ouvrages d'art, ou pour réduire le temps de coffrage .Son utilisation permet :

- **sur le béton frais :** L'amélioration de fluidité, le décoffrage rapide, la faciliter la mise en œuvre.
- **sur le béton durci :** D'augmenter la résistance mécanique à jeune âge, de diminuer la porosité, de diminuer le retrait et d'augmenter la durabilité.

Chapitre III / ESSAIS SUR LA COMPACTITE DES MELANGES DE FRACTIONS DE GRAVIERS BINAIRES ET TERNAIRES.

III.1 : Introduction :

La granularité conditionne la porosité du mélange. Si tout les grains avaient la même dimension, on aurait une porosité maximale, s'ils étaient répartis suivant une courbe discontinue on pouvait avoir une porosité minimale pour assurer un béton plus compacte, c'est-à-dire une bonne composition granulométrique correspond à un mélange des grains de différentes dimensions dont le volume entre les grains est plus petit. La granularité est donc, dans tout les cas, le paramètre fondamental [21].

Afin de minimiser la porosité du squelette de nos bétons, nous avons procédé a un mélange de fractions de gravier (3/8 et 8/15) ainsi les petits grains viendront se positionner dans les interstices des gros grains, notre but c'est de serrer la granularité de ces mélanges a travers l'optimisation de leurs masses volumiques apparentes et leurs porosités.

III.2 : Mélange binaire (fractions 3/8 et 8/15).

Tableau III.1: Proportions des fractions dans les mélanges.

fractions	Proportions des mélanges de fractions (%)								
	GC _{10/90}	GC _{20/80}	GC _{30/70}	GC _{40/60}	GC _{50/50}	GC _{60/40}	GC _{70/30}	GC _{80/20}	GC _{90/10}
GC _{3/8}	10	20	30	40	50	60	70	80	90
GC _{8/16}	90	80	70	60	50	40	30	20	10

- **Mesure de la masse volumique et de la porosité des mélanges de fractions de graviers.**

Après avoir préparé les mélanges de fractions de graviers suscité d'après les proportions données au tableau III .1, on a effectué des mesures de la masse

volumique apparente, calculé la porosité de chaque mélange et tracer la courbe granulométrique du mélange optimum.

Tableau. III .2 : Masse volumique et porosité pour mélanges de fractions.

Combinaison de fractions de graviers N°	Masse volumique apparente, (kg/l)	Porosité, (%)
GC _{10/90} (10% _{3/8} -90% _{8/16})	1.326	50.52
GC _{20/80} (20% _{3/8} -80% _{8/16})	1.362	49.18
GC _{30/70} (30% _{3/8} -70% _{8/16})	1.371	48.84
GC _{40/60} (40% _{3/8} -60% _{8/16})	1.376	48.66
GC _{50/50} (50% _{3/8} -50% _{8/16})	1.367	48.99
GC _{60/40} (60% _{3/8} -40% _{8/16})	1.347	49.74
GC _{70/30} (70% _{3/8} -30% _{8/16})	1.347	49.74
GC _{80/20} (80% _{3/8} -20% _{8/16})	1.341	49.96
GC _{90/10} (90% _{3/8} -10% _{8/16})	1.319	50.78

La combinaison du mélange GC_{40/60} avec (40% de fraction 3/8 mm et 60% de fraction 8/16 mm) donne une masse volumique apparente maximale (porosité minimale) FigIII.1 et FigIII.2.

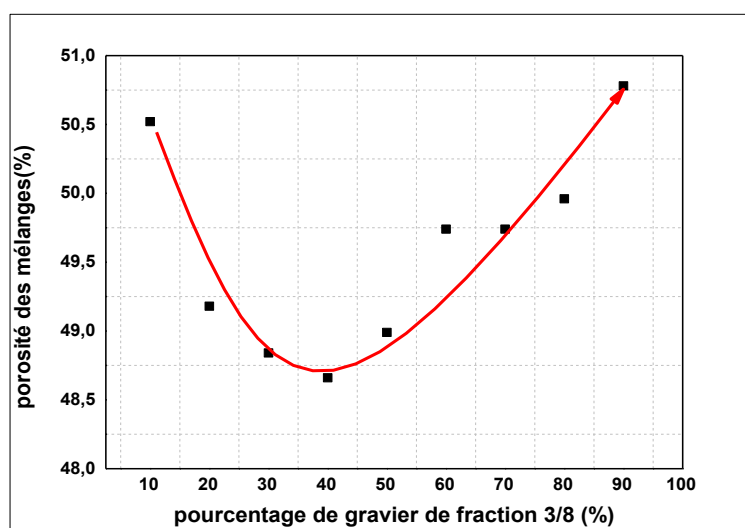


Figure III.1 : Porosité des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16.

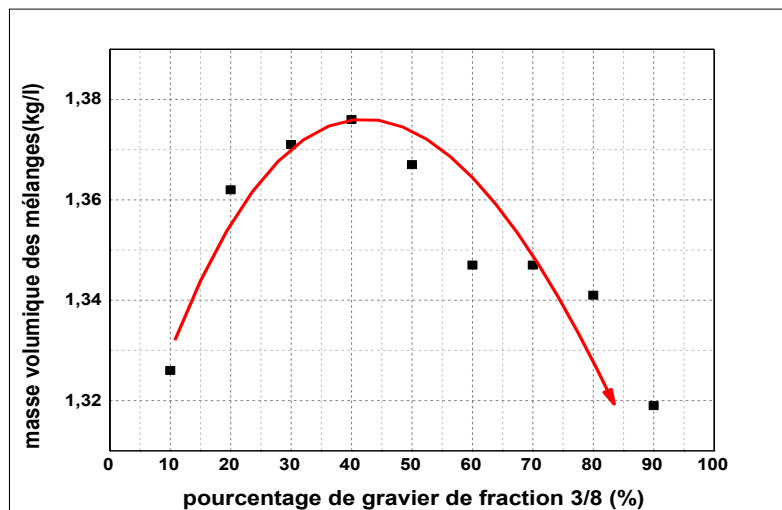


Figure .III.2 : Masses volumiques des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16.

- **Analyse granulométrique des mélanges de fractions de gravier 3/8 et 8/16:**

La composition granulométrique d'un mélange de fractions de gravier est calculée sur la base des compositions granulaires des fractions et de leur pourcentage dans ce mélange. Le refus partiel du mélange sur un tamis (R_{pm}) est calculé selon la formule :

$$R_{pm} = R_{pf}^1 \frac{X}{100} + R_{pf}^2 \frac{Y}{100}$$

Avec : R_{pf}^1 , R_{pf}^2 : refus partiel des fractions 1 et 2.

X, Y : pourcentages (proportions) de ces fractions dans le mélange.

Les refus cumulés et les tamis du mélange sont calculés à base des refus partiels trouvés. La composition granulométrique de tous les combinaisons de mélanges, sont présentée Fig.III.3.

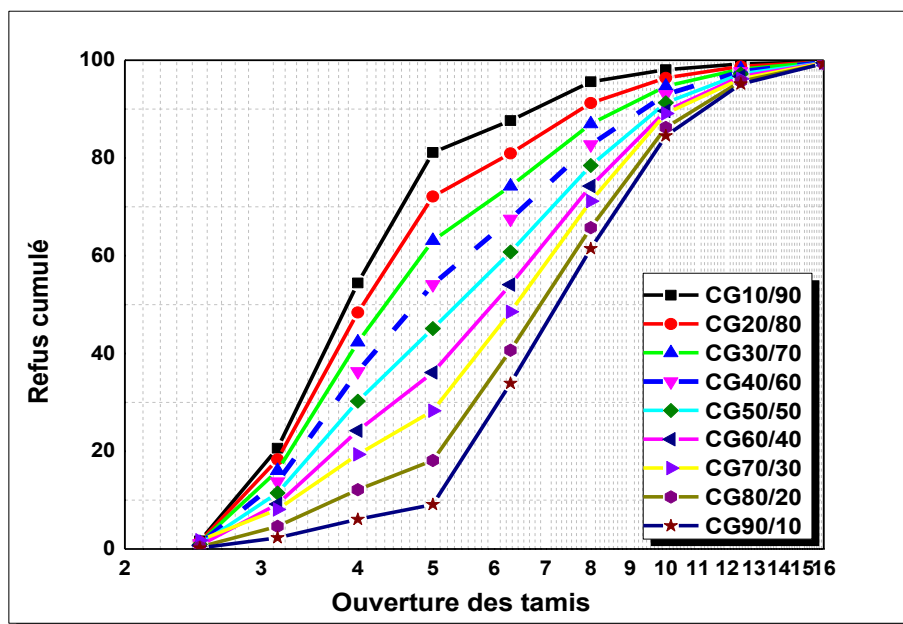


Figure .III.3 : Courbe granulométrique des différents mélanges.

La composition granulométrique du mélange optimum (40% de fraction 3/8 et 60% de fraction 8/16) et présentée Fig. III.4.

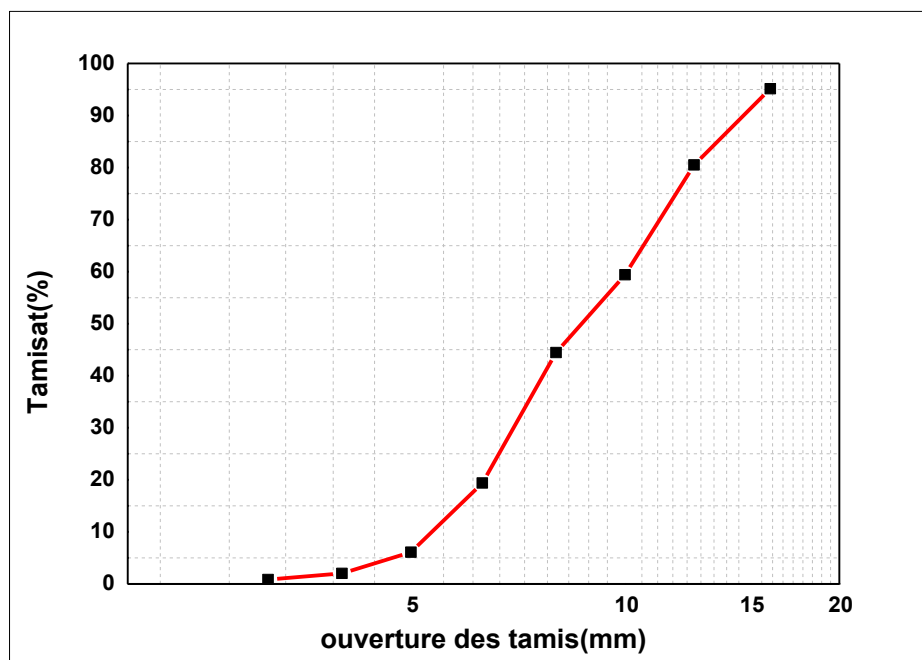


Figure III.4 : Courbe granulométrique du mélange optimum 40% (3/8) +60% (8/16).

Avec ce mélange optimal de fractions de gravier (40% de fraction (3/8) et 60% de fraction (8/16)) qui a donner une compacité maximale, et afin d’améliorer d’avantage les performances de notre béton, nous avons introduit différents pourcentages de gravier roulé de fraction (3/8 mm), ces graviers ont une surface extérieure lisse et arrondi, ils vont jouer le rôle de billes dans un roulement mécanique cela va améliorer la maniabilité de notre béton et réduire ainsi le rapport E/C , les combinaisons choisis suivant le pourcentage de gravier roulé dans le mélange sont présentées Tab 3.3.

Tableau III.3 : Pourcentage de gravier roulé dans les différents mélanges de gravier.

Mélanges de fraction $M_{(GR\ 3/8)/(GC\ 3/8)/(GC\ 8/16)}$	GR _{3/8} Gr. roulé (3/8)	GC _{3/8} Gr. concassé (3/8)	GC _{8/16} Gr concassé (8/16)
M0/40/60	0	40	60
M8/32/60	8	32	60
M16/24/60	16	24	60
M20/20/60	20	20	60
M24/16/60	24	16	60
M40/0/60	40	0	60

- Analyse granulométrique des mélanges de graviers roulé et concassé:

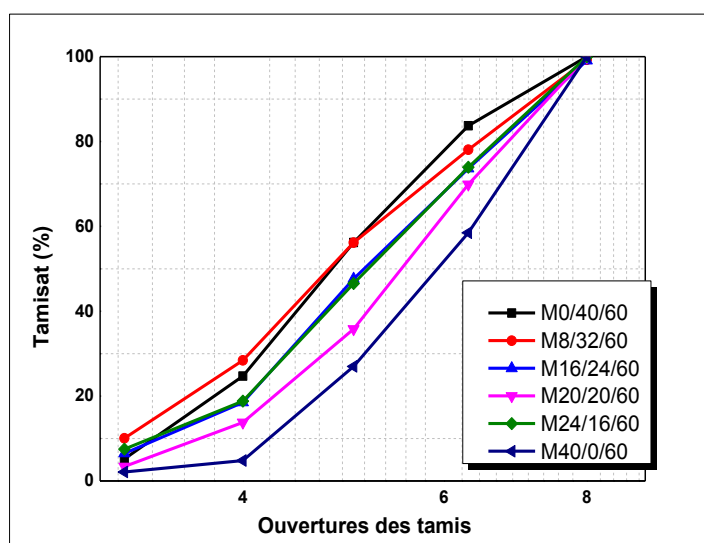


Figure III.5. Analyse granulométrique des mélanges de graviers

La mesure de la masse volumique apparente et le calcul de la porosité pour les différents mélanges étudiés sont présentés Figure III.5 et Figure III.6.

Tableau III.4 : Masse volumique apparente et Porosité des différents mélanges de gravier.

Mélange de fractions	M _{0/40/60}	M _{8/32/60}	M _{16/24/60}	M _{20/20/60}	M _{24/16/60}	M _{40/0/60}
Masse volumique apparente, (kg /l)	1,478	1,495	1,515	1,52	1,558	1,591
Porosité, (%)	41,11	40,43	39	39,44	37,84	36,61

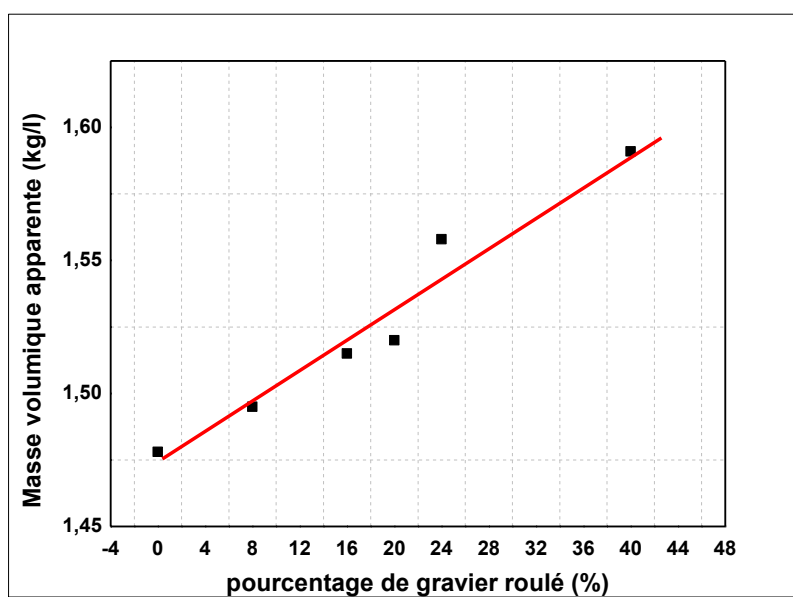


Figure III .6 . Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage de gravier roulé.

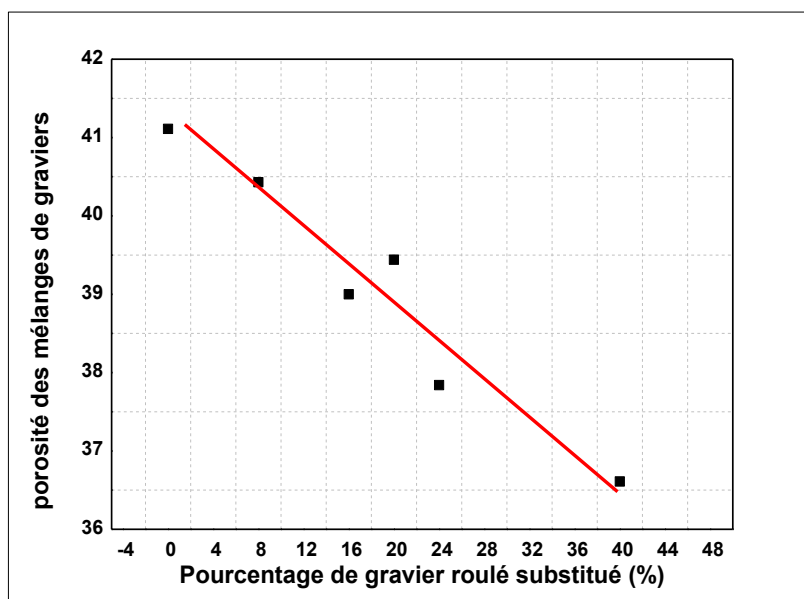


Figure III.7. Variation de la porosité en fonction du pourcentage de gravier roulé

III.3 : Mélange ternaire (fractions 3/8, 8/16 et 16/25).

Dans cette deuxième partie, et afin de minimiser la porosité du squelette de notre béton, nous avons procédé avec des mélanges de trois fractions de gravier (3/8 et 8/15 et 15/25) « mélange ternaire », comme pour les mélanges binaires, les petits grains viendront se positionner dans les interstices des gros grains, notre but c'est de serrer la granularité de ces mélanges à travers l'optimisation de leurs masses volumiques apparentes et leurs porosités.

Pour le mélange ternaire avec trois fractions, nous avons 36 combinaisons avec différentes proportions de chaque fraction, les combinaisons sont présentées au tableau III.

Tableau III.5 : proportions des fractions de gravier dans un mélange ternaire.

Combinaison, N°	Proportions des fractions, %			Combinaisons, N°	Proportions des fractions, %		
	3/8	8/16	16/25		3/8	8/16	16/25
1	10	10	80	19	30	40	30
2	10	20	70	20	30	50	20
3	10	30	60	21	30	60	10
4	10	40	50	22	40	10	50
5	10	50	40	23	40	20	40
6	10	60	30	24	40	30	30
7	10	70	20	25	40	40	20
8	10	80	10	26	40	50	10
9	20	10	70	27	50	10	40
10	20	20	60	28	50	20	30
11	20	30	50	29	50	30	20
12	20	40	40	30	50	40	10
13	20	50	30	31	60	10	30
14	20	60	20	32	60	20	20
15	20	70	10	33	60	30	10
16	30	10	60	34	70	10	20
17	30	20	50	35	70	20	10
18	30	30	40	36	80	10	10

- Mesure de la masse volumique apparente, et calcul de la porosité :

Nous avons préparé les mélanges avec les proportions suscités au tableau III.5, sur ces mélanges on a effectué des essais de la masse volumique apparente, et nous avons calculé la porosité et la composition granulométrique de chaque mélange (chaque combinaison) d'après la composition de chaque fraction incluse dans le mélange. Les

résultats d'essais effectués sur les mélanges ternaires (trois fractions) sont présentés au tableau III.6.

Tableau III.6 Masse volumique apparente et porosité des différents mélanges de fractions de gravier concassé Cosider.

Combinaison N°	Masse volumique Apparente (Kg/l)	Porosité (%)	Combinaison N°	Masse volumique Apparente (Kg/l)	Porosité (%)
1	1.255	53.17	19	1.291	51.83
2	1.336	50.15	20	1.286	52.20
3	1.317	50.86	21	1.294	51.72
4	1.322	50.67	22	1.330	50.37
5	1.379	48.54	23	1.351	49.59
6	1.369	48.92	24	1.348	49.70
7	1.387	48.25	25	1.325	50.56
8	1.369	48.92	26	1.304	51.34
9	1.343	49.89	27	1.330	50.37
10	1.359	49.29	28	1.327	50.48
11	1.369	48.92	29	1.338	50.07
12	1.421	46.98	30	1.307	51.23
13	1.307	51.23	31	1.333	50.26
14	1.379	48.54	32	1.317	50.86
15	1.299	51.53	33	1.340	50.00
16	1.314	50.97	34	1.314	50.97
17	1.330	50.37	35	1.294	51.72
18	1.359	49.29	36	1.320	50.75

Classification des mélanges d'après leurs masses volumiques apparentes :

D'après les résultats présentés au tableau III.6, nous avons classé les masses volumiques rapprochées (écart de l'ordre de 0.02 kg/l) pour chaque mélange combiné, le classement est présenté au tableau III.7.

Tableau III.7 : Classification des mélanges d'après les masses volumiques apparente.

Classe N° :	Fourche des masses Volumique apparente, Kg/l	Mélange N°
1	1.250 – 1.270	1
2	1.270 – 1.290	20
3	1.290 – 1.310	13-15-19-21-26-30-35
4	1.310 – 1.330	3-4-16-25-28-32-34-36
5	1.330 – 1.350	2-9-17-22-24-27-29-31-33
6	1.350 – 1.370	6-8-10-11-18-23
7	1.370 – 1.390	5-7-14
8	1.390 – 1.410	néant
9	1.410 – 1.430	12

- **Classification des mélanges d'après leurs porosités**

Nous avons aussi classé les mélanges de fractions de gravier selon leur porosité rapprochée (dans une fourchette de 2% d'écart), les résultats sont présentés au tableau III.8.

Tableau III.8 : Classification des mélanges d'après leurs porosités.

Classe N°	Fourchette des porosités, %	Mélange N°
1	45-47	12-13-16-18-19-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-34-35 -36
2	47-49	2-3-4-5-6-7-8-10-11-14-15-17-21-33
3	49-51	1-9-20

- Mélange optimale des fractions du gravier

Le mélange optimal d’après les tableaux III.6, III.7 et III.8 est le mélange N°12, qui donne la masse volumique la plus importante donc la porosité minimale, les proportions de ce mélange sont présentés au tableau 3.9.

Tableau III.9: Mélange optimal M12 du gravier Cosider de fractions 3/8,8/16, et16/25

Pourcentage des fractions ; (%)			D _{max} ; (mm)	Masse Volumique absolue, (kg/l)	Masse volumique apparente, (kg/l)	Porosité ; (%)
3/8	8/15	15/25				
20	40	40	25	2.68	1.421	46.98

- Composition granulométrique d’un mélange ternaire

La composition granulométrique de chaque mélange est calculée sur la base des compositions granulaires des fractions (3/8, 8/15 et 15/25) et de leur pourcentage dans ce mélange. Le refus partiel du mélange sur un tamis quelconque (R_{pm}) pour un mélange ternaire de trois fractions I, II, III :

$$R_{pm} = R_{pf}^1 \frac{X}{100} + R_{pf}^2 \frac{Y}{100} + R_{pf}^3 \frac{Z}{100}$$

Avec :

$R_{pf}^1, R_{pf}^2, R_{pf}^3$: Refus partiel des fraction 1, 2, 3.

X, Y, Z : proportions (pourcentages) de ces fractions dans le mélange.

Les refus cumulés et les tamisas du mélange sont calculés à base des refus partiels trouvés.

- Analyse granulométrique du mélange optimum.

Tableau III.10 : Composition granulométrique du mélange optimum.
(M12 : 20% 3/8, 40% 8/16, 40 % 16/25).

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel des fractions, (%)			Refus partiel total, (%)	Refus cumulé total, %	Tamisât total, %
	3/8	8/16	16/25			
31.5	0	0	0	0	0	100
25	0	0	2.85	2.85	2.85	97.15
20	0	0	21.95	21.95	24.80	75.20
16	0	3.23	13.83	17.06	41.86	58.14
12.5	0	9.76	1.26	11.02	52.88	47.12
10	0	14.2	1.26	14.20	67.08	32.92
8	1.31	8.21	0	9.52	76.60	23.40
6.3	10.50	4.72	0	15.22	91.82	8.18
5	5.14	0	0	5.14	96.96	3.04
4	2.04	0	0	2.04	99.00	1.00
3.15	0.59	0	0	0.59	99.59	0.41

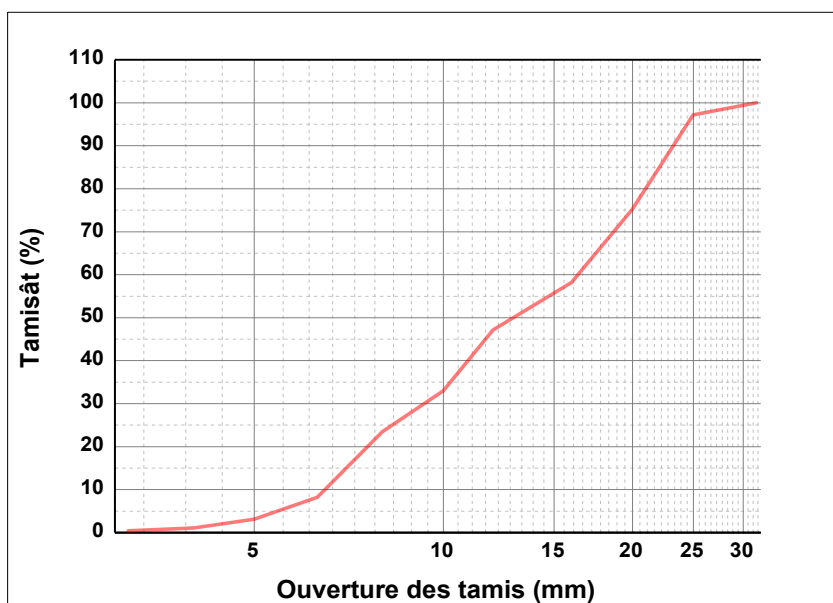


Figure III.8 : Courbe granulométrique du mélange optimum.

- Composition des mélanges optimaux de gravier roulé et gravier concassé

En partant de ce mélange optimum qui nous adonné une compacité maximale, nous avons introduit un autre type de gravier à savoir le gravier roulé d'origine alluvionnaire, de fractions 3/8, 8/16, et 16/25, avec différents pourcentages, toujours dans la même idée d'améliorer la compacité de nos mélanges et au même temps améliorer la fluidité de nos bétons en introduisant un certain pourcentage de gravier roulé, nous avons choisi 5 mélanges, exposés de la manière suivante : $M_{(GC\ 3/8) / (GC8/16) / (GC\ 16/25) / (GR3/8) / (GR\ 8/16) / (GR15/25)}$, les trois fractions du gravier concassé « Cosider » sont suivi des trois fractions du gravier roulé de « oued M'aïter », On prend donc la fraction 3/8 pour les deux types de graviers avec un pourcentage 0%, 10%, et 20%, la fraction 8/16 pour les deux types de graviers avec un pourcentage 0%, 20%, et 40%, la fraction 16/25 pour les deux types de graviers avec un pourcentage 0%, 20%, et 40%, en se référant au pourcentage des fractions de gravier du mélange optimum M12 (20% 3/8 + 40% 8/16 + 40% 16/25).

les mélanges étudiés sont présentés dans le tableau III.11.

Tableau III.11 : Pourcentage de gravier roulé et concassé dans les différents mélanges de gravier étudié.

Mélange de fraction	Gravier Concassé (3/8) GC _{3/8} (%)	Gravier Concassé (8/16) GC _{8/16} (%)	Gravier Concassé (16/25) GC _{16/25} (%)	Gravier Roulé (3/8) GR _{3/8} (%)	Gravier Roulé (8/16) GR _{8/16} (%)	Gravier roulé (16/25) GR _{16/25} (%)
$M_{20/40/40/0/0/0}$	20	40	40	0	0	0
$M_{0/40/40/20/0/0}$	0	40	40	20	0	0
$M_{20/0/40/0/40/0}$	20	0	40	0	40	0
$M_{0/0/40/20/40/0}$	0	0	40	20	40	0
$M_{10/20/20/10/20/20}$	10	20	20	10	20	20

- Mesure de la masse volumique et calcul de la porosité des mélanges de graviers.

La porosité est donné par la formule : $P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100$, (%)

La compacité est donné par la formule : $C = \left(\frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) = 100 - P$, (%)

Tableau III.12 : Masse volumique apparente et Porosité pour les différents mélanges de gravier.

Mélange de fractions	$M_{20/40/40/0/0/0}$	$M_{0/40/40/20/0/0}$	$M_{20/0/40/0/40/0}$	$M_{0/0/40/20/40/0}$	$M_{10/20/20/10/20/20}$
Dénomination	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Masse volumique apparente (kg/l)	1.451	1.517	1.287	1.556	1.536
Porosité (%)	42.42	39.80	48.93	38.25	39.05
Compacité (%)	57.58	60.2	51.07	61.75	60.95

le Mélange M₃ donne la masse volumique la plus faible a cause de la discontinuité de ce mélange due à l'absence de la fraction 3/8 de gravier roulé et 8/16 de gravier concassé , le mélange M₄ donne la porosité la plus faible parmi ces mélanges, ce mélange contient 20 % de gravier roulé de fraction 3/8 et 40% de gravier roulé de fraction 8/16, ce qui facilite le réarrangement des grains de gravier dans le mélange. Donc pour le mélange M₄ qui a donné la plus faible porosité en remarque le rôle bénéfique que joue la fraction 3/8 de gravier roulé dans le réarrangement des grains dans le mélange de gravier a cause de ca forme arrondie et ca surface extérieure lisse.

Chapitre IV / ESSAIS SUR BETON FRAIS ET DURCIS AVEC MELANGES DE GRAVIERS BINAIRES ET TERNAIRES.

IV.1 : Mélange Binaire

- Mélanges optimums des graviers

Avec les mélanges optimums obtenus par des essais de compacité (voir *Tableau III.3* chapitre III), nous avons confectionné nos bétons :

Tableau III.3 : Pourcentage de gravier roulé dans les différents mélanges de gravier.

Mélanges de fraction	GR _{3/8}	GC _{3/8}	GC _{8/16}
M _{(GR 3/8)/(GC 3/8)/(GC 8/16)}	Gr. roulé (3/8)	Gr. concassé (3/8)	Gr concassé (8/16)
M _{0/40/60}	0	40	60
M _{8/32/60}	8	32	60
M _{16/24/60}	16	24	60
M _{20/20/60}	20	20	60
M _{24/16/60}	24	16	60
M _{40/0/60}	40	0	60

- Calcul des proportions des constituants

Formulation du béton « Méthode de Dreux - Gorisse »

Tableau IV.1 : Données de bases pour la formulation des bétons.

Données de base	valeur
Béton normal	classe C25/30.
Consistance	béton plastique.
Dimension maximale de granulat	D= 16mm
Forme des granulats	Granulats concassés et granulats roulés
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 350kg/m ³
Classe vraie du ciment	425 bars
Module de finesse MF	2
Coefficient granulaire G	0.45
AF	6

Les constituants et leurs quantités sont présentés au tableau suivant :

Tableau IV.2 : Composition pour 1 m³ de béton.

CONSTITUANTS	QUANTITE Kg/m ³
Ciment	400
Gravier (3/8)	479.30
Gravier (8/16)	720.70
Sable (0/5)	624.80
Eau	200

IV.1.1 : Résultats des essais sur béton frais :

A/ Bétons sans adjuvants

- **Masse volumique du béton frais**

La masse volumique du béton frais varie légèrement de l'ordre de 1.17%, avec l'introduction du gravier roulé 3/8, voir tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Masse volumique du béton frais.

Béton	B _{0/40/60}	B _{8/32/60}	B _{16/24/60}	B _{20/20/60}	B _{24/16/60}	B _{40/0/60}
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	8	16	20	24	40
Masse volumique du béton frais (kg/l)	2.50	2.49	2.50	2.51	2.55	2.58

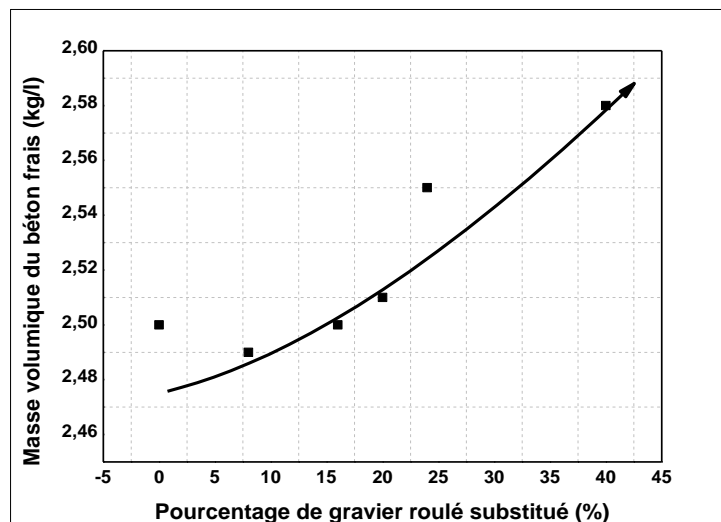


Figure IV.1 : Variation de la masse volumique à l'état frais des mélanges de bétons.

- **Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges**

La résistance à été longtemps considéré comme la qualité essentielle à rechercher pour un béton ; ouvrabilité et résistance sont à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton [5], [137].

La présence de gravier roulé de fraction 3/8 (surface lisse et arrondi) dans le béton, améliore ça maniabilité et on remarque une diminution du rapport E/C pour les mélanges de béton avec un pourcentage élevé de gravier roulé 3/8.

On note ici qu'on à remplacer la lettre (M) pou mélange par la lettre (B) pour béton et cela pour les six mélanges de béton.

Tableau IV.4 : Réduction d'eau et Rapport E/C des différents mélanges.

Bétons	B _{0/40/60}	B _{8/32/60}	B _{16/24/60}	B _{20/20/60}	B _{24/16/60}	B _{40/0/60}
Réduction d'eau	0	1.2	2	2.53	4.5	14.33
Rapport E/C	0.57	0.51	0.50	0.49	0.46	0.44

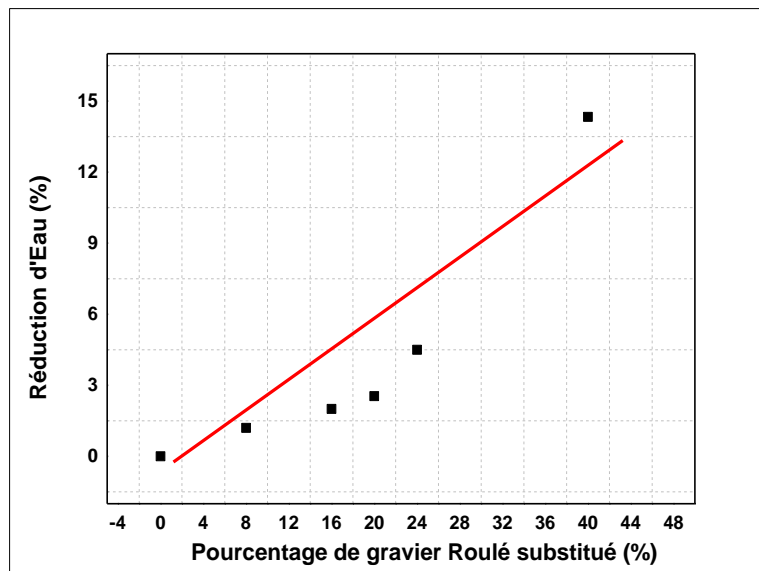


Figure IV.2 : Réduction d'eau en fonction du Pourcentage de gravier roulé substitué.

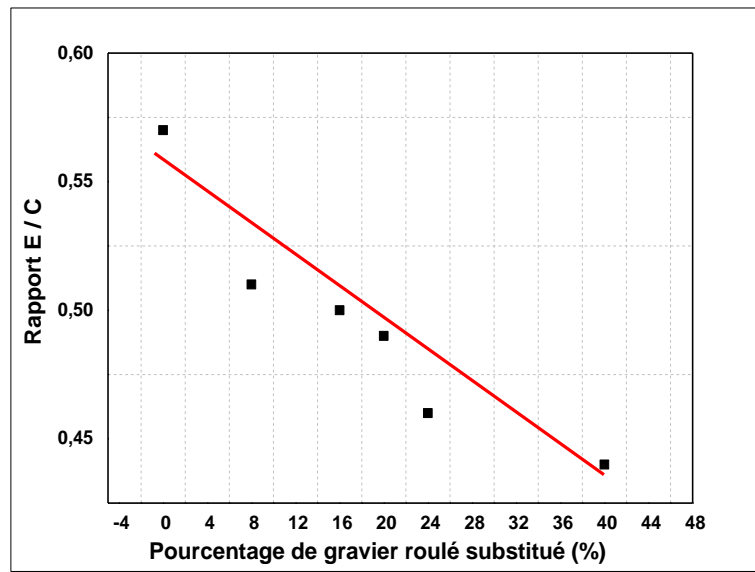


Figure IV. 3 : Rapport E/C en fonction du Pourcentage de gravier roulé substitué.

Une réduction d'eau de gâchage et une diminution du rapport E/C à été remarquée après introduction du gravier roulé de fraction 3/8 dans les différents mélanges de béton, la diminution du rapport E/C est de 22,8 % pour un béton avec 100% de gravier roulé de la fraction 3/8 ($B_{40/0/60}$), ceci est due à la forme arrondie et à la surface lisse de ces grains qui travaillent comme des billes dans un roulement mécanique, il favorise ainsi la maniabilité du béton frais en réduisant l'eau de gâchage et le rapport E/C, Figure IV.2, IV.3 et IV.4.

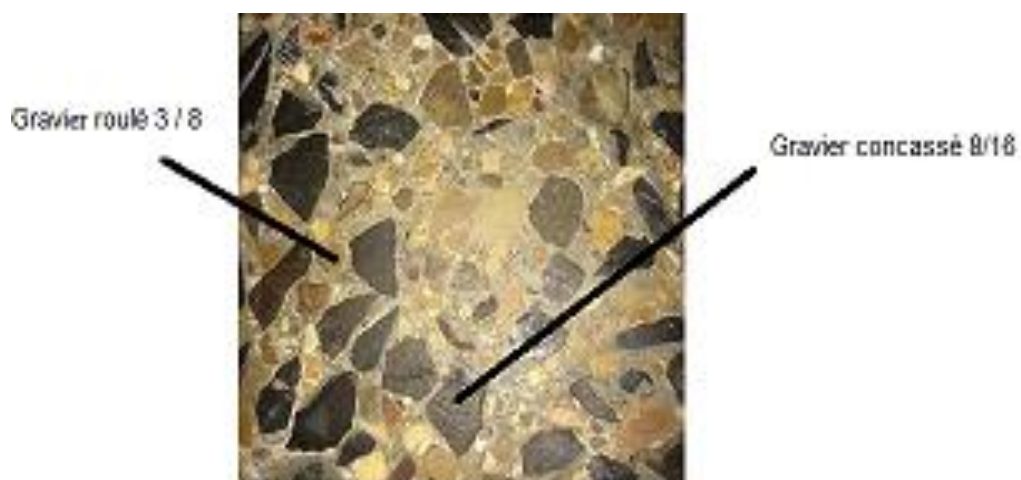


Figure IV.4 : disposition des grains de graviers roulés de fraction 3/8
Entre les grains de gravier concassé de fraction 8/16.

B/ Bétons avec adjuvants :

Les adjuvant super plastifiant sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains de ciment ainsi que les autres fines et ultrafines. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C conduisant à une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. [138]

On a utilisé un super plastifiant fabriqué par la société « GRANITEX » implantée à Alger, le « MEDAFLOW 30 » avec un pourcentage de 1.5 % de la masse du ciment substitué.

- Masse volumique du béton frais avec adjuvants.

La masse volumique du béton frais varie légèrement de l'ordre de 2 %, avec l'introduction du super plastifiant « MEDAFLOW 30 ».

Tableau IV.5 : Masse volumique du béton frais avec adjuvants pour les différents mélanges.

Béton	B _{0/40/60}	B _{8/32/60}	B _{16/24/60}	B _{20/20/60}	B _{24/16/60}	B _{40/0/60}
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	8	16	20	24	40
Masse volumique du béton frais (kg/l)	2.501	2.503	2.498	2.518	2.543	2.582

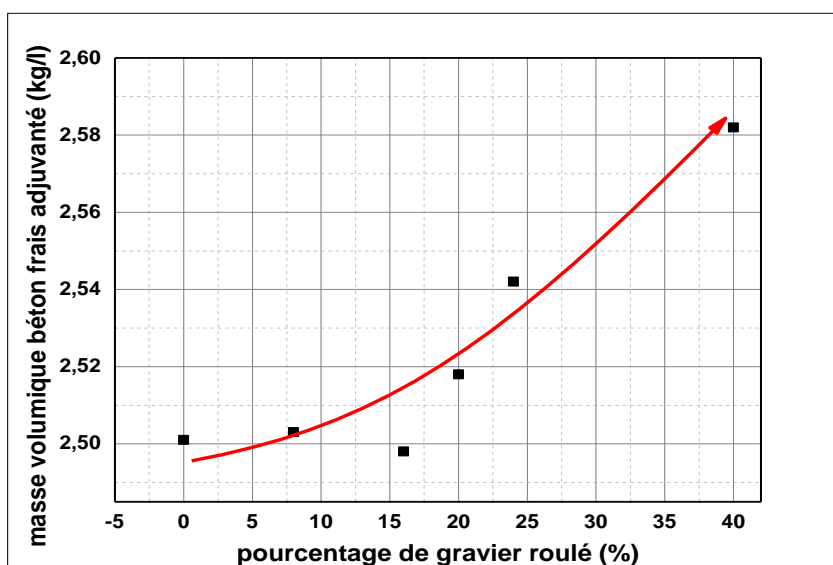


Figure IV.5 : Masse volumique du béton frais avec adjuvant.

Tableau IV.6 : Réduction d'eau et rapport E/C du béton frais avec adjuvant.

Béton	B _{0/40/60}	B _{8/32/60}	B _{16/24/60}	B _{20/20/60}	B _{24/16/60}	B _{40/0/60}
Réduction d'eau	1	2.39	3.98	5.04	8.95	28.63
Rapport E/C	0.43	0.39	0.38	0.37	0.35	0.30

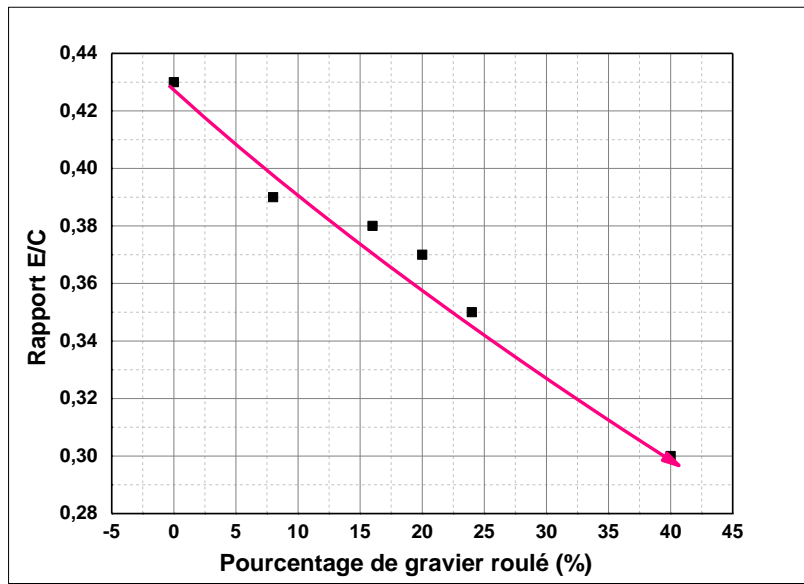


Figure IV.6 : Rapport E/C du béton frais avec adjuvant.

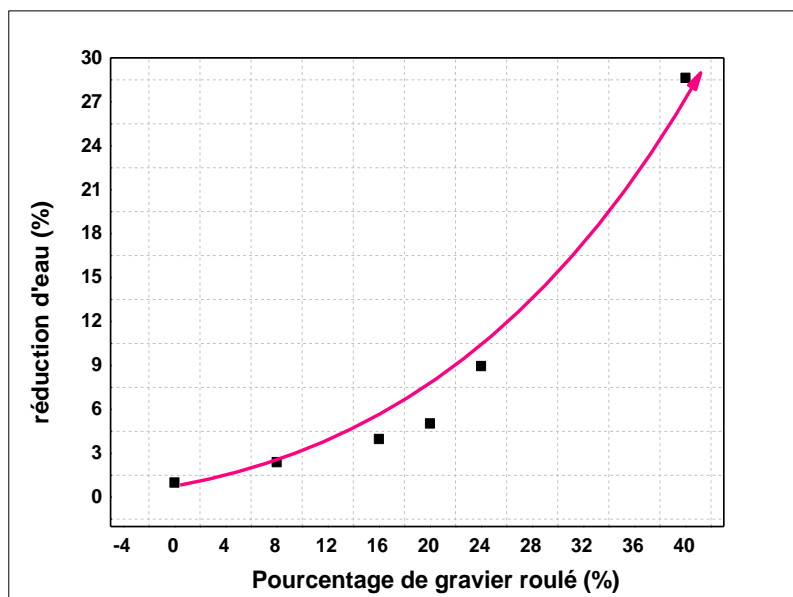


Figure IV.7 : Réduction d'eau du béton frais avec adjuvant.

L'introduction de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 », un super plastifiant avec un dosage de 1.5 % et l'introduction du gravier roulé de fraction 3/8 améliore d'avantage la maniabilité du béton frais et on remarque une diminution du rapport E/C de **47 %** par rapport au béton témoin **B_{0/40/60}** et de **31.8 %** par rapport au béton **B_{40/0/60}**, figure IV.5 et IV.6.

IV.1.2 : Résultats des essais sur béton durci:

Les méthodes de Dreux-Gorisse , de Baron et Lesage ont pour but de définir les quantités des différents composants à introduire dans le malaxeur et de déterminer par une expérimentation poussée les valeurs numériques des différents paramètres.

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur et une fois le malaxage terminé, nous versons le béton dans des moules cubiques (10*10*10) cm, au moyen d'une pelle à coque cylindrique de dimension appropriée au volume des éprouvettes et nous accompagnons l'introduction d'un mouvement de répartition.

L'affaissement de nos bétons étant fixé entre cinq et six , nous avons procédé à la mise en place du béton dans les moules en deux couches d'égale importance par aiguille vibrante, conformément à la norme NF P 18-422.

- Enfin, nous procédons à l'arasement de la surface supérieure de l'éprouvette à l'aide d'une règle d'arasement, conformément à la norme NF P 18-404.

- Conservation des éprouvettes

A/ Conservation avant démoulage

L'arasement terminé, les éprouvettes sont conservées, sans être déplacées pendant 24 heures \pm 1 heure au sein de notre laboratoire à la température d'environ $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et chacune d'entre-elle est numérotée.

B/ Conservation après démoulage

Le démoulage des éprouvettes s'est effectué avec le plus grand soin pour ne pas épaufrer les arrêtes, et nous avons repéré, pour chaque éprouvette, la face d'arasement.

Le but recherché est de conserver les moules et les éprouvettes dans des conditions voisines de celles auxquelles est soumis le béton de l'ouvrage, d'où la recherche de conditions de conservation appropriées. Dans le cadre de cette étude; les éprouvettes ont été conservées totalement immergées dans l'eau à une température de $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

- **Caractérisation du béton a l'état durci.**

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité peuvent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et de l'établissement des spécifications de conformité.

Chaque éprouvette réalisée, a été soumise, à l'âge de 7 jours, 14 jours et 28 jours, aux essais suivants :

- **Mesure de la masse volumique du béton durci sans adjuvant.**

L'éprouvette étant essuyée, nous le peson et nous calculons sa masse volumique apparente, en divisant sa masse par le volume correspondant.

Tableau IV.7 : Masse volumique à l'état durci en fonction du type de béton sans adjuvant

N° de béton	La masse volumique à l'état durci ρ (kg/l)			
	1j	7j	14j	28j
B_{0/40/60}	2.4	2.423	2.432	2.428
B_{8/32/60}	2.440	2.428	2.439	2.430
B_{16/24/60}	2.420	2.426	2.450	2.430
B_{20/20/60}	2.40	2.440	2.460	2.450
B_{24/16/60}	2.42	2.445	2.455	2.458
B_{40/0/60}	2.440	2.424	2.430	2.435

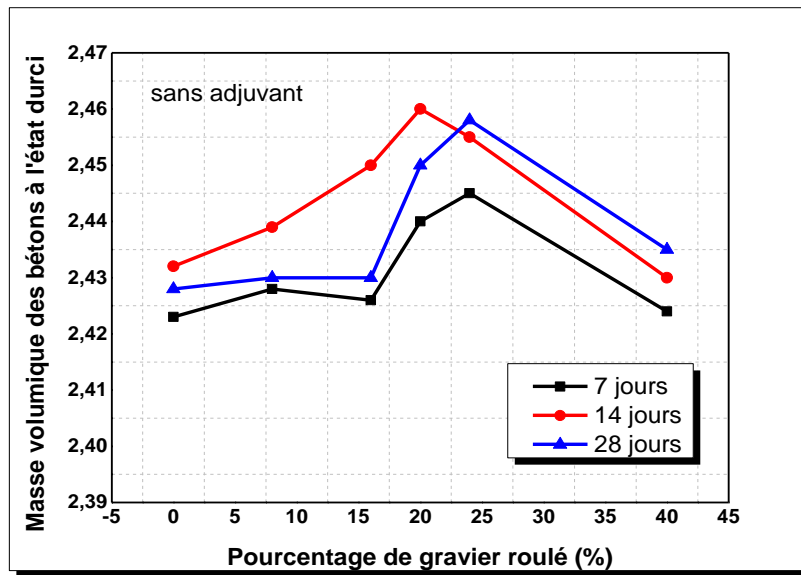


Figure IV.8 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué bétons sans adjuvants.

- **Mesure de la masse volumique du béton durci avec adjuvant.**

Tableau IV.8 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué, bétons avec adjuvants.

N° de béton	La masse volumique à l'état durci ρ (kg/l)			
	1j	7j	14j	28j
B_{0/40/60}	2.448	2.464	2.471	2.464
B_{8/32/60}	2.480	2.469	2.478	2.466
B_{16/24/60}	2.465	2.467	2.489	2.466
B_{20/20/60}	2.5	2.5	2.48	2.485
B_{24/16/60}	2.465	2.486	2.485	2.490
B_{40/0/60}	2.490	2.480	2.45	2.470

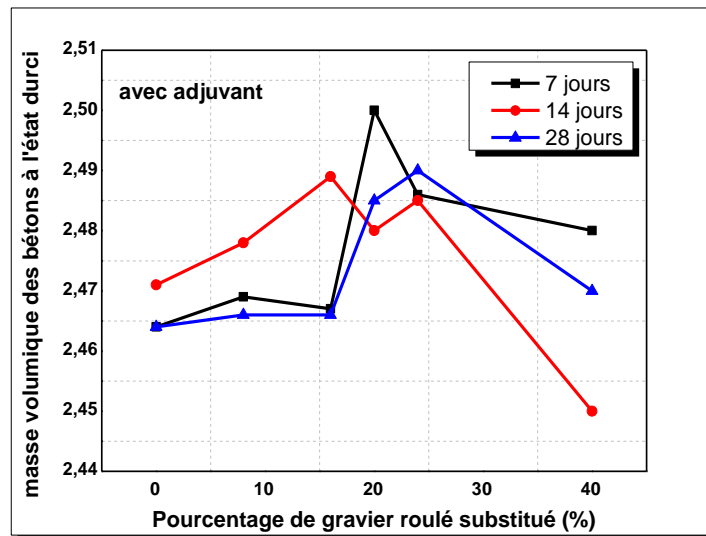


Figure IV.9 : Masse volumique à l'état durci en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué, bétons avec adjuvants.

La masse volumique du béton durcis augmente en augmentons le pourcentage de gravier roulé de fraction 3/8 cela est due au rôle de ces grains dans l'organisation et la bonne disposition des différentes grains de graviers au sein du squelette de notre béton, la variation de la masse volumique avec le temps est faible (0.8 % pour B_{40/0/60}) à cause de la bonne compacité de nos mélanges de béton frais.

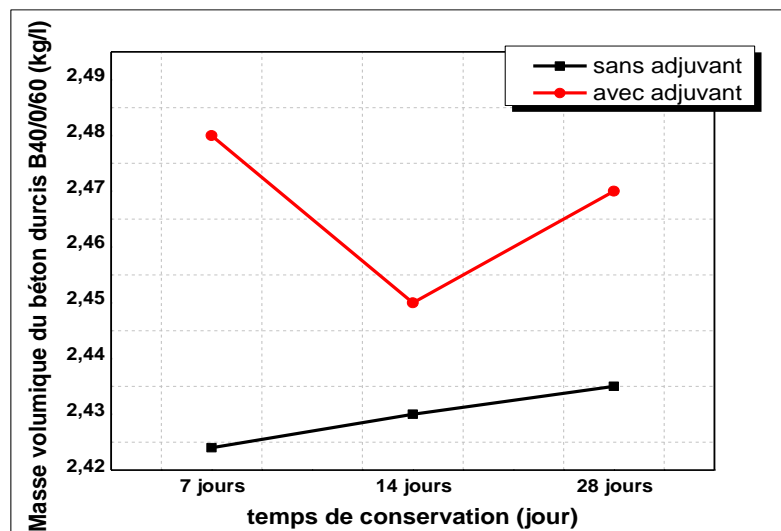


Figure IV.10 : Masse volumique du béton durcis B_{40/0/60} en fonction du temps.

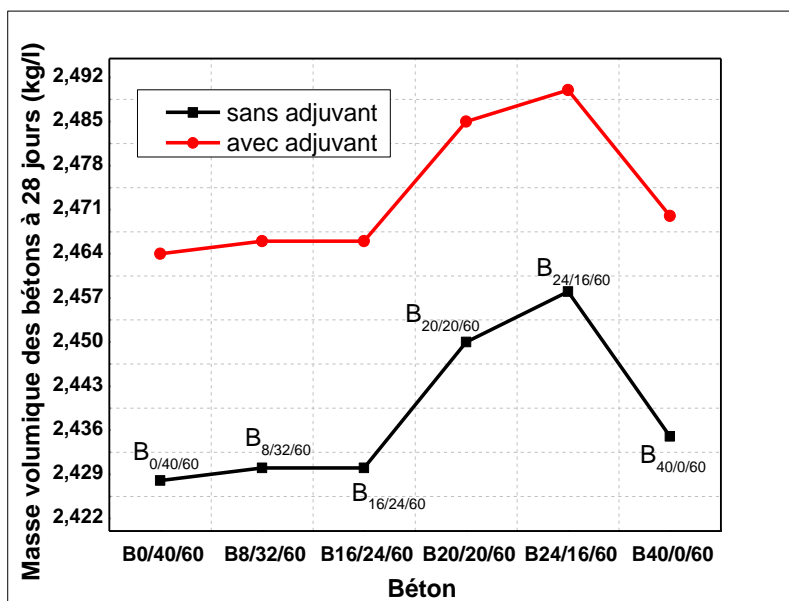


Figure IV.11 : Masse volumique des bétons durcis à 28 jours en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

Le mélange B_{20/20/60} et le mélange B_{24/16/60} donnent les meilleures valeurs de la masse volumique, on peut expliquer cela par le fait qu'avec des dosages de la fraction 3/8 entre 20 et 24 %, la majorité des vides entre les grains de la fraction 8/16 sont comblés par les grains de la fraction 3/8 roulé au-delà de ces valeurs les grains de la fraction 3/8 créés eux mêmes des vides et la porosité augmente. Avec ces pourcentages de 20 et 24 % de la fraction 3/8 roulé, il existe encore des vides entre les grains de la fraction 8/16 qui ne sont pas comblés.

Au-delà de 40 % de gravier de fraction 3/8, on a trouvé que la porosité augmente d'avantage, voir chapitre III.

- **Essai de résistance mécanique à la compression.**
- **Surfaçage des faces de chargement**

Normalement on procède au surfaçage des éprouvettes à l'aide du soufre normalisé qui en général, donne satisfaction. Il adhère convenablement au béton et ne l'affecte en aucun cas. Des essais réalisés dans des laboratoires ont montré que dans la plupart des cas, la résistance à la compression du mélange « soufre-sable » est supérieure à celle du béton. Il se compose de 65 parties de soufre et 35 parties de sable fin, dont le diamètre maximal est inférieur à 0.5 mm, conformément à la norme NA 2599.

Le surfacage a pour but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement ainsi que l'orthogonalité de celles-ci par rapport aux génératrices du cylindre, toutefois, il permet aussi de diminuer le frettage.

- **Résistance mécanique à la compression en fonction du pourcentage de gravier roulé.**

La résistance à la compression augmente en augmentons le pourcentage de gravier roulé de la fraction 3/8, la présence de ces graviers roulés favorise la maniabilité du béton frais et réduit le rapport E/C, l'augmentation est de 29% pour le béton $B_{40/0/60}$ par rapport au béton témoin $B_{0/40/60}$.

Aussi l'introduction de 1.5 % d'adjuvant MEDAFLOW 30 améliore la résistance à la compression du béton durcis $B_{40/0/60+ADJ}$ de 38% par rapport au béton témoin $B_{0/40/60}$ et de 12.7% par rapport au béton $B_{40/0/60}$ (figure IV.14).

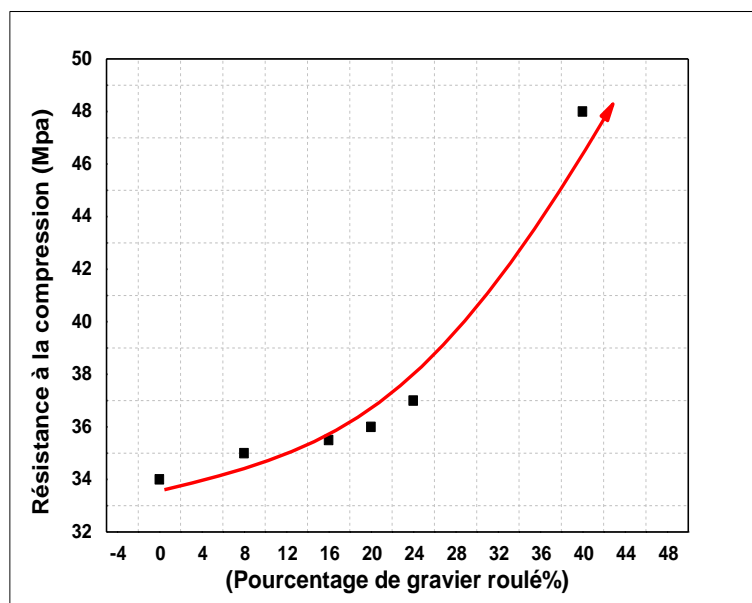


Figure IV.12 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

- Résistance mécanique à la compression en fonction du temps.

a/ béton sans adjuvant

Tableau IV.9 : Résistance à la compression en fonction du temps pour bétons sans adjuvants.

type de béton	résistance à la compression (bar)		
	7j	14j	28j
B0/40/60	270	310	330
B8/32/60	300	320	340
B16/24/60	280	310	350
B20/20/60	325	340	355
B24/16/60	340	350	361
B40/0/60	350	430	480

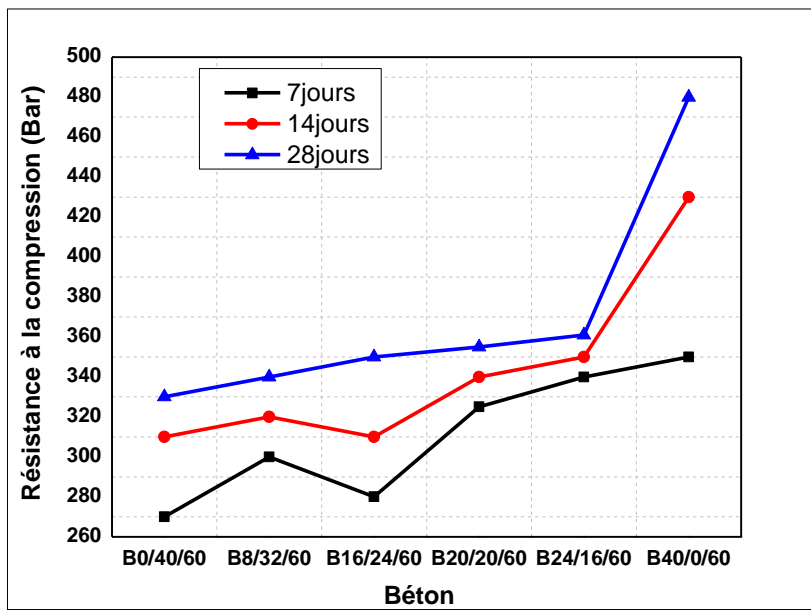


Figure IV.13 : Résistance à la compression pour bétons sans adjuvants.

b/ béton avec adjuvant : Un super plastifiant le « Medaflow30 » à 1.5%.

Tableau IV.10 : Résistance à la compression en fonction du temps, pour bétons avec adjuvants

type de béton	Résistance à la compression (bar)		
	7j	14j	28j
B_{0/40/60+adj}	310	378	395
B_{8/32/60+adj}	324	385	408
B_{16/24 /60+adj}	345	394	415
B_{20/20/60+adj}	425	450	485
B_{24/16 /60+adj}	420	462	550
B_{40/0/60+ adj}	500	520	575

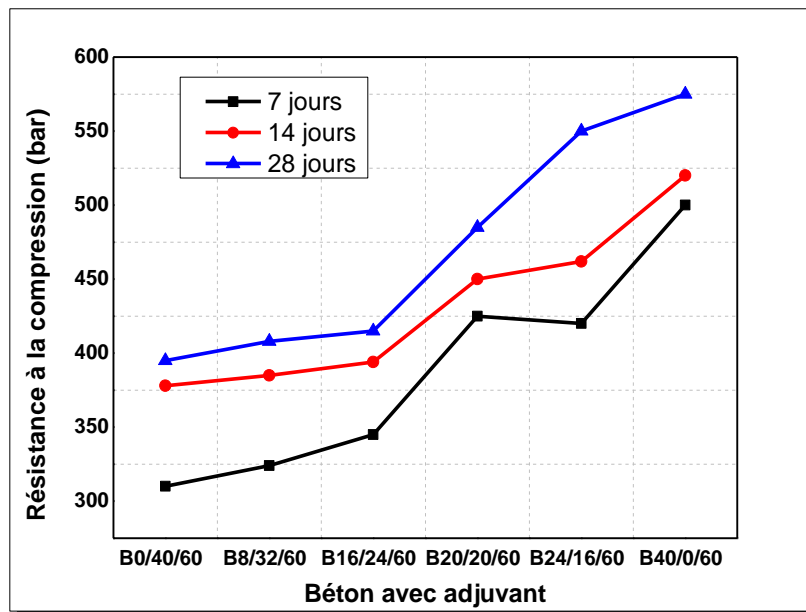


Figure IV.14 : Résistance à la compression pour bétons avec adjuvant.

- **Résistance mécanique à la compression des bétons avec ou sans adjuvant en fonction des mélanges de fractions de graviers.**

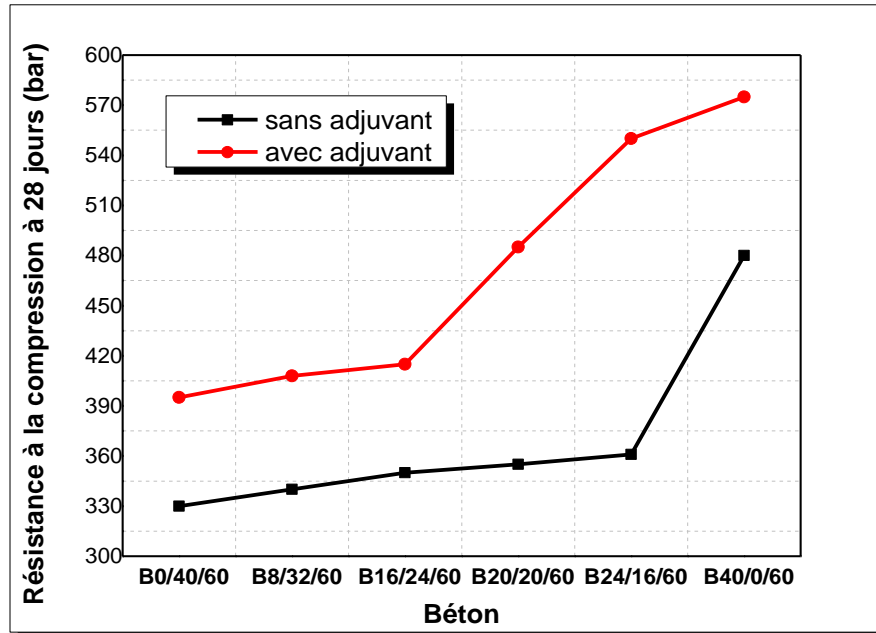


Figure IV.15 : Résistance à la compression des bétons avec ou sans adjuvant en fonction des mélanges de fractions de graviers.

- **Resistance à la compression en fonction de la porosité.**

Nous avons vu au chapitre 3 figure 3.6 la variation de la porosité des mélanges de graviers en fonction du pourcentage de gravier roulé substitués, ces mélanges avec lesquels nous avons confectionner nos bétons : **B0/40/60**, **B8/32/60**, **B16/24/60**, **B20/20/60**, **B24/16/60**, **B40/0/60**.

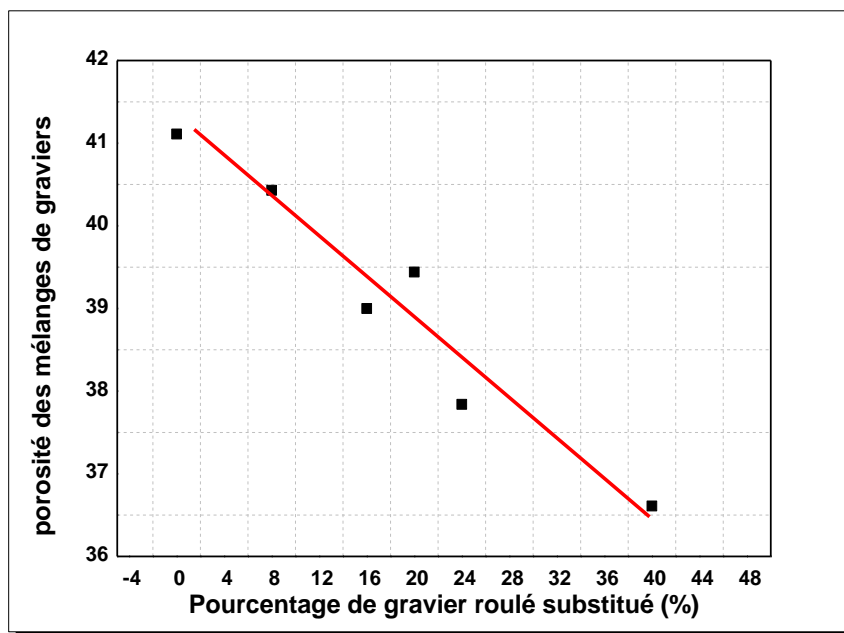


Figure III.6 : Variation de la porosité en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

a/ Mélange sans adjuvant.

les mélanges avec une porosité minimale donne les meilleures résistance à la compression, c'est le cas du mélange de béton avec 40 % de gravier roulé substitué **B_{40/0/60}** avec une porosité minimale du mélange de gravier 36.61%, du mélange **B_{24/16/60}** avec une porosité 37.84%, puis les autres mélanges par ordre décroissant de la résistance à la compression : **B_{20/20/60}**, **B_{16/24/60}**, **B_{8/32/60}** et enfin **B_{0/40/60}** qui à la plus grande porosité parmi les mélanges étudiés et qui donne la plus faible résistance.

Tableau IV.11 : Résistance à la compression du béton à 28 jours en fonction de la Porosité des mélanges de gravier.

Mélange de béton	Porosité des mélanges de graviers	Résistance à la compression à 28 jours (bar)
B_{0/40/60}	41.11	330
B_{8/32/60}	40.43	340
B_{16/24/60}	39	350
B_{20/20/60}	39.44	355
B_{24/16/60}	37.84	361
B_{40/0/60}	36.61	480

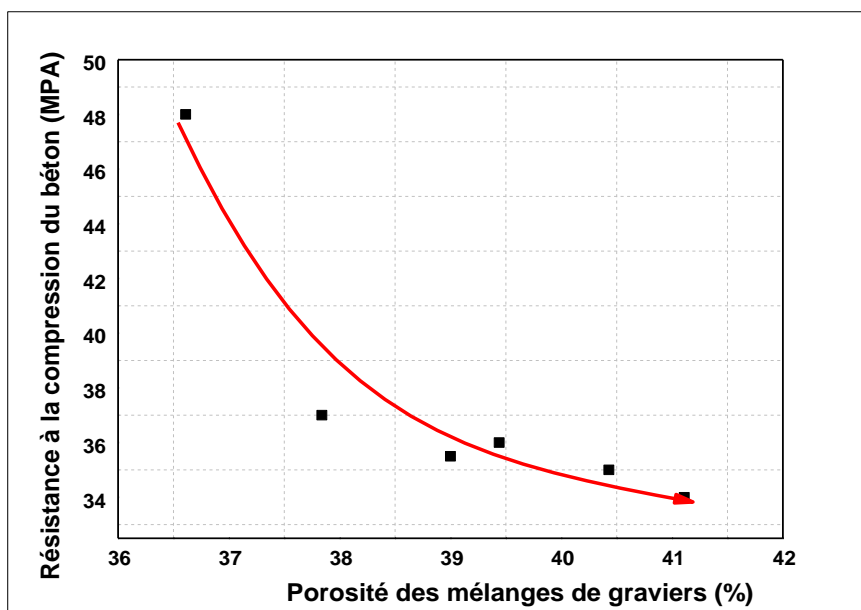


Figure IV.16 : Résistance à la compression en fonction de la porosité des mélanges de fractions, béton sans adjuvant.

On remarque une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la porosité du mélange de gravier. La présence de gravier roulé de fraction 3/8 avec surface lisse et arrondi a favorisé et facilité le réarrangement des gros et petits granulats, ce qui a donné une porosité minimale avec 40% de gravier roulé de fraction 3/8 et une résistance à la compression maximale atteignant 48 Mpa à 28 jours sans adjuvant.

b/ Mélange de béton avec adjuvant « Medaflow 30 »

L'incorporation du super plastifiant « Medaflow 30 » améliore d'avantage la résistance à la compression

Tableau IV.12 : Résistance à la compression à 28 jours pour bétons avec adjuvants.

Mélange de béton	Porosité des mélanges de graviers	Résistance à la compression à 28 jours (Bar)
B_{0/40/60+adj}	41.11	395
B_{8/32/60+adj}	40.43	408
B_{16/24/60+adj}	39	415
B_{20/20/60+adj}	39.44	485
B_{24/16/60+adj}	37.84	550
B_{40/0/60+ adj}	36.61	575

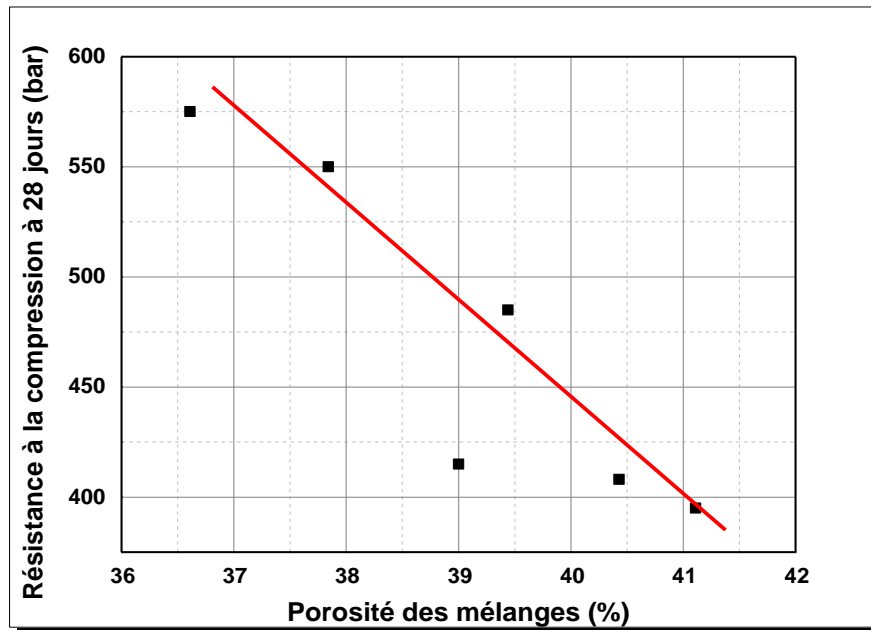


Figure IV.17 : Résistance à la compression en fonction des porosités des mélanges de fractions, béton avec adjuvant .

- Coefficient d'amélioration de la résistance

Tableau IV.13 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons par rapport au pourcentage de gravier roulé substitué.

Béton	B _{0/40/60}	B _{8/32/60}	B _{16/24/60}	B _{20/20/60}	B _{24/16/60}	B _{40/0/60}
résistance à la compression béton sans adjuvant (Bar)	330	340	350	355	361	480
Coefficient d'amélioration (%)	0	3.03	6.06	7.58	9.40	45.45
résistance à la compression béton avec adjuvant (Bar)	395	408	415	485	550	575
Coefficient d'amélioration (%)	0	3.29	5.06	22.78	39.24	45.56

L'incorporation du super plastifiant « Medaflow 30 » améliore d'avantage la résistance à la compression et en remarque une amélioration de 45.56 % pour le mélange **B_{40/0/60}** par rapport au béton témoin **B_{0/40/60}** avec 0% de gravier roulé substitué.

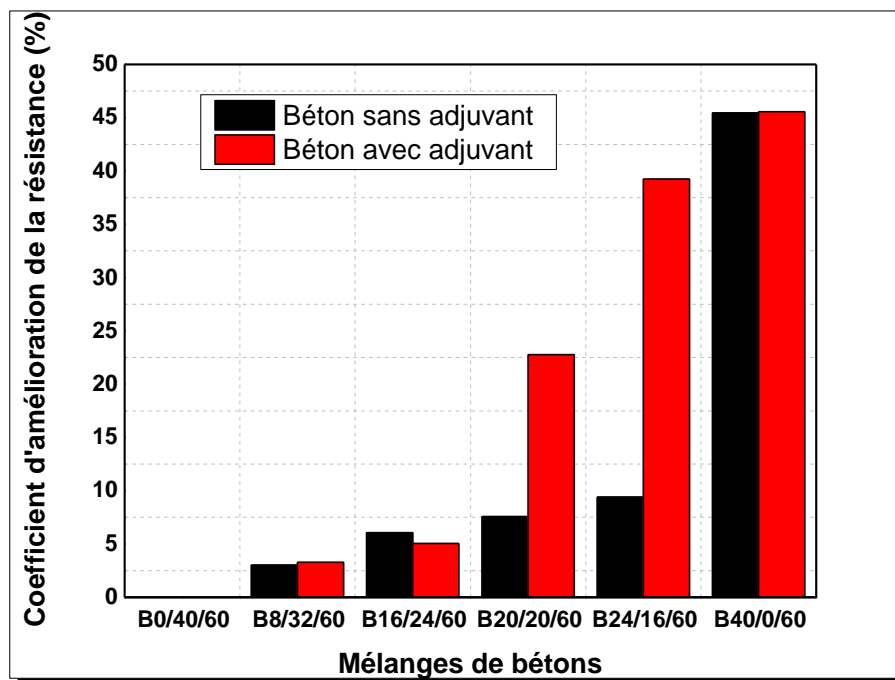


Figure IV.18 : Coefficient d'amélioration des mélanges de bétons.

IV.1.3 : Conclusions :

Afin de minimiser la porosité du squelette de notre béton, nous avons procédé à un mélange de fractions de gravier (3/8 et 8/15) ainsi les petits grains viendront se positionner dans les interstices des gros grains, notre but c'est de serrer la granularité de ces mélanges à travers l'optimisation de leurs masses volumiques apparentes et leurs porosités.

La combinaison de mélange avec 40% de fraction 3/8 et 60% de fraction 8/16 donne une masse volumique apparente maximale (porosité minimale).

Avec ce mélange optimal de fractions de gravier et afin d'améliorer d'avantage les performances de nos bétons, nous avons introduit différents pourcentages de gravier roulé de fraction 3/8, ces graviers ont une surface extérieure lisse et arrondi, ils vont jouer le rôle de billes dans un roulement mécanique cela va améliorer la maniabilité

de notre béton et réduire ainsi le rapport E/C, avec les combinaisons choisies suivant le pourcentage de gravier roulé dans le mélange nous avons confectionné nos bétons .

On a remarqué une réduction d'eau de gâchage et une diminution du rapport E/C après introduction du gravier roulé de fraction 3/8 dans les différents mélanges de béton, la diminution du rapport E/C est de 22.8 % pour un béton avec 100% de gravier roulé de la fraction 3/8 (B_{40/0/60}), ceci est dû à la forme arrondie et à la surface lisse de ces grains, il favorise ainsi la maniabilité du béton frais en réduisant l'eau de gâchage et le rapport E/C, Figure IV.2 et IV.3.

L'introduction de l'adjuvant super plastifiant « Medaflow 30 » avec un dosage de 1.5% du poids de ciment avec l'introduction du gravier roulé de fraction 3/8 (B_{40/0/60+ADJ}) améliore d'avantage la maniabilité du béton frais et on a remarqué une diminution du rapport E/C de 47 % par rapport au béton témoin B_{0/40/60} et de 31.8 % par rapport au béton B_{40/0/60}, (fraction 3/8 concassé substitué totalement par la fraction 3/8 du gravier roulé), Figure IV.6 et IV.7.

On remarque une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la porosité du mélange de gravier. La présence de gravier roulé de fraction 3/8 avec surface lisse et arrondi a favorisé et facilité le réarrangement des gros et petits granulats, ce qui a donné une porosité minimale avec 40% de gravier roulé de fraction 3/8 et une résistance à la compression maximale atteignant 48 Mpa à 28 jours sans adjuvant.

L'incorporation du super plastifiant « Medaflow 30 » améliore d'avantage la résistance à la compression et on remarque une amélioration de 45.56 % pour le mélange B_{40/0/60} par rapport au béton témoin B_{0/40/60} avec 0% de gravier roulé substitué.

Ainsi nous recommandons l'utilisation des graviers roulés de fraction 3/8 dans les différents mélanges de béton afin d'améliorer leur rhéologie et donc leurs performances.

IV.2. Mélange Ternaire.

Mélanges optimaux des graviers. Avec les mélanges optimaux obtenus par des essais de compacité (voir Tableau III.11.chapitre III), nous avons confectionné nos bétons :

Tableau III.11 : Pourcentage de gravier roulé dans les différents mélanges de gravier.

Mélange de fraction M (GC 3/8) / (GC8/16) / (GC 16/25) / (GR3/8) / (GR 8/16) / (GR15/25)	Gravier Concassé (3/8) % GC _{3/8}	Gravier Concassé (8/16) % GC _{8/16}	Gravier Concassé (16/25) % GC _{16/25}	Gravier Roulé (3/8) % GR _{3/8}	Gravier Roulé (8/16) % GR _{8/16}	Gravier roulé (16/25) % GR _{16/25}
M _{20/40/40/0/0/0}	20	40	40	0	0	0
M _{0/40/40/20/0/0}	0	40	40	20	0	0
M _{20/0/40/0/40/0}	20	0	40	0	40	0
M _{0/0/40/20/40/0}	0	0	40	20	40	0
M _{10/20/20/10/20/20}	10	20	20	10	20	20

Noter bien que les chiffres en indice dans le tableau indique les pourcentages de chacune des trois fractions de chaque type de graviers étudiés :

M (GC 3/8) / (GC8/16) / (GC 16/25) / (GR3/8) / (GR 8/16) / (GR15/25)

Avec GC : abréviation de gravier concassé, GR : abréviation de gravier roulé.

- **Calcul des proportions des constituants**

Formulation du béton « Méthode de Dreux - Gorisse »

Tableau IV.14 : Données de bases pour la formulation des bétons.

Données de base	valeur
Béton normal	classe C25/30.
Consistance	béton plastique.
Dimension maximale de granulat	D= 25mm
Forme des granulats	Granulats concassés et granulats roulés
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 350kg/m ³
Classe vraie du ciment	425 bars
Module de finesse MF	2
Coefficient granulaire G	0.5
AF	6

Tableau IV.15 : Composition pour 1 m³ de béton.

CONSTITUANTS	QUANTITE Kg/m ³
Ciment	367
Gravier (3/8), (20%)	230.6
Gravier (8/16), (40%)	461.2
Gravier (16/25), (40%)	461.2
Sable (0/5)	570
Eau	198

Présentation Du Programme Expérimental :

Nous envisageons, dans cette deuxième partie d'analyser l'influence de différentes fractions de deux types de granulats (roulé et concassé) sur le comportement différé des cinq mélanges de béton étudiés. La lettre B désigne le béton, elle remplace la lettre M qui désigne le mélange de gravier la lettre C et R désignent le type du granulats utilisé (concassé ou roulé).

Dosage en graviers :

Tableau IV.16 : Compositions de béton pour 15 éprouvettes cubiques (10cm /10cm /10cm)

Mélange de fraction M (GC 3/8) / (GC8/16) / (GC 16/25) / (GR3/8) / (GR 8/16) / (GR15/25)	Gravier Concassé (3/8) GC _{3/8} (kg)	Gravier Concassé (8/16) GC _{8/16} (kg)	Gravier Concassé (16/25) GC _{16/25} (kg)	Gravier Roulé (3/8) GR _{3/8} (kg)	Gravier Roulé (8/16) GR _{8/16} (kg)	Gravier roulé (16/25) GR _{16/25} (kg)
B _{20/40/40/0/0/0}	3.46	6.92	6.92	0	0	0
B _{0/40/40/20/0/0}	0	6.92	6.92	3.46	0	0
B _{20/0/40/0/40/0}	3.46	0	6.92	0	6.92	0
B _{0/0/40/20/40/0}	0	0	6.92	3.46	6.92	0
B _{10/20/20/10/20/20}	1.73	3.46	3.46	1.73	3.46	3.46

IV.2.1 Résultats des essais sur béton frais :

a/ Bétons sans adjuvants

- Masse volumique du béton frais

La masse volumique du béton frais varie légèrement de l'ordre de 3.4 %, avec l'introduction du gravier roulé 3/8, voir tableau IV.17.

Tableau IV.17 : Masse volumique du béton frais sans adjuvant.

Mélanges de Béton	B _{20/40/40/0/0/0}	B _{0/40/40/20/0/0}	B _{20/0/40/0/40/0}	B _{0/0/40/20/40/0}	B _{10/20/20/10/20/20}
Dénomination des bétons	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	20	40	60	50
Masse volumique (kg/l)	2.35	2.43	2.42	2.39	2.36

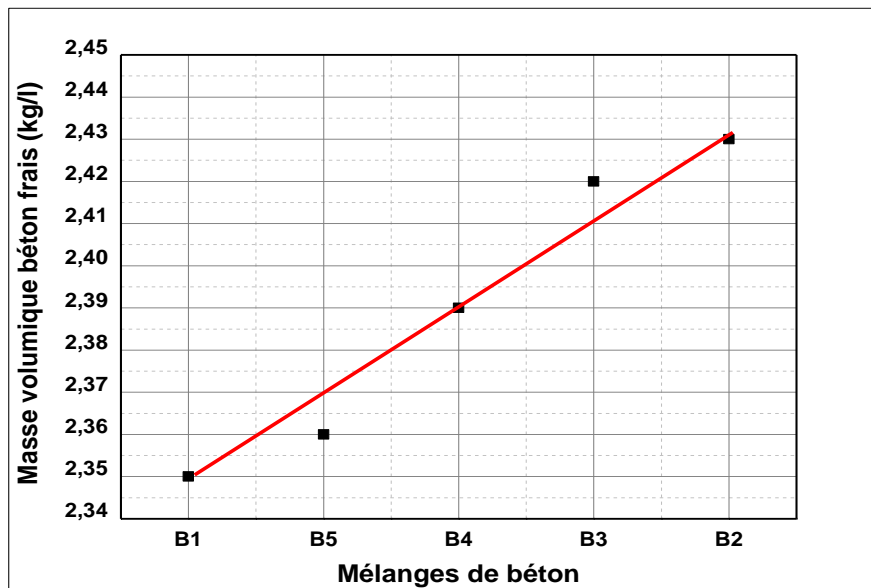


Figure IV.19 : Masse volumique du béton frais sans adjuvant.

Les bétons B₂ (B_{0/40/40/20/0/0}) et B₃ (B_{20/0/40/0/40/0}), donnent les meilleures valeurs de la masse volumique à l'état frais.

- Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges

La présence de gravier roulé de fraction 3/8, 8/16/ et 16/25 avec des surfaces lisse et arrondi, et avec un taux d'absorption faible, dans le béton, améliore sa maniabilité et en remarque une diminution du rapport E/C.

Figure IV.18 : Réduction d'eau de gâchage des différents mélanges de béton.

Mélanges de Béton	$B_{20/40/40/0/0/0}$	$B_{0/40/40/20/0/0}$	$B_{20/0/40/0/40/0}$	$B_{0/0/40/20/40/0}$	$B_{10/20/20/10/20/20}$
Dénomination des bétons	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	20	40	60	50
Réduction d'eau	0	2.42	1.97	4.18	2.76
Rapport E/C	0.49	0.477	0.48	0.468	0.476

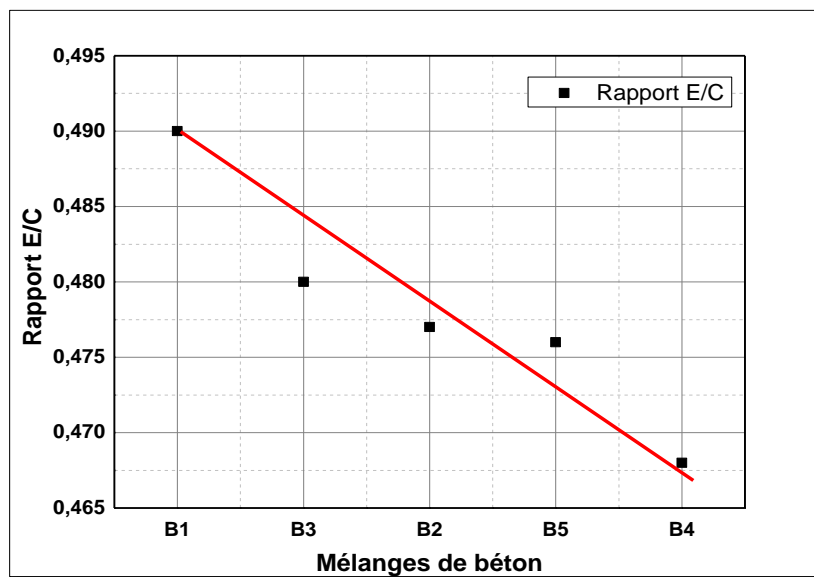


Figure IV.20 : Rapport E/C, des différents mélanges de béton.

On remarque une diminution du rapport E/C pour les mélanges de béton B₄ et B₅, ces deux mélanges contiennent le pourcentage le plus élevé de la fraction 3/8 de gravier roulé, 20% et 10% respectivement, on remarque bien le rôle de la fraction 3/8

du gravier roulé avec forme arrondie et lisse, dans l'amélioration du rapport E/C et la réduction de l'eau de gâchage, Figure IV.19 et IV.20.

b/ Bétons avec adjuvants :

Un super plastifiant « Medaflow 30 » avec un dosage de 1.5% en poids du ciment, à été utilisé dans le but d'améliorer d'avantage les performances de nos bétons.

- **Masse volumique du béton frais avec adjuvant.**

- **Tableau IV.19 :** Masse volumique du béton frais avec adjuvant.

Mélanges de Béton	$B_{20/40/40/0/0/0}$	$B_{0/40/40/20/0/0}$	$B_{20/0/40/0/40/0}$	$B_{0/0/40/20/40/0}$	$B_{10/20/20/10/20/20}$
Dénomination des bétons	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	20	40	60	50
Masse volumique, (kg/l)	2.397	2.467	2.468	2.449	2.399

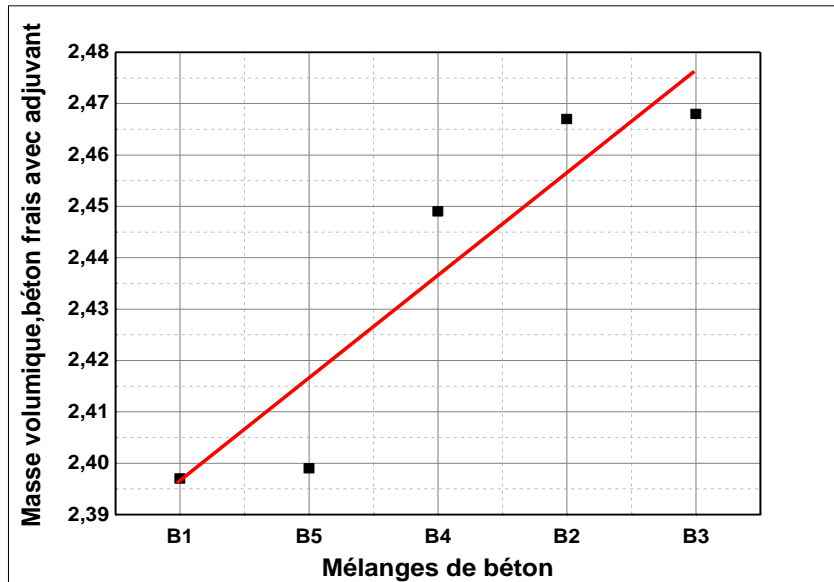


Figure IV.21 : Masse volumique du béton frais avec adjuvant

- Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant.

Tableau IV.20 : Rapport E/C et réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant.

Mélanges de Béton	$B_{20/40/40/0/0/0}$	$B_{0/40/40/20/0/0}$	$B_{20/0/40/0/40/0}$	$B_{0/0/40/20/40/0}$	$B_{10/20/20/10/20/20}$
Dénomination des bétons	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	20	40	60	50
Réduction d'eau	1.2	4.58	3.75	7.93	5.25
Rapport E/C	0.387	0.372	0.379	0.369	0.376

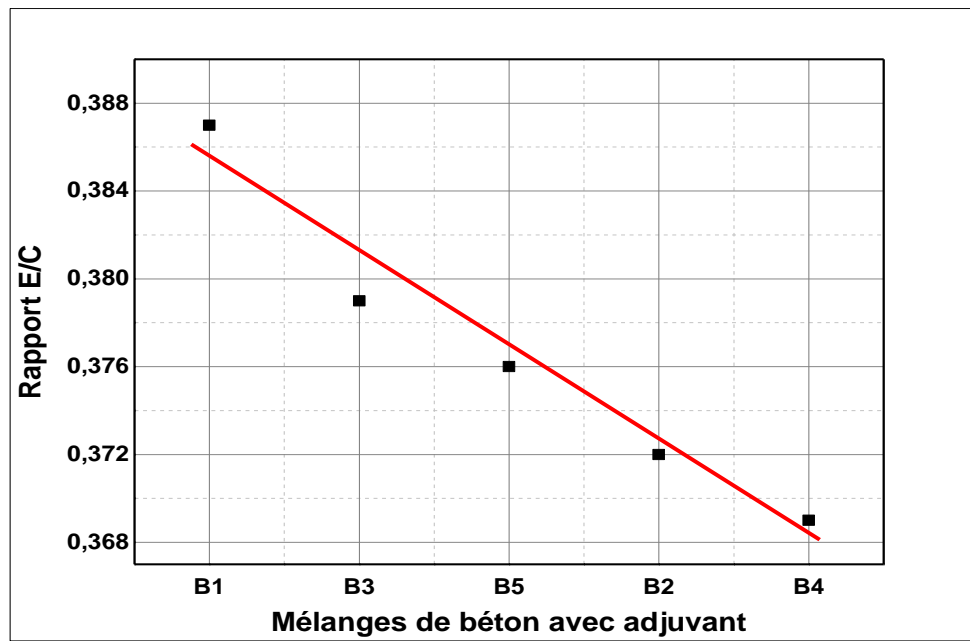


Figure IV.22 : Rapport E/C des mélanges de béton frais avec adjuvant.

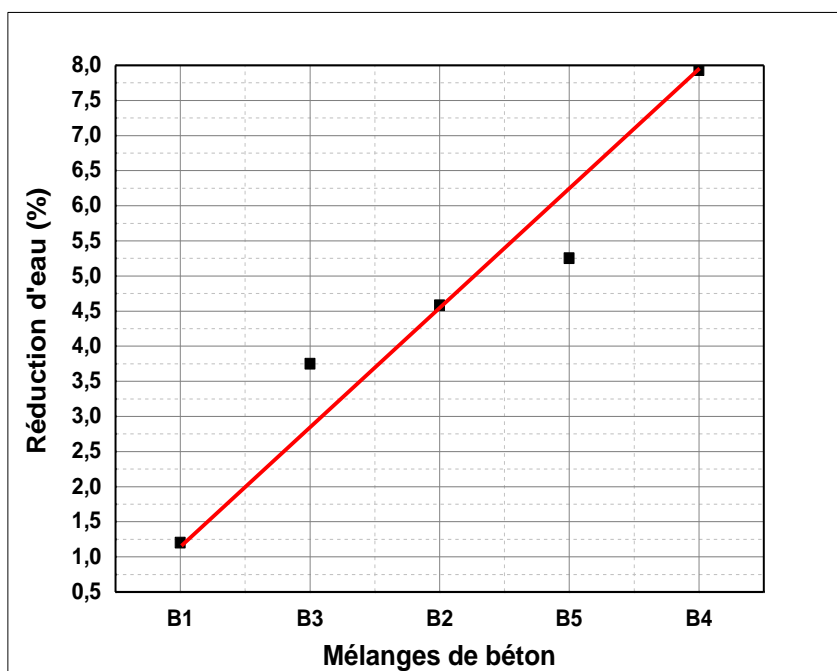


Figure IV.23 : Réduction de l'eau de gâchage dans les mélanges de béton frais avec adjuvant.

L'introduction de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 », un super plastifiant avec un dosage de 1.5 % et l'introduction du gravier roulé de fraction 3/8 améliore d'avantage la maniabilité du béton frais et on remarque une diminution du rapport E/C de 4.87 % par rapport au béton B_{20/40/40/0/0/0} avec adjuvant, et de **30.32 %** par rapport au béton témoin B_{20/40/40/0/0/0}, sans adjuvant, figure IV.22 et IV.23.

IV.2. 2. Résultats des essais sur béton durci:

a/ Béton sans adjuvant

- **Mesure de la masse volumique du béton durcis sans adjuvant.**

Tableau IV.21 : Mesure de la masse volumique du béton durcis en fonction du temps.

Mélange de béton	Masse volumique à l'état durci (kg/l)			
	1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B ₁	2.384	2.420	2.444	2.474
B ₂	2.430	2.442	2.456	2.459
B ₃	2.436	2.443	2.449	2.452
B ₄	2.416	2.426	2.435	2.441
B ₅	2.358	2.370	2.390	2.406

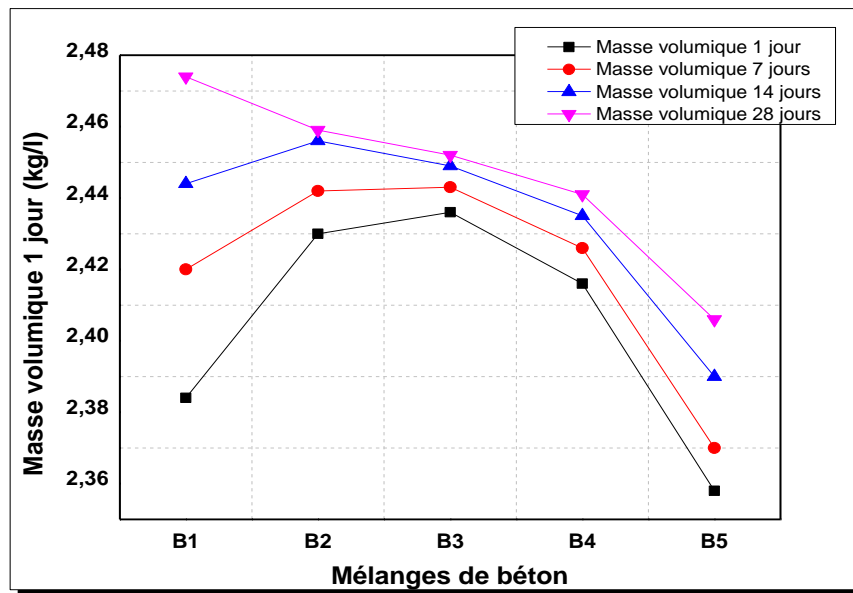


Figure IV.24 : Masse volumique des mélanges de béton durcis sans adjuvant.

b / Béton avec adjuvant

Mesure de la masse volumique du béton durcis avec adjuvant

Tableau IV.22 : Mesure de la masse volumique du béton durcis avec adjuvant en fonction du temps.

Mélange de béton	Masse volumique à l'état durci (kg/l)			
	1jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	2.419	2.447	2.471	2.498
B2	2.454	2.466	2.481	2.484
B3	2.46	2.467	2.473	2.476
B4	2.441	2.451	2.459	2.465
B5	2.381	2.391	2.414	2.430

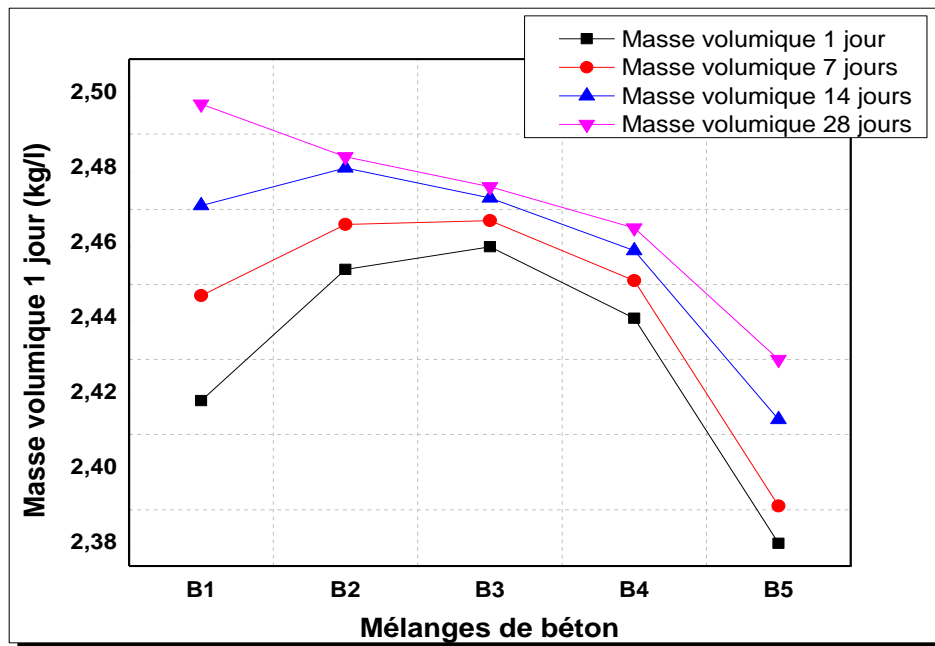


Figure IV.25 : Masse volumique des mélanges de béton durcis avec adjuvant

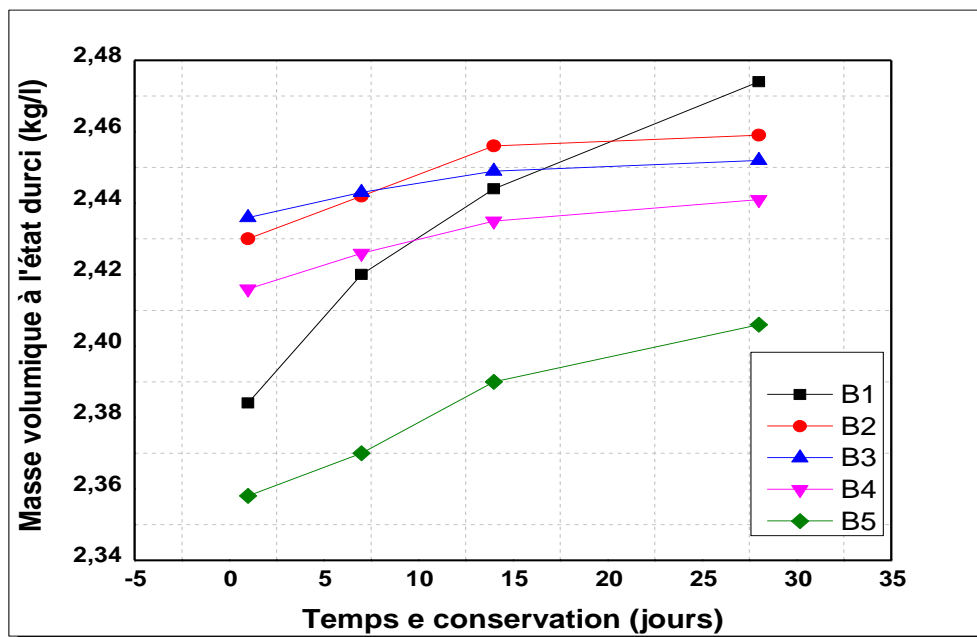


Figure IV.26 : Masse volumique du béton durcis sans adjuvant en fonction du temps.

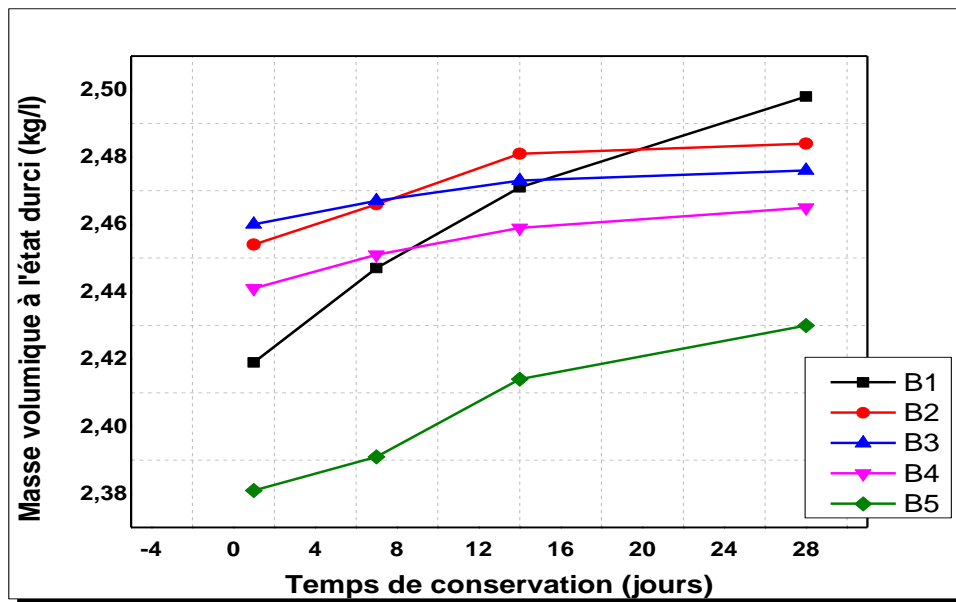


Figure IV.27 : Masse volumique du béton durcis avec adjuvant en fonction du temps.

- Essais de résistance mécanique à la compression des bétons

a/ Béton sans adjuvant :

- Résistance à la compression en fonction du temps.

Tableau IV.23 : Résistance à la compression en fonction du temps, des mélanges de béton sans adjuvant.

Mélange de béton	Résistance à la compression (bar)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B ₁	231	280	381
B ₂	350	440	481
B ₃	271	321	410
B ₄	281	360	441
B ₅	270	340	420

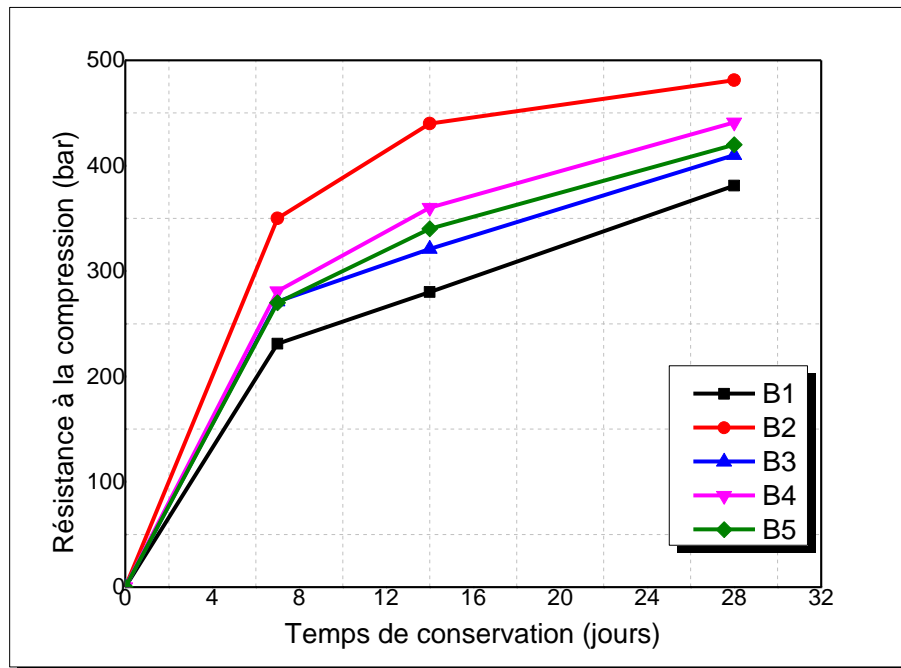


Figure IV.28 : Résistance à la compression en fonction du temps, des mélanges de béton sans adjuvant.

b/ Béton avec adjuvant :

Tableau IV.24 : Résistance à la compression en fonction du temps ,béton avec adjuvant

Mélange de béton	Résistance à la compression (bar)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B₁	289	344	461
B₂	437	541	582
B₃	339	395	496
B₄	351	443	534
B₅	337	418	508

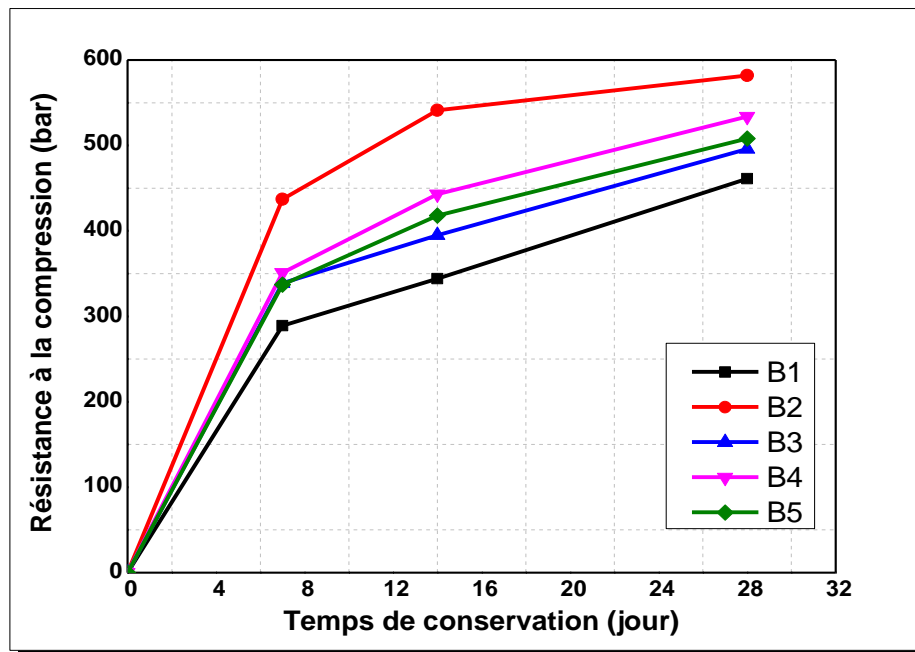


Figure IV.29 : Résistance à la compression en fonction du temps, des mélanges de béton avec adjuvant.

D'après les résultats présentés sur la (Figure IV.28), nous constatons que le béton B₂ (20% GR 3/8, 40% GC 8/16 et 40% GC 16/25) présente la meilleure résistance à la compression dans les différents âges d'essai .

La diminution de la résistance à la compression est due au changement du type de gravier roulé ou concassée (B₃.B₄.B₅), mais les résultats pour ces bétons sont meilleurs par rapport au béton témoin B₁. On peut déduire que la diminution de la résistance est due à d'autres facteurs comme les caractéristiques des grains, à savoir : le pourcentage de fraction de gravier, l'état de surface, la forme des grains, le type de gravier (roulée ou concassée) ainsi que la faculté d'absorption d'eau plus importante pour les graviers concassés.

les mélanges B₂ et B₄ donnent les meilleures résistance à la compression, cela est due à la présence de gravier roulé qui facilite la fluidité du béton frais et absorbe peu l'eau de gâchage cela influe directement sur le rapport E/C qui diminue, ce qui augmente la résistance à la compression.

- **Résistance mécanique à la compression des mélanges de bétons, en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.**

Tableau IV.25 : Résistance mécanique à la compression des mélanges de bétons sans adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

Mélanges de Béton	B _{20/40/40/0/0/0}	B _{20/0/40/0/40/0}	B _{10/20/20/10/20/20}	B _{0/0/40/20/40/0}	B _{0/40/40/20/0/0}
Dénomination des bétons	B ₁	B ₃	B ₅	B ₄	B ₂
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	40	50	60	20
Résistance à la compression à 28 jours (Bar)	381	410	420	441	481

Tableau IV.26 : Résistance mécanique à la compression des mélanges de bétons avec adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

Mélanges de Béton	B _{20/40/40/0/0/0}	B _{20/0/40/0/40/0}	B _{10/20/20/10/20/20}	B _{0/0/40/20/40/0}	B _{0/40/40/20/0/0}
Dénomination des bétons	B ₁	B ₃	B ₅	B ₄	B ₂
Pourcentage de gravier roulé substitué (%)	0	40	50	60	20
Résistance à la compression à 28 jours (Bar)	461	496	508	534	582

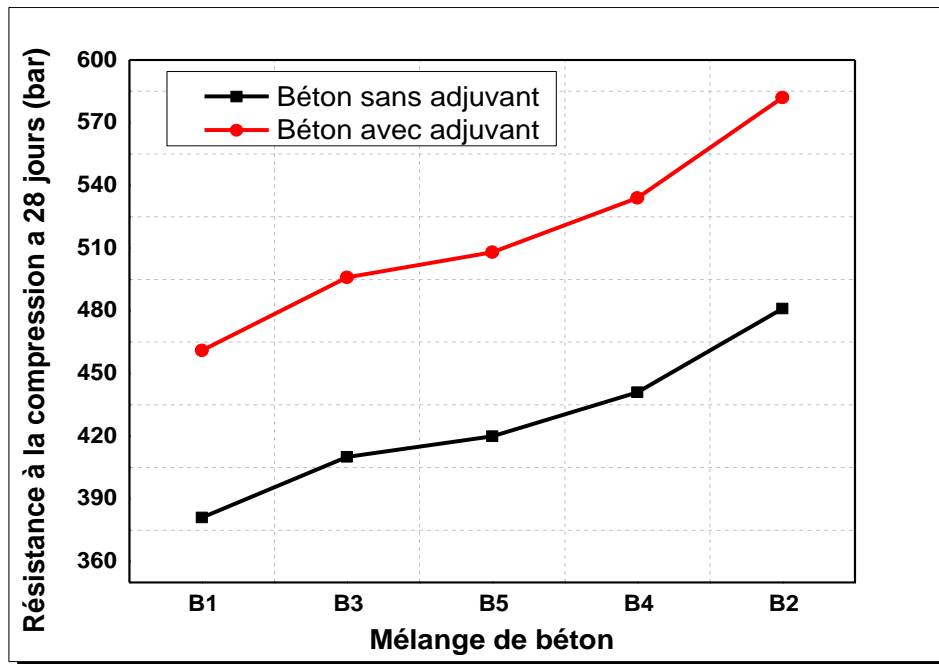


Figure IV.30 : Résistance mécanique à la compression des bétons avec et sans adjuvant en fonction du pourcentage de gravier roulé substitué.

- Coefficient d'amélioration de la résistance

Tableau IV.27 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des béton par rapport au béton témoin B₁.

Béton	B ₁	B ₃	B ₅	B ₄	B ₂
Résistance à la compression béton sans adjuvant (Bar)	381	410	420	441	481
Coefficient d'amélioration (%)	0	7.61	10.24	15.75	26.25
Résistance à la compression béton avec adjuvant (Bar)	461	496	508	534	582
Coefficient d'amélioration (%)	0	7.59	10.20	15.84	26.24

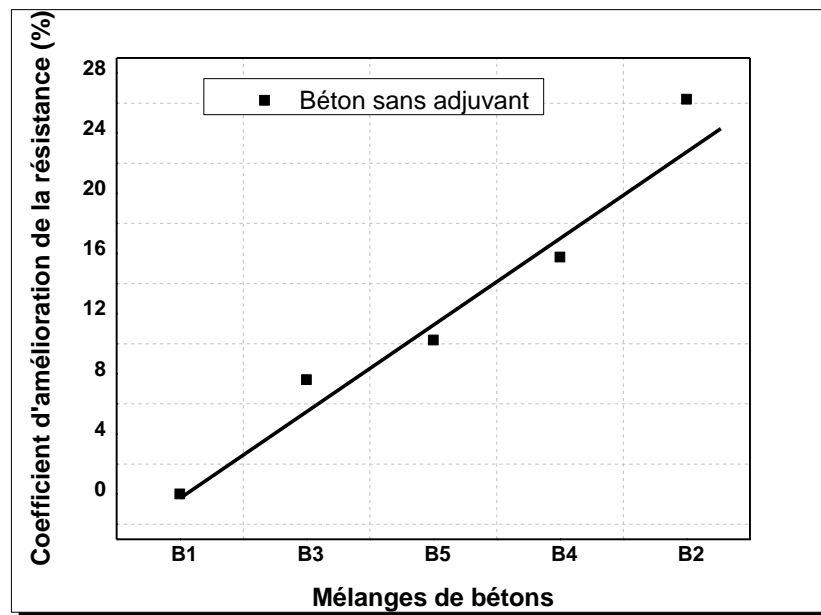


Figure IV.31 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons sans adjuvant par rapport au béton témoin B₁.

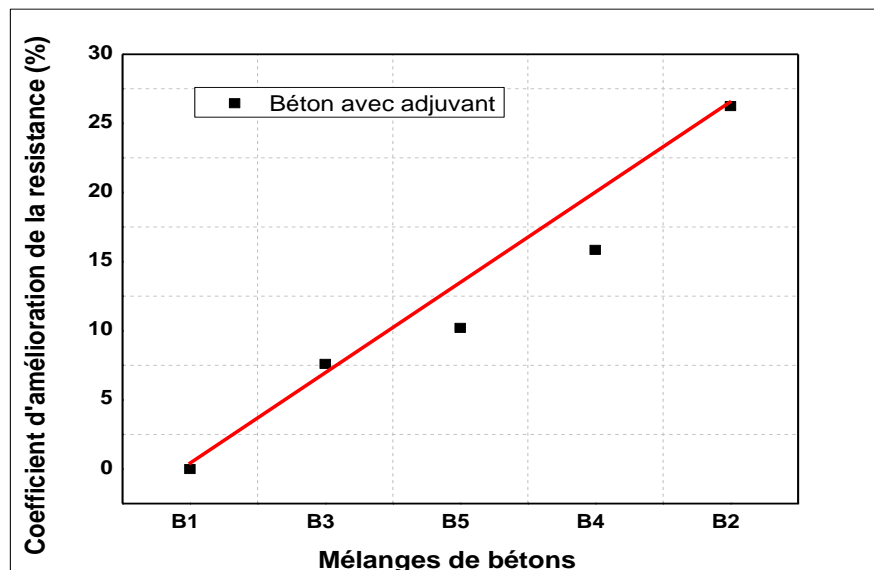


Figure IV.32 : Coefficient d'amélioration de la résistance à la compression des bétons avec adjuvant par rapport au béton témoin B₁.

Une bonne amélioration de la résistance à la compression des mélanges de bétons avec ou sans adjuvant par rapport au béton témoin B₁, a été remarqué, le mélange M₂ avec la fraction 3/8 totalement roulé, donne une amélioration de 26.25%, le Mélange M₄ avec la fraction 3/8 totalement roulé aussi (20% de la masse totale des graviers)

donne une amélioration de 15.84 % par rapport au béton témoin, en remarque bien le rôle que jouent les graviers roulé de la fraction 3/8 avec des surfaces lisses et arrondis dans l'amélioration des qualités de nos bétons.

Resistance à la compression en fonction de la porosité.

Nous avons vu au chapitre III figure III.12, la variation de la porosité des mélanges de graviers en fonction du pourcentage de gravier roulé substitués, avec ces même mélanges ternaires nous avons confectionné nos bétons : **B₁, B₂, B₃, B₄, B₅**, (voir tableau III.11, pour les différents pourcentages de gravier).

a/ Mélange sans adjuvant.

On a remarquer que les mélanges avec une porosité minimale donc une compacité maximale donnent les meilleures résistance à la compression, c'est le cas du mélange de béton avec 20 % de gravier roulé de fraction 3/8 substitué et 40% de gravier roulé de fraction 8/16, (**B₄**) avec une porosité minimale du mélange de gravier 38.25 %, ou du mélange (**B₅**) avec une porosité 39.05 %.

Tableau IV.28 : Résistance à la compression des bétons sans adjuvant en fonction de la Porosité des mélanges de gravier.

Mélange de gravier	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Masse volumique apparente, (kg/l)	1.451	1.517	1.287	1.556	1.536
Porosité, (%)	42.42	39.8	48.93	38.25	39.05
Compacité, (%)	57.58	60.2	51.07	61.75	60.95
Résistance à la compression, (bar)	381	481	410	441	420

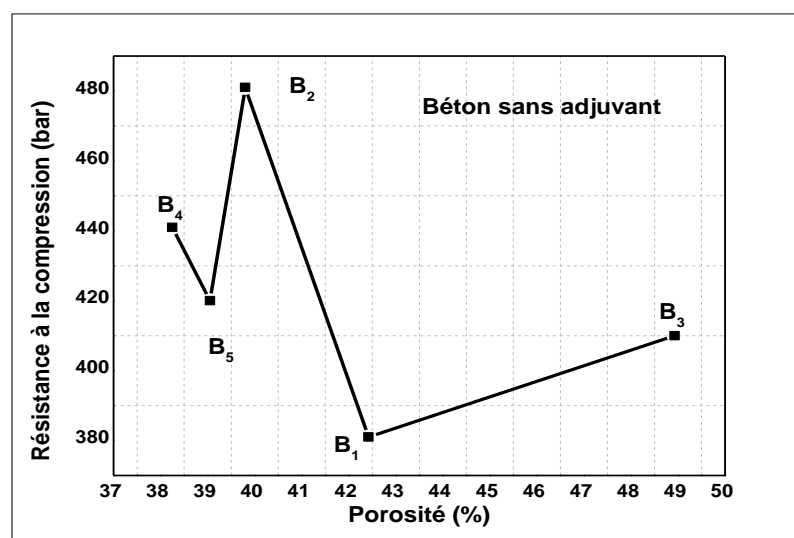


Figure IV.33: Résistance à la compression pour les bétons sans adjuvant en fonction des porosités des mélanges de graviers.

On remarque que pour des porosités minimales, on a les meilleures valeurs de la résistance à la compression, comme pour le mélange **B₂** (**B₀ / 40 / 20 / 0 / 0**) avec une porosité 39.8 %, et avec 20 % de la fraction 3/8 du gravier roulé, le rôle de ses derniers est important dans l'amélioration de la fluidité du béton frais et la réduction du rapport E/C.

b / Mélange avec adjuvant.

Tableau 4.29 : Résistance à la compression du béton avec adjuvant en fonction de la Porosité des mélanges de gravier.

Mélange de gravier	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Porosité, (%)	42.42	39.8	48.93	38.25	39.05
Résistance à la compression (bar)	461	582	496	534	508

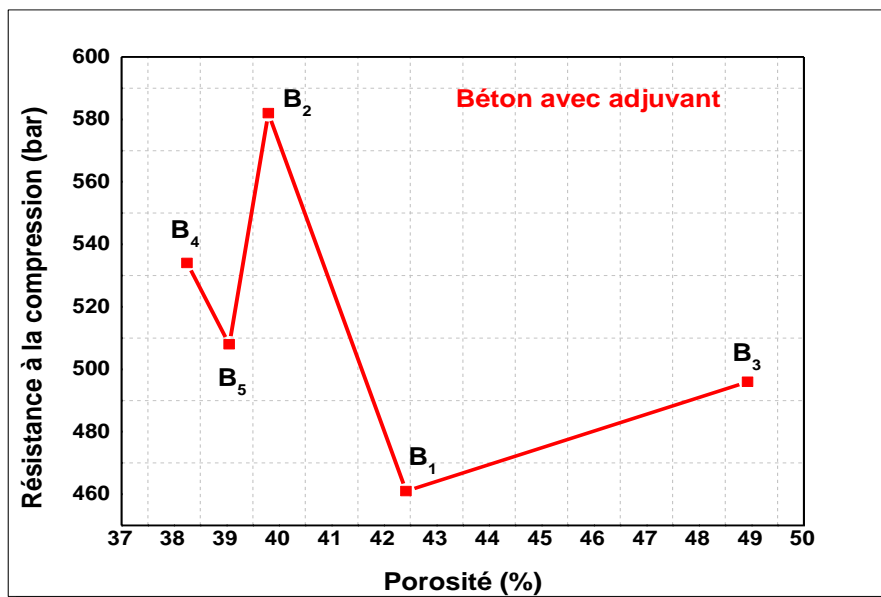


Figure IV.34 : Résistance à la compression pour les mélanges de béton avec adjuvant en fonction des porosités des mélanges.

L'introduction du super plastifiant « Medaflow 30 » améliore d'avantage la résistance à la compression, et en remarque que cette amélioration suit le résonnement fait pour les mélanges sans adjuvant, le mélange **B₂** (**B₀ / 40 / 20 / 0 / 0**) avec une porosité 39.8 %, et avec 20 % de la fraction 3/8 du gravier roulé donne la meilleure résistance à la compression, Le mélange **B₄** avec une porosité plus petite (38.25%), donne une résistance moins importante, d'autre paramètres entre en jeu comme la présence de graviers de grandes dimensions qui donne généralement de bonne résistances à la compression.

Conclusions générales :

Afin de minimiser la porosité du squelette de notre béton, nous avons procédé à un mélange de fractions de gravier (3/8 et 8/16) dans les mélanges binaires de graviers, et un mélange de fractions de graviers (3/8, 8/16 et 16/25) dans les mélanges ternaires, ainsi les petits grains viendront se positionner dans les interstices des gros grains, notre but c'est de serrer la granularité de ces mélanges à travers l'optimisation de leurs masses volumiques apparentes et leurs porosités.

La combinaison de mélange avec (40% de fraction 3/8 et 60% de fraction 8/16) dans les mélanges binaires, et la combinaison de mélange avec (20% de fraction 3/8, 40% de fraction 8/16 et 40% de fraction 16/25) dans les mélanges ternaires, donnent des masses volumiques apparentes maximales pour ces mélanges (porosité minimale).

Avec ces mélanges optimaux de fractions de gravier et afin d'améliorer d'avantage les performances de nos mélanges de béton, nous avons introduit différents pourcentages de gravier roulé de fraction 3/8 dans les mélanges binaires, et différents pourcentages de gravier roulé de fractions 3/8, 8/16 et 16/25 dans les mélanges ternaires, ces graviers roulés ont une surface extérieure lisse et arrondi, cela va améliorer la maniabilité de notre béton et réduire ainsi le rapport E/C. Avec les combinaisons choisies suivant le pourcentage de gravier roulé dans le mélange nous avons confectionné nos bétons.

A- Mélanges binaires

Pour les mélanges binaires, on a remarqué une réduction d'eau de gâchage et une diminution du rapport E/C après introduction du gravier roulé de fraction 3/8 dans les différents mélanges de béton, la diminution du rapport E/C est de 22.8 % pour un béton avec 100% de gravier roulé de la fraction 3/8 (B_{40/0/60}), c.-à-d. (40%) de la masse totale du gravier dans nos bétons, cette diminution du rapport E/C est due à la forme arrondie et à la surface lisse de ces grains de fraction 3/8 de gravier roulé, il favorise ainsi la maniabilité du béton frais en réduisant l'eau de gâchage et le rapport E/C.

L'introduction du super plastifiant MEDAFLOW 30 avec l'introduction du gravier roulé de fraction 3/8 (B_{40/0/60+ADJ}) améliore d'avantage la maniabilité du béton frais

Conclusions générales

et on a remarqué une diminution du rapport E/C de 47 % par rapport au béton témoin B_{0/40/60} et de 31.8 % par rapport au béton B_{40/0/60} avec 40 % de gravier roulé 3/8 et sans adjuvant.

les mélanges avec une porosité minimale donne les meilleures résistance à la compression, c'est le cas du mélange de béton avec 40 % de gravier roulé substitué B_{40/0/60} avec une porosité minimale du mélange de gravier 36.61%, du mélange B_{24/16/60} avec une porosité 37.84%, puis les autres mélanges par ordre décroissant de la résistance à la compression : B_{20/20/60}, B_{16/24/60}, B_{8/32/60} et enfin B_{0/40/60} qui à la plus grande porosité parmi les mélanges étudiés et qui donne la plus faible résistance.

On remarque une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la porosité du mélange de gravier. La présence de gravier roulé de fraction 3/8 avec surface lisse et arrondi à favorisé et faciliter le réarrangement des gros et petits granulats, ce qui a donné une porosité minimale avec 40% de gravier roulé de fraction 3/8 et une résistance à la compression maximale atteignant 48 Mpa à 28 jours sans adjuvant. L'incorporation du super plastifiant « Medaflow 30 » améliore d'avantage la résistance à la compression et en remarque une amélioration de 45.56 % pour le mélange B_{40/0/60} par rapport au béton témoin B_{0/40/60} avec 0% de gravier roulé substitué.

B- Mélanges ternaires

Les essais effectués sur les mélanges ternaires ont donné les conclusions suivantes :

En partant du mélange optimum qui nous adonné une compacité maximale, en mélangeons différents pourcentages de graviers concassé , nous avons introduit un autre type de gravier à savoir le gravier roulé d'origine alluvionnaire, de fractions 3/8, 8/16, et 16/25, avec différents pourcentages, toujours dans la même idée d'améliorer la compacité de nos mélanges et par la suite améliorer la fluidité de nos bétons en introduisant un certain pourcentage de gravier roulé, nous avons choisi 5 mélanges,

le Mélange (M₃) avec 20 % de la fraction (3/8) concassé , 0 % de la fraction (3/8) roulé, 40 % (16/25) concassé et 40 % (8/16) roulé, donne la masse volumique la plus faible a cause de la discontinuité de ce mélange due à l'absence de la fraction 3/8 de gravier roulé et la fraction 8/16 de gravier concassé , le mélange (M₄) donne la porosité la plus faible

Conclusions générales

parmi ces mélanges, ce mélange contient 20 % de gravier roulé de fraction 3/8 , 40% de gravier roulé de fraction 8/16 et 40 % de gravier concassé 16/25, de ce mélange (M₄) qui a donné la plus faible porosité en remarque le rôle bénéfique que jouent les fractions 3/8 et 8/16 de gravier roulé dans le réarrangement des grains dans le mélange de gravier a cause de leur forme arrondie et leurs surfaces extérieure lisses. Avec les mélanges optimums obtenus par des essais de compacité, nous avons confectionné les cinq mélanges de bétons étudiés. On a remarqué que La masse volumique du béton frais varie légèrement de l'ordre de 3.4 % avec l'introduction du gravier roulé 3/8. La présence de gravier roulé de fraction 3/8, et 8/16 avec des surfaces lisse et arrondi, et avec un taux d'absorption faible, dans le béton, améliore ça maniabilité et en remarque une diminution du rapport E/C.

La diminution du rapport E/C est plus importante pour les mélanges de béton B₄ et B₅, ces deux mélanges contiennent le pourcentage le plus élevé de la fraction 3/8 de gravier roulé, 20% et 10% respectivement, on remarque bien le rôle de la fraction 3/8 du gravier roulé avec forme arrondie et lisse, dans l'amélioration du rapport E/C et la réduction de l'eau de gâchage.

L'introduction de l'adjuvant « Medaflow 30 », un super plastifiant avec un dosage de 1.5 % avec l'introduction du gravier roulé de fraction 3/8 améliore d'avantage la maniabilité du béton frais et on remarque une diminution du rapport E/C de **4.87 %** par rapport au béton B₁ (B_{20/40/40/0/0/0}) avec adjuvant , et de **30.32 %** par rapport au béton témoin B₁(B_{20/40/40/0/0/0}) sans adjuvant.(le béton B_{20/40/40/0/0/0} ne contient pas de gravier roulé).

Le béton B₂(20% GR 3/8, 40% GC 8/16 et 40% GC 16/25) présente la meilleure résistance à la compression dans les différents âges d'essai.

La diminution de la résistance à la compression est due au changement du type de gravier roulé ou concassée (B₃.B₄.B₅), mais les résultats pour ces bétons sont meilleurs par rapport au béton témoin B₁. On peut déduire que la diminution de la résistance est due à d'autres facteurs comme les caractéristiques des grains, à savoir : le pourcentage de fraction de gravier, l'état de surface, la forme des grains, le type de gravier (roulée ou

Conclusions générales

concassée) ainsi que la faculté d'absorption d'eau plus importante pour les graviers concassés.

Les mélanges B₂ et B₄ donnent les meilleures résistances à la compression, cela est due à la présence de gravier roulé qui facilite la maniabilité du béton frais et absorbe peu l'eau de gâchage cela influe directement sur le rapport E/C qui diminue, ce qui augmente la résistance à la compression.

On a remarqué que les mélanges avec une compacité maximale donnent les meilleures résistances à la compression, c'est le cas du mélange de béton (**B₄**) avec 20 % de gravier roulé de fraction 3/8 substitué et 40% de gravier roulé de fraction 8/16, avec une porosité minimale du mélange de gravier 38.25 %, ou du mélange (**B₅**) avec une porosité 39.05 %. Pour des porosités minimales, on a les meilleures valeurs de la résistance à la compression, Le mélange **B₂** (**B₀ / 40 / 40 / 20 / 0 / 0**) avec une porosité moyenne 39.8 %, et avec 20 % de la fraction 3/8 du gravier roulé, donne la meilleure valeur de la résistance à la compression par rapport aux autres mélanges étudiés, le rôle de la fraction 3/8 de gravier roulé est important dans l'amélioration de la fluidité du béton frais et la réduction du rapport E/C.

Recommandations et perspectives

L'intérêt d'introduire un certain pourcentage de gravier roulé de fraction 3/8 dans nos mélanges de bétons a été démontré dans cette modeste recherche, ce type de gravier avec des surfaces lisses est arrondi améliore les propriétés physiques et rhéologiques du béton, et procure généralement de bonnes résistances mécaniques et facilite la maniabilité et la mise en coffrage de nos bétons.

Ainsi nous recommandons l'utilisation des graviers roulés de fraction 3/8 dans les différents mélanges de béton avec un mélange binaire ou ternaire de fractions de gravier, afin d'améliorer leur rhéologie et donc leurs performances.

Conclusions générales

Les travaux effectués dans cette thèse ont considéré plusieurs paramètres qui influent sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons.

Ce domaine peut être approfondi et enrichi en procédant à:

- des examens microstructuraux par microscopie électronique à balayage,
- l'identification des phases cristallines par diffractométrie des rayons X.
- l'étude de la contribution des graviers roulés à l'amélioration des résistances mécaniques et la durabilité des bétons.

D'autre part, et à la suite des résultats obtenus, une attention particulière sera donnée à la valorisation des graviers roulés pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons à moyens et longs termes.

Bibliographie

- [1] : **G. Dreux**, "Nouveau guide du béton", Eyroles, paris, (1979).
- [2] : **R. Lacroix, A. Fuentes, H. Thonier**, "Traité de béton armé",Eyroles, paris, (1982).
- [3] : **M. Duriez, J. Arrambide**, "Nouveau traité des matériaux de construction", Dunod, Paris, (1962).
- [4] : **A. Komar**, " Matériaux et éléments de construction", MIA ; Moscou, (1978).
- [5] : **R. MAILLOT**, "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
- [6] : **Degussa**, construction chemicals France, "La Technologie du Béton", Guf \Formation\ Béton\ Techno béton V05_01U, 140 p
- [7] : **J. Baron, et R. Sautrey**, "Le béton hydraulique", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p., (1982).
- [8] : **A. M. Neville**, "Propriétés des bétons", traduis par le Crib, Edition Eyrolles, 806p, (2000).
- [9]: **F. Gorisse**, "Essais et Contrôle", Eyrolles, Paris, (1978).
- [10] : **J. Lentz** , "Manuel pratique de la maçonnerie et du béton armé", Dunod, Paris, (1976).
- [11] : **Norme Française XP P 18-540**, "*Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: p 15-540*", (1997).
- [12] : **J. Baron & J. P. Olivier**, "*Les bétons, bases et données pour leur formulation*",2eme tirage, Edition Eyrolles, 522 p., (1997).
- [13] : **G. Dreux & J. Festa**, "*Nouveau guide du béton et ses constituants*", Edition Eyrolles, 8eme édition, 409 p., (1998).
- [14] : **Réunion D'ingénieur**, " Matériaux de construction", Eyrolles, Paris, (1979).
- [15] : **Emile Olivier**, " Technologie des matériaux de construction", Paris,(1978).
- [16] : **R. Dupain, R. Lanchan & J.-C. Saint-Arroman**, "*Granulats, Sols,Ciments et Bétons*", Editions Casteilla, 2ème édition, 236 p., (2000).
- [17] : **Gordon S.S**, " Structure et qualité des bétons lourds confectionnées à base de different granulats" Moscou (1969).
- [18]: **ACI Journal.N°8** ," Variables in concrete aggregate and Portland cement paste which influence the strength of concrete,(1963).
- [19] : **Izkovith S.M**, « Contrôle des granulats utilisés pour les bétons », MINSK, (1972).

- [20] : **B. Xkramtaev**, " Méthode de détermination de la composition des bétons de différentes sortes", Moscou,(1970).
- [21] : **Technique de l'ingénieur**, « Traité de construction ».
- [22] : **F. Gabrysiak**, "Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2", Académie de Nancy - Metz, Batiment_Pro/ (2000).
- [23]: **Y. Descantes, Y. Fosse & G. Ehret**, "Automated measurement of aggregate properties Part 1: Crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles", Materials and Structures, 39(1), (2006).
- [24] : **Norme française XP P 18-566**, "Granulats : Analyse granulométrique, aplatissement, allongement ",AFNOR, (2002).
- [25] : **Standards de l'EX- URSS**, "Béton et Mortier", Moscou, (1980).
- [26]: **Weymouth C.A – Astm** , proceeding,(1938).
- [27] : **Gordon W.A, Gillergie H.A**, ACI Journal, N° 8, (1963).
- [28] : **Staerman J.M.** "Béton compact à base de granulats de plusieurs fraction»,Tbilici, (1967).
- [29] : **A.Brahma**, " Le béton", Alger, (1992).
- [30] : **Bloem D.L, Gaynour R.D**, ACI Journal, N° 10, (1963).
- [31] : **C.Nachtergal**, " Agenda du bâtiment" Boeck université, (1973).
- [32]: **ACI Journal**, N° 12, " Variables in concrete aggregate and Portland cement paste which influence the strength of concrete, (1964).
- [33] : **Kolokolnikov**, " Technologie des éléments en béton et béton armé», Moscou, (1970).
- [34] : **M.Venuat**, «La pratique des ciments et des bétons », Paris, (1976).
- [35] : **Gortchakov G.I**, " Composition, structure et propriétés des bétons à ciment", Moscou, (1976).
- [36] : **N.T.Tuyen**, " Matériaux de construction ", Hanoi , (1965).
- [37]: **A.M.Neville**, "Properties of concrete", London, (1981).
- [38] : **Norme Française EN 933-3**, Partie 3, AFNOR, (1996).
- [39] : **J. L. Durville & H. Heraud**, "Description des roches et des massifs rocheux", Techniques de l'ingénieur C 352, 13 p., (1995).
- [40] : **N .Volzelski** , " Les liants minéraux ", Moscou, (1978).
- [41] : **Norme Française XP P 18-573**, "Granulats - Essai Los-Angeles",AFNOR, (1990).

- [42] : **Norme Française EN 1097-2**, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques,(1996).
- [43] : **L. MIREN ETXEBERRIA**, "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete", Thèse de doctorat, Université polytechnique de Catalogne –Espagne, 242 p., (2004).
- [44] : **Norme Française XP P 18-574**, "*Granulats - Essai de fragmentation dynamique*", AFNOR, (1990).
- [45] : **Norme Française P 18-577**, "*Granulats - Essai Micro-Deval*", AFNOR, (1990).
- [46] : **Norme Française EN 1097-1**, " caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval), (indice de classement P 18-650.1)", AFNOR, (1996).
- [47] : **Norme Française P 18 554**, "Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", (1990).
- [48] : **Norme Française EN 1097-3**, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 3, AFNOR, (1996).
- [49] : **Norme Française EN 1097-3**, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2, AFNOR, (1996).
- [50] : **Norme Française EN 1097-6**, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient de l'absorption d'eau", AFNOR, (1996).
- [51] : **Norme Française P 18-555**, "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", AFNOR, (1990).
- [52] : **Norme Française P 18-558**, "Granulats: Détermination de la masse volumique absolue des fines", AFNOR, (1990).
- [53] : **N.T.Tuyen**, " Rapport de recherche sur le comportement de l'impureté « filler calcaire » dans les bétons, Hanoi», (1971).
- [54] : **N.T.Tuyen**, "Matériaux de construction", Hanoi, (1980).
- [55] : **J. Berar, R. Roux**, " Le rôle de granulats ", Revue Canadienne de Génie Civil, Vol 13, N°1, Quebec (1986).
- [56]: **W. C. Hanna**, "Additional information on inhibiting Alkali – aggregate expansion ", INST, 48 (2/1952).
- [57] : **Norme Française P 18-555**, "Granulats - coefficient d'absorption et teneur en eau des sables", AFNOR, (1990).

- [58] : **Norme Européenne EN 206-1**, "Béton Partie1: Spécification, performances, Production et conformité ", (2002).
- [59]: **V.W.Y. TAM**, "Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials", *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), pp: 39-57, (2007).
- [60] : **Norme Française EN 12-620**, "Granulats pour béton hydraulique", (2004).
- [61]: **F. De Larrard**, «Concrete Mixture-Proportioning-A Scientific Approach" Londre , (1999).
- [62] : **F.DE.Larrard et al**, " modèle d'empilement compressible", (1994).
- [63] : **Dreux G**, *Guide pratique du béton*, Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, S.D.T.B.T.P, 257 p., (1970).
- [64]: **F. De Larrard and A. Belloc**. The influence of aggregate on the compressive strength Of normal and high-strength concrete. *ACI materials journal*, 94 , 417–426, (1997).
- [65] : **F. DE. Larrard** " structure granulaire et formulation des bétons". Londres, (1999).
- [66] : **Kanta Rao Et Krishnamoorthy** "Bétons à base de polymères ". (1993).
- [67] : **Faury J**, Le béton. Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, Editions Dunod, (1953).
- [68] : **Kara Ali R**, Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, (2002).
- [69]: **Warshney. R.S**, Concrete technology, New Deli, (1980).
- [70] : **A.Remadnia**, Etude de l'influence de la qualité des granulats sur les propriétés des mélanges de béton dans les conditions des entreprises de préfabrication, Thèse de magister, Annaba, (1986).
- [71] : **NT.TUYEN**, " pratiques des Matériaux de construction", Tome 1, Hanoi, (1983).
- [72] : **De Larrard F.**, Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice – Une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret, *Annales ITBTP*, N° 483, p. 92-97, (1990).

[73] : **Kadri E. H**, Contribution à l'étude de l'influence de la fumée de silice sur les caractéristiques des bétons à hautes performances, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, (1998).

[74] : **Lawrence P**, Sur l'activité des cendres volantes et des additions Minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l'université PaulSabatier, Toulouse III, (2000).

[75]: **Rixom M. R, Mailvaganam N. P**, Chemical admixtures for concrete, E & F. N. Spon, Ed., London, (1986).

[76]: **Krejiger P. C**, Plasticizers and dispersing admixtures, proceedings of the International Congress on admixtures, London, 16-17 April 1980, the construction press Ltd, Ed., Lancaster, p. 1-16, England, (1980).

[77] : **Neville A. M**, Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Éditions Eyrolles, (2000).

[78]: **Dodson V. H**, Concrete admixtures, Van Nostrand Reinhold, Structural Engineering Series, Ed., New York, (1990).

[79]: **Prior M. E, Adams A. B**, Introduction to producers papers on water reducing admixtures and set retarding admixtures for concrete, ASTM Sp. Tech .Publ. No. 266, P.170-9, (1960).

[80]: **Foster B**, Effect of water reducing admixtures and set retarding admixtures on properties of concrete, ASTM Sp. Tech. Pub... No. 2 66, P. 240-6, (1960).

[81]: **Hewelt P. C**, Cement admixtures, Use and Applications, 2nd Ed. for the cement admixtures Association, p. 166, Longham Harlow, (1988).

[82]: **Emoto T, Bier T. A**, Rheological behaviour as influenced by plasticizers And hydration kinetics, Cement and concrete research Vol.37, p.647- 654, (2007).

[83]:**Meyer A**, Experiences in the use of superplsticizers in Germany, in Superplasticizers in concrete, ACI SP-62, P. 21-36, Detroit, Michigan, (1979).

[84]: **Jolicoeur C, Nkinamubanzi P. C, Simard M. A. and Piotte M**, Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete, Fourth CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Montréal, ACI, ED., SP-148, p. 63-88, October (1994).

[85]: **Boussant J. B, Vernet C. and Defosse C**, Growth of ettringite in diffusion controlled conditions. Influence of additives on the crystal morphology, Proceedings of

the eleventh international conference on cement microscopy, p. 186-197, New Orleans, April (1989).

[86] : **De Larrard F, Bosc F, Catherine C**, La nouvelle méthode des coulis AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, Bulletins des Laboratoires des ponts et chaussées, (1996).

[87]: **Thermkhajornkit P, Nawa T**, The fluidity of flyash-cement paste containing naphthalene sulfonatesuperplasticizer, Cement and concrete research Vol. 34, p. 1017-1024, (2004).

[89]: **Ramachandran V. S et al** , Superplasticizers: Properties and applications in concrete, Minister of Public Works and Government services, p. 97-100, Canada, (1998).

[90] : **Aitcin P. C**, Les superplastifiants : des réducteurs d'eau, Recueil de conférences présentées à l'université de Sherbrooke, (1990).

[91] : **De Larrard F**, Formulation et propriétés constructives des bétons à très Hautes performances, Rapport de recherche des LPC N° 149, LCPC, Paris, (1989).

[92]: **Ramachandran V. S**, Use of superplasticizers in concrete, II Cemento, Vol. 3, p. 273-298, (1987).

[93]: **Paillore A. M**, Influence des résines de synthèse fluidifiantes sur la rhéologie et la déformation des pâtes de ciment avant et en cours de prise, 7ème Congrès International de la chimie des ciments, Vol.III, p.186 -191, Paris, (198)0.

[94]: **Hanna E, Luka K. and Aitcin P. C**, Rheological behaviour of Portland cement in the presence of a superplasticizers, and other chemical admixtures in concrete, 3rd International congress, p 171-188, CANMET/ACI, Ottawa, (1989).

[95]: **Uchikawa H, Uchida S. and Hanehara S**, Flocculation structure of fresh cement paste determined by sample freezing-back scatterd electron image method, II Cemento, Vol. 84, p. 3-22, Jan-mar (1987).

[96]: **Erdogdu S**, Compatibility of superplasticizers with cements different in composition, Cement and concrete research Vol. 30, p. 767-773, (2000).

[97]: **Chandra S, Björnström J**, Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – part II, Cement and Concrete Research, Vol. 32, p.1613– 1619, (2002).

- [98]: **Aiad I**, Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, *Cement and Concrete research*, Vol. 33, p.1229 – 1234, (2003).
- [99]: **Çolak A**, Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 585 – 593, (2003).
- [100]: **GolaszewskietSzwabowski**, Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 24 - 69, (2003).
- [101]: **Corradi M, Khurana R, Magarotto R**, New superplasticizers for the total control of performances of fresh and hardened concrete, *Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances*, p. 1-10, Skotland, U.K., 6 july (2005).
- [102]: **Magarotto R, Moratti F, Zeminian N**, Enhancing the compatibility of superplasticizers with cements, *Proceedings of the International conference on Admixtures enhancing, Concrete performances*, p. 21-33, Skotland, U.K., 6 july (2005).
- [103]: **Falikman V. R, Sorokin Y. V, Vainer A. Y, bashlykov N. F**, New high performance polycarboxylate superplasticizers based on derivative copolymers of maleinic acid, *Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances*, p. 41-46, Skotland, U.K., 6 july (2005).
- [104]: **Sakai E., Kasuga T, Sugiyama T, Asaga K, Daimon M**, Influence of superplasticizers on the hydration of cement and pore structure of hardned cement, *Cement and concrete research* Vol. 36, p. 2049-2053,(2006).
- [105]: **Brooks J. J, Wainwright P. J. and Neville A. M**, Time depend properties of concrete containing a superplasticizing admixture, in *Superplasticizers in Concrete*, ACI SP-62, p.293-314, Detroit, Michigan,(1979).
- [106]: **Malhorta V. M**, Superplasticizers in concrete, CANMET report MRP/MSL70-213, 20 pp., Canada centre for mineral and energy technology, Ottawa, August (1979).
- [107]: **Malhorta V. M**, Superplasticizers: A global review with emphasis on durability and innovative concretes, in *superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*, Proc., 3rd International conference, ottawa, Ed. V.M. Malhorta, ACI SP-119, p. 1-17, Detroit, (1989).

- [108]: **Brooks J. J. Wainwright P. J. and Neville A. M.**, Time depend properties of concrete containing a superplasticizing admixture, in Superplasticizers in concrete, ACI SP-62, p. 293-314, Detroit, (1979).
- [109] : **F. Gabrysiak**, "Matériaux - Les Bétons - Chapitre 4", académie de Nancy-Metz, Batiment_Pro/ (2002).
- [110]: **S. S. Jankar Et C. B. K. Rao**, "Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning", Cement – concrete research, 34(11), pp:2021-2027, (2004).
- [111] : **S. Bethmont**, "Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplacants", Thèse de Doctorat, ENPC Paris, France, 166 p., (2005).
- [112]: **Baali L, Nacéri A, Mehamed Said R.** Mechanical response of mortar made with natural and artificial fine aggregates, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 85-929 (2007).
- [113]: **M. Westerholm, D. Lagerblad, J. Silfwerbrand & E. Forssberg**, «Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars", Cement & Concrete Composites, 30(4), pp:274-282, (2008).
- [114]: **H. Donza, O. Cabrera & E. F. Irassar**, "High-strength concrete with different fine aggregate", Cement & Concrete Research, 32(11), pp:1755-1761,(2002).
- [115]: **R. Jones Et M. F. Kaplan**, "The effects of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure", Magazine of Concrete Research, 9(26), pp:89-94, (rapporté par [8]), (1957).
- [116]: **A. Kiliç &All**, "The influence of the aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete", Cement & Concrete Composites, 30(4), pp: 290-296, (2008).
- [117]: **M. F. Kaplan**, "Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates", ACI Journal Proceedings, 55, pp: 1193-1202, (rapporté par [8]), (1959).
- [118]: **E. Wirquin, R. Hadjieva -Zaharieva & F. Buyle-Bodin**, "Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – Application aux bétons de granulats recyclés", Materials and Structures, 33(6), pp:403-408, (2000).
- [119]: **S. Chandra & L. Berntsson**, "*Lightweight Aggregate concrete*", Noyes Publications,406 p, (2002).

[120]: **A. Ajdukiewicz & A. Kliszczewicz**, "Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC", *Cement & Concrete Composites*, 24(2), pp: 269-279, (2002).

[121]: **C. S. Poon & C. S. Lam**, "The effect of aggregates-to-cement (A/C) ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks", *Cement & Concrete Composites*, 30(4), pp:283-289, (2008).

[122]: **T. ÖZTURAN & C. ÇEÇEN**, "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths", *Cement & Concrete Research*, 27(2), pp:165-170, (1997).

[123] : **Y. MALIER**, "Les bétons à haute performance, caractérisation, durabilité et applications", *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées*, 673p, (1992).

[124]: **J.P. GONÇALVES & ALL**, "Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars", *Cement & Concrete Research*, 37(6), pp:924 - 932, (2007).

[125]: **A. KILIÇ & ALL**, "The influence of the aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete", *Cement & Concrete composites*, 30(4), pp: 290-296, (2008).

[126]: **Menadi B, Kenai S, Khatib J, Aït-Mokhtar A**. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, *construction and building materials*, 23625-33, (2009).

[127]: **Safiuddin M, Raman SN, Zain MFN**. Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures, *Journal of Applied Sciences Research*, 202-8, 3(2007).

[128]: **UğurÖztürk A, TugrulErdem R, Kozanoglu C**. Investigation of crushing type of concrete aggregates on mechanical properties of concrete, *International Journal of Materials Engineering*, 6-9, 2(2012).

[129]: **Cortes DD, Kim HK, Palomino AM, Santamarina JC**. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands, *Cement and Concrete Research*, 38, 1142-47, 8 (2008).

[130]: **Narasimha C, Atil BT, Sanni SH**. Performance of concrete with quarry dust as fine aggregate - An experimental study, *Civil Engineering and Construction Review*, 19-24, 12(1999).

[131]: **Celik T, Marar K**. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 261121-30, (1996).

- [132]: **Rajput SPS, Chauhan MS.** Suitability of crushed stone dust as fine aggregate in mortars, International Journal of Emerging Technology and Advanced engineering, 87-9, 4 (2014).
- [133]: **Abo-El-Enein SA, El-Sayed HA, & all,** AS. Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume, HBRC Journal, 43-8, 10 (2014).
- [134]: **LO T. Y,** Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete, Materials Letters, 58, P916-919, (2004).
- [135]: **ZHUTOVSKY S., KOVLER K., BENTUR A,** Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high- performance concrete, Cement and Concrete Composite, 26, P499-507, (2004).
- [136]: **BENTZ D. P., SNYDER K. A ,** Protected paste volume in concrete, extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and concrete research, 29,P1863-1867,(1999).
- [137]: **Kim JK.** The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete, Journal of Cement and Concrete Research, 1719-29, (1997).
- [138]: **Cabrera OA, Traversa LP, Ortega NF,** effect of crushed sand on mortar and concrete rheology, Materials of Construction, 61401-16, (2011).

Annexe 1

Calcul des coefficients volumétriques des fractions des graviers étudiés

N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)	N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)
1	42.6	40488.88	31	18.7	3423.93
2	22.3	5806.4	32	12.0	904.78
3	31.4	16210.21	33	21.2	4988.92
4	31.2	15902.43	34	16.8	2482.72
5	26.8	10078.69	35	11.3	755.50
6	29.5	13442.06	36	14.0	1465.77
7	21.6	5276.68	37	12.7	1048.39
8	20.8	4711.83	38	19.0	3591.37
9	28.9	12507.69	39	14.8	1697.40
10	26.8	10078.69	40	16.7	2438.65
11	30.2	14421.83	41	16.0	2144.67
12	21.5	5270.68	42	16.0	2144.67
13	16.0	2144.67	43	16.3	2267.58
14	28.5	12120.88	44	15.0	1767.15
15	19.3	3764.19	45	12.8	1049.00
16	20.1	4251.95	46	29.6	13443.00
17	25.8	8992.05	47	18.1	3104.80
18	14.1	1467.77	48	14.6	1597.00
19	19.9	4126.28	49	16.2	2146.00
20	17.6	2854.54	50	25.5	8682.00
21	14.9	1732.04	51	20.5	4510.88
22	17.4	2758.34	52	22.8	6205.90
23	14.5	1596.26	53	17.8	2952.97
24	20.2	4252.95	54	12.7	1048.00
25	11.3	755.50	55	11.8	902.00
26	12.6	1047.39	56	14.5	1596.26
27	16.0	2144.67	57	18.7	3423.93
28	18.4	3261.77	58	20.0	4250.00
29	17.0	2572.45	59	12.2	906.00
30	12.0	904.78	60	17.7	2856.00

N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)	N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)
61	18.0	3053.60	91	18.8	3225.00
62	17.8	2856.00	92	15.0	1767.15
63	18.8	34.25.00	93	17.3	2756.00
64	10.5	606.13	94	15.2	1769.00
65	21.4	4990.00	95	13.1	1177.00
66	21.4	4994.00	96	12.6	1047.40
67	21.6	4995.00	97	10.1	539.47
68	26.0	9202.80	98	11.5	757.00
69	28.9	12507.70	99	16.6	2478.00
70	24.4	7606.20	100	15.1	1768.00
71	25.4	8580.27	101	14.6	1598.00
72	20.9	4713.00	102	18.4	3261.77
73	21.2	4988.90	103	11.9	882.35
74	17.0	2572.45	104	13.3	1231.84
75	17.5	2852.00	105	12.9	998.31
76	18.3	3260.00	106	15.1	1820.73
77	24.4	7606.22	107	12.2	950.78
78	19.6	3942.47	108	17.7	2903.48
79	17.8	2952.97	109	15.9	2104.70
80	15.8	2142.00	110	14.9	1732.00
81	20.9	4710.00	111	17.2	2664.30
82	15.8	2142.00	112	18.8	3479.15
83	21.3	4988.00	113	17.5	2806.17
84	20.7	4710.00	114	11.3	755.50
85	18.7	3423.00	115	17.9	3003.00
86	22.9	6207.00	116	21.3	5059.85
87	15.2	1769.00	117	14.5	1596.26
88	17.7	2856.00	118	15.9	2104.70
89	18.4	3261.77	119	09.9	508.49
90	16.3	2267.60	120	12.2	950.78

Tableau I. a : Coefficient volumétrique de la fraction 8/16 du gravier « cosider ».

$$\sum \frac{\pi}{6} * D_{max}^3 = 495830.62 \text{ mm}^3$$

Le volume totale des grains pour 200 gramme de graviers de fraction 8/15 :

$$V = \frac{m}{\gamma} = \frac{200}{2.53} = 79.051 \text{ cm}^3 = 79051 \text{ mm}^3$$

Le coefficient volumétrique : $C_V = \frac{79051}{495830.62} = 0.159$.

N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)	N° du grain	D _{max} (mm)	$\frac{\pi}{6} * D_{max}^3$ (mm ³)
1	38.8	30584.04	28	25.3	8479.32
2	30.7	15150.07	29	30.2	14421.83
3	28.5	12120.88	30	23.3	6623.19
4	34.2	20944.88	31	32.5	17974.21
5	36.8	25789.30	32	27.8	11249.52
6	33.6	19580.30	33	27.3	10653.38
7	28.0	11520.40	34	24.5	7700.13
8	41.2	36788.30	35	30.6	15002.51
9	29.0	12770.08	36	29.8	13856.34
10	62.5	127832.02	37	22.8	6205.89
11	28.2	11725.30	38	22.0	5575.29
12	36.8	25985.40	39	32.8	18476.56
13	45.8	50303.25	40	31.4	16210.21
14	35.4	23227.87	41	27.2	10536.74
15	34.6	21688.42	42	24.9	8083.74
16	22.8	6205.89	43	31.2	15902.43
17	23.2	6535.28	44	31.6	16521.93
18	25.5	8682.00	45	37.7	28055.87
19	23.6	6882.33	46	25.3	8479.32
20	33.1	18988.20	47	27.8	11249.52
21	28.9	12638.43	48	32.1	17318.68
22	26.6	9854.73	49	25.0	8181.25
23	31.6	16521.93	50	32.8	18476.56
24	29.8	13856.34	51	34.4	21314.49
25	39.6	32515.10	52	28.5	12120.88
26	22.7	6124.59	53	30.0	14137.20
27	34.4	21314.49	54	28.7	12377.85

Tableau I. b: Coefficient volumétrique de la fraction 16/25 du gravier « cosider ».

$$\sum \frac{\pi}{6} * D_{max}^3 = 961313.39 \text{ mm}^3$$

Le volume total des grains dans 500 g de gravier de la fraction 16/25 :

$$V = \frac{500}{2.53} = 197.628 \text{ cm}^3 = 197628 \text{ mm}^3$$

$$\text{Le coefficient volumétrique : } C_V = \frac{197628}{961313.39} = 0.206$$

Annexe 2

. Analyse granulométrique de différents mélanges de graviers

Mélange M 0/40/60

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	11.1	11.1	0.74	99.26
6,3	317.9	329	21.93	78.07
5	328.6	657.6	43.84	56.16
4	416.2	1073.8	71.58	28.42
3,15	275.3	1349.1	89.94	10.06
2,5	122.9	1472.2	98.13	1.87
Fond	25.2	1497.2	99.81	0.19

Tableau II .26 : Analyse granulométrique de mélange M 0/40/60 .**Mélange M8/32/60**

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	14	14	0.93	99.07
6,3	381.3	395.3	26.35	73.65
5	390.2	785.5	52.36	47.64
4	437	1222.5	81.5	18.5
3,15	180.5	1403	93.53	6.47
2,5	67.5	1470.5	98.03	1.97
Fond	.27.5	1498	99.87	0.13

Tableau II .27 : Analyse granulométrique de mélange M8/32/60 .

Mélange M16/24/60

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	1	1	0.066	99.93
6,3	390.9	391.9	26.09	73.94
5	412.3	803.2	53.46	46.59
4	416.8	1219	81.37	18.67
3,15	170.7	1389.7	92.48	7.55
2,5	763	1465.9	97.54	2.48
Fond	36.2	1499	99.98	0.06

Tableau II .28 : Analyse granulométrique de mélange M16/24/60

Mélange M24/16/60

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	1	1	0.066	99.93
6,3	389.9	390.9	26.06	73.94
5	411.3	801.2	53.41	46.59
4	415.8	1217	81.33	18.67
3,15	169.7	1386.7	92.45	7.55
2,5	762	1462.9	97.52	2.48
Fond	35.2	1499	99.94	0.06

Tableau II .28 : Analyse granulométrique de mélange M24/16/60.

Mélange M40/0/60

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	16	16	1.07	98.93
6,3	350.5	366.5	24.43	75.57
5	391.17	757.67	50.51	49.49
4	405.43	1163.1	77.54	22.46
3,15	175.5	1338.6	89.24	10.76
2,5	110.07	1448.67	96.57	3.43
Fond	50.33	1499	99.93	0.066

Tableau II .29 : Analyse granulométrique de mélange M40/0/60 .

Mélange M20/20/60

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulés</i>		<i>Tamisât (%)</i>
		<i>(g)</i>	<i>(%)</i>	
8	4.6	4.6	0.31	99.69
6,3	570.5	575.1	38.34	61.66
5	457.8	1032.9	68.86	31.14
4	364.8	1397.7	93.18	6.82
3,15	60.8	1458.5	97.23	2.77
2,5	23.2	1481.7	98.78	1.22
Fond	17.1	1498.8	99.92	0.08

Tableau II .31 : Analyse granulométrique de mélange M20/20/60.