

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2022

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

**Contribution à la valorisation des granulats recyclés
(gravier et sable) dans la composition du béton**

Nom et Prénom de l'étudiant :
REZEG Safa

Encadreur :
Dr : BENSMAIL Messaouda

Promotion: Juin 2022

Remerciements

Remerciements:

Au terme de ce travail, je remercie **DIEU** tout puissant pour m'avoir accordé le courage, la patience et la volonté qui m'ont permis d'arriver à ce jour.

Je tiens à remercier ma famille pour leur soutien et leurs encouragements et surtout mon mari **ZERARI MOHAMED** ma chère sœur **Dhia** mes enfants **WISSAL**, **YASSMINE** et **AHMED TAHA**

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à ma promotrice Madame **BENMAIL MESSOUDA** Docteur à l'Université de Biskra, pour tout le temps qu'elle m'a consacré, et la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant de m'encadrer. Son soutien constant, et ces précieux conseils, m'ont permis de mener à bien ce travail. Et que je ne la remercierai jamais assez. Que **DIEU** lui accorde santé et longue vie heureuse.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail .

J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des enseignants du département de génie civil surtout Docteurs **HOUARA SELMA** et **BENKHADA BEN AMMAR** qui m'a beaucoup aidé dans ce travail.

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements au maître **ABD ELMONIIM** directeur du laboratoire du département de Génie Civil pour m'avoir facilité le travail au laboratoire, et pour le soutien et l'encouragement.

Je remercie enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

RÉSUMÉ :

L'importance du recyclage des déchets réside dans de nombreux aspects, tels que les aspects environnementaux, économiques, sociaux et sanitaires. L'utilisation de produits recyclés (issus de la démolition) trouve tout son sens pour la confection des bétons .

Dans ce travail, on a traité l'impact de la substitution des granulats naturels (sable + graviers) par des granulats recyclés pour la confection des nouveaux bétons recyclés.

Pour cela, nous avons étudiées trois types des bétons : béton de granulats ordinaires (béton de référence), des bétons recyclés de composition (25 % SR+ 25% GR) , (25 % SR+ 50% GR) et (50 % SR+ 25% GR) quand les graviers recyclés pré-sature 24 heures dans l'eau et des bétons recyclés de composition (25 % SR+ 25% GR) , (25 % SR+ 50% GR) quand les graviers recyclés pré-sature 12 heures dans l'eau,

Pour chaque type du béton on a fixé le rapport E\C.

Les résultats expérimentaux ont montré les propriétés des bétons recyclés, telles que la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression et l'impact des granulats recyclés sur le nouveau béton.

Actuellement ont cherche à améliorer les granulats recyclés pour obtenir les mêmes caractéristiques que les granulats naturelles .

Mots clés : déchet –béton recyclé -granulats recyclés -résistance-caractéristique.

ملخص:

تكمّن أهمية إعادة تدوير النفايات في العديد من الجوانب ، مثل الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية والصحية. تم استخدام المنتجات المعاد تدويرها (من الهدم) لإنتاج الخرسانة.

في هذا العمل ، تعاملنا مع تأثير استبدال الركام الطبيعي (الرمل + الحصى) بالركام المعاد تدويره لتصنيع خرسانة جديدة معاد تدويرها. لهذا قمنا بدراسة ثلاثة أنواع من الخرسانة: خرسانة الركام العادي (الخرسانة المرجعية) ، الخرسانات المعاد تدويرها من التركيب (25% رمل + 25% حصى) ، (25% رمل + 50% حصى) و (50% رمل + 25% حصى) تم تشبع الحصى المعاد تدويره مسبقاً لمدة 24 ساعة في الماء والخرسانة المعاد تدويرها من التركيب (25% رمل + 25% GR) ، (25% رمل + 50% GR) تم تشبع الحصى المعاد تدويره مسبقاً 12 ساعة في الماء. تم تثبيت نسبة E \ C لكل نوع من الخرسانة.

أظهرت النتائج التجريبية خصائص الخرسانة المعاد تدويرها مثل مقاومة الشد الانتشاء و مقاومة الانضغاط وتأثير الركام المعاد تدويره على الخرسانة الجديدة.

في الوقت الحالي ، بذلت محاولات لتحسين الركام المعاد تدويره للحصول على نفس خصائص الركام الطبيعي.

الكلمات المفتاحية: النفايات -الركام المعاد تدويره-الخرسانة المعاد تدويرها- المقاومة .

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Résumés

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Liste des notation	ix
Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : Recherche Bibliographie Sur Le Béton	
1.1 Introduction	5
1.2 Les Compositions Du Béton Ordinaire	6
1.2.1 Les Granulats (sable et gravier).....	6
1.2.1.1 Caractéristique des granulats.....	7
a- Caractéristiques géométriques.....	7
b- Caractéristiques chimiques.....	12
c- Caractéristiques de durabilité	13
1.2.2 Le Ciment.....	13
1.2.2.1 Les constituants du ciment.....	13
1.2.2.2 Classification des ciments.....	15
1.2.3 L'eau de gâchage	17
1.3 Propriétés du béton.....	17
1.3.1 L'état Frais	17
1.3.2 L'état Durci :	18
1.3.3 Propriété de Durabilité	20
1.4 Conclusion:.....	21
CHAPITRE 2: LES GRANULATS DE BETON RECYCLE	
2.1 Les Déchets De Chantier :.....	23
2.1.1 HISTORIQUE	23
2.1.2 Introduction :	24
2.1.3 Définition des déchets de chantier :.....	24
2.1.4 Classification des déchets de chantiers :	25
2.1.4.1 Les déchets inertes :.....	25
2.1.4.2 Les déchets non dangereux non inertes :.....	25
2.1.4.3 Les déchets dangereux :.....	25
2.1.5 Gestion des déchets de chantier :.....	26
2.1.6 Le Traitement (Recyclage).....	27
2.2 Granulat Recyclé	27
2.2.1 Définition	27
2.2.2 Utilisation Des Granulat Recyclés :	28
2.2.3 Les Avantages de l'emploi des granulats recyclés :.....	28
2.2.4 Préparation Des Granulats Recyclés :.....	29
2.2.5 Le Traitement (recyclage) :	29
2.2.6 Les catégories de produits de recyclage (Les déchets inertes) :	30
2.2.7 Les classes principales des granulats recyclés :.....	31
2.2.8 La Norme De Granulats Recyclés :	32
2.2.9 Caractéristiques Des Granulats Recyclés De Béton:.....	33
2.2.10 Propriétés des granulats recyclés en relation avec le béton :	34

Table des matières

2.2.11 Granulat recyclé fin	35
2.2.12 Problème des fines du sable recyclé :	36
2.2.13Caractéristiques physiques :	37
2.2.13.1 l'Etat Frais :	37
2.2.13.2 l'Etat Durci :	38
2.3 Conclusion.....	40
CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX UTILISE	
3.1 Introduction :	42
3.2 Matériaux utilisés :	42
3.3 Caractéristiques des matériaux :	42
3.3.1 Le ciment	42
3.3.2 Caractéristiques du Gravier :	44
a) Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1] :	44
1-Gravier Naturel :	44
2- Gravier Recyclé :	47
b) La Masse Volumique : [NF P 18-555].....	50
1) La masse volumique apparente (ρ abs) : [NF P 18-555].....	50
2) La masse volumique absolue (ρ abs) : [NF P 18-555].....	52
3.3.3 Caractéristique physiques du sable :	53
3.3.3.1 Equivalent de sable : [NF-18-598].....	53
3.3.3.2 Analyse granulométrique [NA EN 933-1] :	57
3.3.3.3 Modules de finesse [NF P18-540] :	60
3.3.3.4 La Masse volumique :	60
3.3.4 L'eau :	61
3.4 Composition du béton:.....	62
3.4.1 Méthode de calcul de la composition du béton:.....	62
3.4.2 Formulation d'un béton référence :	62
3.5 Conclusion :	66
CHAPITRE 4: RESULTATS ET INTERPRETATION	
4.1 Introduction :	68
4.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations :	68
4.3. Fabrication et préparation de béton : norme (NF 18-404).....	69
4.4. Essais Expérimentaux	73
4.4.1 A l'Etat Frais :	73
4.4.2 A l'Etat Durci :	77
4.4.2.1 Essai de Résistance à la compression :	77
a)Corrélation entre la résistance à la compression (R_c) et affaissement :	79
4.4.2.2 Essais d'auscultation Sonore (ULTRA-SON):.....	80
a) Corrélation entre la résistance à la compression (R_c) et la vitesse des ultrasons (V) :	82
4.4.2.3 Essai de Résistance de Traction par flexion :	83
4.5 Conclusion	85
Conclusion Générale	87
Référence	90
Annexes	93

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE SUR LE BETON

Fig 1.1.Exemple de courbes granulométriques de sable et gravillon	9
Fig 1.2 Lavage industriel des gravillons.....	11

CHAPITRE 2: LES GRANULATS DE BETON RECYCLE

Fig 2.1. Pourcentage des types des déchets de chantiers.	24
Fig 2.2. Classification déchets de chantiers.....	26
Fig 2.3. La gestion des déchets de chantier.....	26
Fig 2.4. granulats de béton de démolition.....	31
Fig 2.5. granulats de maçonnerie.....	32
Fig 2.6 granulats de débris hydrocarbonés.....	32
Fig 2.7 granulats de débris mixtes.....	32
Fig 2.8 La forme du granulats de recyclage et différent types.	33
Fig 2.9 Vue en coupe du granulats recyclé (gauche) et du granulats naturel (droite)[Otsuki et al., 2003] ,.....	35
Fig 2.10 a) Granulats recyclés: vue macroscopique (à gauche) b) vue microscopique en lumière UV (à droite).	38

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX UTILISE

Fig 3.1 a) Série des tamis, b)Refus dans chaque tami.....	44
Fig 3.2 Courbe granulométrique de graviers Naturel (3/8).....	45
Fig 3.3 Courbe granulométrique de Graviers Naturel(8/15).....	46
Fig 3.4 Béton de démolition.....	47
Fig 3.5 Procédure de préparation des granulats recyclés.....	47
Fig 3.6 Concassage et Tamisage Manuel.....	47
Fig 3.7 Courbe granulométrique de graviers Recyclés (3/8).	48
Fig 3.8 Courbe granulométrique de Graviers Recyclés (8/15).....	49
Fig 3.9 La masse volumique apparente.....	51
Fig 3.10 La masse volumique absolue.....	52
Fig 3.11 Essais de l'équivalent de sable.....	55
Fig 3.12 Photos expérimental de l'équivalent de sable.....	55
Fig 3.13 Photo expérimental l'équivalent de sable.....	57
Fig 3.14 Courbe granulométrique du sable Naturel.....	58
Fig 3.15 Courbe granulométrique du sable recyclé 0/5.....	59
Fig 3.16 (a) et (b) Masse volumique apparente. a)sable naturel b)sable recyclé.....	60
Fig 3.17 Masse volumique absolue.....	61
Fig 3.18 dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée.....	63
Fig 3.19 la courbe granulaire de référence.....	65

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION

Fig 4.1 Immersion des graviers dans l'eau.....	70
Fig 4.2 Séchage des graviers.....	70
Fig 4.3 Les constituants solides du béton.....	70
Fig 4.4.Appareillage de cône d'Abrahms.....	71
Fig 4.5.Conservation des moules avec un film plastique.....	72

Liste des figures

Fig 4.6. Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.....	72
Fig 4.7: histogramme d'Affaissement du béton a l'Etat frais.....	73
Fig 4.8: histogramme de Taux d'absorption d'eau des graviers Recyclés	75
Fig 4.9. La masse volumique a l'Etat Frais.....	76
Fig 4.10: histogramme de la Masse volumique du béton a l'Etat frais.....	76
Fig 4.11 Appareil la Presse de Compression du béton.....	78
Fig 4.12: histogramme Résistance à la compression des bétons à 28 jours.....	78
Fig 4.13 : Résistance à la Compression en fonction de L'Affaissement.....	79
Fig 4.14. Appareil ULTRA-SON.....	80
Fig 4.15: histogramme de vitesse de propagation d'onde.....	81
Fig4.16: Temps de propagation des ondes.....	82
Fig 4.17 Corrélation entre la résistance à la compression (R_c) et la vitesse des ultrasons (V)	83
Fig 4.18 Appareil la Presse Hydraulique de Traction par flexion a 3point.....	84
Fig 4.19 éprouvette après la traction	84
Fig 4.20 histogramme de Résistance de Traction par flexion.....	84

Liste des tableaux

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE SUR LE BETON

Tab 1.1 Définition avec exemples des termes "sable", "gravillon" et "grave".....	6
Tab 1.2 Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires.....	8
Tab 1.3 Classes granulaires usuelles.....	9
Tab 1.4 Teneur en fines ($\leq 0,250\text{mm}$) recommandée en fonction de la dimension maximale des granulats pour le béton apparent.....	10
Tab 1.5 Relation entre la forme des grains et leurs propriété.....	11
Tab 1.6 Classification des granulats en fonction de leur masse volumique.....	12
Tab 1.7 les différents ciments et les proportions en masse de leur constituant les constituants marqués d'une étoile son secondaires (moins de 5%).....	15
Tab 1.8 Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours.....	16

CHAPITRE 2 : LES GRANULATS DE BETON RECYCLE

Tab 2.1 les productions de recyclage.....	30
Tab 2.2 Les Catégorie De Grave Recyclée et Leur Diamètre.....	31

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX UTILISE

Tab 3.1 Caractéristiques chimiques du ciment.....	43
Tab 3.2 Caractéristiques physiques du ciment.....	43
Tab 3.3 Caractéristiques mécaniques du ciment.....	43
Tab 3.4 Analyse Granulométrique Du Granulats Naturel (3-8) M=2000 g.....	45
Tab 3.5 Analyse Granulométrique Du Gravier Naturel (8-15) M=3000 g.....	46
Tab 3.6 L'analyse granulométrique de graviers recyclés(3/8)M=2000 g.....	48
Tab 3.7 L'analyse granulométrique de graviers recyclés(8/15) M=3000 g.....	49
Tab 3.8 La masse volumique apparente(ρ_{app})du gravier naturel (3/8),(8/15).....	51
Tab 3.9 La masse volumique apparente(ρ_{app})du graviers recyclés(3/8),(8/15).....	51
Tab 3.10 La masse volumique absolue(ρ_{abs})du gravier naturel(3/8),(8/15).....	53
Tab 3.11 La masse volumique absolue(ρ_{abs}) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	53
Tab 3.12 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable.....	56
Tab 3.13 Résultats d'essais d'équivalent de sable naturel 0/5.....	56
Tab 3.14 Résultats d'essais d'équivalent de sable recycler 0/5.....	57
Tab 3.15 Analyse granulométrique du Sable Naturel 0/5m=2000 g.....	58
Tab 3.16 Analyse granulométrique du sable recyclé0/5.....	59
Tab 3.17 Module de finesse du sable.....	60
Tab 3.18 La masse volumique apparente(ρ) du sable naturel et sable recyclé.....	61
Tab 3.19 La masse volumique absolue(ρ) du sable naturel et sable recyclé.....	61
Tab 3.20 valeurs de coefficient granulaire.....	63
Tab 3.21 valeur du terme correcteur K.....	64
Tab 3.22 coefficient de compacité.....	65

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION

Tab 4.1 composition du béton.....	69
Tab 4.2 Résultats des essais du béton à l'Etat frais.....	73
Tab 4.3 Résultats des vitesses de propagation d'ondes(Km/S).....	81
Tab 4.4 Résultats de corrélation de la résistance à la compression Rc (Mpa).....	82

Liste des Notations :

G : gravier.
S : sable.
E/C : rapport eau sur ciment.
t : le temps.
V : la vitesse de propagation.
GBR :granulat béton recycle.
Dmax : Diamètre maximal du gros granulat.
V : volume.
ρ_{abs} : masse volumique absolue.
ρ_{app} : masse volumique apparent.
E : eau
GR : granulat recycle
SR : sable recycle.
Ab (%) : Coefficient d'absorption d'eau.
Mh : La masse du matériau humide.
Ms : La masse du matériau sec.
Mf : module de finesse du sable.
Esv : équivalent de sable visuel.
Esp : équivalent de sable par piston.
Rt : résistance à la traction par flexion.
MV : La masse volumique.
Rc : résistance à la compression

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIF DU TRAVAIL

Le béton est le matériau de construction le plus communément utilisé dans la construction de structures de génie civil. Ces structures de génie civil ayant une durée de vie limitée et la disposition des rebus de démolition et de réparation des structures de génie civil représente un défi considérable.

L'industrie de la construction est le secteur moteur de développement économique. En termes environnementaux, le secteur du bâtiment est classé en troisième position en tant que consommateur d'énergie, et de ce fait il est un grand émetteur des gaz à effet de serre (CO₂) et un des générateurs de déchets solides[23] . Cette industrie utilise environ 1,6 milliard de tonnes de ciment et 10 milliards de tonnes de sable, de gravier et de pierre concassée chaque année [24]. Par exemple, la production de ciment au Canada est d'environ 350,5 millions de tonnes par an [9]. La production du ciment représente environ 7 % de la charge mondiale de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Ainsi, la production d'une tonne de ciment portland nécessite environ quatre giga joules d'énergie. L'exploitation minière de grandes quantités de matières premières pour la production de ciment comme le calcaire et l'argile, et du combustible comme le charbon se traduisent souvent par le déboisement intensif, les inondations ou par les hautes pertes de sol [24].

Au cours des deux prochaines décennies, il est prévu qu'une grande quantité de béton, résultant de la démolition des bâtiments et des structures, sera disponible pour l'élimination ou le recyclage afin de la réutiliser comme granulats de béton. Le béton qui représentait 52 % des déchets de construction était réutilisée à hauteur de 73 % dans des applications de faible valeur comme matériau de remplissage et comme sous couches de base des routes.

En Algérie, la demande en granulats est de plus en plus accrue pour répondre aux besoins des grands chantiers mis en œuvre [21], L'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires (à partir du 4 juillet 2007 en Algérie (Loi N° : 05/12/2005 du 04/08/2005), l'épuisement de certains gisements naturels de granulats et les difficultés de mise en place de nouvelles exploitations de carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats. En plus du déficit en granulats, [20] les déchets de construction et de démolition sont importants mais rarement valorisés. Une tentative de valorisation dans ce domaine a été entreprise dans la

Introduction Générale

région de Chlef après le séisme de 1982 en collaboration avec le centre scientifique et technique de construction (C.S.T.C) Belge. L'utilisation de ces matériaux, nécessite la quantification de l'impact de ces granulats recyclés sur le comportement des bétons à l'état frais et durci à travers l'identification des propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques. Aujourd'hui la norme EN206-1 permet une réutilisation des granulats recyclés dans la production de béton frais mais dans une proportion maximale de 30% (en béton armé) [16].

Le recyclage des bétons dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires. Dans les dernières années, les propriétés des granulats recyclés de béton (GR) et les effets de leur incorporation dans le béton ont attiré l'attention de divers chercheurs [14]. Malgré les avantages évidents pour l'environnement, ce matériau possède des propriétés distinctes de celles de granulats naturels (GN) qui ont entravé leur utilisation fréquente. La principale différence entre granulat naturel et celui recyclé est la pâte cimentaire rattachée à la surface de ce dernier, qui est l'une des principales raisons de perte des qualités des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels [23].

Dans les pays développés le recyclage a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et l'utilisation des granulats recyclés (RA), particulièrement du gravillon recyclé (GR), est déjà utilisée dans les différentes applications de travaux de génie civil. Cependant, le sable recyclé (SR) est considéré, par certains chercheurs [26], comme nocive à la durabilité. Portant lors du concassage des constructions et de démolition une quantité importante de sable recyclé (SR) est inévitable, qui dépasse les 50% de la quantité totale de granulats recyclés produite [7].

Notre étude utilise des granulats grossiers recyclés et des granulats fins recyclés pour remplacer les granulats naturels à différents taux de remplacement pour préparer le béton recyclé, et étudie systématiquement l'impact du taux de remplacement des granulats recyclés sur les propriétés physique et mécaniques du béton à doubles granulats recyclés.

PLAN DE TRAVAIL

Notre travail est composée de deux parties; la première partie est une synthèse bibliographique faisant objet d'une recherche documentaire planifiée suivant deux chapitres (1 et 2) permettant une connaissance globale et approfondie sur les différents éléments objets de cette étude et une deuxième partie expérimentale comprenant deux chapitres (3 et 4) résumant les objectifs de cette étude en présentant les matériaux utilisés, la méthodologie expérimentale, les résultats et les conclusions tirées.

Introduction Générale

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés. Nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des parties suivantes :

- ❖ Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.
- ❖ Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le matériau béton, il présente aussi les détails relatifs sur les constituants du béton et les méthodes de formulation.
- ❖ Le deuxième chapitre c'est une revue de la documentation sur le béton à base des agrégats recyclés et leur influence dans la fabrication de béton.
- ❖ Le troisième chapitre une étude expérimentale a été réalisée afin d'établir en premier lieu les caractéristiques des agrégats recyclés et ensuite étudier l'effet de remplacement des agrégats naturels par les agrégats recyclés sur les propriétés du béton à l'état frais et durci à travers un programme d'essais qui tient compte des propriétés physiques et mécaniques.
- ❖ Le quatrième chapitre présente une analyse et une discussion des résultats obtenus tout en faisant une comparaison et observations entre le béton témoin composé à 100% des granulats naturels avec le béton à granulats recyclés.
- ❖ Enfin, une conclusion générale sur nos travaux clôture ce mémoire de fin d'études.

CHAPITRE 1

Recherche

Bibliographies Sur

Le Béton

1.1 Introduction :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction et du bâtiment.

Dans le langage courant, le terme « béton » fait référence au « béton de ciment » car il s'agit du béton le plus courant, composé de ciment et d'un agrégat de sable et de gravier. Mais, en réalité, le terme « béton » désigne tout mélange utilisé pour réaliser des structures porteuses. Le béton peut donc aussi bien être de terre, de chaux ou bitumineux par exemple.

Le principe du béton est connu depuis l'Antiquité. Les Romains en ont maîtrisé l'usage dès le II^e siècle faisant cuire le calcaire et le transformant en chaux vive. En mélangeant la matière obtenue à des minéraux siliceux comme la brique pilée ou la poudre de roche volcanique appelée pouzzolane Les performances se sont ensuite améliorées au XIX^e siècle grâce à Louis Vicat qui permit de donner au béton sa résistance que l'on connaît aujourd'hui. La barque de Joseph Lambot, réalisée en 1849, est quant à elle considérée comme la première structure en béton armé de l'histoire. La réalisation est basée sur un mélange de mortier coulé sur un grillage en armature de fer.[30]

1.2 Les Compositions Du Béton Ordinaire :

1.2.1 Les Granulats(sable et gravier): [31]

On désigne en général par granulats l'ensemble des matériaux inertes naturels ou artificiels qui sont solidarisés par le ciment. Les granulats occupent environ les trois quarts du volume du béton et forment le squelette inerte du béton. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent fortement des propriétés des granulats utilisés.

Comme l'illustre le (tab 1.1), on fait la distinction entre trois sortes de granulats : le sable (rond ou concassé), le gravillon, parfois dénommé gravier dans le cas d'origine alluvionnaire (ces gravillons sont en général arrondis) et la grave (désignée également par le terme "mélange de gravillons et sables").

Le terme filler est également couramment utilisé. Il désigne un granulats dont la plupart des grains passent au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés.[30]

Tab 1.1. Définition avec exemples des termes "sable", "gravillon" et "grave"

Désignation	Définition	Exemples
Sable (rond ou concassé)	$D \leq 4 \text{ mm}$ et $d = 0$	0/1 0/2 0/4
Gravillon (gravier ou gravillon concassé)	$D \geq 4 \text{ mm}$ et $d \geq 2 \text{ mm}$	2/8 8/16 16/32 4/32
Grave (mélange de gravillon et sables)	$D \leq 45 \text{ mm}$ et $d = 0$	0/32

1.2.1.1 Caractéristique des granulats :

Les exigences concernant les caractéristiques des granulats pour béton sont spécifiées dans la NBN EN 12620 "Granulats pour béton" et le PTV 411 "Codification des granulats".

Les caractéristiques principales des granulats pour béton sont les suivantes :

- caractéristiques géométriques (granularité, teneur en fines, forme, propreté des sables, teneur en coquillages)
- caractéristiques physiques (Los Angeles, Micro-Deval, masse volumique et absorption d'eau, résistance au polissage)
- caractéristiques chimiques (pétrographie, classification des recyclés, soufre, sulfates solubles, chlorures, constituants influençant le durcissement du béton)
- caractéristiques de durabilité (résistance au gel-dégel, réactivité alcali-silice, stabilité volumique).

a-Caractéristiques géométriques

➤ Granularité ou courbe granulométrique

La granularité influence de manière déterminante la porosité du squelette granulaire, et par conséquent la densité du béton et sa résistance. Elle a également une influence considérable sur la demande en eau et sur l'ouvrabilité du béton.

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. En tamisant le granulat au moyen d'une série de tamis normalisés, on obtient pour chaque tamis un refus qui permet de désigner les granulats en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D), exprimé en d/D . Comme les classes granulaires d'un granulat présentent généralement plus ou moins toute la même masse volumique, il est suffisant de spécifier la granularité en pourcentage de masse (fig1.2), page suivante, exemples de courbes granulométriques). Les tamis qui délimitent les classes granulaires (série de base et séries complémentaires) sont indiqués au tableau (tab1.2) En Belgique, on utilise couramment "série de base + série 2".

D'une manière générale les granulats sont livrés et utilisés en classes granulaires bien définies (tab1.3).

Lorsqu'une classe granulaire fait partiellement ou totalement défaut dans une formule béton, on parle de granularité "discontinue". A l'endroit de la classe manquante, la granularité (courbe granulométrique) est caractérisée par un palier horizontal ou légèrement incliné (fig 1.3).

En général, on cherche à avoir une courbe continue, ce qui est favorable à une bonne ouvrabilité des bétons. [31]

Tab.1.2 Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires.

Série de base (mm)	Série de base + série 1 (mm)	Série de base + série 2 (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
5	5	5
-	5.6(5)	-
-	-	6.3(6)
8	8	8
-	-	10
-	11.2(11)	-
-	-	12.5(12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22.4(22)	-
31.5(32)	31.5(32)	31.5(32)
-	-	40
-	45	-
-	-	56
63	63	63

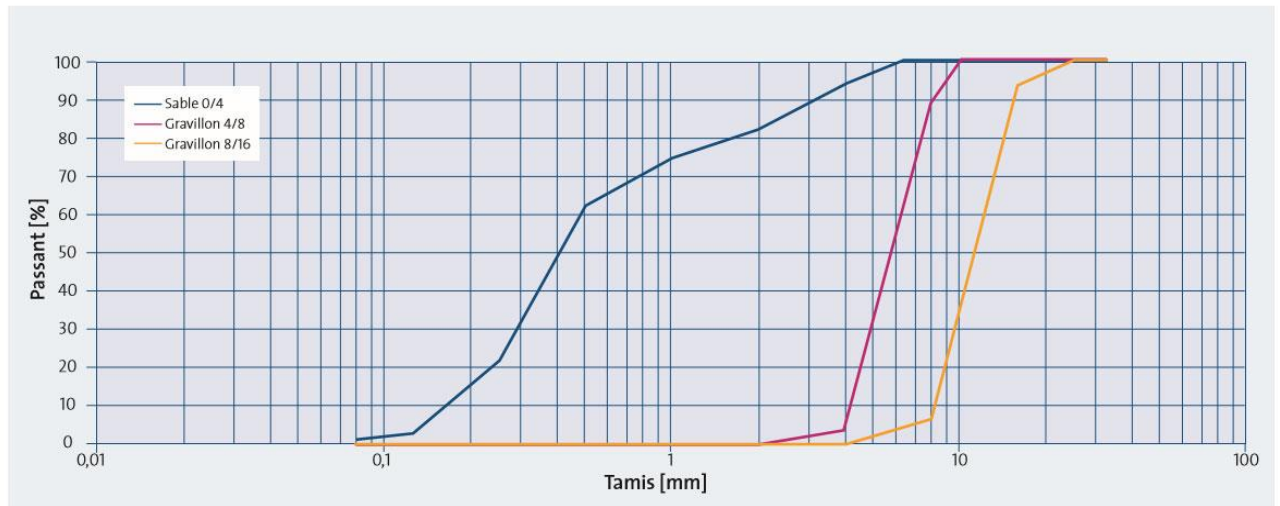


Fig 1.1.Exemple de courbes granulométriques de sable et gravillon

Tab.1.3. Classes granulaires usuelles.

Exemples de classes granulaires	Désignation selon NBN EN 12620
≤ 0.063 mm	Fines (filtre)
Classes granulaires	
0 – 5 mm	Sable
5 – 8 mm	Gravillon
8 – 16 mm	Gravillon
16 – 32 mm	Gravillon
≥ 32 mm	Gravillon

➤ **Influence du sable et de la teneur en fines:**

La fraction 0-5 mm a une influence primordiale sur la qualité d'ensemble du mélange de granulats. C'est sa porosité et la forme de sa granularité qui va jouer un grand rôle sur la demande en eau. Un bon mélange de sable à béton doit avoir environ un tiers de ses grains compris entre 0,250 et 0,500 mm. Pour cette raison, il peut être nécessaire de recomposer la fraction 0-4 mm à partir de sable rond lavé (de mer et/ou de rivière), de sable concassé lavé et/ou de sable concassé sec (pour les bétons maigres).

Les fines ($\leq 0,250$ mm) jouent aussi un rôle déterminant. L'expérience a montré que la teneur totale en fines (ci ment, additions et part des granulats de dimensions $\leq 0,250$ mm) doit s'approcher des valeurs reprises au (tab1.4) [31]

Cette quantité de fines permet notamment :

- un pompage facile du béton
- une bonne qualité de parement
- une stabilité (absence de ressuage et de ségrégation) du béton.

Il faut cependant veiller à ce que les fines soient propres.

Tab.1.4. Teneur en fines ($\leq 0,250\text{mm}$) recommandée en fonction de la dimension maximale des granulats pour le béton apparent.

Diamètre maximal des granulats (mm)	8	16	22.4	32
Teneur en fines (Kg/m ³ de béton)	575	500	465	425

➤ **Forme des grains:**

La porosité et la forme des grains, mais aussi leur état de surface et leur distribution dimensionnelle influencent considérablement le besoin en eau, l'ouvrabilité et la stabilité (ressuage) du béton (Tab1.5).

L'expérience a montré qu'un mélange pour béton comprenant exclusivement des classes granulaires de gravillons concassés peut très bien être utilisé. Les granulats concassés améliorent la résistance mécanique du béton (traction, compression, abrasion) mais influencent défavorablement l'ouvrabilité. La limitation des gravières exploitables entraîne un épuisement progressif des gisements de sables et de graviers roulés, raison pour laquelle le recours aux granulats concassés et recyclés sera de plus en plus fréquent à l'avenir. Ceci ne pose aucun problème, pour autant que le volume de pâte de ciment soit adapté en conséquence.

➤ **Propreté des granulats :**

Une propreté insuffisante des granulats est préjudiciable à la qualité du béton. Il en résulte, par exemple, une altération de la prise et du durcissement ainsi qu'une diminution de la résistance au gel. Raison pour laquelle beaucoup de granulats doivent être lavés (fig1.2), afin d'être exempts de matières organiques, dangereuses pour l'hydratation des ciments, et de particules argileuses, dont la nocivité sera appréciée par des essais tels qu'équivalent de sable et bleu de méthylène.



Fig 1.2 Lavage industriel des gravillons

Tab 1.5. Relation entre la forme des grains et leurs propriétés.

Granulats roulés		Granulats concassés	
			
Sphériques	Aplatis/allongés	Cubiques	Aplatis/allongés
Arrondis		Anguleux	
Surfaces lisses		Surfaces rugueuses	
————— Demande en eau croissante —————>			
<————— Ouvrabilité et aptitude au compactage croissante —————			

➤ **Masse volumique et absorption d'eau:**

L'origine minéralogique et la porosité des granulats déterminent leur masse volumique (Tab 1.5). La masse volumique en vrac (mesurée selon la NBN EN 1097-3) correspond à la masse de matériau en vrac par unité de volume. Elle est utilisée pour l'estimation d'un stock. La masse volumique réelle (mesurée selon la NBN EN 1097-6) correspond à la masse de matériau séché à l'étuve par rapport au volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume des pores fermés ou accessibles à l'eau. Elle est utilisée comme donnée d'entrée pour la formulation des bétons.

Le taux d'humidité des granulats comprend l'eau à la surface des grains et celle absorbée par ceux-ci. L'humidité des sables est généralement comprise entre 4 et 10% de la masse, tandis que celle des granulats plus grossiers n'excède pas 5%. Le taux d'humidité des granulats doit être pris en compte pour le calcul des volumes de granulats et pour celui de l'eau de gâchage.

L'eau absorbée par les granulats n'est pas disponible pour l'hydratation et la fluidité du béton. L'eau absorbée par les gravillons peut être néfaste pour la résistance au gel.

➤ **Los Angeles :**

Le coefficient Los Angeles détermine la résistance à la fragmentation d'un gravillon. Un faible coefficient LA signifie une bonne résistance à la fragmentation.

➤ **Autres caractéristiques éventuelles :**

Pour certaines applications (ex : béton pour revêtement routier), il est parfois nécessaire de spécifier certaines caractéristiques supplémentaires : résistance à l'usure (via l'essai Micro-Deval MDE), résistance au polissage (via l'essai PSV anciennement CPA)

Tab 1.6. Classification des granulats en fonction de leur masse volumique.

Granulats	Masse volumique réelle (Kg/m ³)	Nature des granulats	Utilisation
Granulats courants	2550 - 2800	Dépôts fluviaux, granulats concassés	Béton armé, produits en ciment
Granulats lourds	≥ 3000	Barytine, minéral de fer, hématite, granulats en acier	Béton de protection contre les radiations
Granulats légers	≤ 2000	Agrile, schiste ou verre expansé, pierre ponce	Béton léger, béton isolant, béton de pente

b- Caractéristiques chimiques:

➤ **Chlorures:**

La teneur en ions chlorures solubles dans l'eau doit être connue afin de faire le bilan en chlorures du béton.

La quantité de chlorures contenue dans le béton doit être maîtrisée afin de limiter les risques de corrosion des armatures. Certains chlorures sont de surcroît accélérateurs de prise et de durcissement du béton. Ils se retrouvent essentiellement dans les granulats marins peu ou pas lavés.

➤ **Soufre et sulfates solubles:**

Les teneurs en soufre total et en sulfates sont des caractéristiques qui régionalement sont indispensables pour évaluer l'impact d'une source de granulat sur la durabilité des bétons vis-à-vis d'éventuelles réactions ettringétiques secondaires.

A noter que dans le cas des granulats recyclés, la méthode d'essais est modérée pour ne recueillir que les sulfates solubles dans l'eau. En effet, les sulfates liés présents dans la fraction mortier en seraient libérés par l'attaque acide de la méthode d'essais granulat naturel avec comme conséquence une valeur largement surévaluée de la teneur en sulfates actifs.

La présence de sulfures de fer (pyrite, marcassite, ...) est une information à prendre en compte dans le cas de béton dont l'aspect esthétique est une caractéristique importante (risque de taches de rouille). [31]

c- Caractéristiques de durabilité :

➤ Gélivité (Résistance au gel-dégel) :

Lorsque le béton doit résister au gel, il convient de s'assurer de la résistance au gel-dégel des gravillons. Un gravillon ayant une absorption d'eau $\leq 1\%$ et/ou un LA ≤ 25 sera considéré comme non gélif (sans essais complémentaires nécessaires). Certains granulats peuvent avoir un coefficient d'absorption d'eau $> 2\%$ et offrir une résistance au gel - dégel adéquate.

L'essai de gélivité des granulats consiste à faire subir des cycles de gel-dégel aux granulats saturés en eau et à mesurer la perte de masse par tamisage.

1.2.2 Le Ciment:

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Il ne faut pas confondre:

Le ciment, poudre commercial en sac ou en vrac, avant son gâchage avec l'eau; la pâte de ciment, au moment du gâchage du ciment avec l'eau; le ciment hydraté ou pâte de ciment durcie lorsque le mélange eau + ciment s'est solidifié.[5]

1.2.2.1 Les constituants du ciment : [11]

a) Fabrication Du Clinker:

Le composé de base des ciments est un mélange de chaux apportée par des roches calcaires et d'alumine, de silice et d'oxyde de fer apportés par des argiles. Calcaires et argiles sont extraits de carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker Portland. Le clinker, auquel on ajoute quelque pourcentage de gypse est ensuite finement broyé de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 kg/dm³.

b) Autres Constituants Des Ciments :**➤ Laitier granulé de Haut Fourneau (S):**

Il est obtenu par refroidissement rapide de scories provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier a des propriétés hydrauliques.

➤ Pouzzolanes naturelles (Z):

Ce sont des roches d'origine volcanique ou sédimentaires ayant une composition appropriée, ou des argiles et schistes activés thermiquement. Les pouzzolanes n'ont pas de propriété hydraulique, mais en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment des hydrates stables : on dit qu'elles ont des propriétés pouzzolaniques.

➤ Cendres volantes (V ou W):

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques au charbon. On distingue: Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques; Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

➤ Schistes calcinés(T):

Ce sont des schistes portés à une température de 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

➤ Calcaires (L):

Ils doivent être constitués de 75% au moins de CaCO_3 .

➤ Fumées de silice (D):

Proviennent de l'industrie du silicium et des alliages. Elles ont des propriétés pouzzolaniques.

➤ Fillers(F):

Ce sont des constituants secondaires et n'excèdent pas 5% dans la composition des ciments. Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

1.2.2.2 Classification des ciments:

a) Classification en fonction de leur composition: norme NFP15-301 :

Tab 1.7. les différents ciments et les proportions en masse de leur constituant
 les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (moins de 5 %).

	Ciment portland	Ciment portland composé		Ciment de haut Fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEMI	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95%	≥ 80%	≥ 65%	≥ 35%	≥ 20%	≥ 05%	≥ 65%	≥ 45%	≥ 40%	≥ 20%
		≤ 94%	≤ 79%	≤ 64%	≤ 34%	≤ 19%	≤ 90%	≤ 64%	≤ 64%	≤ 39%
Laitier (S)	-	06% ≤	21% ≤	≥ 36%	≥ 66%	≥ 81%	-	-	≥ 18%	≥ 31%
				≤ 65%	≤ 80%	≤ 95%			≤ 30%	≤ 50%
Pouzzolane (Z)	-	total	total	-	-	-	10% ≤	36% ≤	18% ≤	31% ≤
							total	total	total	total
Cendres siliceuses (V)	-	≤ 20%	≤ 35%	-	-	-	≤ 35%	≤ 55%	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	-			-	-	-	(Fumée ≤ 10%)	(Fumée ≤ 10%)	-	-
Cendres calcaïques (W)	-	(Fumée de silice ≤ 10%)	(Fumée de silice ≤ 10%)	-	-	-	-	-	-	-
Schistes (T)	-			-	-	-	-	-	-	-
Calcaires (L)	-			-	-	-	-	-	-	-
Fillers (F)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

b) Classification en fonction de leur Résistance:

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous-classes sont associées aux 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Les classes doivent respecter les spécification indiquées dans (Tab 1.8) ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.[11]

Tab. 1.8. Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours.

		Résistance à la compression (MPa)		Retrait à 28 jours	Début de prise Stabilité ⁽¹⁾	
		Norme EN 196-1		norme	norme	norme
	Au jeune âge	à 28 jours		P 15- 433	EN 196-3	EN 196-3
clas se	2 jours 7 jours	mini	ma xi	(μm/m)	(min)	(mm)
32.5	(17.5)	≥ 32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32.5 R	≥ 13.5 (12)	≥ 32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 1000	≥ 90	≤ 10
42.5	≥ 12.5 (10)	≥ 42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
42.5 R	≥ 20 (18)	≥ 42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
52.5	≥ 20 (18)	≥ 52.5 (50)			≥ 60	≤ 10
52.5 R	≥ 30 (28)	≥ 52.5 (50)			≥ 60	≤ 10

1.2.3 L'eau de gâchage: (NF18-303).

L'eau est l'un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation [27].

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques [3].

1.3. Propriétés du béton :

1.3.1 A' L'état Frais : [32]

- **Maniabilité (ouvrabilité) :**

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage, Pour étudier la maniabilité il faut étudier la fluidité.

- **Fluidités :**

La fluidité est évaluée par la capacité du béton de couler sous l'action de poids propres ou d'une vibration.

Il existe plusieurs essais et testes divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité.

-affaissement ou cône d'abrams « slump-test » EN 18-451.

-étalement à la table à secousses « flow-test » EN 12-358.

- **Ressuage :**

C'est la remontée éventuelle d'eau à la surface d'un béton avant prise. Cette remontée est liée au tassement sous l'effet de leur poids des éléments solides (ciment granulats) qui composent le matériau.

- **Ségrégation :**

C'est la séparation des petits et des gros grains dans le béton lors de différente manutention et en particulier de transport, la ségrégation conduit à l'hétérogénéité du béton et par conséquent à la l'abaissement de la résistance.

1.3.2 A' L'état Durci :

- **Fluage et Retrait :**

Le retrait du béton est indépendant de tout chargement du matériau . Ce phénomène se produit dès la mise en œuvre du béton, pendant sa prise et son durcissement et se développe au cours du temps.

Le retrait du béton est une contraction dimensionnelle du béton due à des phénomènes chimiques et physiques. Le joint de retrait longitudinal et transversal, réalisé par traits de scie ou par mise en place d'un joint profilé PVC avant coulage de la dalle, permet le libre retrait du béton [32]

Le fluage propre du béton est conventionnellement la part de déformation différée d'un béton chargé sous une contrainte constante et protégé de la dessiccation. On l'obtient en laboratoire en protégeant le béton de la dessiccation et en mesurant en parallèle la composante de retrait endogène (hors dessiccation). [33]

- **Porosité:**

La structure poreuse des bétons est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates. Les pores capillaires, les plus gros, influencent fortement les propriétés de transfert des bétons surtout lorsqu'ils sont interconnectés. Pour diminuer la porosité capillaire et son interconnexion il faut réduire le rapport E/C et soigner la cure. La peau du béton est en outre particulièrement sensible au séchage précoce ce qui peut conduire lorsque la cure est insuffisante à un arrêt de l'hydratation très préjudiciable à l'obtention d'un béton de qualité. La perméation et la diffusion ionique des bétons sont étudiées et les grandeurs associées (perméabilité et coefficient de diffusion effectif) sont définies. La mesure de ces grandeurs est délicate car le domaine de validité des lois qui les définissent est limité. Dans la pratique cela conduit à utiliser des protocoles de mesure bien précis. [34]

- **Perméabilité :**

La perméabilité du béton représente la capacité du matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression. Elle dépend fortement du réseau poreux, de sa fissuration et de la teneur en eau du matériau. La perméabilité est également un paramètre pouvant influencer directement la durabilité des structures en béton en contrôlant la vitesse de pénétration d'agents agressifs. Elle influence directement la capacité de confinement d'une structure lorsqu'elle joue un rôle d'étanchéité.[35]

- **La Résistance à la Compression :** [35]

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton.

Elle dépend notamment de la quantité de ciment, du type de ciment et de la quantité d'eau.

Conventionnellement, on classe le béton en fonction de sa résistance mécanique en compression mesurée à 28 jours. Elle est exprimée en méga-pascals (MPa).

$$R_c = F/S$$

- **La Résistance à la Traction :** [4]

Il existe trois méthodes utilisées pour déterminer la résistance à la traction.

1-Traction direct

Réalisée sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques, et consiste à appliquer à chacune des extrémités de l'éprouvette un effort de traction parfaitement centré afin d'éviter l'apparition d'un moment de flexion parasite. Il nécessite après sciage des extrémités de l'éprouvette sur un ou deux centimètres pour éliminer le béton dont la qualité est toujours perturbée, le coulage des têtes de traction au moyen d'une colle dont la résistance est supérieure à celle du béton (Araldite ou résine Epoxy).

Le dispositif comporte des tiges de traction centrées et articulées par rotules

La résistance à la traction R_t , est donnée par la formule classique de la résistance des matériaux :

$$R_t = N/S$$

2-Traction par fendage :

Il consiste à rompre un cylindre entre les plateaux d'une presse de compression suivant deux génératrices opposées. Le contact des plateaux de la presse avec l'éprouvette est réalisé par l'intermédiaire de réglettes de contre-plaqué de 5 mm d'épaisseur et de largeur égale au 1/10 du diamètre du cylindre .

La résistance à la traction par fendage R_{fd} d'une éprouvette cubique de cote " a " soumise à un effort de rupture N est donnée par la formule suivante :

$$R_{fd} = 2NK/(\pi a^2)$$

K : est un coefficient qui prend les valeurs 1,3 et 1,1 respectivement pour les bétons légers et les bétons lourds.

3-Traction par flexion :

Il est le plus connu et le plus utilisé des trois essais il permet de reproduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent dans les ouvrages

La résistance à la traction par flexion d'une éprouvette prismatique en béton de section carrée de côté "a" soumise à un effort de rupture N serait alors :

$$R_{ff} = 1.8N/a^2$$

1.3.3. Propriétés de Durabilité :

Un béton durable est un béton capable de résister à un degré satisfait aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration. il conserve sa forme originale et sa qualité quand il est exposé à son environnement.

- **Attaque des bétons par les Acides et les Sulfates** : [36]

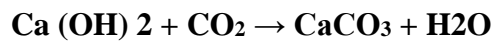
L'attaque sulfurique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimio-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé.

- **Resistance au gel-dégel** : [37]

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

- **Carbonatation :**

La Carbonatation du béton due à l'action de l'acide carbonique CO_2 qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0.5%) sur la chaux libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO_3 .[35]



1.4 Conclusion:

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau, et le plus important dans tous les domaines de la constructions.

Est un ensemble homogène obtenu par le mélange des granulats du ciment, de l'eau, et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2500 Kg/m^3 . Les bétons peuvent être armés non ou même précontraints.

Ses performances (durabilité, résistance, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage.

La structure du béton est composée de deux principaux constituants les granulats et la matrice:

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.
- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve: la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu.

CHAPITRE 2

Les granulats du

béton Recyclé

2.1 Les Déchets De Chantier :

2.1.1 HISTORIQUE

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, l'industrialisation a permis à l'homme de fabriquer de nouveaux produits qui ont révolutionné son mode de vie, et plus particulièrement les domaines de l'agriculture, du transport, de la télécommunication et de la construction. La croissance économique était si fulgurante qu'elle rendait les producteurs et consommateurs insouciants du devenir des produits après leur utilisation. Un siècle plus tard, la communauté scientifique a été alarmée par les premiers signes de dommage de l'environnement dû aux activités anthropiques, notamment de l'élévation de la température planétaire. Épuisement des ressources énergétiques, exploitation abusive de matières premières, réchauffement climatique, pollution de l'environnement, telles sont les thématiques les plus discutées actuellement. En 2001, la production totale de déchets dans les pays de l'OCDE était estimée à 4 milliards de tonnes, dont les premiers secteurs producteurs sont l'industrie avec un milliard de tonnes, suivi de l'agriculture et sylviculture avec 800 millions de tonnes et en troisième place les secteurs du BTP, des mines, et des déchets municipaux avec 600 millions de tonnes chacun. Les déchets de démolition et rénovation représentaient environ 60% (360 millions de tonnes) des déchets du BTP. Ce chiffre correspond à 10% de la quantité totale de déchets toutes catégories confondues. Durant les dernières décennies, la production de déchets de démolition et de rénovation n'a cessé de croître tant dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement. En 2004, selon l'institut français de l'environnement, environ 30% des déchets sont envoyés dans des installations d'incinération ou des centres de décharge en France. Face au contexte environnemental actuel, les politiques se sont concentrées sur la valorisation maximale des déchets dans le but de limiter l'exploitation des ressources naturelles et de valoriser au maximum les matériaux de construction arrivés en fin de vie. [34]

2.1.2 Introduction :

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la guerre mondiale en Allemagne . Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées pour développer l'utilisation du béton recyclé comme constituants de nouveau béton. Quand le chantier produit beaucoup de déchets qui causent des risques de pollution du sol et de l'eau , et le transport de ce déchet occasionne une importante pollution de l' air. Ces pollutions ont un effet direct sur la nature et sur la santé humaine. Avant de les faire évacuer ,il faut les trier et les stocker de façon à ce 'ils ne causent pas de nuisance pour l'environnement .

2.1.3 Définition des déchets de chantier :

Le secteur du bâtiment génère environ 40millions de tonnes de déchets par an ,dont 90% proviennent des chantiers de réhabilitation ou de démolition, soit plus que la production d'ordures ménagères. 66 % de ces déchets proviennent de la démolition, 28 % de la réhabilitation des ouvrages et 7% de la construction neuve. [35]

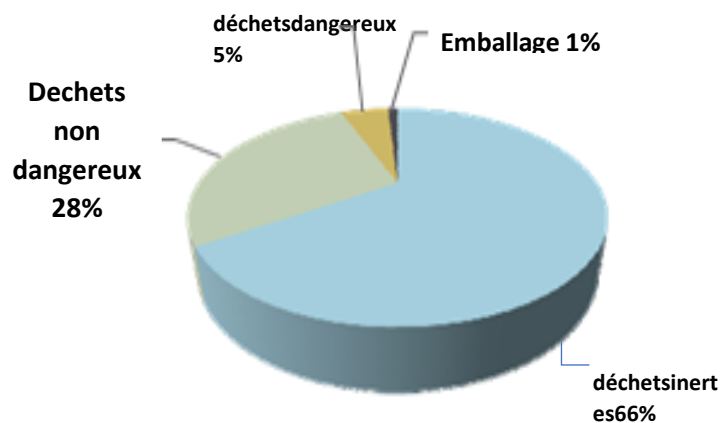


Fig2.1. Pourcentage des types des déchets de chantiers

L'élimination des déchets de chantier est réglementée depuis 1975. Cette réglementation a été modifiée en 1992 par un renforcement du contrôle des décharges et la limitation des déchets acceptés en décharge, en 1994 par l'obligation de valoriser les emballages, puis en 1997 par le classement des déchets, modifié en avril 2002. La nouvelle directive cadre "déchets" du 19 novembre 2008 renforce les objectifs de valorisation des flux de déchets afin de réduire l'enfouissement et l'incinération de ceux-ci. Un objectif de réemploi/recyclage est fixé pour les flux de déchets inertes issus de la construction : il doit atteindre 70 % d'ici 2012.

2.1.4 Classification des déchets de chantiers : [4]

2.1.4.1 Les déchets inertes :

Ils représentent 66 % des déchets de chantier. Les déchets inertes sont des déchets qui après stockage, conservent intactes leurs caractéristiques physico-chimiques. Il s'agit d'une sous-catégorie de déchet non dangereux issu principalement de l'activité de construction par exemple : briques, béton, carrelage, faïence (cuvettes de WC, certains éviers et bacs de douche...) le verre ordinaire parfois la terre et le sable....

La valorisation de ces déchets peuvent être :

- Réemployés : Une fois broyés, les inertes mélangés peuvent servir de fondation (pour des routes, des allées..)
- Recyclés : reprise de bétons de démolition de bâtiment propres puis concassés et calibrés (criblés) puis utilisés comme granulats.

2.1.4.2 Les déchets non dangereux non inertes :

Ils représentent 28 % des déchets de chantier Il s'agit de déchets qui ne sont pas classés déchets inertes, mais ne sont pas dangereux. Ils ont non corrosifs, non explosifs et ils sont souvent appelés des déchets industriels banals, ce sont :

- Soit des déchets mono-matériaux comme le bois non traité (les palettes, le coffrage), les différents métaux, le plâtre, le bitume.
- Soit des matériaux composites, des produits associés à du plâtre, des matériaux fibreux (sauf amiante) du verre traité, de papiers, de cartons, de plastique, de pneus, etc.

2.1.4.3 Les déchets dangereux :

Ils présentent 5 % des déchets du chantier, les déchets dangereux c'est des produits qui contiennent des substances toxiques suivants : explosif, inflammable, irritant, nocif, toxique, par exemples : des déchets contenant du goudron, de terres et pierres contenant des substances dangereuses, des agrégats d'enrobés contenant de l'amiante... ,Bois traités, Peinture, Solvants, piles, batteries ,ampoules



Fig.2.2. Classification déchets de chantiers

2.1.5 Gestion des déchets de chantier : [36]

Pour une bonne gestion des déchets de chantier, on doit établir un projet d’installation de chantier faisant apparaître les zones de stockage ,et les circuits d’évacuation des déchets .Dans le cadre du tri des déchets ,le chantier fera l’objet d’une organisation particulière au niveau de : la signalétique indiquant la nature des déchets à déposer avec une propreté de l’ensemble du chantier, en particulier aux abords des aires de dépôts des déchets en informant le personnel.

Les entreprises spécialisées dans le recyclage pratiquent :

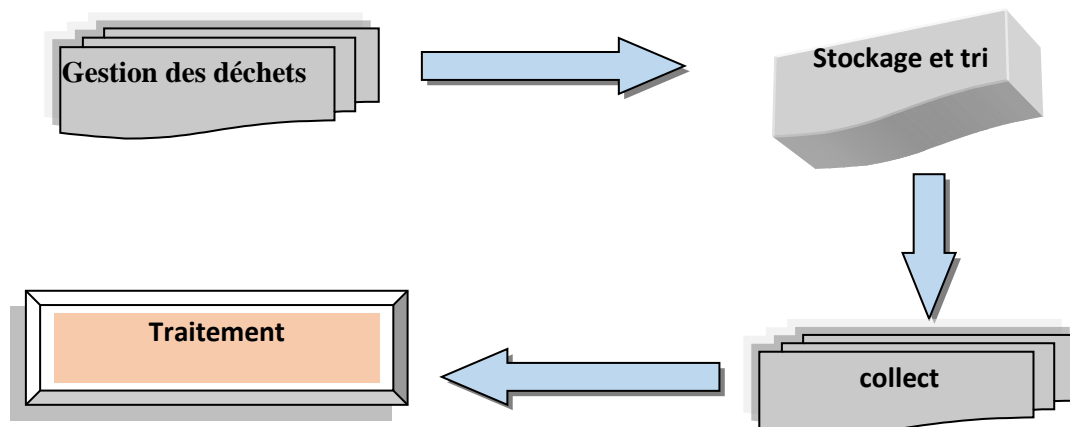


Fig.2.3. La gestion des déchets de chantier

- Soit une sélection des matériaux bruts sur les chantiers de déconstruction
- Soit une réception de matériaux sur leurs centres de traitement, approvisionnés par des entreprises de bâtiments ou de travaux publics .

pour la collecte des déchets de chantier, deux type de solution existent : les déchèteries publiques ouvertes pour la collecte des déchets du bâtiment produits en petite quantité et les déchèteries professionnelles privées ou plates-formes de regroupement.

2.1.6 Le Traitement (Recyclage) : [36]

Afin d'obtenir des niveaux de qualité approchant ceux des matériaux naturels aux quels ils peuvent se substituer, les matériaux de déconstruction doivent être élaborés dans centres de recyclage.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois RV :

- Réduire : qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- Réutiliser : qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- Recycler : qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.
- Valoriser : tous les déchets de démolition et de réhabilitation sont valorisés aux granulats.

2.2 Granulat Recyclé :

Le recyclage des déchets de démolition pourrait être amélioré par la déconstruction sélective

Alors que 97 % des déchets du bâtiment sont des déchets inertes réutilisables en remblaiement ou en sous-couches routières, seul 66% le sont à l'heure actuelle. La généralisation de la déconstruction sélective pourrait faire progresser ce recyclage.

2.2.1 Définition : [37]

Dans le cadre de cette revue de littérature, il est nécessaire de bien définir le terme « granulat recyclé ». On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Le terme « granulat recyclé » peut aussi être utilisé pour décrire un granulat provenant du retour de béton. Il y a, cependant, peu d'information disponible à ce sujet dans la littérature. Les granulats recyclés dont traite cette revue de littérature sont donc des granulats recyclés de démolition. Le terme granulats est utilisé dans ce document pour décrire la fraction grossière (5 mm à 20 mm) des granulats incorporés aux mélanges de béton puisque l'étude se concentre sur celle-ci. Les matériaux granulaires ciblés par cette étude sont des granulats recyclés de type MR-1 et MR-2 selon la norme BNQ 2590-600/2002 qui présente la classification et les caractéristiques des matériaux recyclés [NQ 2590-600/2002].

Ces granulats sont composés majoritairement de résidus provenant du concassage du béton de ciment et peuvent contenir une faible teneur en enrobé bitumineux.

2.2.2 Utilisation Des Granulat Recyclés : [28]

Les domaines d'emploi des granulats recyclé sont diversifiés dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment etc. Cette application se fait tout en respectant certaine norme.

Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, l'étude bibliographique réalisée montre que les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels. Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués des gravillons de bétons recyclés. Ces phénomènes sont encore accrus en présence d'une fraction sable de bétons concassés (0/4 mm). Ces inconvénients sont plus ou moins compensés par l'ajout de 10 à 15 % de ciment supplémentaire et d'un fluidifiant. De plus, les granulats recyclés dont la granulométrie est comprise entre 20 et 63 mm sont destinés aux terrassements ou aux chaussées. Pour la stabilisation de plates-formes et consolidation de sol les matériaux de recyclage de granularité 20/60 et 30/80 sont recommandés .

2.2.3 Les Avantages de l'emploi des granulats recyclés :

- Préservation des ressources naturelles : le recyclage d'une tonne de ciment peut économiser 1360 gallons d'eau et 900 kg de CO₂ .et l'économie des carrières
- Réduction de la pollution du transport vers les décharges
- Réduction des couts de transport des matériaux et des déchets
- Economiser les espaces d'enfouissement.
- Economie des décharges dont on cherche à réduire le nombre et l'usage.
- Economies de transport puisqu'il s'agit de matériaux 'locaux ' .
- Répondre à un large éventail d'applications, depuis les simples remblais jusqu'aux assises de chaussées à trafic lourd.

2.2.4 Préparation Des Granulats Recyclés :

Un tri est indispensable pour séparer les bétons des autres matériaux (plâtre, PVC, armatures, ...) lors de la déconstruction de bâtiments ou d'infrastructures, puis lors du traitement des déchets sur les plateformes de tri et de regroupement. Une fois les déchets triés et séparés, le béton est concassé, déferraillé puis passé au crible. Des traitements complémentaires peuvent avoir lieu si l'on souhaite rendre la matière finale encore plus pure. Après ces opérations, le béton se retrouve sous forme de gravillons ou de gravats. Il subit un contrôle en laboratoire pour vérifier la composition du produit fini et écarter tout risque de pollution.

2.2.5 Le Traitement (recyclage) : [17]

Afin d'obtenir des niveaux de qualité approchant ceux des naturels auxquels ils prouvent se substituer, les matériaux de déconstruction doivent être élaborés des centres de recyclage.

Les installations d'élaboration peuvent être fixe ou mobiles, ces dernières permettant de réaliser des interventions ponctuelles sur des chantiers de déconstruction ou les zones de recyclage et comporter selon les cas :

a) Préparation avant concassage:

Qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'une brise roche hydraulique (BRH), à couper les éléments à l'aide d'une cisaille, à retirer les impuretés les plus grosses.

b) Concassage primaire (le pré criblage) :

À l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un ferrailage électromagnétique.

Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné à retirer les impuretés (bois, papiers, plastiques) résiduelles. On trouve dans les installations primaires un seul niveau de concassage.

c) Concassage Secondaire :

portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire, les installations secondaires (au moins deux niveaux de concassage) qui peuvent être équipées d'un séparateur magnétique, d'un dispositif d'épuration (lavage, tables densimétriques, ...).

Alors les centres de recyclage peuvent offrir une technicité très variée allant du simple concasseur à mâchoire sans criblage ni épuration jusqu'à l'installation industrielle sophistiquée disposant de deux, voir trois niveaux de concassage, de criblage et d'épuration. Ces installations peuvent être fixes ou mobiles, les installations fixes sont les plus élaborées, ce qui permet la production d'une plus grande variété de matériaux.

2.2.6 Les catégories de produits de recyclage (Les déchets inertes) : [19]

Les productions observées sur différents centres de recyclage figurent dans le tableau ci-dessous, ainsi que les normes permettant de les classer. l'essentiel de la production est constitué par des graves 0/D et par des sables, des gravillons et des cailloux.

Afin de faciliter la caractérisation des graves de recyclage (GR),il a été défini Cinq catégories : GR0 ,GR1,GR2,GR3,GR4.

Pour la dureté, des essais sont nécessaires à effectuer (essais Los Angelés et Micro Deval en présence d'eau. Concernant la teneur en sulfates et conformément à la norme **NF P 18-581**.Le seuil absolu est porté à **0.20%** la teneur en plâtre doit être nulle , les sulfates ne provenant que du ciment contenu dans le matériau d'origine.

Tableau. 2.1 les productions de recyclage

Type de matériaux	Norme	Installation
Matériau de pré-criblage	NF P11-300	Toute installation avec scalpage avant concassage
Grave non calibrée		Concassage primaire sans criblage
Grave 0/D	XP P 18-540 et NF P11-300 ou NF P 98-129	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Sable	XP 18-540	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Gravillons et Cailloux	XP P 18-540	Concassage primaire ou secondaire avec criblage

Tableau.2.2 Les Catégorie De Grave Recyclée et Leur Diamètre

Référence à la norme	NF P 11-300		XP P 18-540 et NF P 98-129 (GNT A)		
	F 72	F 71			
Catégorie de grave Recyclée	GR0	GR1	GR2	GR3	GR4
Granularité	Non calibrée	0/D D ≤ 80 mm	0/D D ≤ 31.5 mm	0/D D ≤ 20 mm	0/D D ≤ 20 mm
Dureté	Non spécifiée	LA ≤ 45 MED ≤ 45	LA ≤ 45 MDE ≤ 45 LA+ MDE ≤ 80 soit E	LA ≤ 40 MDE ≤ 35 LA+ MDE ≤ 65 soit E+	LA ≤ 35 MDE ≤ 30 LA+ MDE ≤ 55 soit D
Propreté	Non spécifiée	VBS ≤ 0.2	ES ≥ 50 ou MB ≤ 2.5 soit b	ES ≥ 50 ou MB ≤ 2.5 soit b	ES ≥ 50 ou MB ≤ 2.5 soit b
Sulfates	Selon utilisation	SS b (≤ 0.7%)			

VBS selon norme NF P 94-068

VBS selon norme NF EN 933-9

2.2.7 Les classes principales des granulats recyclés : [13]

D'une manière générale, il y a quatre classes des granulats recyclés.

- 1- Granulats de débris de béton proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infra structures de génie civil (bétons ou béton armé) (A).



Fig.2.4: granulat de béton de démolition.

- 2-Granulats de débris de maçonnerie proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments (B)

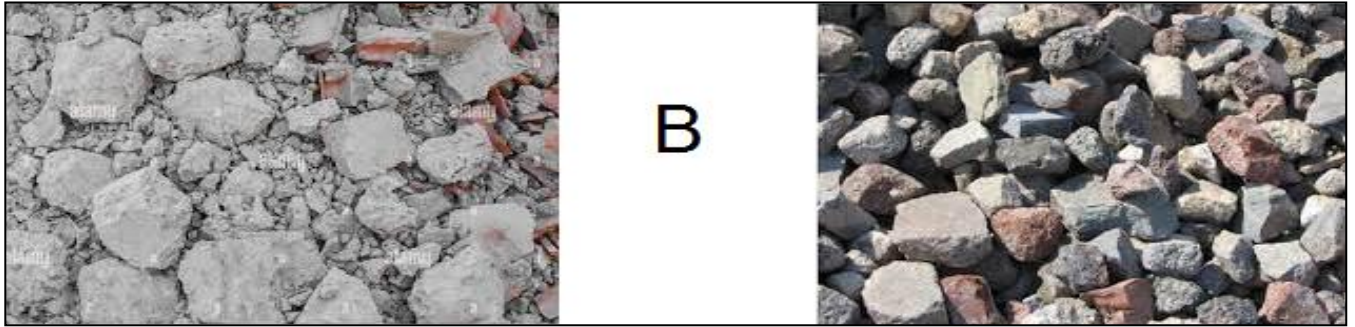


Fig.2.5:granulat de maçonnerie.

3-Granulats de débris hydrocarbonés proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes...) de la démolition de parkings....(C).

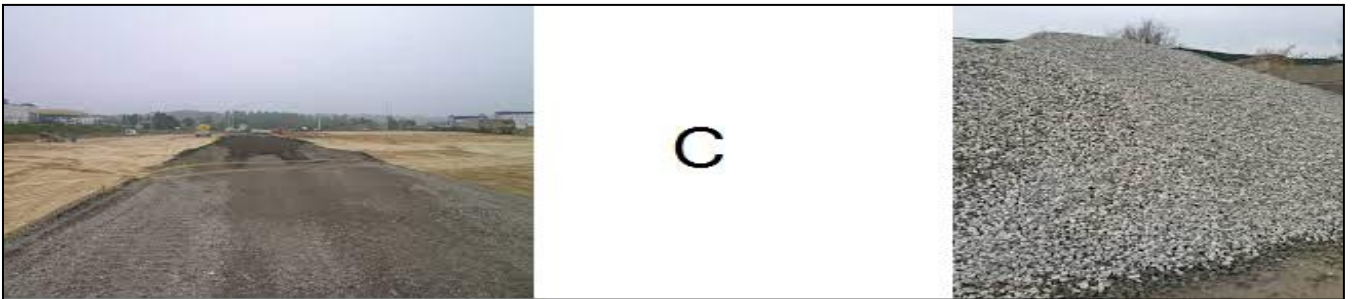


Fig.2.6 granulat de débris hydrocarbonés.

4- Granulats de débris mixtes proviennent de la construction/ rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles....)(D).

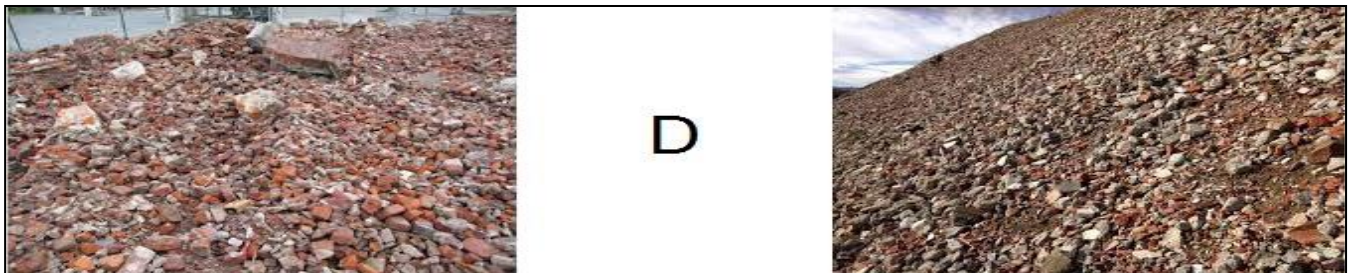


Fig.2.7 granulat de débris mixtes

2.2.8 La Norme De Granulats Recyclés : (Article NA.5.1.3 Granulats).

La norme NF EN 206/CN autorise l'utilisation de granulats recyclés issus de la déconstruction pour la formulation des bétons en précisant les conditions et les limites d'utilisation (article NA.5.1.3 Granulats). Les granulats recyclés doivent être obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction et être conformes aux normes relatives aux granulats (NF EN 12620+A1 et NF P 18-545); qui spécifient les caractéristiques et les propriétés des granulats recyclés

2.2.9 Caractéristiques Des Granulats Recyclés De Béton: [38]

La principale particularité des granulats issus du recyclage du béton est l'existence d'une gangue de ciment ancien attachée aux granulats naturels primaires. Elle a une influence importante sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés, car elle détermine, en grande partie, les caractéristiques géométriques (forme, état de surface), physiques (porosité et absorption d'eau). Mécaniques (friabilité, résistance aux chocs et à l'usure) et physico-chimiques de ces granulats (ils ne peuvent pas être considérés comme inertes).

Lorsque les granulats recyclés sont issus de produits de démolition, il apparaît une autre particularité : la présence de différents types d'impuretés indésirables: minérales: comme le gypse, le verre, les chlorures, les briques ou bien organiques: comme le papier, le bois, les plastiques, etc. Cette présence d'impuretés introduit une hétérogénéité importante des granulats recyclés et pose des problèmes liés à l'échantillonnage et à la représentativité des résultats lors de leur caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité des bétons incluant ces granulats.



Fig.2.8 La forme du granulat de recyclage et différent types

a) Influence de l'ancien mortier colle au granulats de béton recycle :

Une des tares du granulats issu de la démolition, est l'ancien mortier collé au granulats et qui ne peut être éliminé facilement. Sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulats-pâte de ciment et ainsi que de la puissance de concassage lors de la fabrication des recyclés. Cette quantité de mortier attaché aux granulats recyclés porte atteinte à la résistance du béton à long terme.

Démontré que si le rapport E/C du béton d'origine est faible, l'effet de la pâte cimentaire n'influe pas beaucoup la résistance à long terme. Néanmoins, la quantité du mortier attaché aux granulats recyclés influe la résistance à la flexion et l'énergie de rupture, elles diminuent avec l'augmentation de la quantité du mortier.

b) 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 granulats, 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. La résistance à la compression des bétons à base des granulats lisse est 10 % inférieure à celle des bétons à base des granulats rugueux [39].

c) Impact Du Remplacement Du Granulats Naturel :

Plusieurs propriétés du béton et mortier sont affectées par le remplacement du granulats naturel par un granulats recyclé. L'effet sur les propriétés du béton de ce remplacement dépend de plusieurs facteurs et peut être complexe à évaluer. En effet, les études effectuées sur les propriétés des bétons recyclés varient beaucoup tant au niveau des variables évaluées, de la formulation des mélanges, du type de liant utilisé ainsi que du type de granulats recyclés. Les facteurs affectant les propriétés du béton recyclé sont notamment : les types de liants utilisés, la source des granulats recyclés, le taux de remplacement, le rapport eau/ciment ou eau/liant et la teneur en eau des granulats [40].

2.2.10 Propriétés des granulats recyclés en relation avec le béton : [12]**a) Zone de transition :**

En particulier dans le béton de granulats recyclé, il y a plus d'une zone de transition par rapport au béton de granulats naturel. La (Fig2.9) (gauche) montre une vue en coupe d'un granulats recyclé. Cette figure indique la vieille zone de transition entre le granulats d'origine et le mortier résiduel, ainsi que la zone de transition entre le mortier résiduel et la nouvelle

matrice de mortier. Par ailleurs, la (Fig2.9) (droite) présente aussi la zone de transition pour un granulat naturel conventionnel. La configuration dans ce cas ne dispose que d'une seule zone de transition entre le granulat et le nouveau mortier [Otsuki et al., 2003].

En tenant compte des études consultées, les caractéristiques spécifiques de la zone de transition sont influencées par la qualité de mortier autour de cette zone. Cependant, l'épaisseur (ou quantité) du mortier résiduel ne semble pas avoir une influence déterminante sur les caractéristiques de la zone de transition [Otsuki et al., 2003; Boulay, 2014].

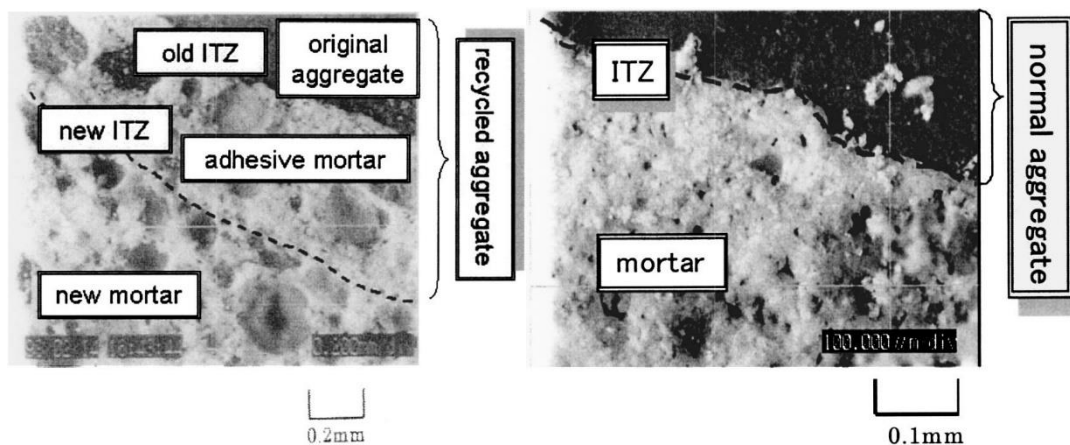


Figure.2.9 - Vue en coupe du granulat recyclé (gauche) et du granulat naturel (droite)[Otsuki et al., 2003]

2.2.11 Granulat recyclé fin : [12]

En termes d'utilisation des granulats recyclés dans la production de nouveau béton, il est établi que seul le remplacement d'une partie des gros granulats ne modifie pas significativement les propriétés du béton. Cependant, il n'y a pas de consensus concernant le remplacement des granulats fins. Le principal facteur mentionné par certains chercheurs contre l'utilisation de la partie fine des granulats recyclés est son absorption d'eau élevée, ce qui peut conduire à un béton avec de moins bonnes performances à l'état frais. Néanmoins, certaines recherches indiquent que l'utilisation de la partie fine des granulats recyclés peut être viable, si la quantité utilisée ne conduit pas à une perte importante de ses propriétés, tant mécaniques [Bravo et al., 2015; Evangelista et al., 2010] que de durabilité [Evangelista et al., 2014].

[Evangelista et al., 2007] ont analysé la résistance à la compression de divers mélanges de béton contenant la partie fine des granulats recyclés et ils ont trouvé des valeurs semblables à celle du béton de référence (60 MPa). Ils justifient ces bons résultats par la présence de ciment non hydraté dans les fines provenant du granulat recyclé, et ils justifient la meilleure adhérence entre la pâte de ciment et le granulat fin recyclé, à cause de sa plus grande porosité [Bravo et al., 2015].

2.2.12 Problème des fines du sable recyclé : [41]

Ce besoin en eau est également lié à la granulométrie du sable recyclé. En effet, la littérature permet de conclure que les parties fines des granulats recyclés réduisent l'ouvrabilité du béton [T.C.HANSEN, 1986]. Plusieurs études ont permis de cibler le problème des fines des granulats recyclés en comparant l'ouvrabilité d'un béton constitué de 100% de granulats recyclés (béton recyclé) à celle d'un béton de gravillons, graviers recyclés et de sable naturel (béton mixte). Il en ressort que le besoin en eau d'un béton recyclé est plus important que celui d'un béton mixte, soit 5 % d'eau supplémentaire. [T.C.HANSEN, 1986]. Le remplacement de fines recyclées par le sable naturel facilite la mise en œuvre des bétons. Des études de formulations ont été effectuées afin d'utiliser un adjuvant afin de réduire l'apport en eau [41]. Il a été montré que la quantité d'adjuvant nécessaire pour obtenir des valeurs similaires d'affaissement est plus importante pour un béton de granulats recyclés que pour un béton mixte et un béton classique. Les fines des granulats recyclés influent donc sur le comportement rhéologique des bétons.

Les fines, tout comme les éléments grossiers des granulats recyclés, sont constituées de granulats naturels concassés (ici en l'occurrence des fines provenant du concassage des granulats naturels) et de pâte de ciment relativement friable (des fines issues du ciment hydraté). Il serait ainsi intéressant d'identifier la part qui provoque la rigidification importante du béton recyclé: fines de granulats naturels concassés ou fines de pâte de ciment. En effet, dans le cadre de l'étude d'un béton à faible impact environnemental, l'utilisation d'une quantité d'eau plus importante n'est pas à souhaiter. En outre ce besoin en eau supplémentaire aura pour conséquences de diminuer les résistances mécaniques du béton.

2.2.13 Caractéristiques physiques :

2.2.13.1 l'Etat Frais : [40]

a) Ouvrabilité :

L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulats naturels pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de 3,1% à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton .

b) La Granulométrie et le module de finesse :

En général, les granulats recyclés se caractérisent par un fuseau granulaire homogène et continu, mais les sables recyclés sont sensiblement plus grossiers que les sables naturels utilisés dans les bétons ordinaires

Les fines présentes dans les granulats recyclés sont essentiellement constituées de ciment ancien et peuvent influencer aussi bien les caractéristiques des bétons frais (demande en eau, maniabilité, délais de la prise), que celles des bétons durcis.

c) Masses volumiques :

Du fait de la faible densité de la gangue de ciment, de la porosité plus élevée et des impuretés légères présentes dans les granulats recyclés, leur masse volumique est plus faible que celle des granulats naturels silico-calcaires d'utilisation courante dans les bétons. [18]

d) L'absorption d'eau par les granulats recyclés :

Deux effets principaux de l'absorption d'eau par les granulats recyclés peuvent être considérés :

- sur la plasticité et l'ouvrabilité du béton frais.
- sur la formation du réseau poreux du béton et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci.

Les fissures dans la partie hydratée du ciment primaire est responsable de la forte absorption d'eau

La porosité capillaire plus élevée de la pâte de ciment au sein du granulats recyclés apparaît plus jaunâtre en lumière UV que celle de la pâte de ciment environnante plus dense.

Les granulats recyclés montrent une plus forte absorption d'eau que les granulats naturels à cause de leur porosité plus élevée.

La porosité des granulats recyclés est beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels courants.

La porosité globale du sable recyclé a été évaluée à 13%. [18]

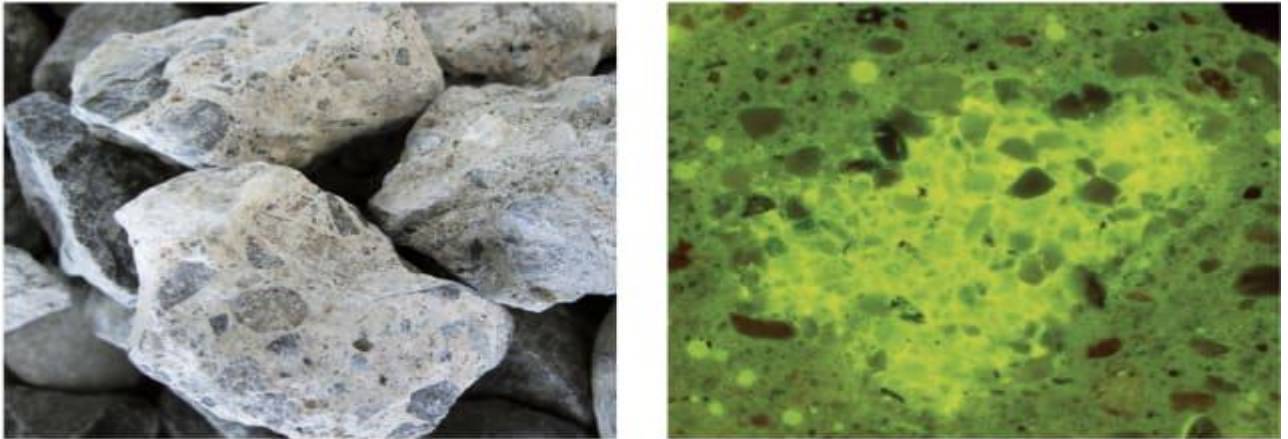


Fig.2.10 a) Granulat recyclé: vue macroscopique (à gauche) b) vue microscopique en lumière UV (à droite).

2.2.13.2 l'Etat Durci :

a) Fluage et Retrait :

L'utilisation des agrégats recyclés dans le béton induit une contraction due à la forte absorption de ces agrégats. Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulat recyclé à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0,55 à 0,8 mm/m, alors que la valeur pour un béton à base de granulat naturel est seulement d'environ 0,30 mm / m. [43]

Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évidents, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est à dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieure à celle du béton avec béton à base de granulat naturel [20].

Bien que davantage de travaux de recherche sont nécessaires dans le domaine, il semble que le comportement global du béton à base de granulat recyclé et béton à base de granulat naturel peut être comparable lors de l'affichage de l'effet combiné du retrait et du fluage.

b) Porosité:

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons de granulat recyclé La porosité des bétons de granulat recyclé est généralement corrélée à leur capacité d'absorption.

La forte capacité d'absorption des bétons de granulat recyclé est liée une forte Porosité de ce matériau. [43].

Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la Porosité des bétons de granulat recyclé. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment.

c) Perméabilité :

Selon, lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55 la présence de granulats de recyclage ne modifie pas

cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels. [6]

d) Résistance à la traction et à la flexion:

La résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours [42].

e) La Résistance à la compression :

comme les granulats de recyclage présentent une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de mortier adhérent, la résistance à la compression des bétons de granulats recyclés est généralement moindre. Néanmoins la résistance du béton ne soit pas seulement due à la résistance mécanique des granulats, mais aussi à un certain degré à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison. [42].

f) Module d'élasticité :

Le module d'élasticité représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée. Le module d'élasticité d'un GBR fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ 25% à 40% de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ 10% à 33% de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés [42].

2.3 Conclusion:

Dans ce chapitre on a défini les déchets de chantiers et leur statistique nécessaires. Et aussi les granulats recyclés lorsque le recyclage du béton est une alternative de plus en plus valorisée, il présente de nombreux avantages sur le plan économique et écologique. Chaque année le secteur du bâtiment et des travaux publics génère 300 millions de tonnes de déchets qui ne sont pas valorisés.

Cette partie présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés. Elle expose d'abord leur définition, leurs sources, leurs classifications ainsi que leur développement, ce chapitre fait une mémoire sur la description du béton à base des granulats recyclés, ses propriétés à l'état frais et durci.

Exploitations des granulats recyclés dans les travaux de construction sont multiples et ceux-ci peuvent remplacer utilement et avantageusement les granulats dits « naturels » dans la grande majorité des utilisations traditionnelles, on cite :

- Application en sous fondation et voirie
- Application en fondation , sous fondation et fondations des bâtiments industriels
- Fondations des parkings.
- Application en construction : béton maigre.

CHAPITRE 3 CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX UTILISE

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et on présente les calculs de formulation de notre béton et ensuite on décrit les différents modes opératoires des essais non destructifs (ultrason) et des essais destructifs (compression, traction).

3.2 Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed Kheider Biskra.

D'autres travaux dans le cadre de ce projet ont fait l'objet d'essais réalisés par nos soins au laboratoire de génie civil à l'Université de Biskra

3.3 Caractéristiques des matériaux :

3.3.1 Le ciment :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment CPA de classe **42.5** provient de la cimenterie El Biskria : wilaya de Biskra.

3.3.1.1 Caractéristiques du ciment CPA-CEM I:

- **Description :**

Ciment CPA CEM I 42.5R Ciment portland, pour les bétons hautes performances a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid CEM I 42.5R : Conforme à la Norme Algérienne

(NA442-2013)

- **Domaine D'application :**

Un ciment pour tous vos travaux de construction de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.

Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.

Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.

Tabliers de ponts.

Béton pompé.

Béton projeté.

3.3.1.2 Caractéristiques chimiques du ciment utilisé :

Tableau 3.1 Caractéristiques chimiques du ciment

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	6 – 8
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.5 – 2.9
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	> 3.5
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	> 0.08
Composition Potentielle du Clinker (%)	valeur
C3S	60-65
C3A	6-10

3.3.1.3 Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment utilisé :

Tableau 3.2 Caractéristiques physiques du ciment

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale (%)	25.4 – 26
Expansion à chaud (mm)	> 1.0
Temps de prise (min)	Valeur
Début de prise	150
Fin de prise	260

Tableau 3.3 Caractéristiques mécaniques du ciment.

Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	23 – 26
28 jours (MPa)	45 - 50

3.3.2 Caractéristiques du Gravier :

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

a) Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1] :

1- Gravier Naturel :

- **Principe de l'essai :**

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

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

- **Domaine d'application :**

l'essai appliqué aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilise dans le domaine du génie civil.

- **Préparation de l'échantillon pour l'essai :**

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NA EN 933-5).

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en grammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait pendant 07 minutes.

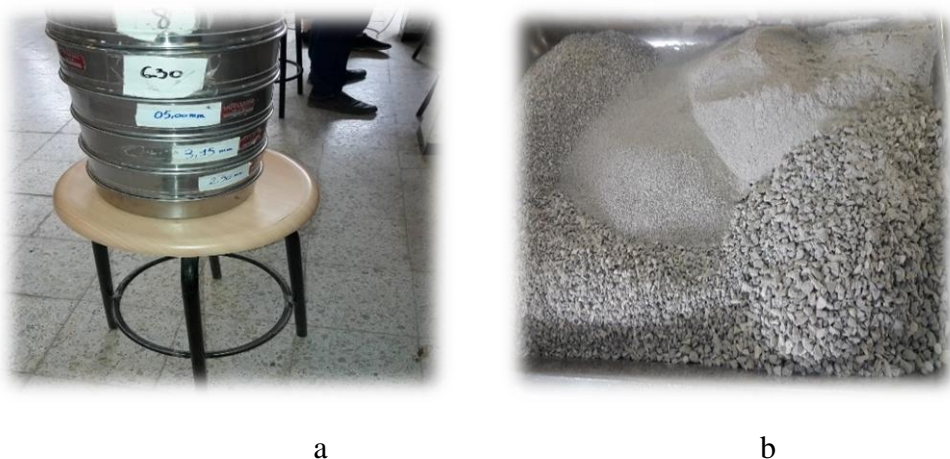


Figure 3.1 a) Série des tamis, b) Refus dans chaque tami

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.4 Analyse Granulométrique Du Granulats Naturel (3-8) M=2000 g

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	20.24	20.24	1.012	98.988
6.3	955.60	975.84	48.792	51.208
5	614.26	1590.11	79.505	20.495
3.15	364.37	1954.48	97.724	2.276
2.5	33.78	1988.26	99.413	0.587
Fond	10.89	1999.16	99.958	0.042

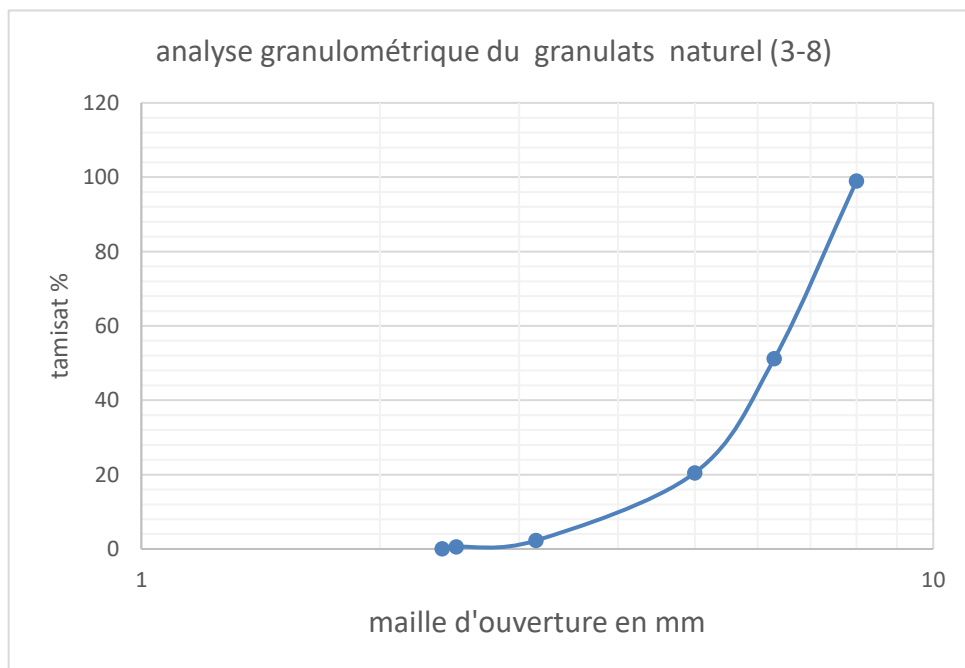


Figure 3.2 Courbe granulométrique de graviers Naturel (3/8).

Tableau 3.5 Analyse Granulométrique Du Gravier Naturel (8-15) M=3000 g .

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	0
16	42.99	42.99	1.43	98.567
12.5	1653.76	1696.75	56.558	43.442
10.00	903.21	2599.96	86.665	13.335
6.30	393.23	2993.19	99.773	0.227
Fond	6.20	2999.39	99.979	0.021

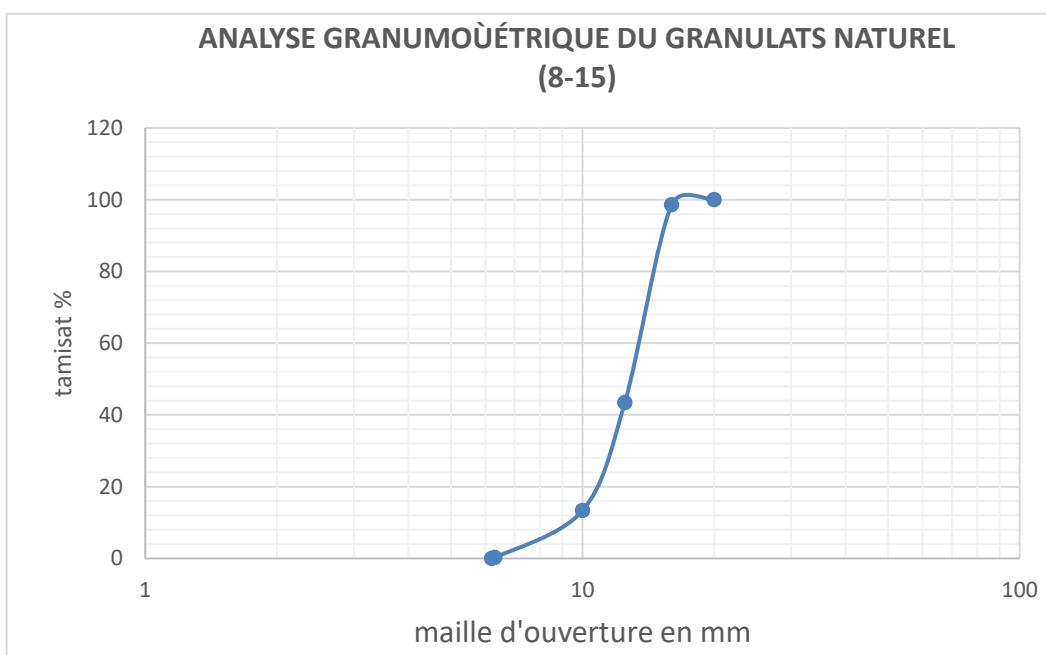


Figure 3.3 Courbe granulométrique de Gravier Naturel (8/15).

2- Gravier Recyclé :

Ce gravier est obtenu par le concassage et tamisage de béton de démolition.



Figure 3.4 Béton de démolition

2.1 Procédure de préparation des granulats recyclés :

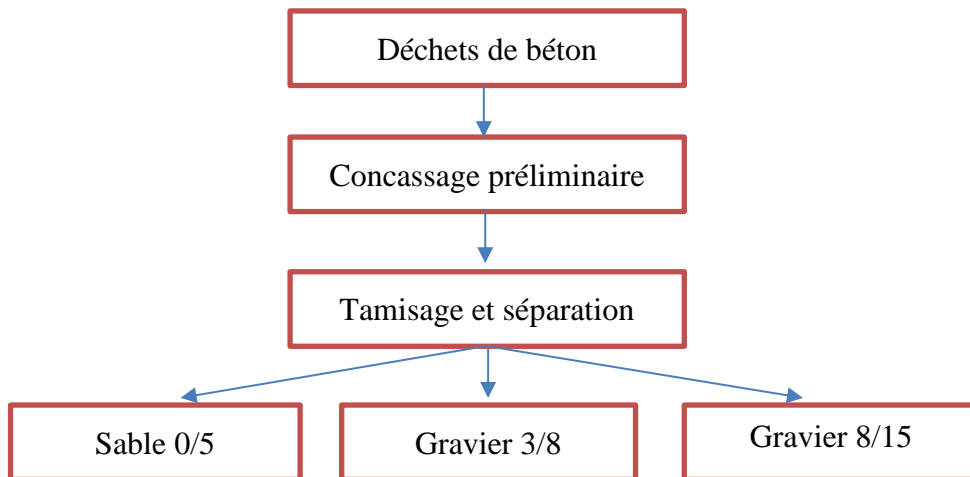


Figure 3.5 Procédure de préparation des granulats recyclés



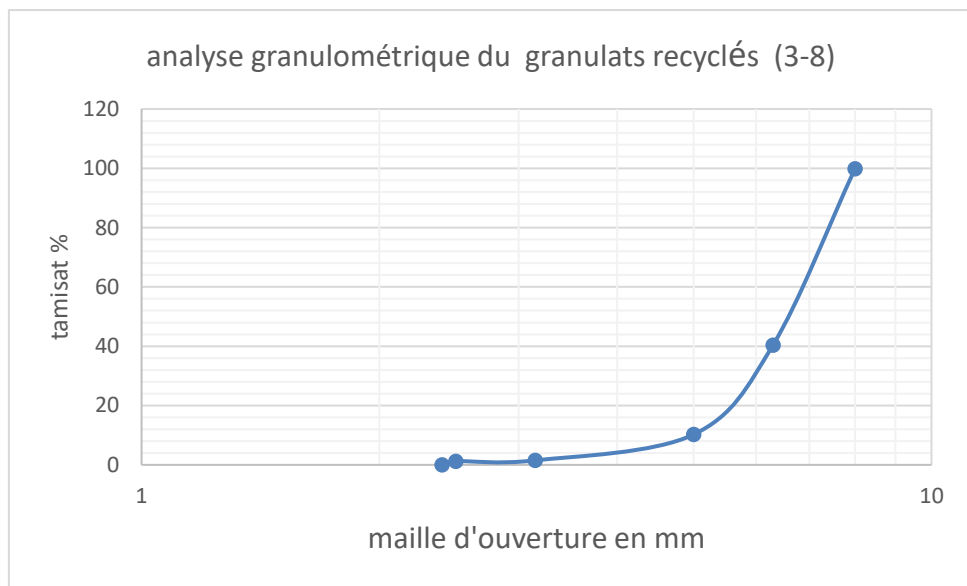
Figure 3.6 Concassage et Tamisage Manuel

L'analyse granulométrique de granulat recyclé qui sont représentés sur le tableau suivant.

➤ **Graviers Recyclés (3/8)**

Tableau 3.6 L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) M=2000 g.

Tamis(mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	3.7	3.7	0.185	99.815
6.3	1189	1192.7	59.63	40.37
5	602.40	1795.1	89.75	10.25
3.15	174.8	1969.9	98.49	1.51
2.5	5.4	1975.3	98.76	1.24
Fond	24.6	1999.9	99.99	0.01



Figuré 3.7 Courbe granulométrique de graviers Recyclés (3/8)

➤ Grapiers Recyclés (8/15):

Tableau 3.7 L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.

Tamis(mm)	Refus (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	0
16	10,5	10.5	0.35	99.65
12.5	1007.1	1017.6	33.92	66.08
10.00	1310.7	2328.3	77.61	22.39
6.30	636.6	2964.9	98.83	1.17
Fond	35.1	3000	100	0

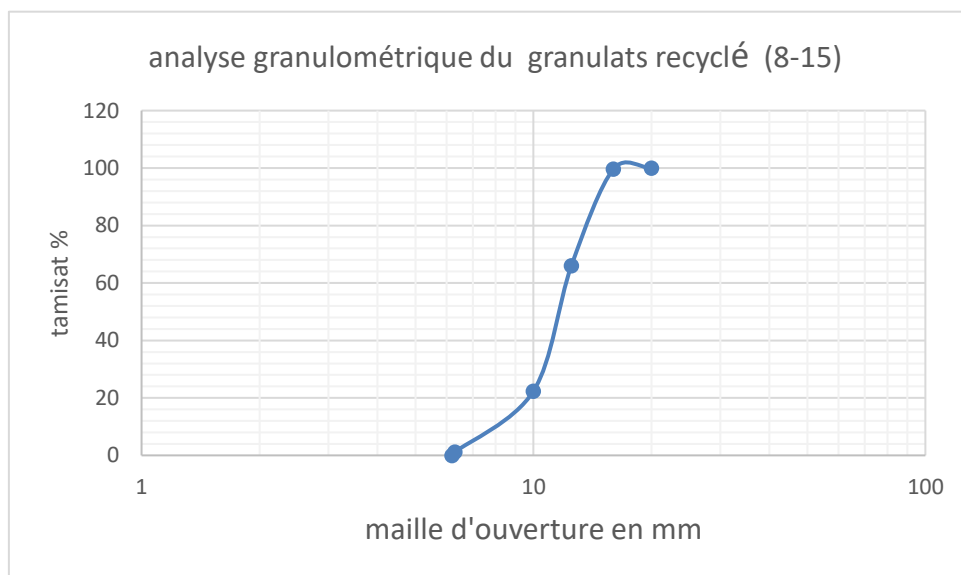


Figure 3.8 Courbe granulométrique de Grapiers Recyclés (8/15)

b- La Masse Volumique : [NF P 18-555]

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps. il existe deux volumes ; le volume apparent et le volume absolu.

1) La masse volumique apparente (ρ_{abs}) : [NF P 18-555]

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm³; Kg/l; t/m³).

• Principe :

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

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

• Mode opératoire :

- Peser le récipient à vide et noter M1
- Prendre le matériau avec les 2 mains en formant un entonnoir,
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- Araser à la règle,
- Peser le contenu et noter M2

Il résulte que :

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

M1 : masse du récipient vide.

M2 : masse du récipient et gravier.

V : Volume de récipient



Figuré 3.9 La masse volumique apparente

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.8 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du gravier naturel (3/8), (8/15).

Matériaux	M_1	V(cm3)	M_2 (g)	$\rho_{app}(g/ cm^3)$
Gravier : 3/8	294,45	1000	1733,73	1,43
Gravier :8/15	3614,5	5000	10571,3	1,39

Tableau 3.9 La masse volumique apparente (ρ_{app}) du graviers recyclés (3/8), (8/15).

Matériaux	M_1	V(cm3)	M_2 (g)	$\rho_{app}(g/ cm^3)$
Gravier : 3/8	294,45	1000	1462,42	1,16
Gravier :8/15	3614,5	5000	9190,92	1,12

2) La masse volumique absolue (ρ_{abs}) : [NF P 18-555]

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte des vides et des pores).

Elle est exprimée en (t/m^3 , kg/l , g/cm^3).

- **Principe :**

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

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier.

Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

- **Mode opératoire :**

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans un tube gradué .
- Bien éliminer les bulles d'air,
- Lire les nouveaux volumes V_2
- Le volume absolu ou réel est :

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



Figure 3.10 La masse volumique absolue

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.10 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du gravier naturel (3/8), (8/15).

Matériaux	$M_1(g)$	$V_1(cm^3)$	$V_2(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/ cm^3)$
Gravier : 3/8	300	300	420	2,50
Gravier :8/15	300	300	410	2,72

Tableau 3.11 La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du gravier recyclé (3/8), (8/15).

Matériaux	$M_1(g)$	$V_1(cm^3)$	$V_2(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/ cm^3)$
Gravier : 3/8	300	300,08	425	2,40
Gravier :8/15	300	300	430	2,30

3.3.3 Caractéristique physiques du sable :

Le sable qu'on a utilisé est sable d'oued Lioua région de Biskra.

3.3.3.1 Equivalent de sable : [NF-18-598]

Selon la norme NF-18-598 décrite de mode opératoire concernant cet essai.

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussière nuisible et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et provoque des gonflements et des retrait.

- **Mode opératoire :**

- tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g)
- prendre une pesée de 120g
- Remplir le tube gradué d'une solution lavante jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120g dans l'éprouvette et taper Fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libéré les bulles d'air qui favorisele mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 min

- fermer l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20cm horizontal en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon, le rincer avec solution lavante au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois. Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant
- Tourner lentement le tube et l'éprouvette en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire montrer les éléments fins et argileux. Effectuer Cette opération jusqu'à ce que la solution lavante au 2eme repère, laisser ensuite reposer pendant 20 minutes

a) Equivalent de sable visuel (E.S.V)

Après 20 min de dépôt de sable , on lit la hauteur **h1** du niveau supérieur de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette .on mesure également avec la règlette : la hauteur **h2** comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

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

Avec :

h1 : hauteur du sable+ flocculat.

h2 : hauteur du sable.

b) Equivalent de sable piston (E.S.P)

-Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

-Introduire la règlette dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit **h'2** la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$E_{sp} = (h'2/h_1) 100\%$$

Avec :

h1 : hauteur du sable+ flocculat.

h'2 : hauteur du sable.

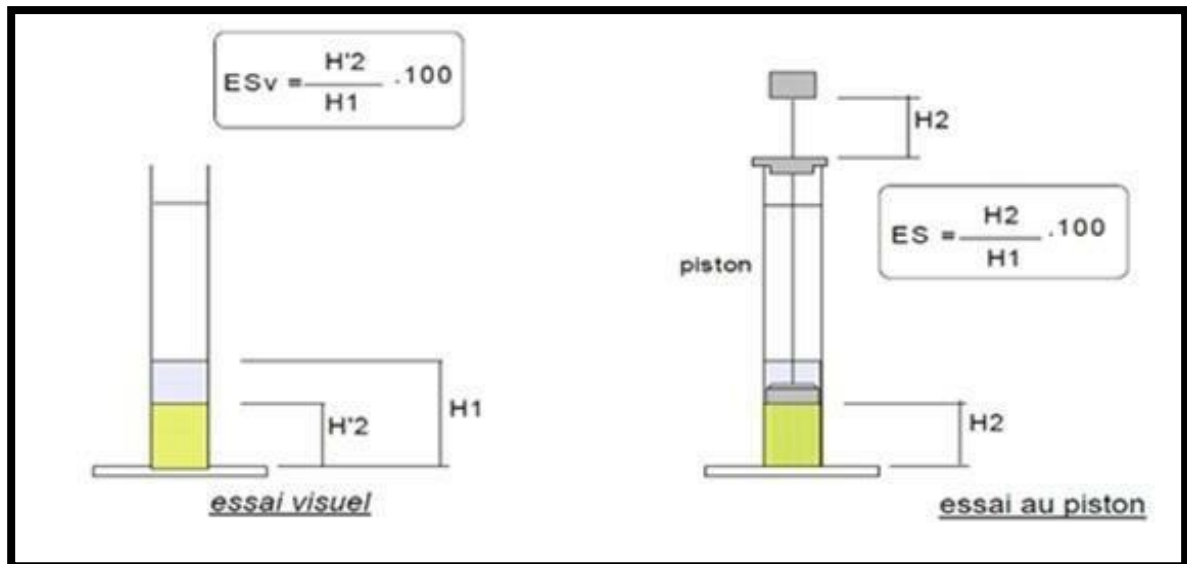


Figure 3.11 Essais de l'équivalent de sable



Figure 3.12 Photos expérimentals de l'équivalent de sable

Tableau 3.12 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable

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

les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.13 Résultats d'essais d'équivalent de sable naturel 0/5.

Hauteur (cm)	h1	h2	ESV (%)	ESV moy (%)	h'2	ESP (%)	ESPMoy (%)
Echantillon (1)	10.3	8.1	78.64	79.23	7.9	76.69	76.58
Echantillon (2)	11.9	9.5	79.83		9.1	76.74	

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv = 79.23

Esp = 76.58

Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité

Tableau 3.14 Résultats d'essais d'équivalent de sable recycler0/5.

Hauteur (cm)	h1	h2	ESV (%)	ESV moy (%)	h'2	ESP (%)	ESPmoy (%)
Echantillon (1)	12	10	82.0	83.70	10.1	78.9	77.5
Echantillon (2)	13	11	85.3		9.9	76.1	

Esv= 83.70
 Esp= 77.52

} Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

3.3.3.2 Analyse granulométrique [NA EN 933-1] :



Figure 3 .13. Photo expérimental l'équivalent de sable.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.15 Analyse granulométrique du Sable Naturel 0/5 m=2000 g.

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0.97	0.97	0.0485	99.951
2.5	312.94	313.91	15.695	84.305
1.25	174.20	488.11	24.305	75.695
0.63	199.34	687.45	34.372	65.628
0.315	656.92	1344.37	67.21	32.781
0.16	416.07	1760.44	88.02	11.978
0.08	199.37	1959.81	97.99	2.01
Fond	39.46	1999.27	99.96	0.04
Module de finesse	Mf=2.29			

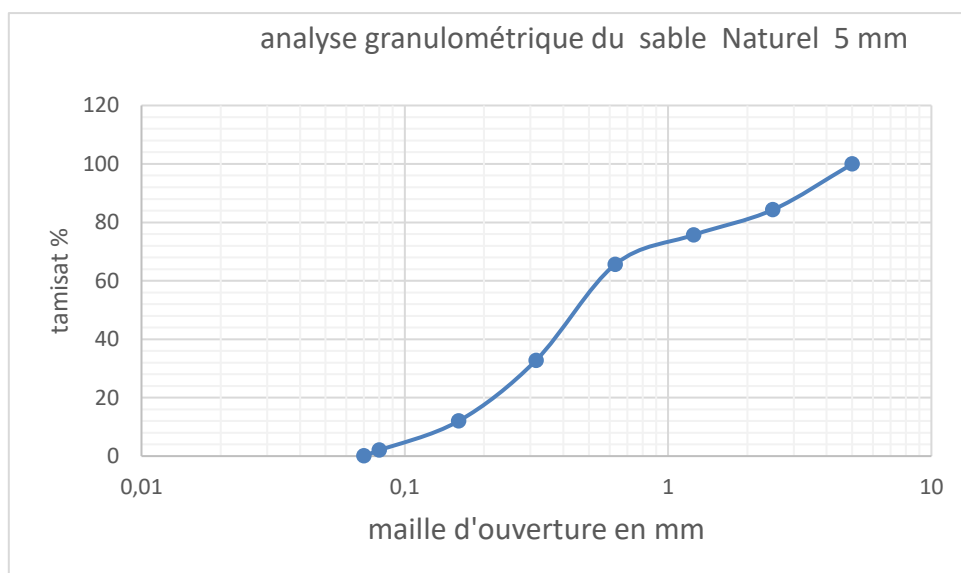


Figure 3.14 Courbe granulométrique du sable Naturel.

Tableau 3.16 Analyse granulométrique du sable recyclé 0/5.

Tamis(mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	1.27	1.27	0.0635	99.93
2.5	747.49	748.76	37.43	62.56
1.25	465.56	1214.32	60.71	39.28
0.63	272.67	1486.99	74.34	25.65
0.315	237.53	1724.52	86.22	13.77
0.16	128.5	1853.02	92.93	7.34
0.08	85.6	1938.62	96.93	3.06
Fond	61.31	1999.93	99.99	0.01
Module de finesse	Mf=2.50			

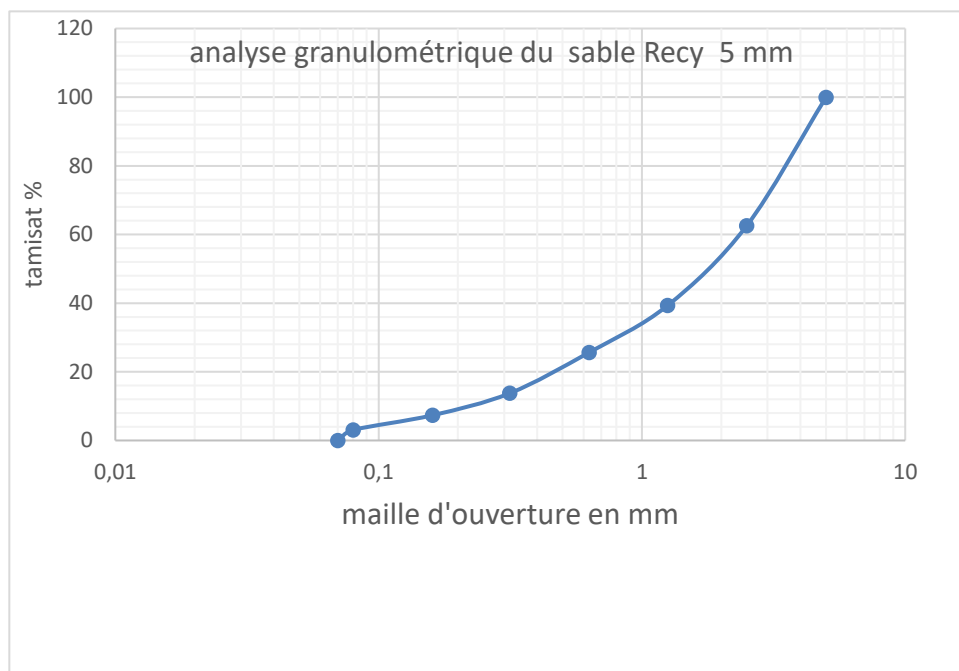


Figure 3.15 Courbe granulométrique du sable recyclé 0/5.

3.3.3.3 Modules de finesse [NF P18-540] :

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

Tableau 3.17 Module de finesse du sable.

Quantité du Sable	Module de Finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très Fin	1 à 1.5

$$MF = \sum Ri/100$$

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

C'est un sable Moyen.

3.3.3.4 La Masse volumique :

a) Masse volumique apparente [NF P 18-555] :



a) sable naturel



b) sable recyclé

Figure 3.16 a) et b) Masse volumique apparente

Tableau 3.18 La masse volumique apparente (ρ) du sable naturel et sable recyclé.

Matériaux	$M_1(g)$	$V_1(cm^3)$	$M_2(g)$	$\rho_{app}(g/cm^3)$
Sable Naturel	294.45	1000	1852.42	1.56
Sable Recycle	294.45	1000	1566.10	1,27

b) Masse volumique absolue [NF P18-555]**Figure 3.17** Masse volumique absolue

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.19 La masse volumique absolue (ρ) du sable naturel et sable recyclé

Matériaux	$M_1(g)$	$V_1(cm^3)$	$V_2(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$
Sable Naturel	300	300	415	2.60
Sable Recycle	300	300	440	2.14

3.3.4 L'eau :

L'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue du robinet de laboratoire. aucune analyse n'a été effectuée, l'eau est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible (matières organiques).

3.4 Composition du béton:

3.4.1 Méthode de calcul de la composition du béton:

Le calcul de la composition du béton à pour le but de déterminer le dosage de ciment, granulats et de l'eau pour un dosage de 1 m³ de béton frais afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue.

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

Méthode de DREUX GORISSE

Méthode de BOLOMEY

Méthode d'ABRAMS

Méthode de FAURY

Méthode d'OISEL

Méthode de VALETTE

Méthode des VOLUMES ABSOLUS

Méthode GENERALE DU CENTRE D'ESSAIS DES STRUCTURES

3.4.2 Formulation d'un béton référence :

Les méthodes de composition ne conduisent pas toutes au même résultat, car chacune d'elles doit simplifier et s'appuyer sur quelques hypothèses qui ne sont pas toujours les mêmes. Pour la formulation de notre béton de référence, il a été retenu d'utiliser la méthode de **Dreux-Gorisse**.

3.4.2.1 Méthode de Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1998] :

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

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du

C.T.C. Est, le L.T.P. Est et autres laboratoires privés.

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

formule:

$$R_b = GR_c - c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

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

G: Coefficient granulaire donné par le (Tableau 3.20), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{mas}) du gravier.

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

Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque (Figure 3.18).

➤ Valeurs de G coefficient granulaire :

Tableau 3.20 valeurs de G coefficient granulaire.

Qualité des granulats	Dimension des granulats D (mm)		
	Fins	moyens	Gros
	$D \leq 12.5$	$20 \leq D \leq 31.5$	$D \leq 40$
Excellente	0.55	0.60	0.65
bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

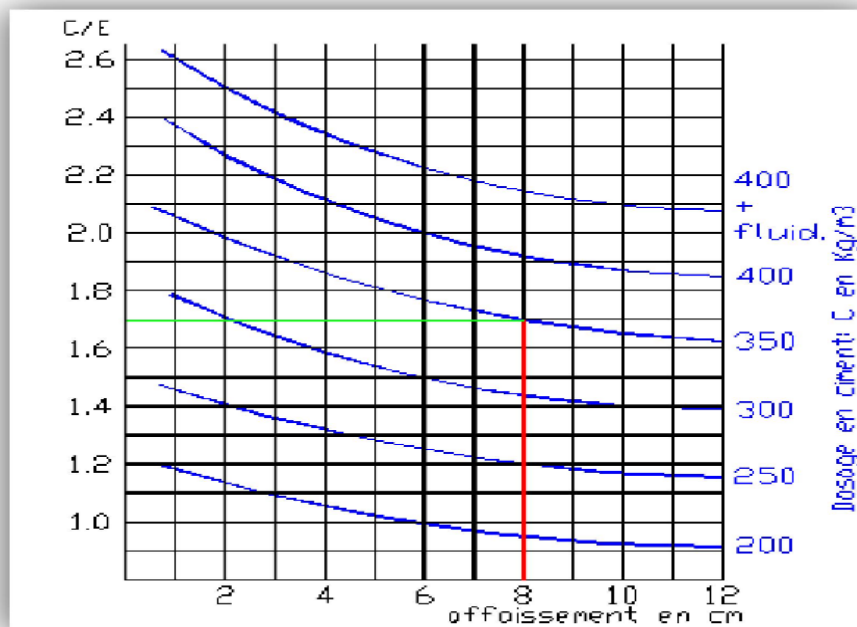


Figure 3.18 dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée.

➤ **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:

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

➤ **Détermination du dosage en granulat:**

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, (Figure 3.19) ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit:

- **En abscisse:**

Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$.

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

- **En ordonnée:** Y donnée par la formule suivante:

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

K: est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable qui est donné par le (Tableau 3.21).

Tableau 3.21 valeur du terme correcteur K

vibration forme(s,t,sable)	Faible		normale		puissante	
	roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	Concassé
400+fluidifiant	-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

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1 , g_2 , g_3 par exemple.

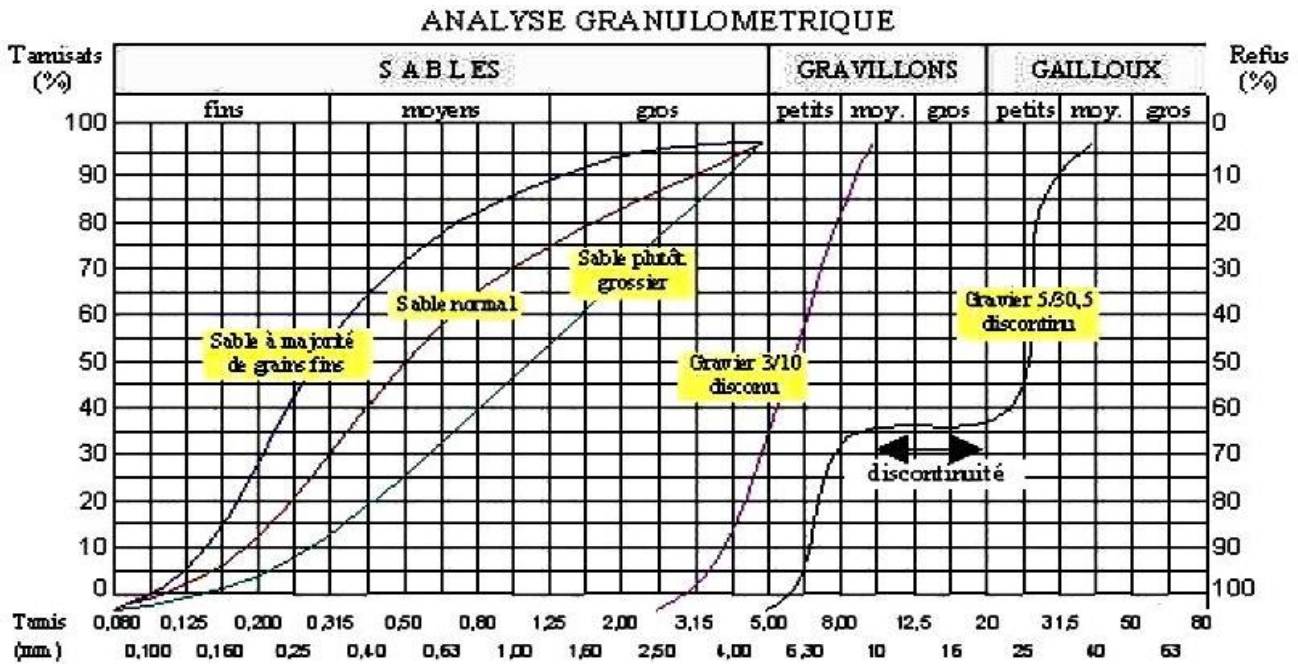


Fig 3.19 la courbe granulair de référence

C'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est:

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

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment Le volume absolu de l'ensemble desgranulats est:

$$V = 1000\gamma - c$$

Ou:

γ : coefficient de compacité qui est donné par le (Tableau 3-22).

Tableau 3.22 coefficient de compacité

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

3.5 Conclusion :

Le présent chapitre avait pour le but de répondre aux objectifs de ce mémoire. Les étapes expérimentales ont été étudiées en détail, y compris la caractérisation des différents matériaux utilisés, ainsi que la formulation des bétons à base des granulats recyclés. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée de toutes les expériences réalisées et la méthode de calcul la composition du béton.

CHAPITRE 4

Résultats Et Interprétations

4.1 Introduction :

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

4.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations :

Dans notre travail nous sommes appuyés sur la fixation du E/C pour étudier l'évolution des propriétés du béton à l'Etat frais et l'Etat durci avec le changement du pourcentage de granulats recyclés (sable + gravier) et pré-saturation de graviers recyclés dans le béton recycle.

Il fallait de préparer des gâchées pour confectionner 18 éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 et 18 éprouvettes prismatiques ($10 \times 10 \times 40$) cm^3 .

- Six formulations de béton sont réalisées :

Bt : formulation du béton témoin : Mélange à base des agrégats naturels.

- ❖ Trois formulations du béton recyclé B1 ; B2 ; B3 a base des graviers de béton recyclé GBR immergés dans l'eau pendant 24 heures.

B1 : formulation du béton (SR 25%, GR de 25%).

B2 : formulation du béton (SR 25%, GR de 50%).

B3 : formulation du béton (SR 50%, GR de 25%).

- ❖ Deux formulations du béton recycle B'1 ; B'2 a base des granulats de béton recyclé GBR

Pré-saturés dans l'eau pendant 12 heures.

B'1 : formulation du béton (SR 25%, GR de 25%).

B'2 : formulation du béton (SR 25%, GR de 50%).

-La composition a été déterminée par la méthode de Dreux-Goriss.

Tab 4.1 composition du béton :(kg/m³)

Ciment	Gravier 8\15	Gravier 3\8	Sable 0\5	Eau (L/m ³)	E/C
350	905	200	670	180	0,52

4.3. Fabrication et préparation de béton : norme (NF 18-404)

4.3.1 Méthode de préparation :

La norme (NF 18-404) distingue les essais d'études, des essais de convenance et de contrôle,

Les essais d'études sont exécutés sur un béton réalisé en laboratoire du l'Université Mohamed Kheider Biskra.

Pour réaliser nos essais, nous avons utilisé des moules cubiques de dimension(10x10x10) cm³ et des moules prismatiques de dimension (10×10×40) cm³. Ces moules sont en métal (acier), cette matière est imperméable, non absorbante et huilé.

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'axe vertical, et mouvement planétaire. La fabrication des bétons ordinaires a été effectuée conformément à la norme NF P 18-404.

La modalité de fabrication des différents types de bétons que nous avons suivie se déroule comme suit :

Immersion totale des granulats de béton recyclé GBR dans l'eau pendant 24 heures pour les formulations B1-B2-B3 et 12 heures pour B'1-B'2 pour la saturation complète puis le sécher avec un morceau de tissu.



Fig4.1 Immersion des graviers dans l'eau.



Fig4.2 Séchage des graviers.

- Mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il a été utilisé auparavant.
- Mettre les constituants solides en commençant par les plus grossiers au plus fin (graviers, sable, et le ciment).



Fig4.3 Les constituants solides du béton

- Malaxage à sec pendant 1 minute.
- Verser l'eau et malaxer pendant 3 minutes.
- Vidange de malaxeur.

4.3.2 Affaissement au cône d'Abrams [NA EN 12350-2] :

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il est réalisé à l'ordre suivant :

- introduire le béton dans le cône d'Abrams légèrement humidifié et huilé en trois couches égales.
- piquer chaque couche 5 coups avec une tige de $\phi=16\text{mm}$.
- démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondir au centimètre.



Fig 4.4. Appareillage de cône d'Abrahms

4.3.3 Vibration : [NA EN 12390-2]

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

- Remplir les moules cubiques et prismatiques en deux couches.
- Chaque couche a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes par couche.
- Les éprouvettes sont laissées pendant 24 heures dans l'air libre, protégées (facette supérieure) par un film plastique contre l'évaporation d'eau,
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par peinture et conservées dans l'eau.



Fig 4.5. Conservation des moules avec un film plastique.

4.3.4 Conservation des éprouvettes après démoulage : NF P 18-404

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et même conditionnement conformément à la norme NF P 18-404.

Les conditions de conservations normalisées ont été réalisées suivant la norme NF P18-404

Mettre les éprouvettes dans l'eau à température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ pendant 28 jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet également de maintenir les bétons saturés.



Fig 4.6. Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.

4.4. Essais Expérimentaux :

4.4.1 A l'Etat Frais :

Les propriétés des bétons étudiées : l'absorption d'eau, Affaissement, La masse volumique sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tab 4.2 Résultats des essais du béton a l'Etat frais :

Types des bétons	Absorption d'eau GR 8/15(%)	Absorption d'eau GR 3/8(%)	Masse volumique (g/cm ³)	L'Affaissement du béton (cm)
Bt	-	-	2,12	5
B1	7,40	9,87	1,95	3
B2	10,18	10,97	1,74	2,3
B3	7,40	9,87	1,87	2,3
B'1	5,36	7,46	1,81	2
B'2	6,09	7,66	1,73	1,5

a) L'Affaissement du béton :

Les résultats d'Affaissement du béton dans le cône d'Abrams présentées ci-dessous :

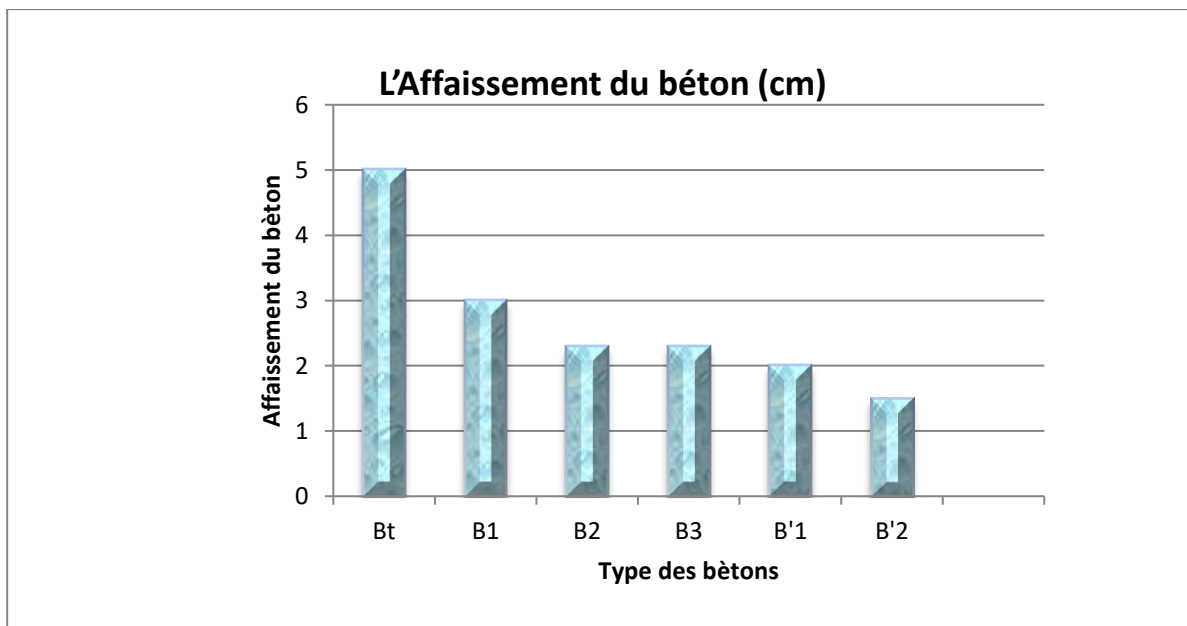


Figure 4.7: histogramme d'Affaissement du béton a l'Etat frais.

Commentaire :

- L'affaissement de béton B1 est proche que le béton témoin .
- D'après des études, le béton à base de granulats recyclés requièrent approximativement 40% d'eau supplémentaire pour même affaissement qu'un béton ordinaire.
- L'augmentation des taux de granulats recyclés de B2, B3 a influe sur l'ouvrabilité du béton qui devient ferme.
- La raison est liée à la forte absorption des granulats recyclés, d'où la nécessité de pré-saturé ces derniers par immersion dans l'eau pour la confection des bétons à base des granulats recyclés.
- Le pourcentage du SR diminue l'affaissement par ce que ce type de sable absorbe plus d'eau de gâchage.
- Le remplacement des granulats (sable + gravier) naturel par les granulats recyclés augmente la demande en eau, en fonction du taux de remplacement.

b) Coefficient d'absorption d'eau :

L'absorption d'eau par immersion des graviers de béton recyclé dans l'eau sur un milieu ambiant.

$$Ab(\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100$$

Avec :

Ms: est la masse sec des GBR avant l'immersion dans l'eau .

Mh: est la masse humide des GBR après l'immersion dans l'eau .

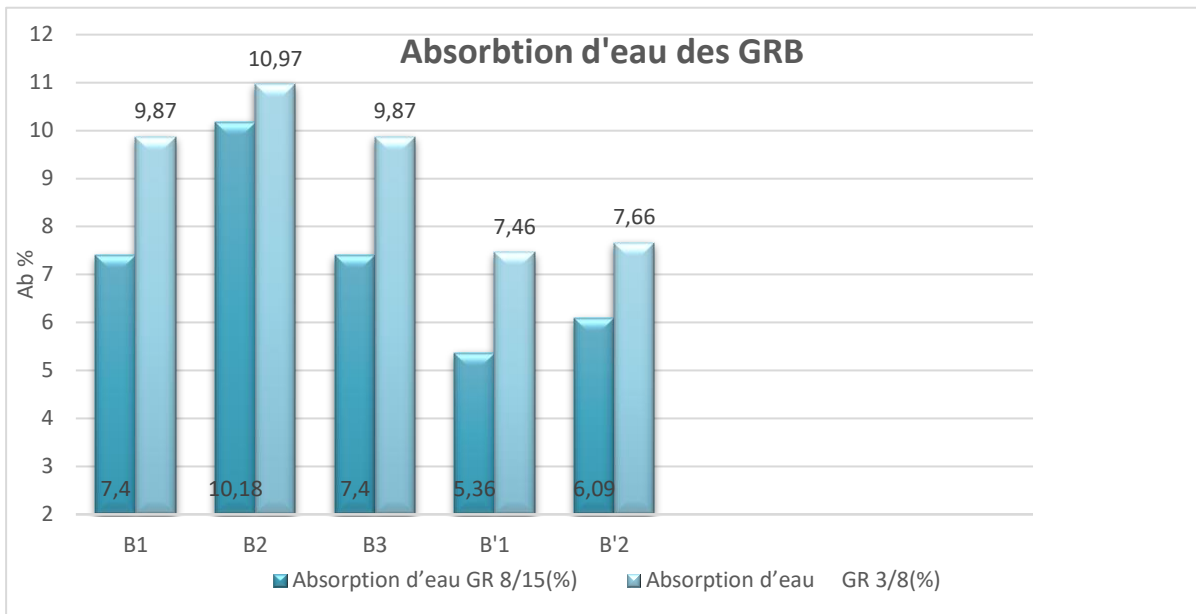


Figure 4.8: histogramme de Taux d'absorption d'eau des graviers Recyclés .

Commentaire :

- D'après les résultats on remarque que le taux d'absorption des graviers recyclés de fraction 3/8 plus élevé que les graviers recyclés 8/15 .
- les GR 3/8 plus petit et plain de mortier adhérent qui absorbe une quantité d'eau plus.
- La forte quantité d'eau absorbée par les graviers recycles immergées 24 heures.
- Le temp d'immersion de GR influe sur coefficient d'absorption d'eau ($Ab\%_{24h} > 12h$).

c) La masse volumique :

La masse volumique d'un matériau (ρ) est calculée en divisant la masse de ce matériau (m) par son volume (V).

$$\rho = m/V.$$



Fig 4.9. La masse volumique a l'Etat Frais.

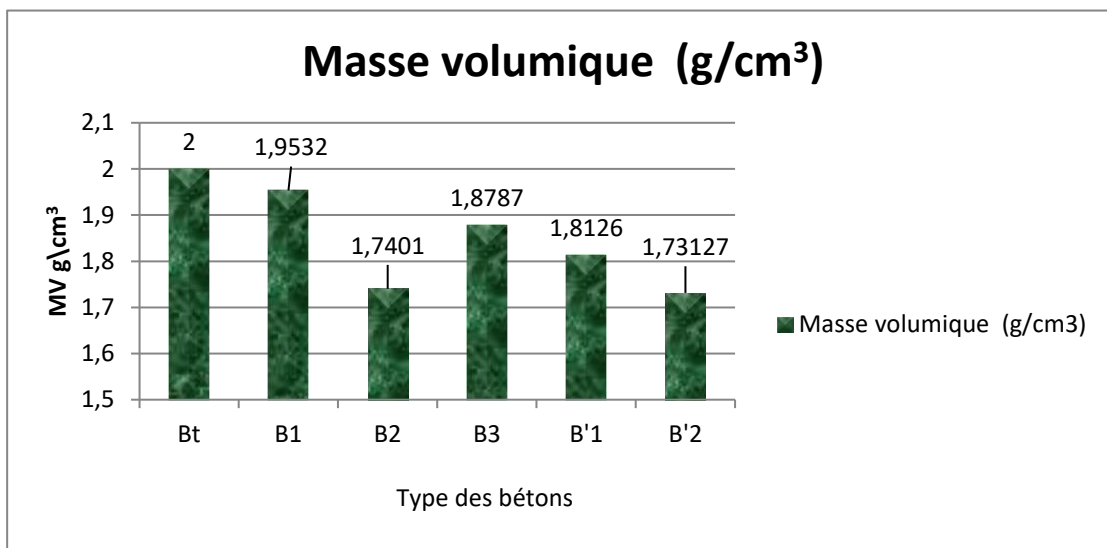


Figure 4.10: histogramme de la Masse volumique du béton a l'Etat frais.

Commentaire :

- La masse volumique des bétons recyclés est inférieure à celle du béton naturel (faible densité et haute porosité).
- La masse volumique de béton recycle de B1 (GR à 25 %) est proche que la masse volumique de béton ordinaire.
- Les bétons recyclés B2, B'2 (50 % GR, 25% SR) ne présente pas de large variation de masse volumique mais elle est inférieure que les autres bétons puisque les granulats recyclés sont plus léger et de forme irrégulière.
- Le pourcentage du SR dans le béton B3 augment la masse volumique.

- La plus faible valeur de densité a été enregistrée avec le mélange B2 et B2' (1.74 et 1.73 g / cm³) avec un pourcentage inférieur à 13 % par rapport BT et 11 % que B1. On constate que la substitution de gravier normal par gravier recyclé de 50% présente un effet négatif sur la densité du béton.
- Dans ce cas, la diminution maximale est 13.45% L'une des hypothèses qui découle de ce comportement est probablement la teneur en particules fines recyclées.

4.4.2 A l'Etat Durci :

Les éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm³ sont destinées aux essais d'ultrason a 7j ,14j,28j et essais de compression (R_c) a 28j, et les éprouvettes prismatiques sont destinées de traction par flexion (R_t) à 28j.

4.4.2.1 Essai de Résistance à la compression :

Pour évaluer la qualité de béton Les éprouvettes sont écrasées dans la presse de compression.

La résistance de béton a la compression est déterminée par la relation :

$$R_c = F/S$$

R_c : la résistance a la compression (Mpa).

F : la charge a la rupture (N).

S : la section de l'éprouvette (mm).

les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :



Figure 4.11 Appareil la Presse de Compression du béton.

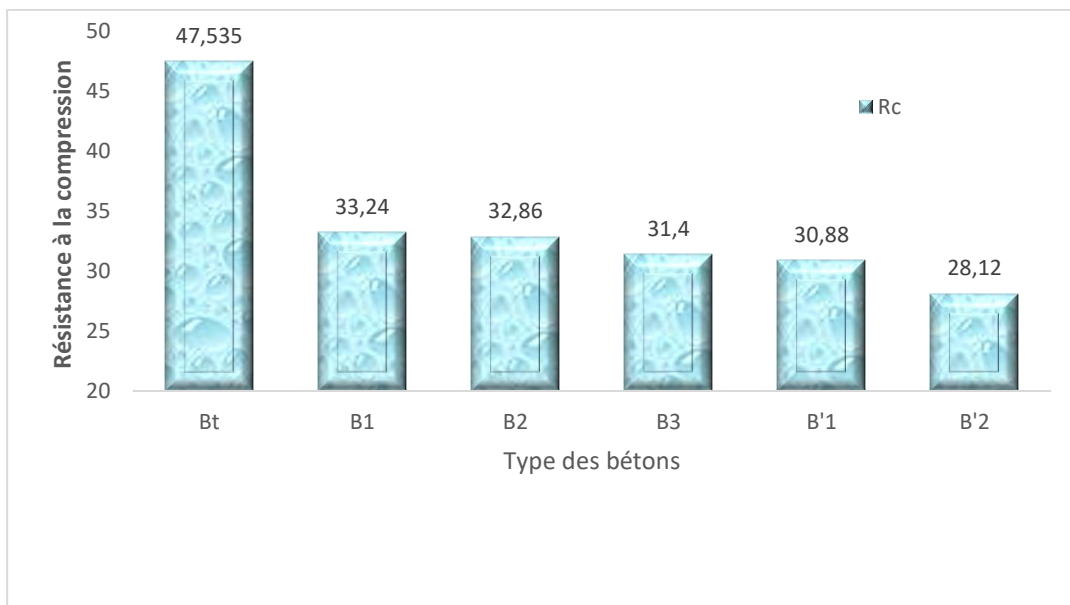


Figure 4.12: histogramme Résistance à la compression des bétons à 28 jours.

Commentaire :

- A partir des résultats obtenus, nous remarquons, pour tous les bétons, une augmentation évolutive de la résistance à la compression avec l'âge du béton et ne présentant aucune chute.
- La figure 4-15 montre que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement dépasse 25% et que cette diminution peut dépasser 30% de la résistance du béton témoin.
- La résistance d'un béton B1 (GR à 25 % et SR 25%) est proche que la résistance d'un béton ordinaire, cela indique la forte adhérence entre le granulat naturel et la pâte de ciment.

- Relation décroissante entre la résistance en compression et le pourcentage de remplacement.
- Le béton des granulats recyclés immergées 12 heures (B'1, B'2) diminuer la résistance du béton à cause de leur faible absorption.
- Les deux paramètres : taux de remplacement et le degré d'absorption d'eau affectent la résistance à la compression.

a) **Corrélation entre la résistance à la compression (R_c) et affaissement :**

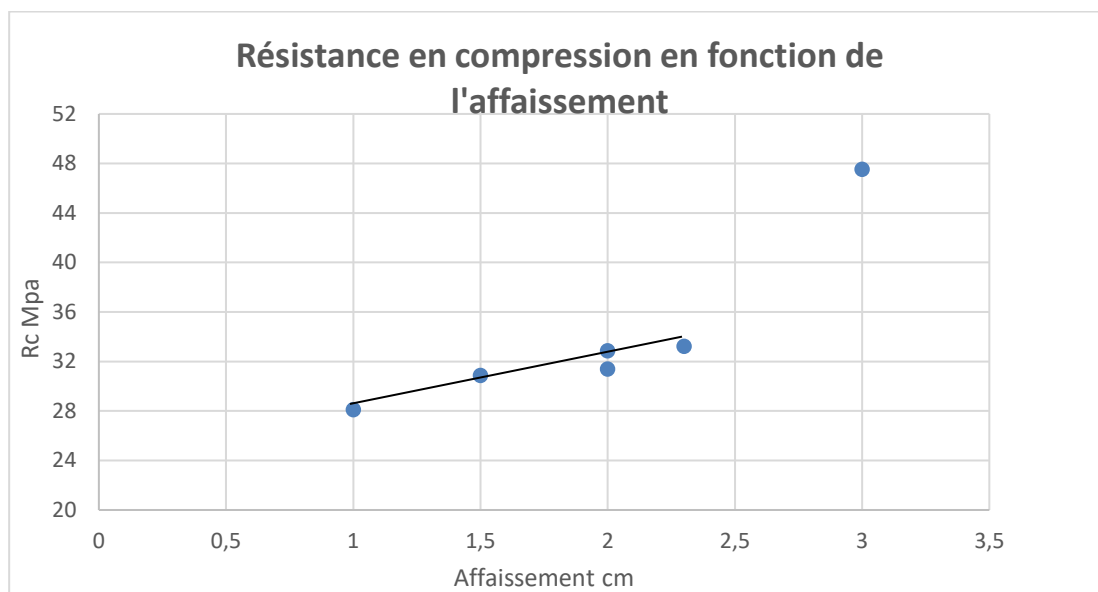


Figure 4.13 : Résistance à la Compression en fonction de L'Affaissement .

Commentaire :

- Dans le cas d'un béton à base de GR à 25 % (B1), la chute de la résistance en compression pour un affaissement plastique, ne dépasse pas 30 %.
- La chute de la résistance d'un béton de graviers recyclés à 50 % (B2), est à peu près la même que celle d'un béton de SR à 50 % (B3).
- Dans le cas d'un béton à base de GR à 50 % (B'2), la chute de la résistance en compression dépend de l'affaissement. Pour un affaissement très ferme.

4.4.2.2 Essais d'auscultation Sonore (ULTRA-SON):

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée entre autres à tester l'homogénéité du béton, elle consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tels que l'âge du béton, les conditions d'humidités, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et des fissures. Le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.

Description de l'appareil :

C'est une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée aussi bien dans le cadre d'un suivi de production qu'en contrôle sur ouvrages. Une vitesse élevée de propagation indique généralement un béton de bonne qualité.

Dans notre essai, nous avons utilisé l'appareil de test ultrasonique Pundit Lab (Fig.4.11), ce dernier est constitué de :

- a. Un testeur ultrasonique
- b. Deux transducteurs (émetteur et récepteur);
- c. Barre de calibrage ;
- d. Deux câbles de connexions de 1.5m ;
- e. Un gel de contact;
- f. Une centrale d'acquisition des données



Fig 4.14. Appareil ULTRA-SON.

Tab 4.3 Résultats des vitesses de propagation d'ondes (Km/S) :

Types des bétons	7j	14j	28j
Bt	4,350	4,374	4,696
B1	4,338	4,349	4,386
B2	4,260	4,310	4,326
B3	4,256	4,263	4,290
B'1	4,163	4,208	4,313
B'2	4,200	4,253	4,256

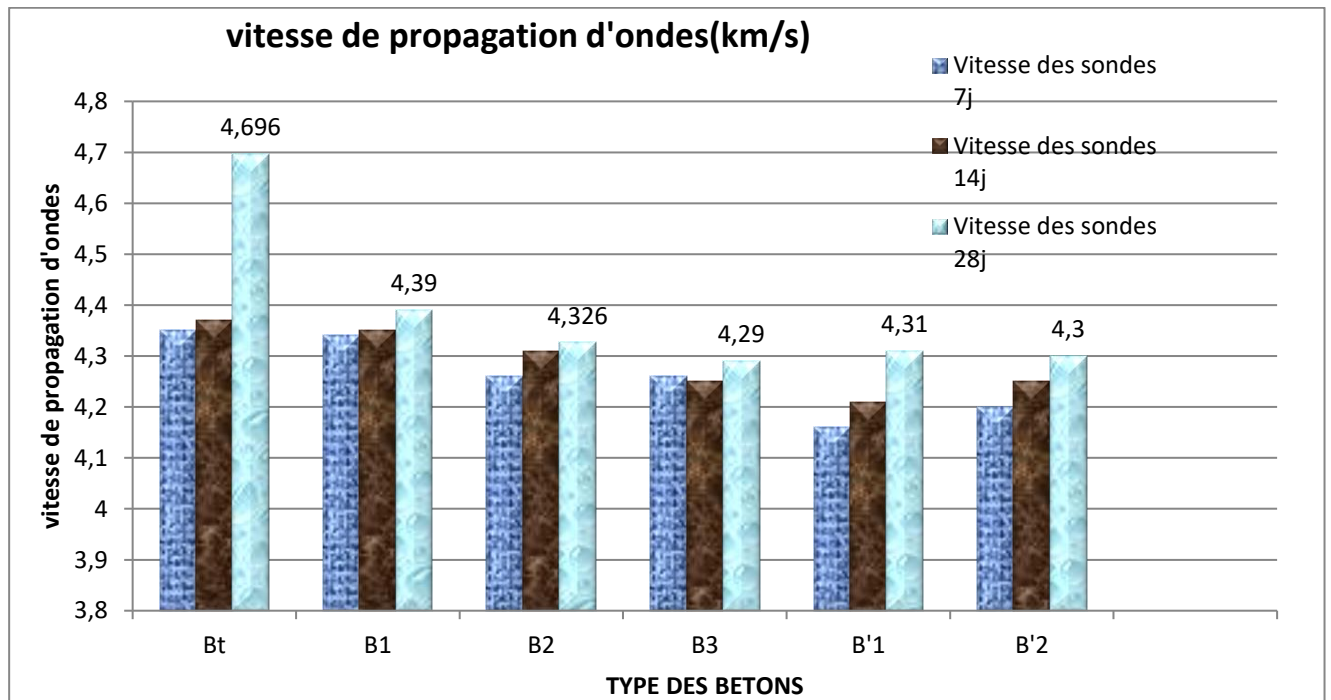


Figure 4.15: histogramme de vitesse de propagation d'onde.

Commentaire :

- On observe, une augmentation de de vitesse de propagation de tous les bétons avec l'âge de la conservation des éprouvettes.
- Les résultats montrent que les vitesses à l'ultrason diminuent avec l'augmentation du pourcentage de remplacement de GR et SR.

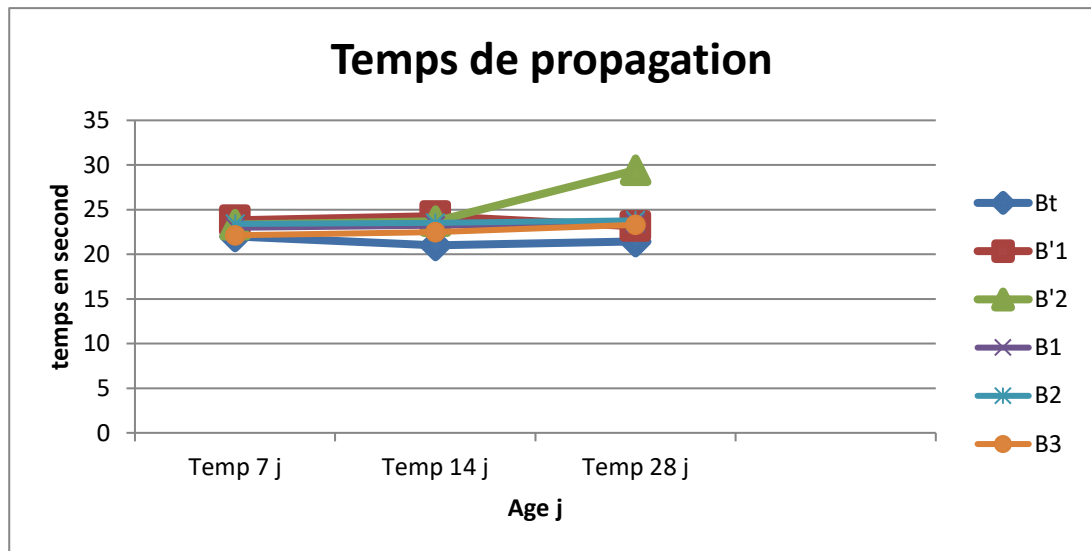


Figure 4.16: Temps de propagation des ondes.

a) **Corrélation entre la résistance à la compression (Rc) et la vitesse des ultrasons (V) :**[8]

La figure 4.17, présente la courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement «Rc» et les vitesses ultrasoniques «V» correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation suivante :

$$R = 0,342 \exp (1,004 V)$$

Tab 4.4 Résultats de corrélation de la résistance à la compression Rc (Mpa) :

Types des bétons	Rc 7j	Rc 14j	Rc 28j
Bt	26,95	27,6	38,13
B1	26,63	26,92	27,93
B2	24,63	25,89	26,23
B3	24,53	24,7	25,38
B'1	22,33	23,26	25,97
B'3	23,17	24,46	24,46

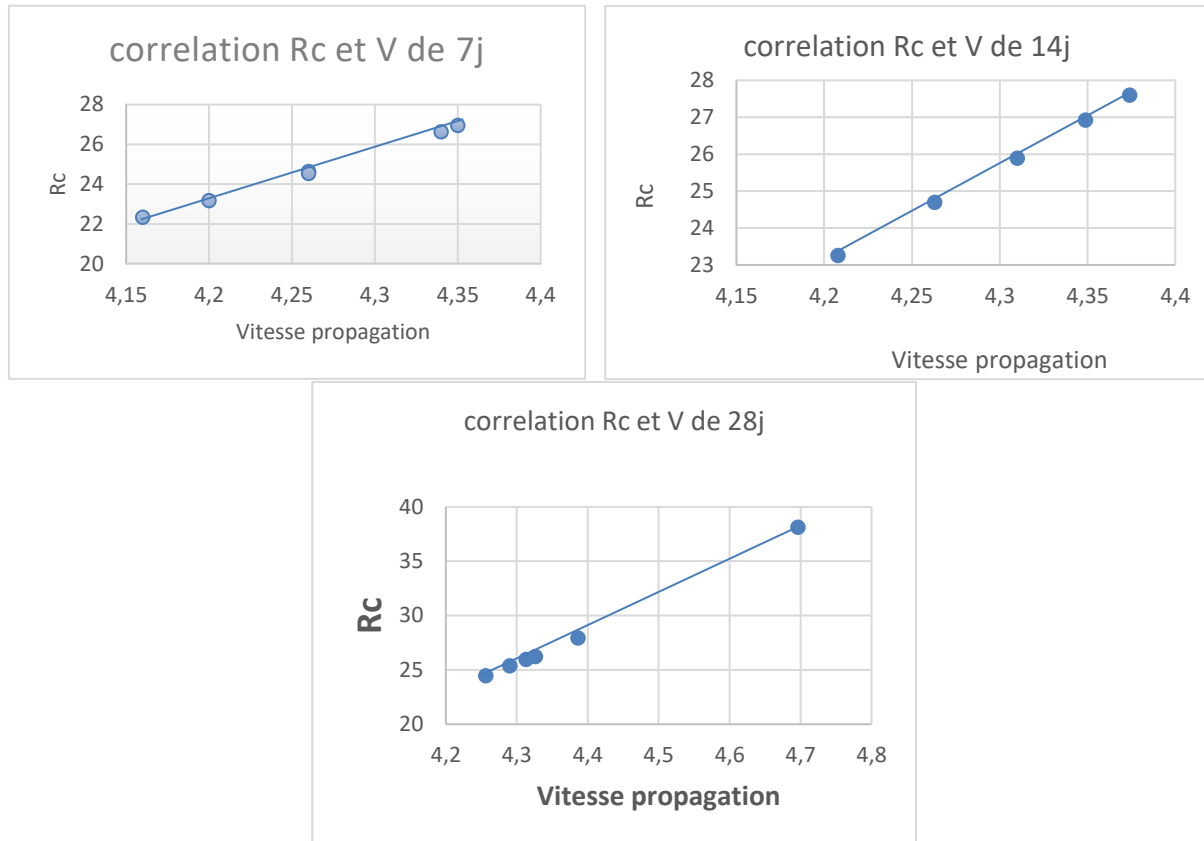


Figure 4.17 Corrélation entre la résistance à la compression (Rc) et la vitesse des ultrasons (V)

Commentaire :

A partir de la figure 4.13 on remarque que la résistance augmente avec la vitesse des sondes, quel que soit l'âge des éprouvettes, à 7, 14 et 28 jours des différents types de bétons testés (recyclés ou ordinaires).

4.4.2.3 Essai de Résistance de Traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion d'une éprouvette prismatique (10×10×40) en béton de section carrée de côté 'a' soumise à un effort de rupture **N** serait alors :

$$R_t = 1.8N/a^2 \text{ (Mpa).}$$

N : la force de traction (N)

a : le côté de éprouvette (mm) (a=10 cm) .



Figure 4.18 Appareil la Presse Hydraulique de Traction par flexion a 3point .



Figure 4.19 éprouvette après la traction.

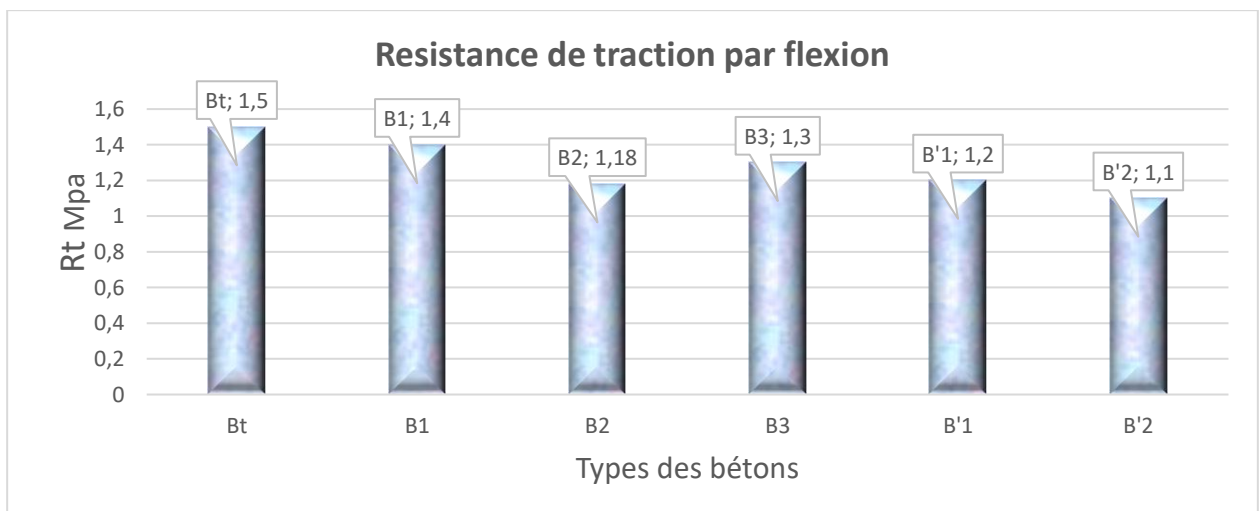


Figure 4.20 histogramme Résistance de Traction par flexion.

Commentaire :

- Le béton de 25 % de granulats recyclés B1 indique la meilleure résistance à la traction est le plus proche de béton témoin Bt.
- On observe que la résistance à la flexion de B3 supérieure à celle des bétons B2, B'1, B'2.
- Les faibles résistances sont obtenues des bétons B'1, B'2 respectivement à cause de leur composition de GR pré-saturé 12 heures.

4.5 Conclusion :

A partir des résultats d'essais effectués dans ce chapitre les granulats recyclés présentent plusieurs caractéristiques dans le béton soit à l'état frais ou bien à l'état durci.

- ❖ L'affaissement de béton comportant des granulats recyclés plus faible que l'affaissement de béton ordinaire pour un même rapport E/C, cette baisse d'affaissement causée par la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés.
- ❖ Les granulats recyclés ont une grande absorption, car leur volume des pores est plus élevé que celui d'un granulat naturel, la nature poreuse du mortier adhérent provenant du vieux béton.
- ❖ La masse volumique à l'état frais est plus faible pour un béton recyclé car la densité du mortier adhérent est plus faible que la densité du granulat naturel, ce qui cause une perte de masse volumique du béton recyclé.
- ❖ Les résistances à la compression et à la traction sont des paramètres fondamentaux pour évaluer la qualité d'un béton, comme les granulats recyclés présentent une densité inférieure et la présence du mortier adhérent la résistance à la compression des bétons de granulats recyclés est généralement moindre même la résistance à la traction.

Donc de manière générale la résistance mécanique des granulats, le taux de remplacement, les caractéristiques de liaison et l'absorption d'eau sont des facteurs influents dans le béton.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde de la construction, ces performances ne cessent de s'améliorer notamment les résistances mécaniques et la durabilité. Hier c'était le béton aujourd'hui ce sont les bétons, le développement technologique et à la recherche scientifique ont permis la naissance de nouveaux types de béton, parmi ces types les bétons à base de granulats recyclés.

Trois raisons sont invoquées pour expliquer les résistances moindres obtenues avec les granulats recyclés. La première raison, c'est la plus grande porosité des granulats de béton recyclé qui augmentent la porosité des bétons qui les contiennent. Cette porosité accrue est principalement due, à la présence de mortier attaché aux granulats. Ensuite, il y a la résistance moindre des granulats recyclés. Finalement, il y a la quantité de zones d'interfaces faibles et la taille de ces zones qui sont de beaucoup supérieures à ce que l'on retrouve dans les bétons de témoin. Évidemment, ces trois raisons se recoupent en ce sens que la faiblesse des granulats de béton recyclé par ce qu'ils sont composés essentiellement de granulats naturels enrobés de mortier. Le mortier présent dans ces granulats recyclés est reconnu pour être un matériau poreux. L'utilisation des déchets en remplacement des agrégats dans le béton a amélioré l'impact environnemental et diminué les déchets solides et la consommation de ressources naturelles.

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance ou la maniabilité qui peut se définir comme étant la facilité de la mise en œuvre du béton. Elle est appréciée par différents essais qui permettent tous de situer le béton sur une échelle de fluidité. [10]

A partir de notre recherche on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation de granulats recyclés dans le béton, particulièrement le sable recyclé, provoque une diminution de leurs densités à l'état frais et durci, une augmentation de la capacité d'absorption d'eau par rapport au béton naturel.
- Par rapport au béton à granulats recyclés simples, le béton à granulats recyclés doubles est beaucoup plus compliqué dans la rupture en compression, et il y a plus de facteurs affectant la résistance à la compression du béton. Par conséquent, l'application de béton de granulats recyclés doubles à des applications pratiques (projet) doit être réalisé sur la base d'un grand nombre d'études expérimentales, et la qualité du projet doit être strictement assurée.

Conclusion générale

- Lorsque le taux de remplacement des granulats recyclés est passé de 25 % à 50 %, la résistance à la compression du béton à double agrégat recyclé a diminué progressivement, et la plus forte baisse de la résistance à la compression est de 40,84%
- Granulats grossiers recyclés et fines recyclées apporte un effet de "double affaiblissement" sur la résistance à la compression du double granulat recyclé béton.
- L'absorption d'eau est d'autant plus grande que la masse volumique du granulat recyclé est faible. Pour prévenir une perte de l'ouvrabilité du béton frais, il est recommandé d'augmenter le dosage de l'eau (eau de gâchage) ou d'humidifier au préalable le granulat recyclé lors de la fabrication du béton. Ce résultat peut être aussi dû à cause des fines qui ont tendance à absorber l'eau libre qui était destiné à la fluidité.
- Diminution de la masse volumique du béton avec l'augmentation de pourcentage des granulats recyclés. Ceci est probablement dû à la porosité des granulats recyclés qui est relativement plus importante que celle des granulats naturels. La masse volumique du béton diminue si on diminue la période de pré-saturation de 24 heures à 12 heures.
- Le béton à base des granulats recyclés présente des résistances à la compression plus faible par rapport au béton naturels qui nécessitent une augmentation du dosage et présentent un inconvénient du point de vue économique ;
- Un béton à base de granulats recyclés avec un taux de substitution de 25% GR et 25% SR présente une meilleure résistance à la compression. Au-delà de 25% GR et 25% SR la résistance à la compression chute.
- Augmentation de la période de pré-saturation des granulats à 24heures améliore d'une façon significative la résistance à la compression ainsi à la traction.

En résumé, la période de pré- saturation et le taux de remplacement des granulats grossiers recyclés et des fines recyclées sont des facteurs d'influence importante sur le comportement du béton.

Références

Références

Références

- [1] **.Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina** «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.
- [2].**Ait Mohamed Amer Adam**, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.
- [3].**B.AHMED** mémoire de magister influence du granulats (classe granulaire .4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 2011.
- [4]. **BACHIR REDJEL, MOURAD YAHIAOUI** "La Mesure de la Resistance du béton a la Traction" Université de Annaba.
- [5].**BELOUADAH MESSAOUDA** «Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures », Thèse de doctorat de l'Université M'sila, Algérie 2018 .
- [6].**Braymand S.**, Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons. 2010: Nantes.
- [7] **Dapena E., Alaejos P., Lobet A., Pérez D.**, (2011), Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes, J. Mater. Civil Eng., 23: 414-22. properties of mortars, Constr. Build. Mater., 81, 179-186.
- [8] **Djamila Boukhelkhal, Said Kenai**. Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason). Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. ffhal-01167739.
- [9] **D. Panagapko**, "Intitulé DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE GRANULATS RECYCLES" "Canadian Minerals Yearbook, Natural Resources Canada," Tak. Corp., 2003.
- [10] **Etxeberria M., VAZQUEZ A., MARI A. and BARRA M.**, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled concrete, Cement and Concrete Research 37(5):735-742 DOI:10.1016/j.cemconres.2007.02.002
- [11]. **(F DE LARRARD)** "concrète mixture-propotioning-A scientific Approach" Londres 1999.
- [12].**GRONDIN Aurélie** ETUDE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES BETONS DE GRANULATS RECYCLES DE BETON Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg .

Références

- [13]. **H. DJELAL & V. NOUVEL**, "Gestion des déchets de démolition et environnement", XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, (2008).
- [14] **Hussain H. & Levacher D.**(2003), Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux. Hallshow Hussain* et **, Daniel Levacher**, Jean-Louis Quenec'h*, Abdelkrim Bennabi*, Fabien Bouvet* ESITCde Caen - ** Centre de géomorphologie, M2C-GRGC, UPRES A 6143 CNRS
- [15].**Katz A.**, «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and concrete research», 33 (5), pp. 703-711, 2003.
- [16] **[KEN 11] Kenai S.,** Debieb F., 2011. « Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés », Materials and Structures vol 44, 2011, p.815–824.
- [17].**Larbi Belagraa1, 3, Oussama Kessal2, 3, Abderrachid Boulaouad1 , Med Cherif Mecheri2 , Ammar Noui3 , and Bouzid Abderrazak3** "Experimental Investigation on the Properties of a Recycled Aggregate Concrete Based on Waste of the Industrial Mineral Additions".KnE Engineering / REMINE International Conference on Valorization of Mining and Industrial Wastes into Construction Materials By Alkali-activation / Pages 124–133.
- [18]. **L'IFEN** a publié en 2007 des données sur la production des déchets du BTP en 2004
- [19] **.M. S. JUAN & P. A. GUTIÉRREZ**, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", Construction & Building Materials, 23(2), 872-877, (2009).
- [20] , **Michaël RAKOTONJANAHARY**" ETUDE DE LA FIN DE VIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION PROVENANT DE PROJETS DE DEMOLITION ET DE RENOVATION" Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication Luxembourg.
- [21] **M. Ghrici**, S. Kenai, and E. Meziane, "Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana," J. Mater. Sci., vol. 41, no. 21, pp. 6965–6972, 2006.
- [22] **N. Arabi and L. Berredjem**, "Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons," déchets - revue francophone d'écologie industrielle, Vol. 60, pp. 25–30, 2011.
- [23].**Naliett Karina SANTAMARIA DIAZ** "VALORISATION DES GRANULATS RECYCLÉS DANS LE BÉTON POUR LES PAVAGES ET TROTTOIR" UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.
- [24] **Pedro D.**, de Brito J. et Evangelista L. (2014), Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete, construction and building Materials, 71: 141-151.
- [25] **P. K. Mehta**, "Reducing the environmental impact of concrete," Concr. Int., pp. 61–66, 2001.
- [26].**Rasheeduzzafar, Khan A.** «Recycled concrete – a source of new aggregate. Cément, Concrète and Agrégeâtes» (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.

Références

- [27] **Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W.**, (2015), Influence of fine recycled concrete aggregates on the the properties of mortars, *Constr. Build. Mater.*, 81, 179-186.
- [28] Les fiches techniques, TOME II, ont été réalisées par les experts de **CIMBETON**. Elle sont pour titre: « les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre ».
- [29] **.Source** : Environmental Outlook for the Chemicals Industry, OCDE, 2001
- [30].<https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/batiment-beton-materiau-construction-multiples-usages-1940/page/2/>
- [31]. <https://www.holcim.be/fr/les-constituants-du-beton-les-granulats>
- [32]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Retrait_du_b%C3%A9ton
- [33]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167661/document>
- [34].<http://lgi.ma/wp-content/uploads/2020/06/La-structure-poreuse-des-b%C3%A9ton-et-les-propri%C3%A9t%C3%A9s-de-transfert.pdf>
- [35] [https://www. DÉCHETS DE CHANTIER](https://www.d%C3%A9chets-de-chantier.fr/) Les réponses aux questions que vous vous posez// Travaux de la Commission Environnement et Construction Durable de la FFB – année de référence 1998//
- [36]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/classes-de-resistance-du-beton/>
- [37].<https://upbtp.com/caracteristiques-de-lattaque-a-lacide-sulfurique/>
- [38].<https://www.infociments.fr/betons/recommandations-pour-la-durabilite-des-betons-durcis-soumis-au-gel-et-aux-sels-de>
- [39].https://www.actu-environnement.com/ae/news/dechets_batiment_deconstruction_selective_2301.php4
- [40]. <https://core.ac.uk/download/pdf/51338772.pdf>
- [41]. <https://core.ac.uk/download/pdf/51338772.pdf>
- [42].https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=publ&doc=utilisation_de_granulats.pdf.
- [43].https://www.groupe-sma.fr/SGM/jcms/jizhprod_73572/fr/l-utilisation-de-granulats-recycles-dans-les-travaux-publics.

**ANNEXES TABLEAUX
DES RÉSULTATS**

Annexes. Tableaux des résultats

1- Tous les résultats des bétons en fonction des dosages des granulats de Béton recyclé .

Formulation témoin Bt

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique	-	-	-	-	1996.43
Affaissement	-	-	-	-	5
Vitesse Ultracent	4790	4630	4670	4696,67	4696,67
Temp	21,4	21,6	21,3	21,43	21,43
Force de Traction	1000	700	800	833,33	833,33
essais Compression	42,63	52,44	47,53	40,31	40,31

Formulation B1

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique	-	-	-	-	1953,2
Affaissement	-	-	-	-	3
V.Ultracent:7jour	4330	4345	4340	4338,33	4338,33
V.Ultracent:14jour	4343	4350	4356	4349,67	4349,67
V.Ultracent:28jour	4370	4400	4390	4386,67	4386,67
temp:7 jour	23,1	23	22,8	22,97	22,97
temp:14 jour	23,2	23,4	23	23,20	23,20
temp:28 jour	23,3	23,9	23,2	23,47	23,47
Force de Traction	630	850	750	743,33	743,33
Essais de Compression	32,78	34,03	32,9	33,24	33,24

Annexes. Tableaux des résultats

Formulation B2

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique	-	-	-	-	1740,1
Affaissement	-	-	-	-	2,3
V.Ultracent:7jour	4200	4310	4270	4260,00	4260,00
V.Ultracent:14jour	4270	4370	4290	4310,00	4310,00
V.Ultracent:28jour	4280	4390	4310	4326,67	4326,67
temp:7 jour	24	23,4	22,8	23,40	23,40
temp:14 jour	23,7	23,9	23	23,53	23,53
temp:28 jour	24,2	23,9	23,3	23,80	23,80
Force de Traction	700	600	670	656,67	656,67
Essais de Compression	32,8	34,26	31,53	32,86	32,86

Formulation B3

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique					1878,7
Affaissement					2,3
V.Ultracent:7jour	4330	4260	4180	4256,67	4256,67
V.Ultracent:14jour	4350	4200	4210	4253,33	4253,33
V.Ultracent:28jour	4310	4290	4270	4290	4290
temp:7 jour	22,1	22	22,3	22,13	22,13
temp:14 jour	22,4	22,6	22,4	22,47	22,47
temp:28 jour	24,2	22	23	23,06	0,00
Force de Traction	890	700	760	783,33	783,33
Essais de Compression	28	35	31,5	31,4	31,4

Annexes. Tableaux des résultats

Formulation B'1

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique					1812,6
Affaissement					2
Ultracent:7jour	4070	4270	4150	4163,33	4163,33
Ultracent:14jour	4150	4275	4200	4208,33	4208,33
Ultracent:28jour	4290	4340	4300	4310	4310
temp:7 jour	24,1	23,4	23,9	23,80	23,80
temp:14 jour	24,4	24,1	24,3	24,27	24,27
temp:28 jour	23,8	24	23,7	23,83	0,00
Force de Traction	650	810	870	776,66	776,66
essais de Compression	27,42	31,82	33,4	30,88	30,88

Formulation B'2

	ech:1	ech2:	ech3:	moy	resultat
Masse Volumique					1731,27
Affaissement					1,5
Ultracent:7jour	4330	4260	4180	4256,67	4256,67
Ultracent:14jour	4350	4200	4210	4253,33	4253,33
Ultracent:28jour	4450	4200	4250	4300	4300
temp:7 jour	22,9	23,2	23,9	23,33	23,33
temp:14 jour	23,1	23,9	24,1	23,70	23,70
temp:28 jour	23,8	24	24,4	24,07	24,07
Force de Traction	800	670	750	740	740
Essais de Compression	30,27	24	30,1	28,12	28,12

2- La fiche technique de Ciment :

البسكرية للإسمنت



البسكرية للإسمنت



بطاقة تقنية

CEM I 42.5R

إسمنت بورتلاند

: CEM I 42.5R
إسمنت بورتلاند، للخرسانة عالية الأداء، ذو مقاومة سريعة على المدى القصير مخصصة للمناطق التي يجب أن تكون فيها مدة نزع القوالب قصيرة، ينصح به خصيصا للاستعمال في المناطق ذات الجو البارد خاصة فصل الشتاء.

: CEM I 42.5R
مطابق للمعايير الجزائرية (NA442-2013)

مجالات الاستعمال

إسمنت لجميع أشغال البناء ذات المقاومة العالية في المدى القصير، يوصى بها أيضا للاستخدامات التالية:

- منتجات الخرسانة التي تتطلب تماسك سريع.
- الخرسانة في القوالب المنزقة، وخاصة في الجو الشتوي.
- خرسانة مقاومة للصقيع في وجود أملاح الجليد.
- أسطح الجسور.
- الخرسانة المضغوطة.
- الخرسانة المرشوشة.



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🏠 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment	Sable	Gravillons	Eau
Dosage pour béton	1 bidon X1	+ X7	+ X5 + X4	+ 25 L
Mortier de briquetage	1 bidon X1	+ X6	+ X9	+ 35 L
Mortier de finition	1 bidon X1	+ X9	+ X6	+ 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 - 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 - 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 - 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 - 0.07
Composition Potentielle du Clinker (selon norme) (%)	valeur
C ₃ S	66 - 68
C ₂ S	9.2 - 9.3
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 - 26.4
Épandage à chaud (mm)	0.25 - 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 - 190
Fin de prise	220 - 250
Résistance à la compression	valeur
7 jours (MPa)	20 - 26
28 jours (MPa)	42.5 - 52.5





www.biskriaciment.com

SPA BISKRIA CIMENT
 Adresse : Djar Belatrache
 Benta, Biskra, Algérie

Tel : +213 (0) 560 753 424
 Fax : +213 (0) 33 556 108
 contact@biskriaciment-dz.com
 www.biskriaciment-dz.com