



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Département de Génie Civil**

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
**Magister**

**Option:** Structures et Matériaux

Par

BERREDJEM Layachi

*Le recyclage des bétons de démolition,  
Solution pour le développement durable.  
Formulation et comportements physiques et mécaniques  
des bétons à base de ces recyclés.*

**Directeur de Mémoire:** Dr. ARABI Nourredine M. de Conférence Université de Annaba

**DEVANT LE JURY :**

**Président:** Pr. REDJEL Bachir Professeur Université de Annaba

**Examineurs:** Dr. ACHOURA Djamel M. de Conférence Université de Annaba

Dr. BEHIM Mourad M. de Conférence Université de Annaba

Dr. OUCIEF Hocine M. de Conférence Université de Annaba

*À mes chers parents ;*

*À mon épouse et à mes aimables enfants :*

*Salah Fddine,*

*Yasmine,*

*Abdelmalek.*

*À mon Frère Slimane et à toutes mes Sœurs ;*

*À ma chère belle mère et ses enfants ;*

*À Jours, Je Dédie ce Mémoire.*

## **REMERCIEMENTS**

Je tenais tout d'abord à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur: Nouredine ARABI, Maître de Conférences à l'Université Badji Mokhtar - Annaba, qui en tant que directeur de ce travail, pour la proposition de ce sujet de recherche, sa grande patience, tous les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer, pour la confiance qu'il m'a accordé. Je le remercie pour l'aide qu'il a su m'apporter.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur: Bachir REDJEL, Professeur à l'Université Badji Mokhtar - Annaba, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs Djamel ACHOURA, Mourad BEHIM et Hocine OUCIEF, Maîtres de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et ont bien voulu participer à ce jury.

Je remercie également à Monsieur : Yazid HADIDANE, Chef du Département de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar – Annaba, pour toute l'aide apportée.

Je suis également très reconnaissante à Madame: Samah TALAI, née HECHAICHI, Chef du laboratoire des matériaux du département de Génie Civil de Université Badji Mokhtar – Annaba, pour son aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

Un remerciement spécial à tous mes enseignants du département de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar – Annaba.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel technique et administratif du département de génie civil d'Annaba ainsi que tous mes collègues.

Des spéciaux remerciements vont à Mr : Youcef SAYAH, Chef du département Technique du Laboratoire des Travaux Publics de l'Est d'Annaba, de m'avoir accueillir au sein de son établissement, à Messieurs: Kamel BOUZENZEN et Abdelhamid MAHDAR, Chefs des Services matériaux et produits noirs et de Routes, qui m'ont mis leurs matériels à ma disposition et ses conseils objectifs, ainsi qu'au personnel du LTPEst – Annaba.

Je tiens enfin à remercier ma famille pour leur soutien et leur aide.

## الملخص

إن ضرورة مراعاة الإحتياجات العالمية في ميدان تكنولوجيا صناعة الخرسانة تدعم الحفاظ على الموارد الطبيعية وحماية البيئة واستخدام عقلائي للطاقة. إن رسكلة نفايات الإنجاز وهدم البنايات جلبت إهتماما متزايدا في مجال البناء، كونها مصدرا للحصى وإنتاج الخرسانة.

في الجزائر، ونظرا لنقص المخازن الطبيعية للحصى وصعوبة فتح محاجر طبيعية جديدة أستلزم البحث عن مصادر أخرى بديلة. لسد الإحتياجات الكبيرة من الحصى لإنجاز المشاريع الكبرى المبرمجة من طرف الدولة منها على سبيل الذكر لا الحصر: الطريق السريع (شرق-غرب) وإنجاز مشروع الرئيس (مليون سكن).

الهدف الأساسي المرجو من هذه الدراسة هو إيجاد الحلول لنقص ونفاذ مادة الحصى لصناعة الخرسانة وكذا رسكلة المواد الخاملة لبقايا عمليات الهدم وخصوصا مادة الخرسانة الصلبة.

هذه الدراسة تمت عبر سلسلة من التجارب حول الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصى الطبيعي والمرسكل على حد سواء، وتأثير هذا الأخير على خصائص الخرسانة اللينة والصلبة. ومنها تبين أن الحصى المرسكل غير متجانس، له قدرة كبيرة في إمتصاص المياه وصلابة متوسطة الجودة. مع ذلك فإن الحصى المرسكل صالح لصناعة الخرسانة وفق المعايير العالمية.

المقاومة الميكانيكية للإنضغاط والشد عن طريق الإنفلاق بدلالة الزمن، للخرسانة بالحصى المرسكل بمختلف الخلطات ودون إضافات (Superplastifiant)، مقبولة عموما مقارنة مع الخرسانة الطبيعية. ومنه يمكن صناعة الخرسانة من الحصى المرسكل ذات مقاومة في حدود 25-30 ميقاباسكال.

إن التغيير في نسبة الحصى/الرمل من 1,0 إلى 3,0 له تأثير مباشر على المقاومة الميكانيكية للخرسانة وهو ما أثبتته البحوث السابقة. لكن كميات المياه الممتصة من طرف الحصى مختلفة وعشوائية مما عقد عملية تحديد النسبة المثالية (حصى/رمل).

**الكلمات الرئيسية** حصى، الرسكلة، الهدم، خرسانة، إمتصاص الماء، المقاومة الميكانيكية.

## **RESUME**

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Le recyclage des déchets de construction et de démolition en tant que source de granulats pour la production de béton, a attiré des intérêts croissants de l'industrie du bâtiment.

En Algérie, l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement, pour faire face aux besoins en granulats pour les grands chantiers lancés par le gouvernement algérien (Autoroute Est-Ouest, la construction d'un million de logement ... etc.).

Dans ce contexte, ce travail s'inscrit dans l'optique d'apporter des réponses aux soucis de manque en granulats pour béton. Il a pour objectif aussi la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les bétons comme source de granulats pour la fabrication de nouveaux bétons hydrauliques.

Cette étude expérimentale expose les résultats de caractérisations physiques et mécaniques des granulats naturels et recyclés, ainsi que l'influence de ces recyclés sur les propriétés du béton frais et durci. La caractérisation des matériaux utilisés a montré que, les granulats recyclés présentent une hétérogénéité, un fort pouvoir d'absorption d'eau et une dureté de qualité moyenne. Toutefois, les limites prescrites par les normes en vigueur ne disqualifient pas ces matériaux pour une application dans le béton.

Les résistances mécaniques, à la compression et à la traction par fendage en fonction du temps, des bétons sans adjuvants à base des granulats recyclés, avec différentes combinaisons granulaires, sont acceptables par rapport à celles des bétons naturels. Ces performances mécaniques mettent en évidence, que les granulats recyclés peuvent fournir des bétons de résistance caractéristique à 28 jours en compression dans les limites de 25 à 30 MPa sans aucune technologie adaptée. L'incorporation d'un superplastifiant SP 40, n'a pas donné d'amélioration escomptée que ce soit en gain sur le dosage en eau ou l'amélioration des performances mécaniques des bétons recyclés, contrairement aux bétons naturels.

La variation du rapport G/S de 1,0 à 3,0 en fonction du dosage en ciment a influencé directement la résistance du béton, mais ce constat est similaire à ce que la littérature étale. La forte absorption d'eau une particularité des granulats recyclés et qui est aléatoire, complique davantage la recherche du seuil adéquat pour le rapport G/S qui conviendra.

**Mots clés** : granulat, recyclage, démolition, béton, absorption d'eau, résistances mécaniques.

## **ABSTRACT**

The universal need to conserve resources, protect the environment and well using the energy must necessarily be felt in the field of concrete technology. Recycling of construction waste and demolition as a source of aggregates for concrete production, has attracted growing interest in the building industry.

In Algeria, the exhaustion of natural aggregate deposits and difficulties in establishing new quarries require to seek new sources of supply to meet the aggregate needs for large projects launched by the Algerian government (East West Highway, the construction of one million housing etc ....).

In this context, this work is conducted in order to answer the concerns of lack aggregates for concrete. Its objective is also the recovery of the fraction of inert demolition materials and mainly as a source of concrete aggregates for the construction of new hydraulic concrete.

This experimental study presents the results of physical and mechanical characteristics of natural and recycled aggregates, as well as the influence of these recycled on the properties of fresh and hardened concrete. The characterization of materials showed that recycled aggregates presented an heterogeneity, a high absorption of water and a hardness of medium quality. However, the limit prescribed by the regulations in force does not disqualify these materials for use in concrete.

The strength, compressive and tensile splitting as a function of time, without concrete admixtures based aggregates recycled with different combinations granular, are acceptable compared to those of natural concrete. The mechanical performances highlight that the recycled aggregate concrete can provide resistance to 28 days under compression within 25 to 30 MPa without any adapted technology. The incorporation of superplasticizers SP 40, gave no expected improvement in both gain in water dosage or the improvement of mechanical performance of recycled concrete, unlike the natural concrete.

The change in G/S of 1,0 to 3,0 depending on the dosage of cement has directly influenced the strength of concrete, but this is similar to what the literature slack. The high water absorption of particular recycled aggregates is random and, further complicates the search for the appropriate threshold for the G/S that wile be convenient.

**Key-Words:** aggregate, recycling, demolition, concrete, water absorption, mechanical strength.

---

## LISTE DES SYMBOLES

---

<i>SIGLE</i>	<i>DENOMINATION</i>
RILEM :	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFNOR :	Association Française de Normalisation
LERM :	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, implanté au cœur d'Arles - France
CEBTP CEBETP :	Centre Expérimental de Recherche et D'études du Bâtiment et des Travaux Publics
CERIB :	Centre d'études et de Recherches de l'industrie du Béton manufacturé
CSTB :	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CEN :	Comité Européen de Normalisation
EN :	Norme Européenne définitive
ENV :	Prénorme européenne
NF :	Norme Française
NF P :	Norme Française applicable au bâtiment et génie civil
V <sub>SI</sub> :	Valeur spécifiée inférieure de la limite acceptable
V <sub>SS</sub> :	Valeur spécifiée supérieure de la limite acceptable
S :	Ecart type
VDG :	Vidéogranulomètre
D ou D <sub>max</sub> :	Dimension maximale du plus gros granulaire de béton
d :	Dimension de plus petit grain d'un mélange granulaire
Mf :	Module de finesse des sables
A :	Coefficient d'Aplatissement
P % :	Porosité
W% :	Teneur en eau
Ab % :	Taux d'absorption d'eau
ES :	Equivalent de sable
VB :	Valeur du Bleu au Méthylène
P :	La propreté des gros granulats
NR :	Non Réactif
PR :	Potentiellement Réactifs
PRP :	Potentiellement Réactifs à effet de Pessimum

*SIGLE*

*DENOMINATION*

---

G :	Coefficient de Gélivité des granulats
L <sub>A</sub> :	Coefficient Los Angeles
FD :	Fragmentation Dynamique
M <sub>DE</sub> :	Coefficient Micro-Deval
RAC :	Béton de granulats recyclés
NAC :	Béton de granulats naturels
M <sub>v app</sub> :	Masse volumique apparente
M <sub>v abs</sub> :	Masse volumique absolue
Aff. :	Affaissement au cône d'Abrams
R <sub>cj</sub> :	Résistance a la compression de béton à (j) jours
R <sub>t</sub> :	Résistance à la traction
E :	Module d'élasticité
F :	Charge de rupture
SN :	Sable Naturel
SR :	Sable Recyclé
GN :	Gravier Naturel
GR :	Gravier Recyclé

## TABLE DES MATIERES

RESUME: .....	III
LISTE DES SYMBOLES: .....	VI
TABLE DES MATIERES: .....	VIII
LISTE DES FORMULES FIGURES ET TABLEAUX: .....	XII
INTRODUCTION GENERALE: .....	1
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE: .....	5
I.1/ GENERALITES SUR LES GRANULATS UTILISES DANS LE BETON: .....	6
I.1.1/ Introduction: .....	6
I.1.2/ Définition: .....	6
I.1.3/ Les différents types de Granulats: .....	6
I.1.3.1/ Les Granulats Naturels: .....	6
I.1.3.1/ Les Granulats Artificiels: .....	7
I.1.3.1/ Les Granulats Recyclés: .....	9
I.1.4/ Elaboration des granulats recyclés : .....	10
I.1.5/ Caractéristiques des Granulats: .....	13
I.1.5.2/ Les Caractéristiques de Fabrication: .....	13
I.1.5.2.1/ Les spécifications des Granulats pour Béton: .....	13
I.1.5.2.2/ Analyse Granulométrique: .....	14
I.1.5.2.3/ Les Caractéristiques Géométriques des Granulats: .....	15
I.1.5.3/ Caractéristiques Intrinsèques: .....	16
I.1.5.3.1/ Pétrographie: .....	16
I.1.5.3.2/ Caractéristiques Physiques: .....	16
I.1.5.4/ Caractéristiques Chimiques: .....	19
I.1.5.5/ Caractéristiques Mécaniques: .....	21
I.1.5.6/ Propriétés Thermiques des Granulats: .....	21
I.2/ LES PROPRIETES ESSENTIELLES DES BETONS (Conventionnels et Recyclés) : .....	22
I.2.1/ Les Propriétés Rhéologiques: .....	22
- Influence des granulats sur la maniabilité: .....	22
I.2.2/ Les Propriétés Physiques: .....	23
- Influence de l'interface pâte de ciment-granulat: .....	23
- Influence de l'ancien mortier collé au granulat de béton recyclé: .....	24
- Influence de la forme et la texture de surface des granulats: .....	24
- Influence de la forme et la texture sur la liaison pâte-granulat: .....	25
- Perméabilité, Porosité et Absorption d'eau: .....	25
- Retrait et Fluage: .....	28
I.2.3/ Les propriétés mécaniques: .....	29

---

- Résistance à la Compression: .....	29
- Relation entre la résistance à la compression à celle de traction: .....	30
- Influence de la quantité de liant sur la résistance: .....	30
- Influence du rapport G/C sur la résistance: .....	31
- Influence des granulats sur le rapport E/C: .....	31
- Influence de l'origine et résistance des granulats: .....	32
- Module d'élasticité (E): .....	32
- Adhérence entre le béton recyclé et les armatures: .....	33
I.2.4/ Durabilité: .....	33
- La Carbonatation: .....	34
- Alkali Réaction: .....	34
- Gel-Dégel: .....	35
I.3/ CONCLUSION: .....	36
<b>CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DES</b>	
<b>BETONS: .....</b>	<b>37</b>
II.1/ INTRODUCTION: .....	38
II.2/ LES MODES OPERATOIRES DES ESSAIS: .....	38
II.2.1/ Le Ciment: .....	38
II.2.2/ Les Granulats: .....	40
II.2.2.1/ Préparation des Granulats: .....	40
II.2.2.2/ Echantillonnage: .....	41
II.2.2.3/ Essais sur Granulats: .....	41
II.2.3/ Le Béton Frais: .....	45
II.2.4/ Le Béton Durci: .....	46
II.3/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES: .....	46
II.3.1/ L'eau: .....	46
II.3.2/ Le ciment: .....	46
II.3.3/ Les granulats: .....	48
II.3.3.1/ Analyse granulométrique par tamisage: .....	48
II.3.3.2/ Caractéristiques Mécaniques: .....	48
II.3.3.3/ Caractéristiques Physiques: .....	50
II.3.4/ Les adjuvants : .....	53
II.4/ FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS: .....	53
II.4.1/ Méthode de formulation de béton: .....	53
II.4.2/ Formulation et préparation des bétons: .....	54
II.4.3/ Confection et cure des éprouvettes: .....	54
II.4.4/ Composition des bétons: .....	55
II.5/ CONCLUSION: .....	57

---

<b>CHAPITRE III: FORMULATION ET COMPORTEMENTS DES BETONS SANS ADJUVANTS:</b>	
III.1/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS: .....	59
III.2/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS FRAIS: .....	60
III.2.1/ Dosage en eau: .....	60
III.2.2/ Masse volumique apparente: .....	61
III.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS DURCIS: .....	62
III.3.1/ Masse volumique apparente: .....	62
III.3.2/ Résistance à la compression: .....	62
III.3.3/ Résistance à la traction par fendage: .....	66
III.4/ CONCLUSION: .....	67
<b>CHAPITRE IV: FORMULATION ET COMPORTEMENTS DES BETONS AVEC ADJUVANTS:</b>	
IV.1/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS: .....	69
IV.2/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS FRAIS: .....	70
IV.2.1/ Dosage en Eau et en Superplastifiant: .....	70
IV.2.2/ Masses volumiques: .....	72
IV.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS DURCIS: .....	72
IV.3.1/ Résistance à la compression: .....	72
IV.3.2/ Résistance à la traction par fendage: .....	73
IV.4/ COMPARAISON DES BETONS SANS ADJUVANT ET AVEC ADJUVANT: .....	74
IV.4.1/ Résistance à la Compression: .....	74
IV.4.2/ Résistance à la traction par fendage: .....	76
IV.5/ CONCLUSION: .....	77
<b>CHAPITRE V: ETUDE DES BETONS AVEC DIFFERENTS RAPPORTS (G/S): .....</b>	
V.1/ OPTIMISATION DES MELANGES DES FRACTIONS DES GRAVIERS: .....	79
V.2/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS: .....	80
V.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS FRAIS: .....	82
V.3.1/ Dosage en Eau: .....	82
V.3.2/ Les masses volumiques apparentes: .....	83
V.4/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS DURCIS: .....	84
V.5/ CONCLUSION: .....	86
CONCLUSION GENERALE: .....	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES: .....	90
ANNEXES: .....	99

## LISTE DES FORMULES

N°: de la Formule	Titre	Page
<b>CHAPITRE I :</b>		
Formule I.1:	Détermination de la sensibilité au gel (G)	20
Formule I.2:	La relation entre la résistance à la traction et celle en compression	30
<b>CHAPITRE II:</b>		
Formule II.1:	Détermination de la masse volumique apparente du ciment	39
Formule II.2:	Détermination de la masse volumique absolue du ciment (Mv abs.)	39
Formule II.3:	Détermination de la porosité du ciment (P %)	39
Formule II.4:	Détermination du module de finesse des sables (MF)	42
Formule II.5:	Détermination du coefficient d'aplatissement des granulats (A)	42
Formule II.6:	Détermination du coefficient Los-Angeles des granulats ( $L_A$ )	42
Formule II.7:	Détermination du coefficient Micro-Deval des granulats ( $M_{DE}$ )	43
Formule II.8:	Détermination de la masse volumique apparente des granulats (Mv app.)	43
Formule II.9:	Détermination de la masse volumique absolue des granulats (Mv abs.)	43
Formule II.10:	Détermination de la teneur en eau des granulats (W %)	44
Formule II.11:	Détermination du taux d'absorption d'eau des granulats (W %)	44
Formule II.12:	Détermination de la propreté des gros granulats (P %)	44
Formule II.13:	Détermination de l'équivalent de sable (ES)	45
Formule II.14:	Détermination de la valeur du Bleu de Méthylène (VB)	45
Formule II.15:	Détermination de la densité réelle du béton frais	45
Formule II.16:	Détermination de la résistance à la compression simple des bétons	46
Formule II.17:	Détermination de la résistance à la traction par fendage des bétons	46

## LISTE DES FIGURES

N°: de Figure	Titre	Page
Figure 1:	Photos des décharges sauvages de gravats dans la région d'El Hadjar	1
<b>CHAPITRE I :</b>		
Figure I.1:	Photos des différents types de granulats	7
Figure I.2:	Les différentes catégories de déchets de chantiers	10
Figure I.3:	Schéma d'installation de production de granulats recyclés	11
Figure I.4:	Règle de conformité à deux valeurs spécifiques	13
Figure I.5:	Présentation du VDG40 (L=1,60 m, l= 0,75 m et H= 1,20 m)	14
Figure I.6:	Exemples de courbes granulaires des granulats pour béton	14
Figure I.7:	Forme d'un granulats	15
Figure I.8:	Relation entre l'absorption d'eau et densité des granulats recyclés	18
Figure I.9:	Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats (E/C=0,50)	24
Figure I.10:	Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton	26
Figure I.11:	L'absorption d'eau des bétons	27
Figure I.12:	Relation entre les retraits des bétons recyclés et un béton conventionnel	29
Figure I.13:	Relation entre la résistance à la compression et le retrait du béton	29
Figure I.14:	Rapport entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression	30
Figure I.15:	Influence du rapport G/C sur la résistance du béton	31
Figure I.16:	Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression	32
Figure I.17:	Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en recyclés et le rapport E/C	33
Figure I.18:	Relation entre les modules élastiques des bétons recyclés et conventionnels à différent taux de substitution en recyclés	33
<b>CHAPITRE II :</b>		
Figure II.1:	Essais Los-Angeles et Micro-Deval sur les granulats naturels et recyclés	48
Figure II.2:	Courbes granulométriques des différents granulats utilisés	49
Figure II.3:	Masses volumiques apparentes et absolues des différents types de granulats	50
Figure II.4:	Teneur et absorption d'eau des différents types de granulats	52
Figure II.5:	Photos de la structure poreuse des granulats recyclés	52
Figure II.6:	Composition granulair type du béton d'étude	55

N°: de Figure	Titre	Page
<b>CHAPITRE III :</b>		
Figure III.1:	Dosage en eau pour chaque type de béton	60
Figure III.2:	Masses volumiques apparentes et G/S des différents types de béton	61
Figure III.3:	Evolution des masses volumiques apparentes des bétons durcis	62
Figure III.4:	Evolution des résistances à la compression des bétons sans adjuvant	63
Figure III.5:	Evolution des R-ces à la compression des bétons BT1, BT2 et B1	64
Figure III.6:	Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B2	65
Figure III.7:	Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B3	65
Figure III.8:	Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B4	66
Figure III.9:	La résistance à la traction par fendage des bétons sans adjuvant à 28 jours	66
<b>CHAPITRE IV :</b>		
Figure IV.1:	Dosage en eau et en adjuvant pour chaque type de béton	70
Figure IV.2:	Comparaison des dosages en eau de bétons avec et sans adjuvants	70
Figure IV.3:	Comparaison des consistances de bétons avec et sans adjuvants	71
Figure IV.4:	Masses Volumiques Apparentes des différents types de béton frais	72
Figure IV.5:	Evolution des résistances à la compression des bétons adjuvantés	73
Figure IV.6:	Evolution des résistances à la traction par fendage des bétons avec adjuvant	74
Figure IV.7:	Comparaison des résistances à la compression des bétons BT2 et BT2A	74
Figure IV.8:	Comparaison des R-ces à la compression des bétons B1 et B1A	75
Figure IV.9:	Comparaison des R-ces à la compression des bétons B2 et B2A	75
Figure IV.10:	Comparaison des R-ces à la compression des bétons B3 et B3A	76
Figure IV.11:	Comparaison des résistances à la traction par fendage des différents bétons avec et sans adjuvants	76

---

<b>N°: de Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE V :</b>		
Figure V.1:	Variation des masses volumiques apparentes en fonction des proportions de la fraction (12,5/20) du gravier recyclé	79
Figure V.2:	Variation des masses volumiques apparentes en fonction des proportions de la fraction (5/12,5) du gravier naturel	79
Figure V.3:	Le dosage en eau en fonction du rapport G/S et du dosage en ciment des bétons recyclés	82
Figure V.4:	Le dosage en eau en fonction du rapport G/S et de la nature du béton, avec $C=300 \text{ kg/m}^3$	82
Figure V.5:	Variation des masses volumiques en fonction du rapport G/S et du dosage en ciment des bétons recyclés	83
Figure V.6:	Variation des masses volumiques en fonction du rapport G/S des bétons naturels	83
Figure V.7:	Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport G/S des bétons recyclés et naturels	85

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N°: du Tab.</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I :</b>		
Tab. I.1:	Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable	15
Tab. I.2:	Limitation de contaminants dans les granulats recyclés	19
<b>CHAPITRE II :</b>		
Tab. II.1:	Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé	47
Tab. II.2:	Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5 utilisé	47
Tab. II.3:	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé	47
Tab. II.4:	Caractéristiques mécaniques des granulats utilisés	48
Tab. II.5:	Les caractéristiques physiques des granulats utilisés	51
Tab. II.6:	Caractéristiques des adjuvants utilisés	53
Tab. II.7:	Compositions des mélanges granulaires de la variété des bétons utilisés	56
<b>CHAPITRE III:</b>		
Tab. III.1:	Compositions des différents bétons sans adjuvants formulés	59
<b>CHAPITRE IV:</b>		
Tab. IV.1:	Compositions des différents bétons avec adjuvants formulés	69
<b>CHAPITRE V:</b>		
Tab. V.1:	Compositions des bétons recyclés formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec C=300 kg/m <sup>3</sup>	80
Tab. V.2:	Compositions des bétons recyclés formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec C=400 kg/m <sup>3</sup>	81
Tab. V.3:	Compositions des bétons naturels formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec C=300 kg/m <sup>3</sup>	81
Tab. V.4:	Les résistances à la compression à 28 jours des bétons avec les différents rapports G/S et les deux dosages en ciment	84

**INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

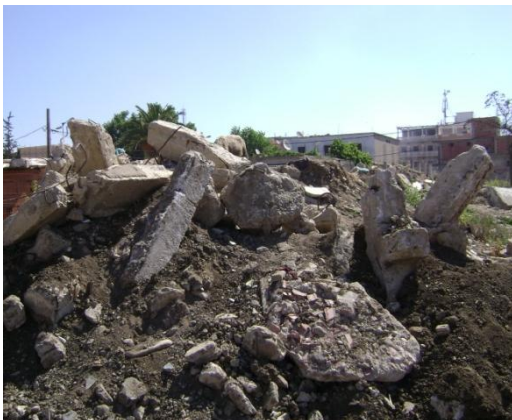
La protection de l'environnement est un élément fondamental, qui est directement liée à la survie de l'être humain, la faune et la flore. Paramètres comme l'environnement, la protection de la nature, le développement durable jouent un rôle important dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction.

La poussée écologique imposa de tenir compte de l'environnement soit en évitant des empruntes de matériaux naturels, soit en éliminant des sous produits et déchets dont les dépôts souvent disgracieux peuvent conduire à certaines pollutions du milieu naturel ce qui nécessitera la mobilisation de capitaux très importants.

Les chantiers de construction et de démolition génèrent une grande diversité de déchets qui constituent une partie importante des coûts de production des déchets solides dans le monde. Environ 90 % d'entre eux sont éliminés en décharge.

L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans les travaux de génie civil, semble être une solution idéale, la plus prometteuse pour les problèmes de déchets. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats et la figure suivante est bien édifiante.



Débris de bétons



Débris mixte de bétons et maçonnerie

**Figure 1:** Photos des décharges sauvages de gravats dans la région d'El Hadjar.

Actuellement, la valorisation de déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage des débris de construction/démolition a atteint dans certains pays les 80 %.

En Algérie, l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires à partir du 04 juillet 2007 ( Loi N: 05/12 du 04/08/2005), l'épuisement de certains gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières (la protection de l'environnement, la préservation des paysages) imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers lancés par le gouvernement Algérien (Autoroute Est-Ouest, la réalisation de un (01) million de logements et d'autres infrastructures.....).

Comme le béton constitue presque 75%, en poids, des constructions. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton.

Les granulats issus de recyclage des produits de démolition s'inscrivent dans le cadre des matériaux locaux de substitution, ils sont utilisés actuellement dans la plupart des pays Européens dans le domaine routier, et leur valorisation dans le béton hydraulique est freinée par le fait qu'ils sont considérés comme granulats hors normes. Leur hétérogénéité et leur fort pouvoir d'absorption d'eau menant à des difficultés de control des propriétés du béton frais et par conséquent, influençant la résistance et on les suspecte ainsi d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité des bétons.

Les études sur l'utilisation des granulats recyclés durent depuis 50 ans. Et parallèlement, on a constaté selon différentes sources bibliographiques le manque d'études sur la composition d'un béton à base de granulats recyclés. Ceci constitue un problème, voire une insuffisance majeure.

Dans ce contexte, notre travail s'inscrit, il a pour objectif principal de contribuer à la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les bétons comme substitut aux granulats naturels, dans la production de nouveaux bétons structurels, dans le but de:

- ✓ Contribuer à préserver l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats et la limitation d'extraction des granulats de carrière et alluvionnaires.
- ✓ Répondre à la demande croissante en granulats.
- ✓ Contribuer à mettre en valeur des granulats recyclés.
- ✓ Contribuer aux études menées sur l'emploi des granulats recyclés dans les bétons en substitution des granulats naturels.

**Ce manuscrit comporte cinq chapitres:**

Après une introduction générale sur la problématique, sur l'insuffisance des granulats naturels face aux besoins de fonctionnement des chantiers de grands projets lancés en Algérie et l'impact de la décharge des déchets de démolition sur l'environnement et sur l'économie.

Une revue bibliographique sur ces derniers et sur les propriétés des bétons frais et durci est présentée dans le premier chapitre, elle se compose de deux parties:

- La première présente un ensemble de généralités sur les granulats utilisés dans le béton: un rappel sur les différents types de granulats, un aperçu général sur les méthodes et les moyens nécessaires à l'élaboration des granulats recyclés et enfin l'ensemble des caractéristiques des granulats (intrinsèques, chimiques, mécaniques et thermiques).
- La deuxième partie traite les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques essentielles des bétons conventionnels en général et ceux recyclés en particulier.

Dans le second chapitre, on a exposé les modes opératoires des essais sur les matériaux employés dans cette étude, ainsi que les différentes méthodes expérimentales, selon les normes en vigueur, nécessaire pour la caractérisation physique et mécanique de ces matériaux. La dernière partie de ce chapitre présente la méthode et les conditions de formulation des bétons.

Le troisième chapitre est entièrement axé sur l'étude du béton à base de granulats recyclés avec différentes combinaisons avec ceux naturels. La caractérisation des bétons frais: la consistance, le dosage en eau et les masses volumiques réelles et la caractérisation mécanique du béton durcis: en compression et en traction par fendages, en fonction du temps.

Le quatrième chapitre est porté sur l'étude des mêmes bétons du chapitre précédent en incorporant un superplastifiant dans la perspective d'amélioration du comportement rhéologique et une comparaison de ces bétons avec ceux non adjuvés.

Le dernier chapitre concerne l'influence de la variation du rapport G/S de 1,0 à 3,0 en fonction du dosage en ciment dont l'issue sera d'arriver à une formulation granulaire assurant les meilleures performances mécaniques des bétons.

Enfin une conclusion générale relative à ces travaux, et des recommandations pour des futurs travaux éventuels sont proposées.

# **CHAPITRE I:**

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

**I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE :****I.1/ GENERALITES SUR LES GRANULATS UTILISES DANS LE BETON :****I.1.1/ INTRODUCTION:**

La construction de l'habitat et l'aménagement de l'environnement font appel à trois grands secteurs d'activités, qui sont les industries de carrière et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. Tous les travaux liés à ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires (sous forme de sables et graviers), soient obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et parfois l'utilisation des déchets inertes. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Elles sont destinées à être mises en œuvre sans aucun apport de liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais...) soient agglomérées à l'aide d'un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés) [1].

**I.1.2/ DEFINITION :**

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540 [2]. Un granulats est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais [1].

**I.1.3/ LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS :**

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- «Naturels», lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- «Artificiels», lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- «Recyclés», lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés [3].

**I.1.3.1/ LES GRANULATS NATURELS :**

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

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

Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles : les roches calcaires, les roches siliceuses et les silico-calcaires [3].



**Figure I.1:** Photos des différents types de granulats

- **Les Granulats Alluvionnaires:**

Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Se sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière (et en mer éventuellement) [4]. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, et criblés pour obtenir différentes classes de granulats [5].

- **Les Granulats de Carrières:**

Les granulats sont obtenus par abatage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... [6].

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [7].

### **I.1.3.2/ LES GRANULATS ARTIFICIELS :**

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous produits industriels transformés.

---

**➡ Sous-Produits et Déchets de L'industrie:****a) Le Laitier des hauts fourneaux :**

Le laitier de haut fourneau est le principal sous-produit de l'industrie sidérurgique, il est constitué de toutes les parties minérales contenues dans la charge du haut fourneau (minerai et ajouts) qui subsistent après l'extraction du fer [6].

**b) Le laitier cristallisé concassé :**

Il est obtenu par refroidissement lent à l'air libre, en fosse, il a l'aspect et les propriétés d'une roche magmatique. Il peut être plus ou moins poreux, plus le refroidissement est lent et en couches minces, plus le laitier est cristallisé et compact [8]. Il possède une masse volumique apparente  $>1250 \text{ Kg/cm}^3$ , de composition chimique constituée essentiellement de chaux, magnésie, silice et alumine [9].

**- Le laitier expansé ou bouleté :**

Le laitier de coulée subit un traitement spécial : une puissante injection d'eau et une action mécanique. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres qui subissent une trempe à l'air pendant la durée de leurs trajets [9, 10].

Le laitier expansé a une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950  $\text{kg/m}^3$  [6].

**c) Les Scories d'aciérie :**

Ces laitiers sont des sous produits de la transformation de la fonte hématite en acier. Traité comme les laitiers de haut fourneau, ce matériau est handicapé par une déferrisation insuffisante qui conduit à une masse volumique élevée d'environ  $3300 \text{ kg/m}^3$  [8].

**d) Les Schistes houillers :**

L'industrie minière en général et les houillères en particulier produisent des quantités considérables de matériaux stériles. Ces déchets trouvent des applications importantes dans des terrassements routiers comme granulats [8].

**e) Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :**

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires [8].

**f) Granulats allégés par expansion ou frittage**

Ces granulats ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé, leurs masses volumiques

---

varient entre 400 et 800 kg/m<sup>3</sup> selon le type et la granularité. Ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique [6].

### **I.1.3.3/ LES GRANULATS RECYCLES : NOUVELLES DEBOUCHEES**

Le granulats recyclé est le granulats résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

#### **a) Les déchets de chantier :**

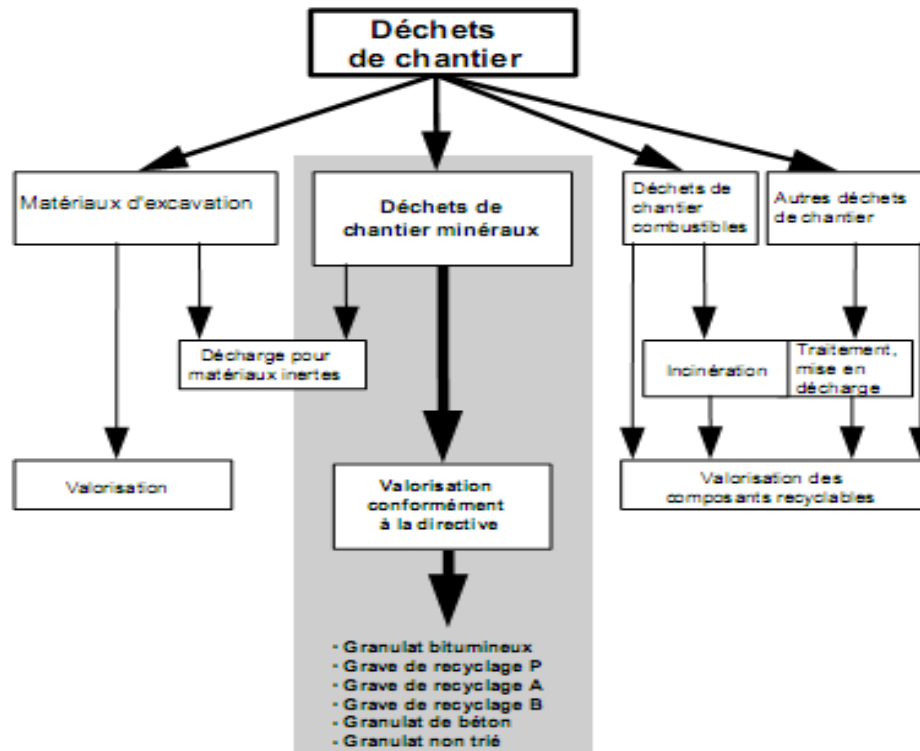
Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [11].

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [12].

La figure (I.2) présente les différentes catégories de déchets de chantiers et domaine d'application [13].

#### **b) Les déchets de démolition :**

Les déchets de démolition sont une sous catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [14].



**Figure I.2:** Les différentes catégories de déchets de chantiers [13]

#### I.1.4/ ELABORATION DES GRANULATS RECYCLES :

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différentes des installations de concassage des granulats naturels, ce qui les différencie c'est la présence des impuretés dans les matériaux. Pour enlever ces impuretés, à différents moments au cours du processus de concassage des opérations de triage manuel ou mécanique sont effectuées. Les plus gros débris comme les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc. sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire, tandis que pour enlever les impuretés légères, QUEBAUD [15] propose deux procédés: l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature. Le deuxième cas, l'épuration par voie humide (flottaison), la séparation est réalisée au moyen d'un bain dans lequel les granulats recyclés sont transportés par bande immergée et les fractions légères qui flottent sont séparées par des jets d'eau à contre-courant. Des électro-aimants sont ajoutés au circuit de concassage pour enlever les débris métalliques. Ces électro-aimants seront installés à la sortie des concasseurs et recueilleront les éléments métalliques comme les aciers d'armature. La figure (I.3) présente un schéma d'installation de production de granulats recyclés.



RILEM [16] affirme que ce sont ces concasseurs qui assurent la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment.

Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près la même quantité de particules fines (particules < 80  $\mu\text{m}$ ).

Le troisième type de concasseur, à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de grosseur maximale de 200 millimètres.

Le type de matériau à concasser aura aussi une incidence sur le choix des concasseurs. Si on concasse du béton de ciment, la quantité de pâte de ciment entourant les granulats naturels sera plus ou moins importante dépendamment du type de concasseur utilisé. De plus, Quebaud [15] affirme que le concasseur à percussion brise aussi bien les granulats naturels que la gangue de ciment, mais ne détache pas cette dernière des granulats naturels tandis que, de par leur action combinée de frottement-écrasement, les concasseurs à mâchoires donneront un pourcentage de pâte de ciment plus important dans la fraction fine. On aura donc, à la sortie du concassage, des granulats ayant une grande proportion de particules fines.

En guise de conclusion sur la fabrication de ce type de granulat, CIMPELLI [18] propose un résumé des différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage sur l'Île-de-France: sélection et stockage des produits bruts ;

- préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique;
- concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un déferrailage 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;
- éventuellement, concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire.

▪ **LE STOCKAGE :**

La conservation des granulats recyclés après traitement se fait dans des aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos [1], selon des critères bien précis et qui sont fonction de la provenance des granulats, de la forme des grains, de la nature des opérations de traitement et de la granulométrie.

HANSEN [19], conseille de stocker les différents types de granulats séparément l'un de l'autre, et de ne pas conserver les sables recyclés pendant longtemps [20].

### I.1.5/ CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication [3].

Le prélèvement d'un échantillon pour la caractérisation doit se faire conformément aux normes "NF P 18-553 et EN 932-1" relatives au prélèvement par "échantillonneur" ou par "quartage" [21, 22].

#### I.1.5.2/ LES CARACTERISTIQUES DE FABRICATION :

##### I.1.5.2.1/ LES SPECIFICATIONS DES GRANULATS POUR BETON:

La norme expérimentale XP P 18-540 [2] définit les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons hydrauliques [3, 23, 24].

La norme distingue quatre familles de granulats: les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D [2, 3] et cinq catégories pour les granulats recyclés [23] : A, B, C, D, et E par ordre de qualité décroissante du point de vue des performances du béton [3]. Elle définit aussi les règles de conformité de la granularité en spécifiant les limites admissibles, figure (I.3) [3, 23, 25] :

- Un ou deux valeurs spécifiées, inférieure ( $V_{Si}$ ) et/ou supérieure ( $V_{Ss}$ ) servant à quantifier les limites acceptables
- Fuseau de fabrication :  $V_{Si} + 1,25 S \leq m \leq V_{Ss} + 1,25 S$  qui doit être inclus dans le fuseau de régularité  $S \leq (V_{Ss} - V_{Si})/3$  [3], avec  $m$ : valeur moyenne et  $S$  : l'écart type.
- Un ou deux valeurs limites absolues ( $V_{Si} - U$ ) et/ou supérieures ( $V_{Ss} + U$ ) qui ne doivent être dépassées pour aucun essai.

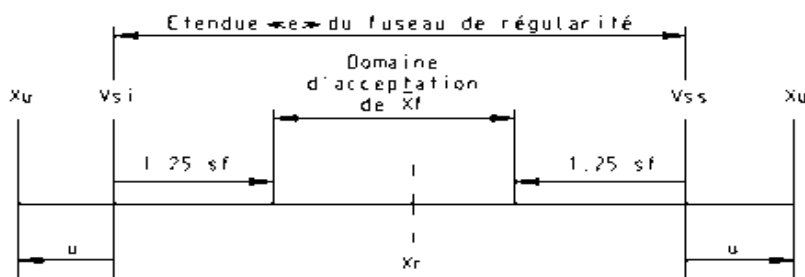


Figure I.4 : Règle de conformité à deux valeurs spécifiques [2]

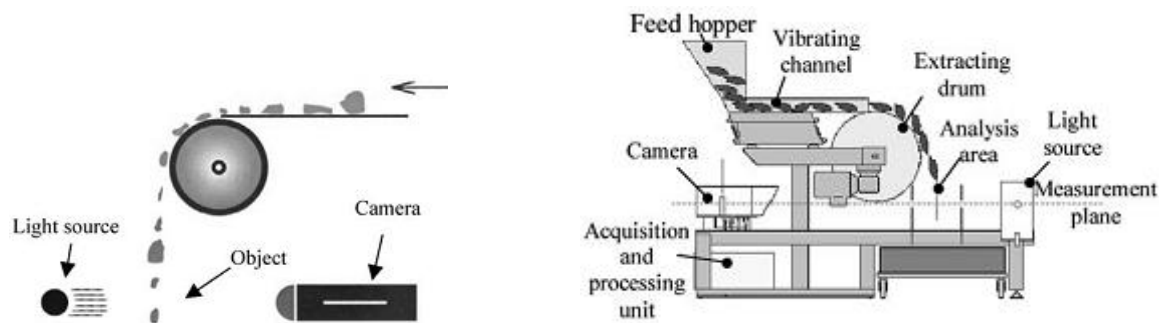
Un récapitulatif des spécifications pour les granulats destinés aux bétons hydrauliques que la norme XP P 18-541 exige [23, 24 et 26], est présenté en Annexes 1 et 2.

**I.1.5.2.2/ ANALYSE GRANULOMETRIQUE :**

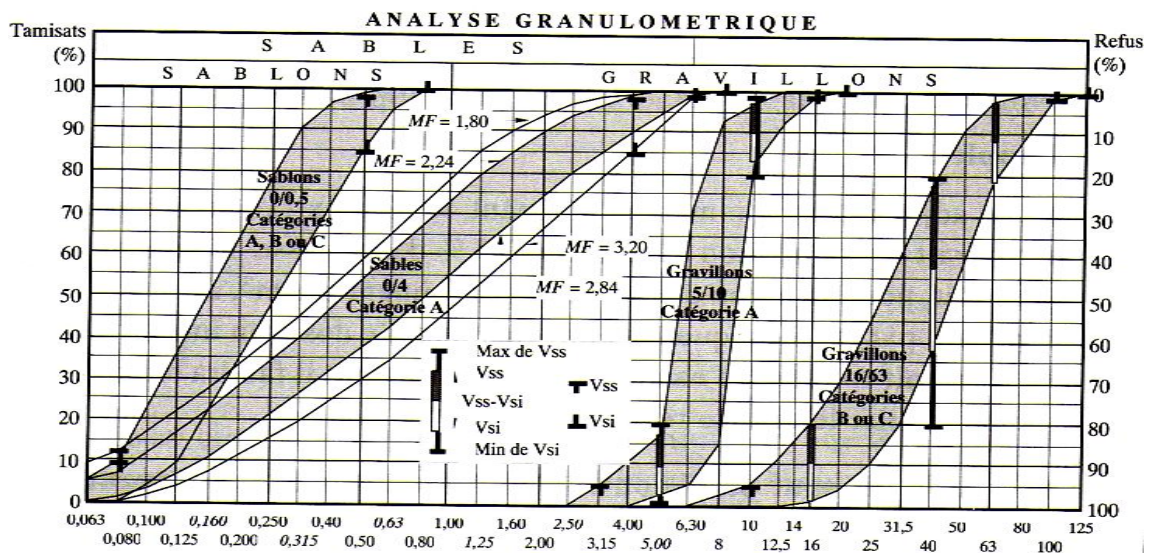
L'analyse granulométrique est régie par les normes "EN 933-1 et EN 933-2" [23, 24 et 26]. Les granulats sont désignés par d et D, ou d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées.

L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures au moyen de tamis [3, 25]. Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (*courbe granulométrique*) [3, 25, 26]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [24].

Une nouvelle méthode plus sophistiquée est aussi utilisée pour la détermination de la granulométrie qui se base sur le traitement d'image. La granulométrie est traitée par le logiciel *vidéogranulomètre* VDG40 et son utilisation est couverte par la norme française "XP P 18-566" [27, 28]. La figure (I.5) illustre le principe de fonctionnement de cette technique.



La figure (I.6) montre des exemples de fuseaux granulaires à l'intérieur desquels doivent se trouver les fuseaux de fabrication de granulats [3].



**Figure I.6 :** Exemples de courbes granulaires des granulats pour béton [3]

**I.1.5.2.3/ LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES GRANULATS :**

Les granulats peuvent avoir des formes sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées. Ces caractéristiques, ainsi que l'état de surface des grains influent sur l'aptitude à la mise en place du béton frais, la résistance mécanique et durabilité du béton durci.

**- Module de finesse (MF):**

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis. Le Tableau I.1 présente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [3, 24, 26].

**Tableau I.1** : Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.

01	Tamis: 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm.	"NF P 18-540" [2]
02	Tamis: 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 et 4 mm.	"EN 12620" [29]

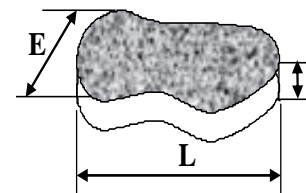
Un bon sable pour béton doit avoir un module finesse d'environ 2,2 et 2,8. Au dessous, le sable est à majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, au dessus, le sable manque de fins et le béton y perd en ouvrabilité [24, 26].

**- La forme :**

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistance des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissements potentiels.

La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales, figure (I.7) : l'épaisseur (E), la grosseur (G) et la longueur (L).

Pour différents usages, il est conseillé d'utiliser des granulats les plus isotropes possibles. Une forme assez ramassée des granulats est très recommandée pour une utilisation dans le béton [3].

**Figure I.7:** forme d'un granulat [26]**- Le coefficient d'aplatissement "A" :**

Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm à partir de (G) et (E), est par définition le pourcentage d'élément tel que  $G/E > 1,58$  [25]. Le coefficient d'aplatissement est déterminé selon la Norme NF EN 933-3 [30].

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

**- Angularité :**

L'angularité des granulats est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et rapport de concassage. Mais peut être mesurée aussi par le temps d'écoulement d'un certain volume de granulats à travers un orifice donné caractérisant ainsi un *coefficient d'écoulement des gravillons*. Il en va de même pour les sables, la méthodologie étant la même, seul diffère les dimensions de l'appareillage de mesure [3].

**- La pâte cimentaire attachée aux granulats :**

Les granulats recyclés contiennent du mortier et pâte cimentaire, qui sont toujours présents et collés aux granulats. Au Japon, les recherches ont abouti à une méthode, qui consiste à l'enlèvement de mortier à partir de la surface des granulats sans écraser les granulats [20].

Les principaux facteurs qui influent sur la quantité de la pâte cimentaire rattaché aux granulats recyclés sont : le rapport E/C, la résistance du béton source des granulats [31] et la taille des granulats recyclés [20].

**I.1.5.3/ CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES :****I.1.5.3.1/ PETROGRAPHIE :**

La description pétrographique consiste à déterminer la nature des différents minéraux, leur abondance relative, leur degré d'altération, leur taille et leur agencement, ainsi que l'existence éventuelle de pores. Elle permet aussi de définir l'état cristallin de la matière (*cristallographie*) pour décrire les roches [32].

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

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

**I.1.5.3.2/ CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :**

On peut les classer en deux groupes [33], celles qui concernent le granulat lui même, et celles qui concernent la teneur en substances étrangères et nocives.

**• LES MASSES VOLUMIQUES :**

Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [34, 35, 36, 37, 38].

- **La Masse Volumique Apparente (en vrac) :** C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores intergranulaires.
- **La Masse Volumique Absolue :** C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores).

Il existe 3 façons généralement employées pour déterminer ces masses volumiques en fonction de la précision recherchée et de la nature du granulat:

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

Les granulats sont dits: **Légers** si " $Mv_{abs} < 2 t/m^3$ ", **Courants** si " $2 t/m^3 < Mv_{abs} < 3 t/m^3$ " et **Lourds** si " $Mv_{abs} > 3 t/m^3$ " [26].

En général, la densité des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels, à cause de la faible densité de la pâte cimentaire rattaché aux granulats [20].

- **LA POROSITE (P):**

C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes "NF P18 554, EN 1097-3" [34, 37].

La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [10].

- **TENEUR EN EAU (W %) :**

La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon [3].

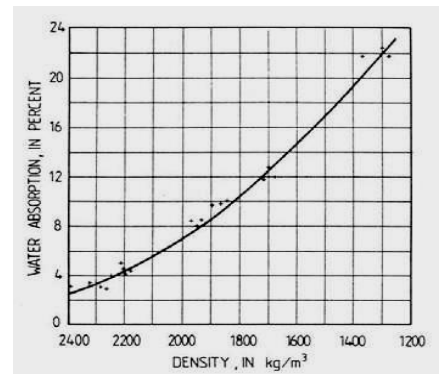
- **TAUX D'ABSORPTION D'EAU (AB %):**

L'absorption d'eau par définition est le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Elle est déterminée selon les normes standards "NF P 18-554, 18-555, EN 1097-3, EN 1097-6".

Les granulats sont plus ou moins dangereux selon leur degré de saturation en eau au moment où intervient le gel.

La capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés dépendra principalement :

- la taille des granulats. Les granulats fins absorbent de l'eau beaucoup plus que les gros granulats [39],
- la qualité et la quantité de la pâte cimentaire rattachée aux granulats [40],
- la densité des granulats [39] (figure I.8).



**Figure I.8:** relation entre l'absorption d'eau et densité des granulats recyclés [39].

- **PROPRETE DES GRANULATS :**

La qualité des granulats utilisés dans les bétons est un facteur très important. Trois grandes catégories d'impuretés peuvent être rencontrées dans les granulats: matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leurs présence à la surface des granulats interférant avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [7].

- a) **LES SABLES :**

On mesure l'importance des pollutions argileuses dans les sables par l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène [3].

- **Equivalent de sable "ES":**

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique multiplié par 100 entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins. Il existe deux types de mesures : l'essai visuel et l'essai au piston [25, 26]. Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai:

- d'équivalent de sable (NFP 18-598) [41],
- d'équivalent de sable à 10% de fines (NFP 18-597) [42],
- évaluation des fines - équivalent de sable (EN 933-8) [43].

Les essais d'équivalent de sable permettent la détermination du pourcentage des éléments très fins du sable (aspect quantitatif) sans aucune distinction de nature "argile, limon, vase et matières solubles" (aspect qualitatif), et pour évaluer de façon plus sélective la propreté des sables, de compléter l'essai d'équivalent de sable par l'essai au bleu de méthylène [25, 26].

### - Essai au bleu de méthylène :

Le bleu de méthylène se fixe préférentiellement sur les fines argileuses au détriment des fines non argileuses [3]. L'essai au bleu de méthylène est pratiqué selon la norme "NF EN 933-9" [44] sur la fraction granulaire (0/2 mm) des sables courants ( $V_B$ ) ou sur les fillers (0/0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant ( $V_{BF}$ ) [26]. La valeur limite selon les spécifications pour les bétons hydraulique est égale à 01 [24].

### b) LES GRAVILLONS, ESSAI DE PROPRETE SUPERFICIELLE (P) :

La propreté superficielle des gravillons est caractérisée par la teneur en particules fines essentiellement argileuse ou d'origine végétale ou organique [10], elle est définie comme étant le rapport du passant à 0,5 mm au poids total d'un échantillon de gravillon. Elle est déterminée selon la norme NF P 18-591 [45].

### c) AUTRES POLLUTIONS :

Les normes relatives aux granulats définissent des seuils pour certaines impuretés comme: les éléments coquilliers dans les gravillons alluvionnaires, les matières organiques dans les sables, les chlorures et les sulfates et sulfures. Les limites des contaminants dans les granulats recyclés sont données par le Tableau I.2 [46].

**Tableau I.2:** Limitation de contaminants dans les granulats recyclés [46]

Type des granulats recyclés	le plâtre, l'argile et d'autres impuretés de densité $< 1\,950\text{ Kg/m}^3$	Asphalte, plastique, peinture, tissu, papier, bois et matériaux similaires avec une densité inférieure à $1\,200\text{ Kg/m}^3$
Gravier	$10\text{ Kg/m}^3$	$2\text{ Kg/m}^3$
Sable	$10\text{ Kg/m}^3$	$2\text{ Kg/m}^3$

### I.1.5.4/ CARACTERISTIQUES CHIMIQUES :

#### • LA TENEUR EN CHLORURES :

Un sable provenant du bord de mer, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité [7]. La quantité d'ions chlore acceptable dans les granulats est limité à: 1 % pour les bétons non armés; 0,40 % pour les bétons armés selon Neville [7] et selon la norme européenne NF EN 206-1 [47].

Il a été constaté sur des cas de bétons recyclés la présence de chlorures dépassant les limites recommandées [48]. Ceci est semblablement lié à la contamination des ouvrages par les chlorures au cours leurs exploitations avant démolition.

- **LA TENEUR EN SULFATE :**

La norme européenne EN-12-620 définit la limite de la teneur en sulfate à 1 % [29].

La teneur en sulfate des granulats recyclés est en relation avec la quantité de la pâte cimentaire attachée aux granulats. La contrainte de compression du béton qui emploie 3% de plâtre est de 15 % inférieur à celui sans plâtre. Toutefois, les granulats doivent être lavés avant leur utilisation et la démolition sélective pourrait être considérée comme une alternative efficace [39].

- **ALCALI-REACTION :**

L'alcali-réaction est un ensemble de réactions chimiques pouvant se produire entre certaines formes de silices, de silicates ou de carbonates appartenant aux granulats et les éléments alcalins (sodium, potassium) en solutions dans la pâte liante [40], et la formation d'un gel expansif entraînant l'éclatement du béton [3].

Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR), potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP). La teneur en alcalins actifs des granulats est communiquée si elle dépasse 0,01 % exprimée en Na<sub>2</sub>O équivalent [3].

- **GELIVITE DES GRANULATS :**

Un granulat ne sera pas sensible au gel, s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macrospores (qui jouent le rôle de bulles d'air) [33]. Un granulat est considéré comme non gélif si au moins l'une des trois valeurs spécifiées suivantes est respectée: absorbe peu d'eau ( $A_b \leq 1\%$ ), sa résistance à la fragmentation est bonne ( $L_A \leq 25$ ), sa gélivité ( $G \leq 30$ ) [3, 23]. Dans les cas contraires, la gélivité est mesurée par la dégradation granulométrique du matériau préalablement soumis à des cycles gel-dégel [3].

L'essai gel-dégel est déterminé selon la norme "NF EN 1367-1" [49]. La sensibilité au gel est déterminée par la formule (I.1) suivante:

$$G = \left( \frac{L_{AG} - L_A}{L_A} \right) \times 100 \quad (I.1)$$

Ou  $L_{AG}$  : coefficient Los Angeles des granulats gelés,

$L_A$  : coefficient Los Angeles des granulats non gelés.

Plusieurs travaux ont indiqué que les granulats recyclés ont de mauvaises performances lors de l'essai de gel-dégel [50, 51, 52, 53].

### I.1.5.5/ CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

- **RESISTANCE DES GRANULATS :**

La résistance des granulats est obtenue par des essais indirects, des essais de résistance au choc et à l'usure. En général, la résistance et l'élasticité des granulats dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure.

- **LA RESISTANCE A LA FRAGMENTATION**

- **Essai Los Angeles ( $L_A$ ) :**

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

La valeur du coefficient Los-Angeles doit être  $\leq 40$  pour les granulats naturels type B et C suivant les normes "NF P18 573, EN 1097-2 § 5" [54, 55] et compris entre 30 (catégorie A) et 50 (catégorie D) selon les normes XP P 18 540 [2, 24] et ASTM C-33 pour les granulats recyclés [39, 40].

La variation du coefficient Los-Angles des granulats recyclés est en fonction de la résistance du béton d'origine, la quantité de la pâte cimentaire rattachée aux granulats et la qualité d'origine des granulats ainsi que la méthode de préparation des granulats et la puissance employée [39].

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

L'essai permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat "NF P 18-574" [56]. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. Cette quantité est appelée coefficient de fragmentation dynamique. Cet essai a été conçu de manière à trouver, sur un même matériau, un résultat aussi proche que possible du coefficient Los-Angeles [26].

- **Résistance à l'attrition et à l'usure "Essai Micro-Deval humide" ( $M_{DE}$ ) :**

L'essai Micro Deval peut être utilisé à sec ou en présence d'eau, méthode plus représentatif [3]. Les granulats résistent d'autant mieux à l'attrition que la valeur du coefficient Micro-Deval est faible [3]. La valeur du ( $M_{DE}$ ) doit être  $\leq 35$  pour les granulats naturels selon "NF P18-577, NF EN 1097-1" [57, 58] et compris entre 15 et 50 pour les granulats recyclés selon la norme "XP P 18-540" [2].

### I.1.5.6/ PROPRIETES THERMIQUES DES GRANULATS :

Trois propriétés thermiques importantes des granulats sont le coefficient de dilatation thermique, de la chaleur spécifique et la conductivité [33].

Si la différence entre les coefficients de dilatation thermique des granulats et de pâte de ciment hydraté est importante, une variation notable de la température peut occasionner des mouvements différentiels et rompre ainsi l'adhérence entre les granulats et la pâte [7].

Si les températures extrêmes sont prévues, les propriétés thermiques des granulats doivent être connues [33].

## **I.2/ LES PROPRIETES ESSENTIELLES DES BETONS (CONVENTIONNELS ET RECYCLES) :**

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

Les propriétés des bétons qui en découlent des granulats ne sont pas toujours observatrices. Le béton de granulats recyclés (RAC<sup>1</sup>) de point de vue morphologie est identique à un béton de granulats naturels (NAC<sup>2</sup>) ce qui les différencie se sont les granulats. Dans ce contexte, nous présentons un état des lieux de l'influence des granulats sur les propriétés du béton et plus particulièrement le cas des granulats recyclés.

### **I.2.1/ LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES:**

#### **▪ INFLUENCE DES GRANULATS SUR LA MANIABILITE:**

La maniabilité est une caractéristique d'aptitude à la mise en œuvre d'un béton [59]. Sa mesure, est appréciée à l'aide de différents appareillages dont le plus répandu est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams encore appelé slump-test.

Pour un béton classique, cette caractéristique est souvent difficile à quantifier à cause de la conjugaison de plusieurs paramètres intrinsèques de la composition d'un béton (le dosage en eau, le dosage et la nature du liant, la forme et la texture des granulats, la granulométrie et la dimension maximale du granulat) [7, 60]. D'autres paramètres, s'ils ne sont pas contrôlés, peuvent affecter d'avantage la maniabilité tels que : le malaxage, le

---

<sup>1</sup> RAC : recycled aggregate concrete : béton de granulats recyclés

<sup>2</sup> NAC : natural aggregate concrete : béton de granulats naturels

transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants [59].

La quantité d'eau, nécessaire pour une maniabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats [61]. Il est préconisé de réduire le diamètre et la quantité des plus gros granulats afin d'éviter la ségrégation [10, 62]. Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse (tels que les granulats concassés et recyclés) nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [24, 7], de plus, leur coefficient de frottement relativement important, les rend défavorables pour la maniabilité [10, 62].

La présence de fillers favorise la maniabilité du béton, en facilitant le mouvement des granulats. L'influence des propriétés des granulats sur la maniabilité diminue à mesure que le mélange devient plus riche en ciment [10, 63] et peut même disparaître lorsque le rapport G/C est de l'ordre 2,5 ou de 2 [7, 61].

L'ouvrabilité des bétons recyclés est généralement affectée par la capacité d'absorption d'eau des granulats [39, 64, 65]. La forme et la texture des granulats peuvent également affecter l'efficacité de l'ouvrabilité des bétons cités. Cela dépend du type de broyeur utilisé [39].

La forte absorption d'eau est attribuée à la présence de l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés et plus celui-ci est important plus la maniabilité se réduit davantage [66]. D'après certaines expériences, les bétons recyclés à base de granulats recyclés et sable naturel nécessitent 5 % d'eau que le béton conventionnel avec la même ouvrabilité [40, 67, 68]. Certains chercheurs conseillent l'utilisation des granulats recyclés saturés en eau ou très humides. [69]

D'après une étude menée par M. BARRA & ALL. (1998) [70], lorsque les granulats recyclés sont saturés, la zone interfaciale n'est pas efficace, et pour l'améliorer une humidification des granulats à 80-90 % (plus proche de saturation).

## **I.2.2/ LES PROPRIETES PHYSIQUES**

### **▪ INFLUENCE DE L'INTERFACE PATE DE CIMENT-GRANULAT:**

Certaines observations montrent clairement que la microfissuration dans le béton provient de la zone interfaciale et que, à la rupture, le réseau de fissuration passe par ces interfaces. Les caractéristiques minéralogiques des granulats fins ainsi que les granulats ayant une couche externe poreuse ont une influence sur la microstructure de l'aurole de transition, ils entraînent la formation d'une zone plus dense [7].

Les bétons recyclés présentent deux zones interfaciales : l'une constituée dans le granulat recyclé (liaison granulat-pâte ancienne) et l'autre nouvellement créée entre le granulat

recyclé (y compris le mortier ancien) et la pâte cimentaire nouvelle [39]. Ces zones doivent être prises en considération lors de l'étude de la perméabilité et la résistance du béton.

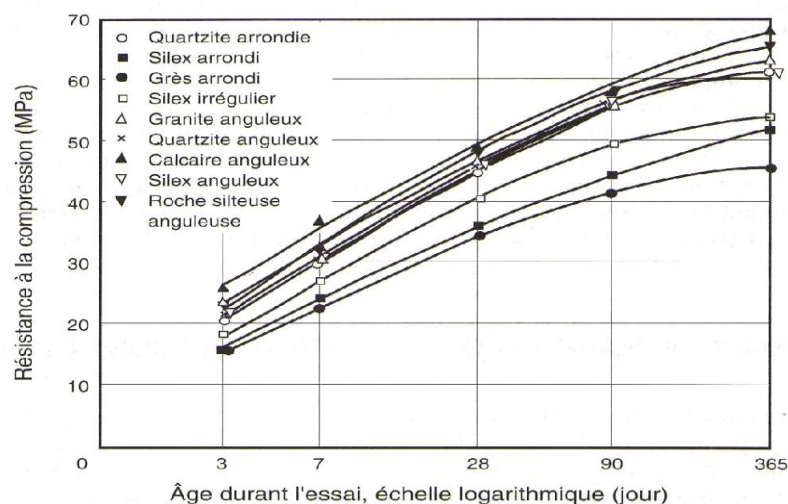
▪ **INFLUENCE DE L'ANCIEN MORTIER COLLE AU GRANULAT DE BETON RECYCLE:**

Une des tares du granulat issu de la démolition, est l'ancien mortier collé au granulat et qui ne peut être éliminé facilement. Sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulat-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. KOKUBU & UENO (2000) [71] a 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.

▪ **INFLUENCE DE LA FORME ET LA TEXTURE DE SURFACE DES GRANULATS :**

La forme et la texture des granulats influencent considérablement la résistance des bétons [72]. Celle-ci dépend en grande partie des propriétés du gros granulat, elle est plus faible lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés, de forme angulaire et de surface rugueuse. [7]. La résistance à la compression des bétons à base des granulats lisse est 10 % inférieures à celle des bétons à base des granulats rugueux [7].

L'influence du type de gros granulats sur la résistance du béton est fonction du rapport E/C. Cette influence des granulats sur la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C [7, 73], comme le montre la figure (I.9).



**Figure I.9:** Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats ( $E/C=0,50$ ) [7].

---

L'influence des granulats sur la résistance à la flexion dépend également de l'état d'humidité du béton au moment de l'essai [7].

▪ **INFLUENCE DE LA FORME ET LA TEXTURE SUR LA LIAISON PÂTE-GRANULAT:**

D'après des analyses microstructurales [24, 47] sur un béton, il a été démontré que l'interface pâte de ciment granulat présente la zone la plus poreuse et donc la plus critique pour la perméabilité et la durabilité du béton.

La texture de la surface du granulat affecte cette liaison avec la pâte de ciment et par conséquent influence la résistance du béton (particulièrement celle de la traction) [7, 24, 72].

La liaison pâte de ciment-granulat a été trouvée meilleure avec des granulats concassés, à cause de leur texture plus rugueuse, qu'avec des granulats roulés [7, 74].

La texture des granulats concassés, entraîne une meilleure adhésion entre les granulats et la matrice de ciment, à condition que ceux-ci ne contiennent pas des matières nuisibles à l'adhérence telles que les poussières de concassage. Des granulats plats et allongés sont généralement friables, donc ils sont à proscrire.

Il peut arriver que la résistance de la liaison soit inférieure à celle de la traction de la pâte de ciment hydraté ce qui provoque un décollement des granulats de la pâte [7, 75], un phénomène qui a été observé en utilisant des granulats de quartzite [75]. Bien que ces granulats possèdent une résistance élevée, la résistance du béton dans lequel ils ont été introduits, a été jugée très faible à cause de leur surface lisse entraînant le décollement de la pâte de ciment lors de l'application d'un effort.

Une autre expérience [24] a été menée sur deux bétons du même dosage et même plasticité, l'un avec des granulats calcaire, l'autre avec des granulats siliceux. On a constaté que malgré la qualité de dureté du silex bien supérieur à celle du calcaire, on a en traction, une résistance nettement plus élevée avec du calcaire qui présente une rupture au niveau des grains contrairement au silex qui subit un décollement des graviers de la pâte de ciment.

On peut conclure que les graviers calcaires génèrent une bonne adhésion à cause de leur surface rugueuse.

Les granulats plats et allongés ont un effet défavorable pour la durabilité des bétons, car les granulats plats tendent à s'orienter dans une direction créant des drains et l'eau de ressuage ainsi que les vides d'air se concentrent autour d'eux [24].

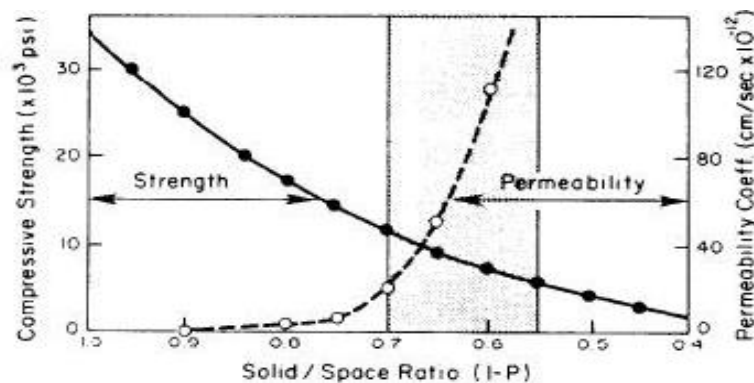
▪ **PERMEABILITE, POROSITE ET ABSORPTION D'EAU:**

Pour la bonne conservation (durabilité) du béton, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité, à l'eau, à l'air ou à certains gaz et de résistance à la diffusion d'ions. Même si les mécanismes et les lois qui les régissent sont différents, les moyens

d'action limitant ces effets sont les mêmes : limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire.

La perméabilité du béton se singularise par la perméabilité de la pâte de ciment et la perméabilité des granulats. Si la perméabilité de la pâte de ciment hydraté est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. Tandis que celle des granulats naturels se distingue par la nature des pores qui sont habituellement non interconnectés en plus lorsque les granulats sont enrobés par la pâte de ciment, ceux-ci ne participent presque pas à la perméabilité du béton [7]. En revanche, l'utilisation de granulat de grand diamètre et avec une grande proportion augmente la perméabilité [76], qui a été remarquée plus aigue dans l'interface pâte granulat. Il est à noter que la perméabilité du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C.

On ne peut parler de perméabilité sans évoquer la porosité dont le volume seul n'influe pas de manière significative sur la perméabilité. Celle-ci est en fonction de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et la continuité des pores. Etant donné que cette relation perméabilité-porosité est très étroite, elle constitue un paramètre déterminant de la durabilité du béton comme l'illustre la figure (I.10).



**Figure I.10** : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.

Le volume des pores d'un béton, indépendamment de la facilité avec laquelle un fluide peut le traverser, se mesure par l'absorption d'eau. Celle-ci est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Le processus d'absorption d'eau peut être qualifié par deux paramètres : l'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires, et l'absorptivité, représentative du volume des capillaires fins [78].

L'un des problèmes majeurs de l'utilisation des granulats recyclés dans le béton structurel, est leur fort pouvoir absorbant menant à des difficultés de contrôle des propriétés

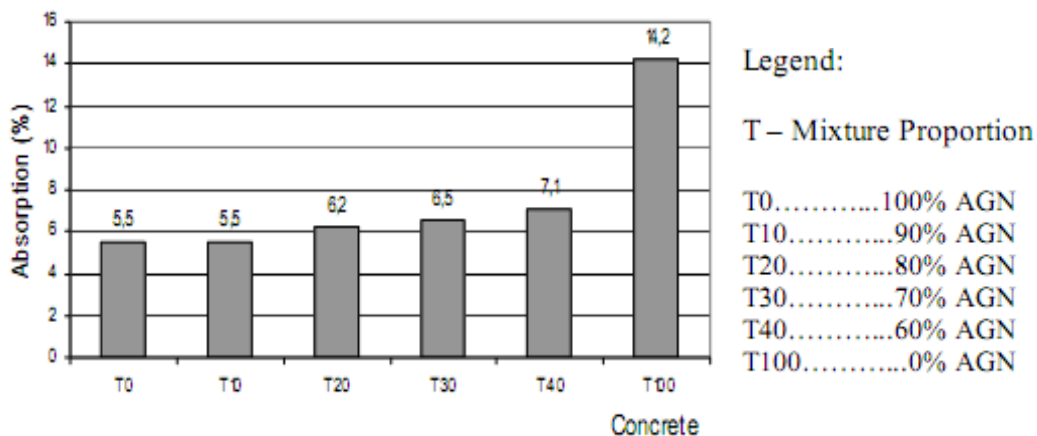
du béton frais et par conséquent la résistance et la pérennité du béton durci se trouvent amoindries [59]. L'absorption d'eau un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agressions telles que l'attaque par les sulfates, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible. L'emploi du béton mixte à base de sable naturel et du gravier recyclé est fortement recommandé pour des conditions d'agressivité moyenne [78].

Lors de la fabrication de ces bétons, il est difficile de maintenir une ouvrabilité constante compte tenu de la grande absorption d'eau des granulats recyclés. Il ressort que le matériau posant le plus de problèmes est le sable recyclé. L'élaboration des bétons contenant des sables et graviers recyclés demande donc quelques précautions particulières:

- l'utilisation d'un superplastifiant permet de résoudre en partie les problèmes de confection et d'assurer un comportement acceptable ;
- un prémouillage éventuel des granulats est nécessaire afin d'améliorer la mise en œuvre du béton et de réduire les migrations d'eau de la pâte de ciment vers les granulats ;
- un moyen certain d'atteindre la classe de résistance escompté est l'ajout de ciment d'environ  $50 \text{ kg/m}^3$  par rapport aux bétons contenant du sable naturel [79].

L'absorption d'eau d'un béton recyclé est plus élevée que celle du béton naturel (presque 3 fois). OLORUNSOGO & PADAYACHEE (2002) [80] ont constaté que l'eau absorbée par un béton à 100% de granulats recyclés était d'environ 39% plus élevée que celui du béton à base des granulats naturels après 28 jours de séchage.

La figure (I.11) montre les différents pourcentages d'absorption d'eau des bétons avec différents pourcentages de granulats recyclés.



**Figure I.11:** L'absorption d'eau des bétons [81]

---

**▪ RETRAIT ET FLUAGE :**

Le retrait et le fluage sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Ces déformations doivent donc, en toute circonstance, être prises en compte.

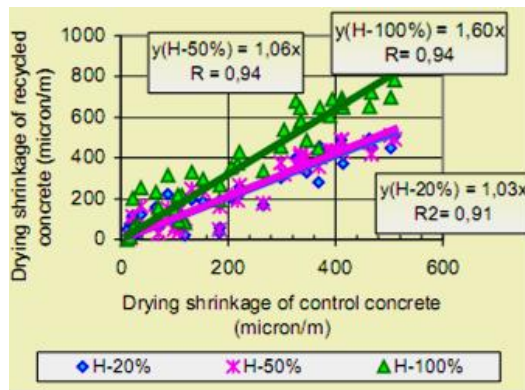
Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire, est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favorisée par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés [24], par la présence des argiles et fines dans les granulats [10] et à la grandeur du module élastique de ces derniers [77]. Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment [77].

Généralement les granulats naturels ne sont pas sujets au retrait, mais il existe des roches dont le retrait voisine celui d'un béton à granulats sans retrait, le cas rencontré avec certaines roches sédimentaires [7]. Le calcaire est classé comme granulats sans retrait, en revanche, sa dilatation très faible diminue les propriétés thermiques du béton car les granulats calcaires peuvent présenter des différences significatives au niveau du coefficient de dilatation avec la pâte de ciment, qui peut rompre la liaison pâte granulats [7].

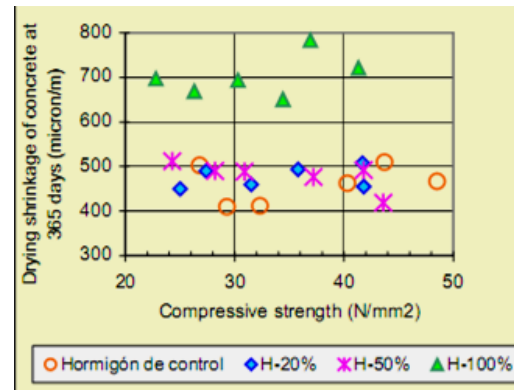
Les bétons à base de granulats de recyclage tendent à avoir un retrait et un fluage plus importants. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats de recyclage. Le retrait et le fluage sont signalés excessifs en cas d'utilisation de sable de béton concassé et le mouillage préalable des granulats, selon une étude [82]. Il a été préconisé par celle-ci de remplacer pour atténuer les effets du retrait et fluage, le sable issu du béton recyclé par un sable naturel. HASABA & ALL. [83] ont signalé que le retrait de séchage du béton à base de granulats recyclés et de sable naturel est de 50% plus élevé que celui du béton conventionnel, et lorsque on utilise les deux granulats recyclés (gros et fins), le retrait de séchage du béton recyclé peut augmenter jusqu'à 70% plus élevé que celui de béton conventionnel. Ces auteurs soutiennent que le facteur responsable qui a induit l'effet de retrait dans ce type de béton, est la forte absorption d'eau des granulats recyclés.

Certaines études KATZ (2003) [84] montrent qu'à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ 0,55 à 0,8 mm/m pour un béton recyclé, alors que la valeur comparable pour le béton conventionnel est seulement d'environ 0,30 mm/m. Sur d'autres études [84] l'effet de la teneur en granulats recyclés n'aboutit à aucune différence notable dans le retrait si cette teneur ne dépasse pas 50% comme l'illustre bien la figure (I.12). Sur celle-ci est présentée une comparaison de mesures de retrait sur des spécimens de bétons fabriqués de 20, 50 et 100% de granulats recyclés. A des taux de 100% de recyclés, la différence est bien évidente néanmoins. Des constatations similaires ont été aussi obtenues en reliant le retrait à la

résistance à la compression comme nous le montre la figure (I.13), avec des pourcentages en granulats recyclés de 20 et 50% les valeurs présentées se situent sur une même plage de valeurs enregistrées avec le béton de référence, tandis que l'échantillon à 100% de recyclage en granulats, ses valeurs sont bien éloignées.



**Figure I.12:** Relation entre les retraits des bétons recyclés et un béton conventionnel



**Figure I.13:** Relation entre la résistance à la compression et le retrait du béton [85].

Des résultats du test de fluage mené dans des conditions normales en laboratoire sont à contre sens de ce qui a été avancé précédemment et après 1 an de chargement le fluage est donné environ 20% de moins que pour un béton [50]. Bien qu'un travail supplémentaire dans le domaine soit indispensable pour confronter les résultats, il semble que les comportements du RAC et du NAC ne sont pas comparables lors de la visualisation de l'effet combiné du retrait et le fluage.

### I.2.3/ LES PROPRIETES MECANIQUES:

#### ▪ RESISTANCE A LA COMPRESSION :

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats [7]. D'après certains auteurs [86, 87], les bétons fabriqués avec des granulats recyclés obtiennent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances à la compression équivalentes à celles d'un béton conventionnel.

La résistance à la compression des bétons à base de granulats de recyclage est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Celle-ci dépend à son tour de la densité brute des granulats. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons de recyclés est généralement moindre. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulats naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [88]. Néanmoins, la résistance du béton ne soit pas seulement due à la résistance

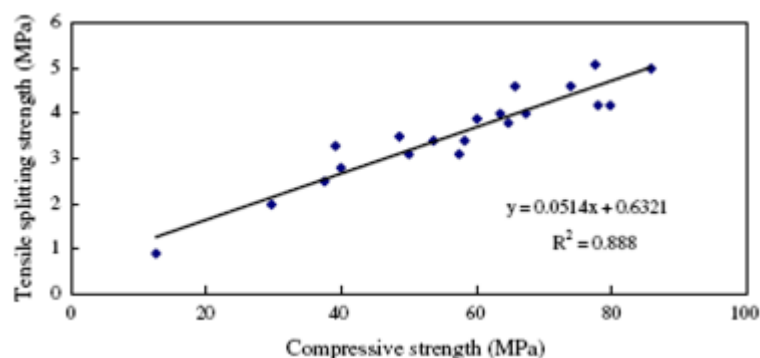
mécanique des granulats, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

Selon TASH ET ADELFAH (2009) [89], les RAC peuvent rivaliser les bétons conventionnels s'ils sont riches en gravier que de vieux mortier.

Avec des moyens techniques spécifiques lors de la préparation du béton, une teneur en ciment accrue (d'environ 10%) et un rapport E/C réduit, des bétons de résistance comparable à celle du béton de granulats naturels peuvent être atteints. D'après une étude faite par B. GONZALEZ FONTEBOA (2005) [90], un béton préparé avec 50 % de granulats recyclés humides et  $E/C = 0,55$  donne la même résistance en compression qu'un béton conventionnel.

▪ **RELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A CELLE DE TRACTION :**

La résistance à la traction ( $R_t$ ) augmente avec la résistance en compression ( $R_c$ ), mais à un taux allant en diminuant. Plusieurs facteurs influent sur la relation entre les deux résistances : les gros granulats concassés, les propriétés des granulats fins, la granulométrie des granulats et l'âge du béton. Un certain nombre de formules empiriques reliant  $R_t$  et  $R_c$  ont été proposées. L'expression suivante semble donner la meilleure relation entre  $R_t$  et  $R_c$ :  $R_t = 0,2(R_c)^{0,7}$  (I.2), où les résistances sont exprimées en MPa [7]. Pour le béton recyclé, la figure (I.14) décrit la relation étroite entre la résistance à la traction par fendage et la résistance en compression [66].



**Figure I.14:** Rapport entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression [66].

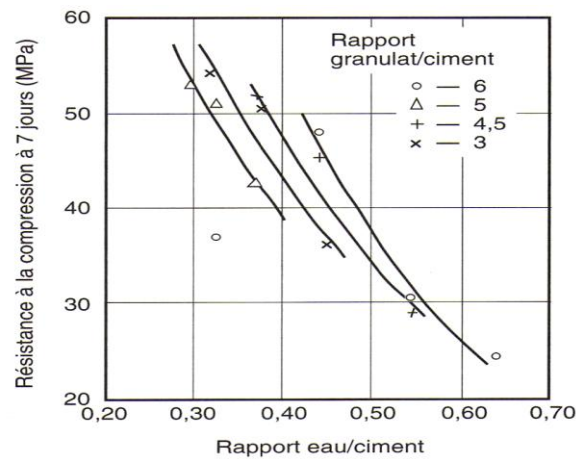
▪ **INFLUENCE DE LA QUANTITE DE LIANT SUR LA RESISTANCE :**

Une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance surtout à court terme. La résistance du béton est liée au type et la classe de ciment [59], tandis que la forte teneur en ciment des bétons affecte la résistance de tous les bétons de résistances moyennes ou très élevées (> 35 MPa) [10].

Pour atteindre la même résistance à la compression du béton conventionnel, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment dans le béton à base de gros granulats recyclés de 5 à 9 % et de 15 à 20 % dans le béton à base de sable recyclé [39].

▪ **INFLUENCE DU RAPPORT G/C SUR LA RESISTANCE :**

Le rapport G/C est un facteur de moindre importance sur l'évolution de la résistance. Avec un rapport E/C constant, il a été démontré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant [7, 91] figure (I.15). L'explication la plus probable est le faible pourcentage des vides par rapport au volume total de béton.



**Figure I.15:** Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [7]

Les études faites sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons indiquent que lorsque le pourcentage du volume des granulats augmente de 0 à 20 % par rapport au volume total, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, c'est une augmentation qui a été enregistrée [7].

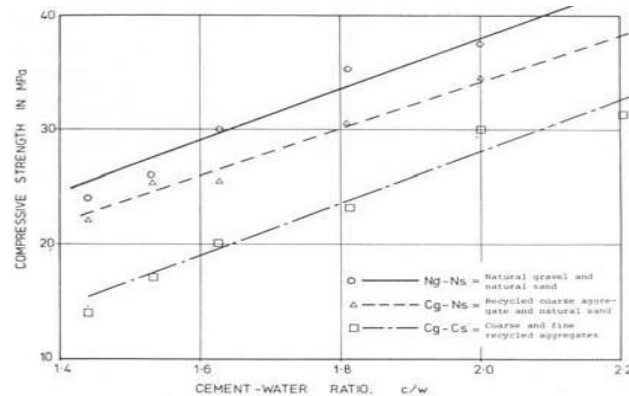
▪ **INFLUENCE DES GRANULATS SUR LE RAPPORT E/C :**

Il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance.

Pour des rapports E/C < 0,4, la résistance à la compression est majorée de 38%, lorsque le béton est fabriqué avec des granulats concassés que ceux roulés et pour des rapports E/C = 0,65 la résistance ne varie pas [7].

La rétention d'eau par les granulats recyclés, conduit à réaliser les bétons recyclés avec des rapports E/C supérieurs à ceux des bétons classiques [51], MUKAI & ALL (1979) [92] propose une relation entre le rapport E/C et la résistance de compression en fonction du pourcentage des granulats recyclés utilisé selon la figure (I.16).

TAVAKOLI & SOROUSHIAN (1996) [93] ont démontré qu'un béton composé de 100 % de granulats recyclés avec un rapport E/C plus faible que celui d'un béton conventionnel, donne une résistance à la compression plus élevée que celle relevée avec celui-ci. Tandis que pour un rapport E/C égale, la résistance à la compression du béton avec 100 % de granulats recyclés est faible que celle du béton conventionnel [85].



**Figure I.16:** Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression [7].

#### ▪ INFLUENCE DE L'ORIGINE ET RESISTANCE DES GRANULATS:

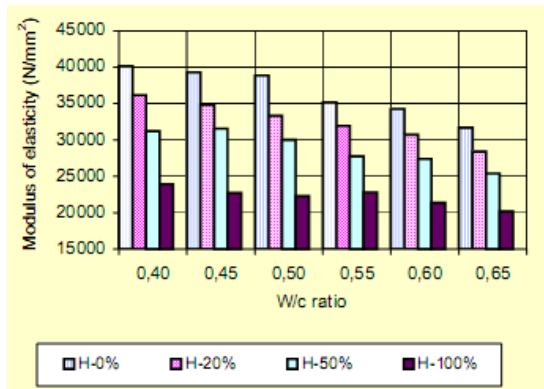
Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, ce qui revête que la qualité de ces derniers est d'une grande importance sur la résistance à la compression du béton. Celle-ci ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats et cela dépend d'une part, de la nature de la roche mère qui a été concassée ou usée à la dimension actuelle [81, 94] et d'autre part, du processus de concassage adopté [95].

Une éprouvette de béton soumise à la compression contient plusieurs granulats rompus, cela signifie que la résistance du granulat est inférieure à la résistance nominale du béton. Cas rencontré avec l'utilisation des latérites comme granulats beaucoup plus répandus dans les pays subsahariens [75].

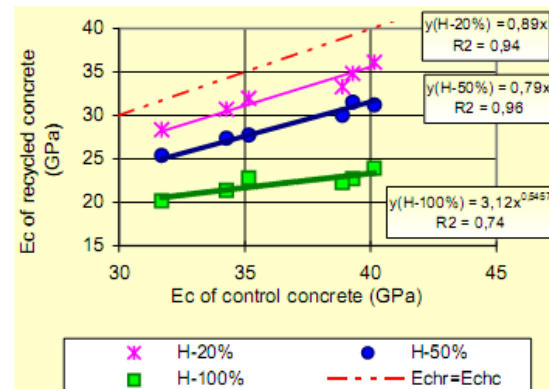
#### ▪ MODULE D'ELASTICITE (E) :

Le module d'élasticité est l'une des propriétés les plus touchées de bétons recyclés, même à des taux de substitution faibles en granulats recyclés [81]. Le module d'élasticité du béton recyclé a été signalé comme étant de l'ordre de 50-70% par rapport à celui du béton ordinaire, comme l'ont rapporté certains auteurs [50, 96, 97, 98]. Ceux-ci ont constaté qu'avec des niveaux de remplacement en granulats recyclés de 20, 50 et 100% dans des bétons, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont de 10, 20 et 40% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel [85] comme l'illustre la figure (I.17). Sur celle-ci on remarque que la perte de rigidité pour les bétons recyclés s'accroît d'avantage avec l'accroissement du rapport E/C. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et du béton recyclé

lorsque la substitution en recyclés est partielle (20 et 50%) et elle devient médiocre lorsque le taux de remplacement est à 100% et ceci est bien représenté sur la figure (I.18).



**Figure I.17:** Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en recyclés et le rapport



**Figure I.18:** Relation entre les modules élastiques des bétons recyclés et conventionnels à différent taux de

#### ▪ ADHERENCE ENTRE LE BETON RECYCLE ET LES ARMATURES :

Etant donné que le béton de structure est utilisé dans la majorité des cas avec des armatures, la résistance de liaison entre les deux matériaux est d'une importance considérable du point de vue du comportement structural. Dans une structure, l'adhérence dépend des propriétés du béton, la géométrie et l'état de surface rugueuse ou lisse des armatures et l'épaisseur d'enrobage.

Pour le cas des bétons recyclés, très peu de travaux ont abordé le sujet de l'adhérence acier-béton recyclé. Il a été constaté néanmoins que la contrainte d'adhérence entre le béton et l'armature diminue de 6 et 12 % pour un remplacement des granulats recyclés de 50 et 100 % respectivement, en utilisant les armatures lisses. Alors que cette contrainte pour le cas des aciers hautes adhérences et le béton recyclé, est similaire à celle pour le béton naturel par test pull-out, quelque soit le pourcentage de remplacement des granulats [50].

#### I.2.4/ DURABILITE:

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons. L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation et l'absorption d'eau est la tare essentielle qui compromet la durabilité.

L'absorption d'eau par immersion et le volume total des pores sont considérés comme les meilleurs indicateurs de la longévité potentielle du béton que l'absorption par capillarité qui donne une indication macroscopique du réseau poreux puisque le béton n'est pas totalement en état de saturation d'eau. WIRQUIN & ALL. [78], ont rapporté dans une étude, que le processus d'absorption d'eau d'un béton recyclé est similaire à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Toutefois, les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau. Cela est dû à la taille plus grande des gros capillaires et à la proportion en volume plus importante des petits capillaires, ce qui les rend a priori plus vulnérables à la pénétration des agents agressifs. Ceux-ci sont sous forme d'eau, d'ions ou de gaz qui pénètrent dans le béton et peuvent changer la cinétique de dégradation du béton pendant la durée de vie de l'ouvrage. Les pathologies les plus abordées par la littérature pour le cas du RAC sont ; la carbonatation, l'alcali-réaction et le gel-dégel.

La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulats naturel, affecte davantage cette dureté, donc sa qualification [88]

▪ **LA CARBONATATION :**

En raison de sa porosité plus élevée, la profondeur de carbonatation devrait être en principe plus importante pour un RAC que pour un NAC. Or, selon une étude [99], faite sur le recyclage de granulats de béton recyclé et de granulats de maçonnerie, la profondeur de carbonatation diminue quand la quantité d'agrégats réutilisés augmente, présentant un meilleur comportement quand ce remplacement était 20% ou 50%. Même à 100% de remplacement le niveau de carbonatation était pareil à celui observé pour un NAC. L'explication de ceci est le dosage en ciment plus important pour un RAC pour atteindre la résistance mécanique d'un NAC ce qui fait accroître l'alcalinité du milieu. En plus de ceci, les granulats recyclés sont constitués en partie par du vieux mortier dans lequel le ciment peut contenir de l'hydroxyde de calcium qui augmente davantage l'alcalinité. Sur un autre plan, la saturation en eau (lors de l'absorption et un rapport E/C élevé) pourrait ralentir la diffusion du CO<sub>2</sub> et celle-là est importante lorsque le taux de remplacement en granulats de recyclage augmente.

▪ **ALCALI REACTION :**

La réaction alcali-grulats est une pathologie des bétons, qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages, les plus sévèrement exposées à l'humidité et se caractérise par la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un

décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures qui se matérialise en surface par une fissuration à multi orientation. Cette pathologie ne peut se produire que lorsque trois conditions soient réunies simultanément : présence d'un granulats potentiellement réactif, des alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) en quantités suffisantes dans la solution interstitielle ( $\text{pH} > 12,5$ ) pour maintenir une concentration en ions hydroxydes élevée et des conditions d'humidité relative excèdent 80-85% [100].

Pour le cas de la réutilisation des granulats de béton recyclé, très peu de sujets ont été trouvés dans la littérature sur le cas l'alcali-réaction. La pathologie ne peut se produire que si les granulats recyclés sont dès l'origine réactifs et celle-ci peut avoir lieu lorsque les granulats réactifs n'ont pas trouvé les conditions favorables à leur réaction avant la réutilisation (c'est à dire ils étaient en milieu sec ou par manque d'alcalins) ou bien venant du vieux mortier contenant encore une réactivité résiduelle dans la fraction sable [101].

#### ▪ LE GEL-DEGEL :

Un granulats ne sera pas sensible au gel s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macrospores (qui jouent le rôle de bulles d'air). Le volume d'eau susceptible de geler ne doit pas excéder le volume des vides de l'air entraîné du béton. Cette condition se traduit par la nécessité d'avoir un apport E/C suffisamment faible, ce qui assure par la même une bonne résistance au béton qui peut mieux résister aux forces de dégradation induites par le gel. Le béton de granulats recyclés n'échappe pas à cette règle et il est plus exposé à de telles dégradations à cause du fort taux d'absorption d'eau par les granulats.

Plusieurs travaux ont été entrepris relativement à l'utilisation de granulats recyclés disponibles sur le marché ou fabriqués à partir de bétons de laboratoire, avec ou sans un bon réseau d'air, ont indiqué que le comportement au gel des bétons élaborés uniquement à partir de granulats recyclés est assez médiocre, mais l'emploi des bétons à base de sable naturel et de gravillon recyclé dans des conditions de gel modéré peut être envisagé [79]. La mesure de la gélivité peut être quantifiée par la dégradation granulométrique des granulats soumis à des cycles gel-dégel ou bien à partir de la résistance gel-dégel du béton, mais aucune relation simple entre ces essais n'a été établie. Il en résulte que les faibles performances au gel du RAC provenaient des bétons réutilisés ayant déjà un mauvais réseau d'air ou comportés déjà des fissurations occasionnées lors de la fabrication (en concassage) [102].

Des essais ont été menés dans le but d'améliorer la durabilité au gel des bétons de granulats recyclés par une reconfiguration de la composition, ou par des inclusions d'agents antigel. Selon SALEM & BURDETTE (1998) [103], la méthode de l'air entraîné est la meilleure façon d'améliorer la résistance au gel des granulats recyclés, cependant, cette méthode affecte quelques propriétés physiques des bétons. M. BARRA & VAZQUEZ (1996) [104], ont fait

observer que les mauvais résultats de la résistance au gel des RAC sont obtenus par l'utilisation des granulats à l'état saturé ou sec et que ces bétons devenaient bons avec les granulats prémouillés préalablement.

### **I.3/ CONCLUSION:**

D'après ce qui a été présenté dans cette partie bibliographique, on peut conclure que :

- ✓ La typologie et la qualité des déchets de construction et de démolition se diffèrent d'un pays à un autre et leur recyclage est beaucoup plus à caractère environnemental qu'économique.
- ✓ La présence de la gangue de ciment (mortier collé aux granulats) complique le choix des techniques de fabrication et par conséquent la présence de fortes impuretés risque de s'accroître.
- ✓ La déconstruction sélective des constructions est indispensable, choix plus coûteux mais assure des granulats de bonne qualité.
- ✓ Par leur fort taux d'absorption d'eau, les granulats recyclés verront leur champ d'application se rétrécir. Ils présentent des mauvaises performances vis-à-vis du gel-dégel.
- ✓ Les résultats relevés dans la littérature sont perplexes sur le volume de substitution des granulats recyclés, ce qui nécessite d'autres investigations pour mieux qualifier les RAC.
- ✓ Les expériences relevées dans le domaine de recyclage distinguent les pays les plus développés (les pays les plus industrialisés) qui ont des soucis pour le développement durable et qui prennent l'environnement comme outil avant-garde.

Pour mieux connaître le comportement des bétons incluant des granulats recyclés, on a consacré le deuxième chapitre à la caractérisation des matériaux utilisés et la formulation des bétons.

## **CHAPITRE II:**

**CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

**ET FORMULATION DES BETONS**

## **II/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DES BETONS:**

A travers ce chapitre, on a présenté les matériaux utilisés dans cette étude et les techniques expérimentales pour caractériser ces matériaux ainsi que et la formulation des bétons.

### **II.1/ INTRODUCTION:**

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau, afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées.

Avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est recommandé de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants le béton (granulats, ciment, eau, adjuvant), en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés. Une fois le béton préparé, il doit subir des essais à l'état frais et durci, afin de matérialiser notre matériau et donc confectionner des ouvrages résistants, durables et économiques.

Ce deuxième chapitre est composé de trois parties :

- La première partie expose les modes opératoires des essais réalisés.
- La deuxième partie traite les caractéristiques des matériaux utilisés.
- La troisième partie concerne la préparation et la formulation des bétons.

### **II.2/ LES MODES OPERATOIRES DES ESSAIS:**

#### **II.2.1/ LE CIMENT:**

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est conforme aux normes NF P 15-301 et ENV 197-1 [105, 106]. C'est un ciment portland composé de classe CEM II 42,5, fabriqué à Hadjar Essoud Wilaya de Skikda.

#### **– Essais de Prise :**

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des liants hydrauliques afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des bétons. Les essais de prise se font à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille, Norme EN 196-3 [107]. Le but est de déterminer le temps de début de prise, qui correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, et la fin de prise qui est le moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

– **Essai de Consistance Normale :**

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme NF EN 196-3 [107]. Le but est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour le ciment. La consistance normale est atteinte lorsque la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule atteint  $6 \pm 1$  mm.

– **La finesse de mouture du ciment:**

La finesse de mouture est obtenue à partir du refus sur le tamis  $80\mu\text{m}$ , qui doit être inférieur à 15%, norme NF EN 196-6 [108], mais aussi par le perméabilimètre de Blaine, NF P 15-442 [109]. Les résultats sont fournis par la cimenterie de Hadjar Essoud.

– **La masse volumique apparente:**

L'essai consiste à remplir en matériau sec (ciment) un récipient vide de volume (V) du matériau sec (ciment) sans le tasser et le peser ensuite (M), pour en déduire la masse volumique. Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1097-3 [37].

$$Mv_{app} = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (\text{II.1})$$

Ou: M : La masse sèche du matériau, en (g).

V : représente le volume du récipient, en (ml).

– **La masse volumique absolue :**

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, on a appliqué la méthode de l'éprouvette graduée selon la norme NF P 18-558 [36]. L'essai consiste à verser une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte (mazoute), la différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique selon la formule (II.2):

$$Mv_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)} \times 1000 \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (\text{II.2}),$$

Ou: M : La masse sèche du matériau, en (g).

$V_1$  et  $V_2$  : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du ciment, en (ml).

– **La porosité:**

La porosité est déduite à partir des masses volumiques, qui est définie par la formule (II.3) suivante:  $P = \left[1 - (Mv_{app} / Mv_{abs})\right] \times 100$  (%) (II.3).

**II.2.2/ LES GRANULATS:**

Dans cette étude, on a utilisé trois types de granulats:

- Sable roulé (sable de mer), siliceux et fin provenant de la région d'Annaba;
- Granulats naturels (concassés), roche naturel calcaire d'origine locale extraite des carrières de Ben Azzouz dans la région de Skikda;
- Et granulats issus du concassage des bétons de démolition de structure (relativement propres), source : dalles préfabriqués de l'ancienne installation de préfabrication du béton à Sidi Amar - Annaba.

**II.2.2.1/ PREPARATION DES GRANULATS:**

On a choisi pour cette étude, de concevoir 3 classes granulaires 0/5, 5/12,5 et 12,5/20, et cela pour avoir des bétons ternaires avec un étendu granulaire meilleur et une formulation adaptée aux exigences voulues (Consistance et Résistance).

**– Nettoyage du sable roulé:**

On a procédé au tamisage du sable de mer sur le tamis 5 mm puis sur le tamis 0,8 mm pour éliminer toutes les impuretés organiques ou minérales existants dans le sable.

**– Fractionnement et préparation des granulats naturels concassés:**

Les granulats naturels concassés sont commercialisé avec des classes granulaires 0/5, 3/8, 5/15 et 15/25, et pour des raisons techniques ( $D_{max}$  est en fonction de dimensions des moules) et pour avoir un bon béton ternaire, on a procédé aux fractionnements des granulats pour avoir trois nouvelles classes: 0,5, 5/12,5 et 12,5/20. Notant que lors de la séparation (tamisage) des graviers, on a éliminé certaines quantités des fillers qui peuvent influencer la qualité des bétons.

**– Elaboration et préparation des granulats recyclés:**

L'élaboration des granulats recyclés est passée par plusieurs étapes:

Fragmentation des blocs du béton de démolition (dalles préfabriquées) à l'aide d'une presse hydraulique, et à l'aide d'un marteau on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées à l'ouverture du concasseur. Celui-ci est à doubles mâchoires l'un fixe et l'autre mobile. La dimension de l'ouverture de sortie du concasseur est réglée de telle façon que le matériau (mélange) qui sort du concasseur ait la dimension maximale du gravier. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires 0/5, 5/12,5 et 12,5/20.

En raison de la qualité hétérogène et la quantité insuffisante du sable obtenu lors du concassage, une réduction de l'ouverture des mâchoires a été procédée sur une partie de gravier recyclé afin d'obtenir un sable aux dimensions voulues.

**II.2.2.2/ ECHANTILLONNAGE:**

Les prélèvements des granulats naturels sont effectués en cours d'écoulement des matériaux, directement à partir de la trémie au niveau de la carrière. Et dans le laboratoire on a prélevé les matériaux sur le tas, en haut et en bas au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Le passage de l'échantillon total à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, a été fait selon les deux procédés d'échantillonnage: le quartage ou à l'aide d'échantillonneur. Et la quantité du matériau soumise à l'essai "la prise" est indiquée dans les modes opératoires NF P 18-553, EN 932-1 [21, 22].  $M \geq 9 \times D_{\max}^{0,5}$  (M en kg et  $D_{\max}$  en mm); ( $D_{\max} = 20$  mm, M = 40,0 Kg).

On appelle *prélèvement* une fraction constituant l'échantillon global. La masse doit être telle que  $M \geq 0,1 \times D_{\max}$  (M en kg et D en mm); ( $D_{\max} = 20$  mm, M = 2,0 Kg).

**II.2.2.3/ ESSAIS SUR GRANULATS:**

La série d'essais sur les granulats (naturels ou recyclés) a concerné la mesure des caractéristiques granulométriques, géométriques, mécaniques et physiques.

**■ ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE:**

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560 [110], elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ( $200D < M < 600D$ ) préalablement sécher dans une étuve ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat suivant :

- Pour le sable roulé: 0,8 - 0,5 - 0,315 - 0,2 - 0,125 - 0,08 mm.
  - Pour les sables concassés: 5 - 3,15 - 2 - 1,25 - 0,8 - 0,5 - 0,315 - 0,2 - 0,125 - 0,08 mm.
  - Pour les graviers: 20 - 16 - 12,5 et 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 mm.
- **Courbes granulométriques :** Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale du matériau et exprimées en pourcentage, servent pour tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D sont indiquées en abscisse.

### ▣ LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES GRANULATS :

#### – Le Module de Finesse ( $MF$ ):

Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540 [02], et calculé selon la formule (II.4) suivante:

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm)} \quad (\text{II.4})$$

#### – Le Coefficient d'Aplatissement ( $A$ ):

L'essai a été réalisé au niveau du laboratoire du LTPEst d'Annaba, selon la norme NF EN 933-3 [30]. Il consiste en une double opération de tamisage du même échantillon (4-20 mm) de granulats d'une masse  $M \geq 0,2D$ , en utilisant une série de tamis à maille carrées et une série de grilles à fente parallèles d'écartement  $E=D/2$ . Le coefficient d'aplatissement est calculé d'après la formule (II.5) suivante:

$$A = \frac{\sum_i M_{ei}}{\sum_1 M_{gi}} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{II.5})$$

Avec:  $M_{ei}$ : Masse de la classe granulaire;

$M_{gi}$ : Masse passant à travers le tamis à fente parallèles d'écartement  $E$  correspondant.

### ▣ CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES GRANULATS :

Les essais de dureté ont été réalisés au laboratoire LTPEst d'Annaba.

#### – Essai Los-Angeles ( $L_A$ ):

La résistance à la fragmentation (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles selon la norme NF P 18-573 [54], l'essai consiste à mesurer la masse ( $m$ ) d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los-Angeles en 500 rotations à une vitesse régulière [6].

L'essai Los-Angeles est pratiqué sur deux fractions 6,3-10 et 10-14 mm et le nombre de boulets est 9 et 11, d'une masse total 3 960 et 4 840 grammes respectivement. Les matériaux sont lavés, tamisés et séchés à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. Le coefficient Los-Angeles est déterminé par la formule (II.6):

$$L_A = \left( \frac{m}{M} \right) \times 100 \quad (\text{II.6})$$

Ou:  $m$  : représente le passant du matériau au tamis 1,6 mm après essai en (g).

$M$  : la masse initiale en (g),  $M = 5000 \pm 5$  g.

– **Essai Micro-Deval ( $M_{DE}$ ):**

La résistance à l'usure est déterminée selon l'essai Micro-Deval en présence d'eau, selon la norme NF P 18-572 [111], deux fractions 4-6,3 et 6,3-10 mm ont été testés pour chaque type de granulats avec une charge abrasive de  $2000 \pm 5$  et  $4000 \pm 5$  g respectivement. Le coefficient Micro-Deval est déterminé par la formule (II.7) suivante :

$$M_{DE} = \left( \frac{M - m}{M} \right) \times 100 = \left( \frac{m}{M} \right) \times 100 \quad (\text{II.7})$$

Ou:  $m$  : représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en (g).

$m'$  : représente la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm, en (g).

$M$  : la masse initiale sèche de l'échantillon en (g),  $M = 500 \pm 2$  g.

■ **CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRANULATS :**

– **Masse volumique apparente ( $M_{v_{app}}$ ):**

Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 [34] pour les graviers et NF P 18-555 [35] pour les sables. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume ( $V$ ) du matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité ( $M$ ), pour en déduire la masse volumique selon la formule suivante (II.8):

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{II.8}),$$

Ou:  $M$  en (g): La masse sèche du matériau.

$V$  en (L): représente le volume du récipient.

– **Masse volumique absolue ( $M_{v_{abs}}$ ):**

Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 [34] pour les graviers et NF P 18-555 [35] pour les sables. La méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue. La masse volumique est calculée selon la formule (II.9) suivante:

$$M_{v_{abs}} = \frac{M}{(V_2 - V_1)} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{II.9}),$$

Ou:  $m$  en (g): représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm.

$m'$  en (g): représente la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm.

– **Teneur en eau ( $W$  %) :**

La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon, elle est déterminée selon la norme NF P 18-554 [34] pour les graviers et NF P 18-555 [35] pour les sables. Elle est déterminée selon la formule suivante:

$$W = \frac{(M - M'_s)}{M'_s} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{II.10})$$

- $M$  en (g): la masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état.
- $M'_s$  en (g): la masse de cet échantillon, séché sans lavage.

– **Taux d'absorption d'eau ( $Ab$  %) :**

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes NF P 18-554 et NF P 18-555 [34, 35]. Il est déterminé selon la formule (II.11) suivante:

$$A_b = \frac{(M_a - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{II.11})$$

- $M_a$  en (g): la masse du l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche).
- $M_s$  en (g): la masse de l'échantillon séché à 105°C.

■ **PROPRETE DES GRANULATS:**

– **La propreté des gros granulats ( $P$ ):**

Elle est caractérisée par la teneur d'éléments fins indésirables, hydrophiles ou non. Ce sont soit des fines d'argile, soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches. La propreté des graviers est déterminée à partir de l'essai de propreté superficielle NFP 18-591 [45], l'essai est effectué par lavage d'une quantité de gravier ( $200D < M < 600D$ ) sur le tamis 0,5 mm et en déduire la différence de masse après séchage. Elle est déterminée d'après la formule (II.12) suivante:

$$P = \frac{(M_s - m')}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{II.12})$$

- $M_s$  en (g): la masse du dernier échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant.
- $m'$  en (g): la masse de l'échantillon séché à 105°C.

– **La propreté des sables (ES, VB):**

Le degré de propreté du sable est fourni par l'essai d'équivalent de sable (**ES**), selon la norme NF P 18-597 [42] et complété par l'essai au bleu de méthylène (**VB**), selon la norme EN 933-9 [44], ce dernier a été réalisé au niveau du laboratoire du LTPEst d'Annaba.

L'équivalent de sable est déterminé selon la formule suivante:

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{II.13})$$

- $h_1$  en (cm): la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension).
- $h_2$  en (cm): la hauteur du dépôt de sable visible.

La valeur du Bleu de Méthylène est déterminée sur la fraction 0/2 mm et calculée selon la formule suivante:

$$VB = \frac{V}{m} \quad (\text{II.14})$$

- $V$  en (ml): le volume du bleu de méthylène.
- $m$  en (g): la masse de l'échantillon (0-2mm).

### II.2.3/ LE BETON FRAIS:

■ **Malaxage et Vibration:**

Le malaxage des bétons a été fait dans une bétonnière électrique à axe inclinée, de capacité 30 litres. Le temps de malaxage est de 05 minutes dont 02 minutes de malaxage à sec. La mise en place du béton est réalisée sur une table vibrante (vibration externe), selon la norme NF P18 – 421 [112].

■ **Essai d'ouvrabilité du béton:**

L'ouvrabilité du béton est évaluée à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451 [113]. L'essai consiste à introduire le béton frais dans un moule tronconique (D=20, d=10, H=30 cm) en trois couches, où chacune subit 25 coups de piquage à l'aide d'une tige  $\phi$  16 mm, puis le moule est retiré lentement et on relève la mesure de l'affaissement en (cm).

■ **Mesure de la densité réelle du béton frais:**

La densité du béton frais est mesurée à partir de la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume après vibration. Elle est calculée selon la formule suivante:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (\text{II.15})$$

- $M$  en (g): la masse de la quantité du béton frais.
- $V$  en (ml): le volume du récipient.

**II.2.4/ LE BETON DURCI:**

Les essais réalisés sur le béton durci dans cette étude sont la mesure de la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage.

**■ RESISTANCE A LA COMPRESSION (R<sub>C</sub>):**

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté, L'essai est réalisé conformément à la norme BS 1881–partie 116 [114]. La presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5000 kgf. Les résultats sont obtenus par la formule suivante:

$$R_{C_j} = \frac{F}{a^2} = 0,102 \times F \quad (MPa) \quad (II.16)$$

Avec:  $R_{C_j}$ : Contrainte de compression à (j) Jours en "MPa".

$F$ : Valeur de la charge de rupture en "Kgf".

$a^2$ : Section de l'éprouvette en Cm<sup>2</sup>,  $a^2 = 100$  Cm<sup>2</sup>.

**■ RESISTANCE A LA TRACTION (R<sub>t</sub>):**

La résistance à la traction est déterminée par un essai de fendage sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm, conformément à la norme NF P 18-408 [115]. La presse est la même que celle utilisée pour l'essai de compression, et les résultats sont obtenus par la formule suivante :

$$R_{t,28} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot L} = 0,268 \times F \quad (MPa) \quad (II.17)$$

Avec:  $R_{t,28}$ : Contrainte de traction en "MPa".

$F$ : Charge de rupture en "Kgf".

$D$  et  $L$ : Diamètre (11 cm) et longueur (22 cm) de l'éprouvette cylindrique.

**II.3/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES:****II.3.1/ L'EAU:**

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet (potable), qui répond aux prescriptions de la norme EN 1008 [116].

**II.3.2/ LE CIMENT:**

La composition chimique et minéralogique du CEM II 42,5 utilisé pour la confection des bétons sont résumés dans les tableaux II.1 et II.2, qui sont élaborés à la base de la fiche technique fournie par le laboratoire de l'usine "Hadjar Essoud", en Annexe 03.

**Tableau II.1 :** Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé

CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	P.A.F 975 °C
59,5	5,0	23,0	3,0	1,5	0,13	0,45	0,01	2,5	3,0

**Tableau II.2 :** Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5 utilisé

C <sub>3</sub> S <sup>3</sup>	C <sub>2</sub> S <sup>4</sup>	C <sub>3</sub> A <sup>5</sup>	C <sub>4</sub> AF <sup>6</sup>
57,5	17,5	10,5	9,0

Les principales caractéristiques du ciment utilisé sont données par le Tableau II.3.

**Tableau II.3 :** Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé pour la confection des bétons.

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	kg/m <sup>3</sup>	1100
Masse volumique absolue	kg/m <sup>3</sup>	3100
Porosité	%	64,51
Consistance normale	%	27,0
Début de prise	h	2h.25mn
Fin de prise	h	5 h
Classe de résistance	MPa	42,5
Résistance vraie	MPa	35
Finesse de mouture	cm <sup>2</sup> /g	3200
Refus sur tamis 45 μ	%	22

### II.3.3/ LES GRANULATS:

#### I.3.3.1/ ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE:

Les différentes courbes granulométriques des granulats utilisés sont montrées sur la Figure II.2.

D'après la Figure II.2 on remarque que sauf le sable recyclé (SR) est un bon sable qui se trouve à l'intérieur de la zone normalisée, suite aux différents réglages des mâchoires du concasseur utilisé, alors que les autres sables sont soit très fins comme le sable de mer ou soit

<sup>3</sup> C<sub>3</sub>S: 3CaO.SiO<sub>2</sub>

<sup>4</sup> C<sub>2</sub>S: 2CaO.SiO<sub>2</sub>

<sup>5</sup> C<sub>3</sub>A: 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>6</sup> C<sub>4</sub>AF: 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

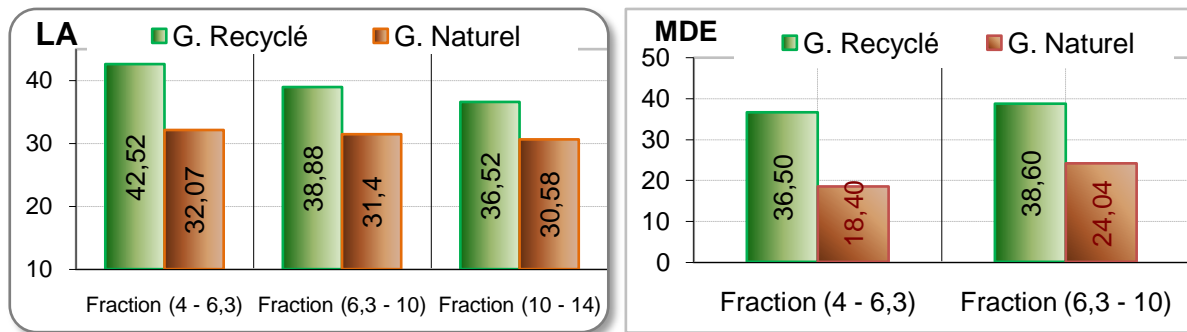
trop gros comme tous les sables naturels concassés. Pour les graviers, tous les graphes ont les mêmes allures avec une petite différence pour le gravier naturel concassé (GN 5/12,5) qui contient une quantité importante de la fraction 5-8 mm.

### II.3.3.2/ Caractéristiques Mécaniques:

Le Tableau II.4 récapitule les différents résultats obtenus lors des essais de caractérisation mécanique des granulats.

**Tableau II.4 :** Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés

Essai	MDE		LA	
	G. Naturel	G. Recyclé	G. Naturel	G. Recyclé
Fraction (4 - 6,3)	18,4	36,5	32,07	42,52
Fraction (6,3 - 10)	24,04	38,6	31,4	38,88
Fraction (10 - 14)	--	--	30,58	36,52



**Figure II.1:** Essais Los-Angeles et Micro-Deval sur les granulats naturels et recyclés

D'après les résultats obtenus, les granulats naturels présentent de bonnes résistances de dureté (Choc et Usure), tandis que les granulats obtenus à partir des bétons démolis présentent de faibles résistances. Ceci est probablement la conséquence de la quantité de mortier que le béton recyclé contient, et la nature (dureté) des roches mères des granulats d'une part et l'âge, la dégradation des bétons démolis (la carbonatation, l'alcali-réaction,...) d'autre part. Toutefois, ces granulats présentent des valeurs à la limite de celles prescrites par les normes pour le béton hydraulique. Les normes [117] limitent à la valeur de 40 pour l'essai Los-Angeles et à la valeur de 35 pour l'essai Micro-Deval.

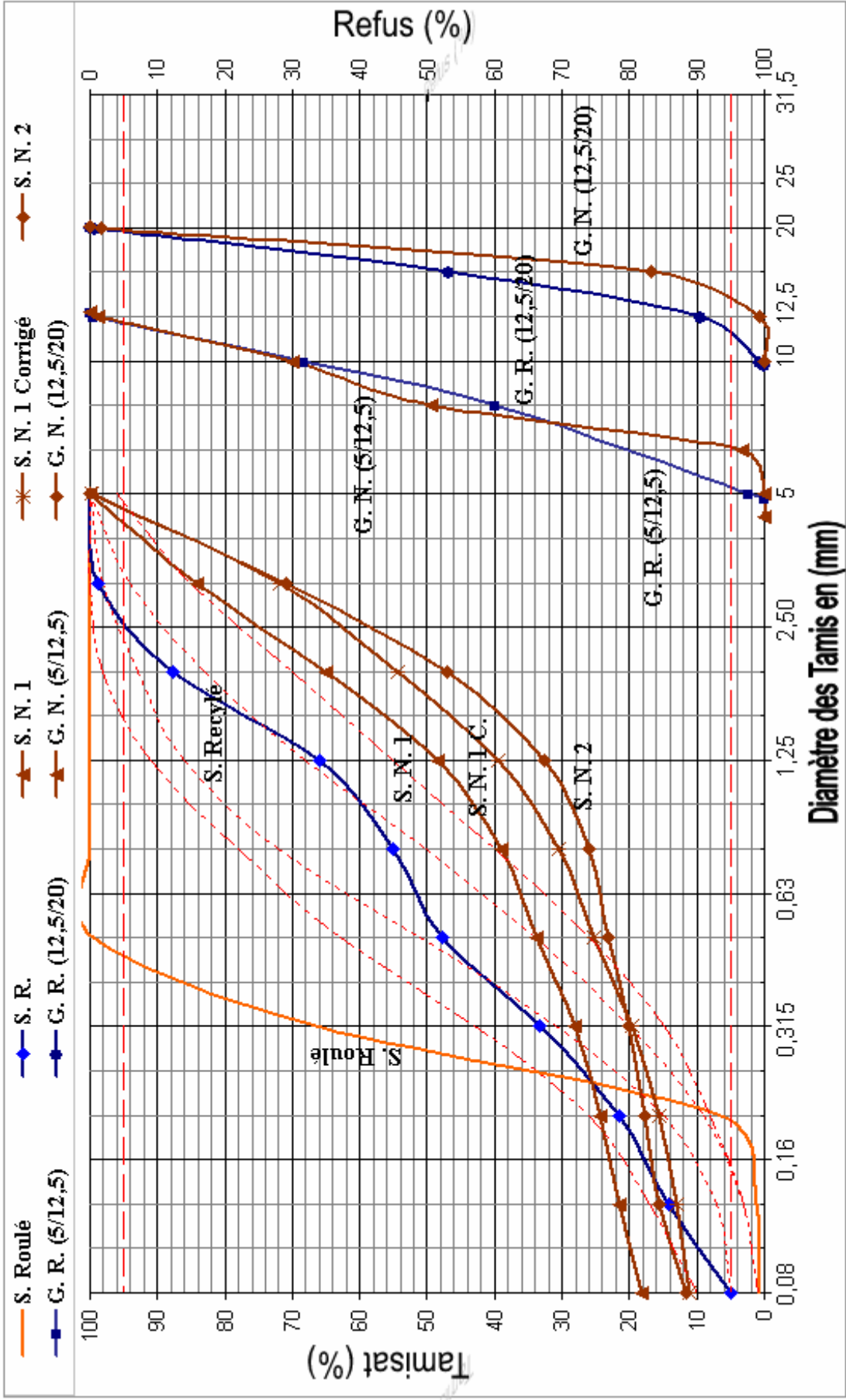


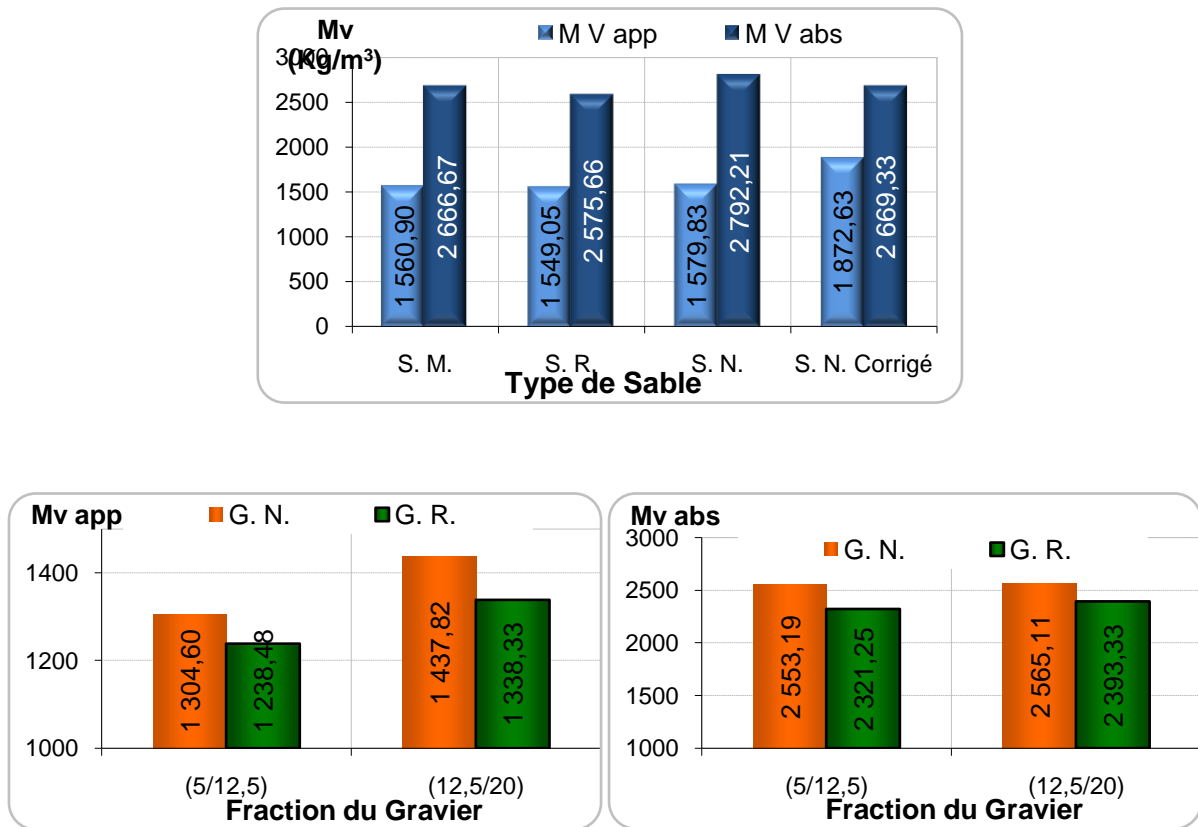
Figure II.2: Courbes granulométriques des différents granulats utilisés

**II.3.3.3/ Caractéristiques Physiques:**

Les principales caractéristiques physiques des granulats sont présentées dans le Tableau II.5.

Selon les modules de finesse des sables en comparaison aux normes peuvent être classer comme suit : le sable roulé "MF = 1,31 < 1,80" dans la classe B "trop fin", les sables naturels dans la classe C "trop grossier" (MF = 2,80 à 3,20), les deux sables rectifié (SN1C) (diminution du pourcentage des fines dans le sable) et le sable naturel 2 (SN2) sont des très gros sables avec MF = 3,38 et 3,48 et le béton à base de ceux-ci y perd son ouvrabilité mais le sable recyclé avec un "MF = 2,41" dans la classe A "préférentiel", suite à sa préparation au niveau du laboratoire avec soin.

Les masses volumiques des granulats recyclés que ce soit apparentes ( $Mv_{app}$ ) ou absolues ( $Mv_{abs}$ ) sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, roulés ou concassés Figure II.3. Ceci peut être expliqué par l'existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse d'une part et la nature (densité intrinsèque) des roches sources de ces granulats d'autre part.

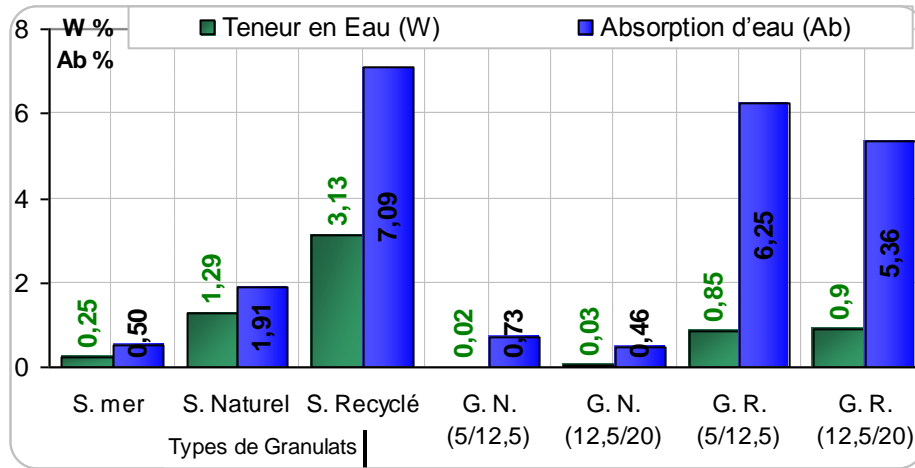


**Figure II.3:** Masses volumiques apparentes et absolues des différents types de granulats.

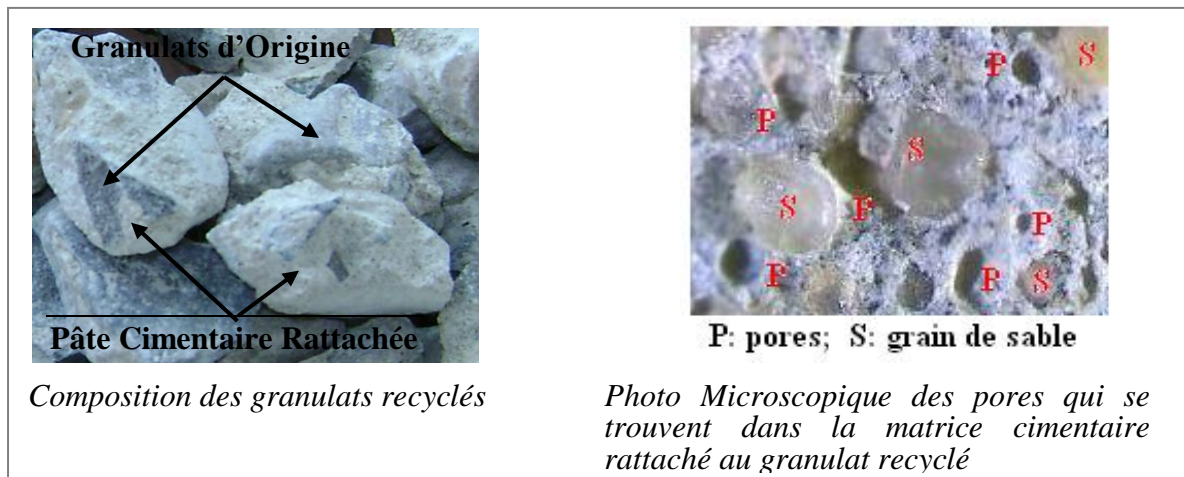
Tableau II.5: Les caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques	U.	Types de Granulats												Spécification pour béton Hydraulique		
		Sable						Gravier								
		Roulé	Naturel 1	Naturel 1 Rectifié	Naturel 2	Recyclé	Naturel Concassé 1	Naturel Concassé 2	Recyclé							
d/D	mm	0/0,8	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	5/12,5	12,5/20	5/12,5	12,5/20	5/12,5	12,5/20	1,8 ≤ MF ≤ 3,2 [117]
Module de Finesse (MF)		1,31	2,9	3,38	3,48	2,41	3,48	2,41	5,07	—	—	—	—	—	—	B(A) ≤ 12 % , B(C) ≤ 18 % [2]
% des Fines < 0,08 mm	%	0,8	18,29	11,14	11,58	5,07	11,58	5,07	—	—	—	—	—	—	—	LA ≤ 30; [117] 20 < LA < 40; [2]
Coef. d'aplat. (LA)	-	—	—	—	—	—	—	—	—	18,75	—	—	—	—	10,07	Mv <sub>app</sub> > 1200 Kg/m <sup>3</sup> [2]
Masse Vol. Apparente (Mv app)	kg/m <sup>3</sup>	1560,9	1579,8	1772,6	1675,6	1549,1	1675,6	1549,1	2575,7	1304,6	1437,8	1429,0	1383,6	1238,5	1338,3	2200 Kg/m <sup>3</sup> < Mv <sub>abs.</sub> , Mv <sub>abs</sub> < 3000 Kg/m <sup>3</sup> [2]
Masse Vol. Absolue (Mv abs)	kg/m <sup>3</sup>	2666,7	2669,3	2792,2	2742,5	2575,7	2742,5	2575,7	—	2553,2	2565,1	2662,3	2644,1	2321,3	2393,3	P ≥ 96,5 % [117]
Propreté Superficielle (P)	%	—	—	—	—	—	—	—	—	92,49	96,27	93,24	96,87	97,69	99,02	ESV > 65 % [117] ESP > 60 % [117]
Equivalent de sable (ES) %	V	87,62	86,54	87,59	88,33	68,43	88,33	68,43	—	—	—	—	—	—	—	VB ≤ 1,3 [117] VB ≤ 1 [2]
Bleu de Méthylène (VB)	P	85,64	81,94	80,26	81,58	65,35	81,58	65,35	—	—	—	—	—	—	—	Ab < 5,5 % [117] 2,5 % B(A) < Ab < 6 % B(C) [2]
Teneur en Eau (W)	%	—	0,33	—	—	0,17	—	—	—	0,02	0,03	—	—	0,85	0,9	—
Absorption d'eau (Ab)	%	0,25	1,29	—	—	3,13	—	—	7,09	0,73	0,46	—	—	6,25	5,36	—
Absorption d'eau (Ab)	%	0,50	1,91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

D'après la figure II.22, les taux de teneur en eau et l'absorption d'eau des granulats recyclés sont très élevés par rapport aux granulats naturels, même ils dépassent la limite 5,5 % fixée par la norme XP P 18-541 [117]. L'absorption est de 11 fois pour les graviers 12,5/20 et cela due à leur structure très poreuse comme le montre la figure II.23.



**Figure II.4:** Teneur et absorption d'eau des différents types de granulats



**Figure II.5:** Photos de la structure poreuse des granulats recyclés

Les essais d'équivalent de sable confirmés par les essais au bleu méthylène montrent que les trois types de sables utilisés sont propres et ne contiennent pas de fines argileuses, ce qui permet de dire qu'ils sont non plastiques et qu'ils ne sont pas sujets de foisonnement.

Les graviers recyclés sont aussi propres que les graviers naturels et ceci s'est traduit par l'essai de propreté superficielle.

**II.3.4/ LES ADJUVANTS :**

Par des tests préalable et pour déterminer l'efficacité d'un adjuvant, nous avons testés trois types d'adjuvants sous forme de liquide, conformément à la norme EN 934-2 [118], deux fluidifiant " MEDAPLAST SP 40" et SIKAMENT FF 86 et un superplastifiant, le et MEDAPLAST SP 40 (voir Annexes 4, 5 et 6), dont les principales caractéristiques physico-chimiques, fournies par les fabricants sont indiquées au Tableau II.08. C'est le dernier qui a donné de bons résultats en améliorant sensiblement la maniabilité des bétons même avec un minimum de pourcentage (0,6 % du poids de ciment).

**Tableau II.6:** *Caractéristiques des adjuvants utilisés*

<i>Les Caractéristiques Principales</i>	<b>PLASTIMENT BV 40</b>	<b>SIKAMENT FF 86</b>	<b>MEDAPLAST SP 40</b>
Couleur	Brun foncé	Brun	Marron
Densité (t/m <sup>3</sup> )	1,185 ± 0,015	1,23 ± 0,02	1,2 ± 0,01
pH	4,5 ± 1	9 ± 2	8,2
Teneur en ions chlorures	0,1 %	≤ 0,1 %	< 1 g/L
Teneur en Na <sub>2</sub> O équivalent	2,0 %	≤ 6,0 %	--
Dosage recommandé par rapport du poids de ciment	0,3 à 1%	0,4 et 2%	0,6 à 2,5%

**II.4/ FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS****II.4.1/ METHODE DE FORMULATION DE BETON:**

Les méthodes de formulation de béton permettent d'obtenir des dosages en constituants "volumétriques" ou "pondéraux" des différents constituants. Elles sont dites à granulométrie continue et à granulométrie discontinue. Pratiquement, la plupart des bétons utilisés actuellement sont à granularité continue [24].

Les performances requises pour un béton impliquent :

- Une consistance adaptée à sa destination.
- Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours.
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment ( $C_{\min}$ ) Et un rapport E/C maximum  $(E/C)_{\max}$ .

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences avec un moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment C le plus faible possible tout en vérifiant  $(C \geq C_{\min})$  [25].

Les méthodes de formulation sont très nombreuses puisque les paramètres à prendre en compte dans l'étude de la composition d'un béton sont nombreux. Les plus utilisées sont associées aux noms de: Bolomey, Abrams, Faury, Valette, Joisel et Dreux-Gorisse. Cette dernière a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et en donnant satisfaction. Elle est très simple d'utilisation et se base sur la connaissance des courbes granulométriques des granulats utilisés [24].

#### **II.4.2/ FORMULATION ET PREPARATION DES BETONS:**

La méthode de formulation des bétons utilisés dans cette étude est celle de Dreux-Gorisse [24]. La composition est calculée selon les données suivantes :

- Type de béton : Ordinaire.
- Diamètre maximal des granulats  $D_{\max} = 20$  cm
- Les trois classes granulaires : 0/5, 5/12,5 et 12,5/20.
- Ouvrabilité du béton : plastique (Affaissement au cône d'Abrams,  $A_{ff} = 7 \pm 2$  cm), qui est le paramètre le plus important pour la mise en œuvre des bétons.
- Serrage : vibration courante (Table vibrante).
- Résistance caractéristique projetée à 28 jours pour tous les bétons  $R_{c28} = 20$  MPa.
- Dosage en ciment des différents bétons est variable suivant chaque série des bétons. Il est de l'ordre de:  $350 \text{ kg/m}^3$  pour la série de combinaison entre granulats (naturel-recyclé), et de l'ordre de 300 et  $400 \text{ kg/m}^3$  pour l'étude de l'influence du rapport gravier/sable (G/S).

La composition granulaire type du béton d'étude est représentée sur la Figure II.24.

#### **II.4.3/ CONFECTION ET CURE DES EPROUVETTES :**

Deux types d'éprouvettes utilisées dans cette étude, cubiques de (10x10x10 cm) et cylindriques de (11x22 cm).

Les éprouvettes couvertes laissées à l'air libre sont démoulées après 24 heures et immergées sous l'eau à température ambiante.

Une moyenne de 3 éprouvettes de béton a été admise pour chaque essai.

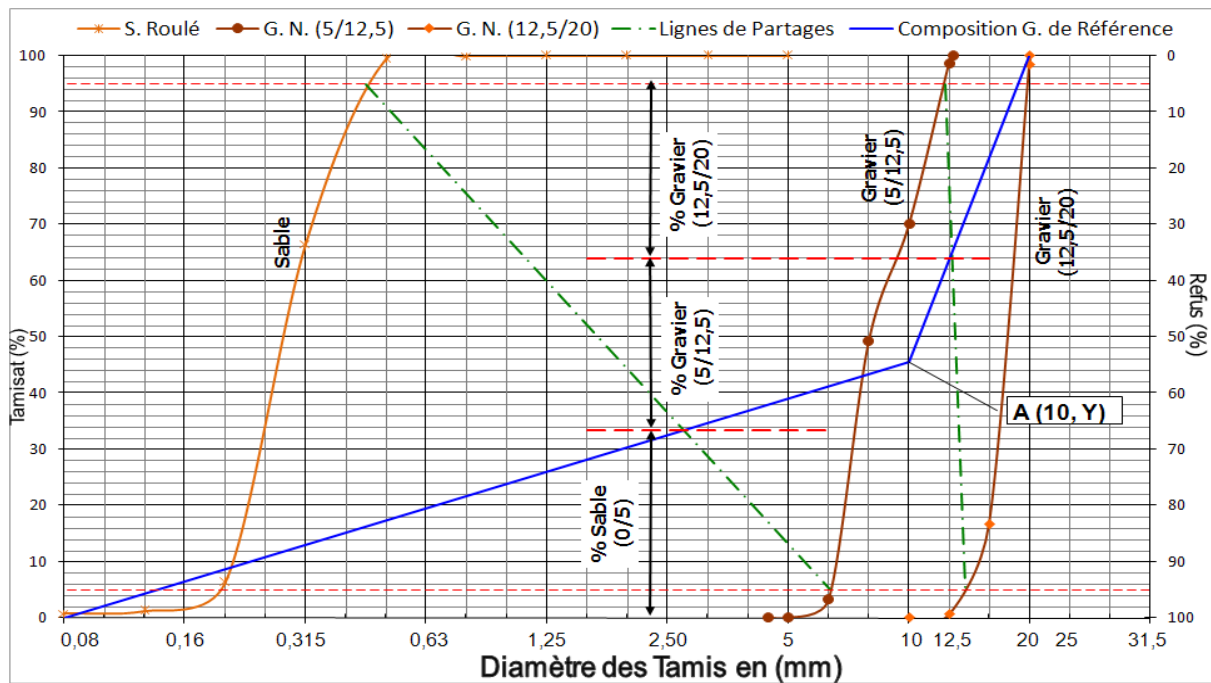


Figure II.6: Composition granulaire type du béton d'étude

#### II.4.4/ COMPOSITION DES BETONS:

Dans la 1<sup>ère</sup> série "bétons sans adjuvant", on a formulé quatre types de bétons avec différents mélanges granulaires de sable et gravier, plus deux bétons standards utilisés comme spécimens de contrôle pour tous les bétons. La résistance à la compression est déterminée aux échéances 7, 14, 28 et 90 jours et la résistance à la traction est mesurée à 28 jours.

La 2<sup>ème</sup> série "bétons avec adjuvant", comporte les mêmes types de bétons de la 1<sup>ère</sup> série. Cependant, pour obtenir une consistance plastique au lieu de la corriger par un ajout d'eau, on a procédé à l'utilisation des adjuvants et qui ont donné les constatations suivantes:

Le fluidifiant PLASTIMENT BV 40 n'a pas donné satisfaction même avec l'utilisation de teneurs supérieures à la limite autorisée par les permet d'améliorer la maniabilité mais la teneur permettant d'arriver à la maniabilité désirée dépasse celle prescrite par le fabricant (3%).

Le superplastifiant haut réducteur d'eau (MEDAPLAST SP 40) a donné de bons résultats, ceci s'est traduit par une nette amélioration de la maniabilité. Les dosages testés varient de 0,6 à 2 % de poids de ciment.

Les résistances à la compression et à la traction sont déterminées aux échéances comme pour la première série.

Dans la 3<sup>ème</sup> série "bétons avec G/S variable", on a formulé Quinze bétons à base de granulats naturels et recyclés avec différents rapports de G/S allant de 1 jusqu'à 3, et avec

deux dosages de ciment de 300 et 400 kg/m<sup>3</sup>. Pour ce cas, seul la résistance à la compression à 28 jours a été retenue.

Les différentes compositions des bétons utilisés sont présentées dans le Tableau II.09.

**Tableau II.9:** Compositions des mélanges granulaires de la variété des bétons utilisés

<i>Les granulats utilisés dans la composition des bétons</i>							
<i>Référence du béton</i>	<i>Sable roulé</i>	<i>Sable Naturel</i>	<i>Sable Naturel rectifié</i>	<i>Sable Recyclé</i>	<i>Gravier Naturel</i>	<i>Gravier Recyclé</i>	<i>Superplastifiant SP 40</i>
<b>1<sup>ère</sup> Série</b>							
BT1	+				+		
BT2			+		+		
B1				+		+	
B2			+			+	
B3				+	+		
B4		+			+		
<b>2<sup>ème</sup> Série</b>							
B1A				+		+	+
B2A			+			+	+
B3A				+	+		+
B4A			+		+		+
<b>3<sup>ème</sup> Série</b>							
BR31 - BR35				+		+	
BR41 - BR45				+		+	
BC31 - BC35			+		+		

**II.5/ CONCLUSION:**

La caractérisation des matériaux (granulats) permet d'éclairer leur choix et les destiner pour la confection d'un béton ou d'un mortier.

L'analyse des résultats de la caractérisation des matériaux nous a permis de déduire que:

- ✓ La principale caractéristique des granulats de démolition est la présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats se qui complique leur caractérisation exacte. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécaniques des granulats recyclés seront dépendantes du volume de ce mortier.
- ✓ Les caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, roulés ou concassés.
- ✓ Les résultats des essais de dureté des granulats recyclés sont importants par rapport à ceux des granulats naturels et même ils sont très proches des valeurs limites prescrites par les normes, ce qui va rétrécir le champ d'application future des granulats recyclés comme source de granulat pour des bétons de structures.
- ✓ Le fort taux d'absorption d'eau des granulats recyclés pourrait influencer le comportement mécanique des bétons.

La partie expérimentale consiste à valoriser les granulats recyclés dans le béton structurel, et les comportements des bétons frais ainsi que les performances des bétons durcis sont évalués, présentés et discutés dans les chapitres suivants.

# **CHAPITRE III:**

**FORMULATION ET COMPORTEMENTS**

**DES BETONS SANS ADJUVANTS**

### III/ FORMULATION ET COMPORTEMENTS DES BETONS SANS ADJUVANTS:

Ce chapitre porte sur l'influence des granulats recyclés sur les caractéristiques du béton frais et durci. Pour se faire, plusieurs mélanges de béton à différentes combinaisons en type de granulats et selon la taille (fin ou gros) ont été formulés. En se basant sur la méthode de formulation de Dreux-Gorisse, le dosage en ciment est pris constant  $C=350 \text{ Kg/m}^3$ , tout en gardant une ouvrabilité constante ( $A_{ff} = 7 \pm 2 \text{ cm}$ ) et ceci pour toutes les combinaisons. L'objectif de cette démarche consiste en la recherche de la meilleure combinaison possible entre granulats qui puisse assurer les meilleures performances.

#### III.1/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS:

Deux genres de sable naturel ont été utilisés pour la confection de béton standard. L'un est un sable roulé de mer BT1 et l'autre est un sable concassé appelé couramment sable de carrière BT2. Le choix de celui-ci est dicté par les mesures restrictives quant à l'utilisation d'un sable alluvionnaire.

Les compositions des différents bétons non adjuvés confectionnés dans cette première série sont présentées par le tableau III.1.

**Tableau III.1:** Compositions des différents bétons sans adjuvants

Composants	$M_{v_{abs}}$ $T/m^3$	Unité	Types du Béton						
			BT1	BT2	B1	B2	B3	B4	
CEM II 42,5	3,10	kg/m <sup>3</sup>	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	
Sable Roulé 0/0,8	2,67	kg/m <sup>3</sup>	627,21	--	--	--	--	--	
Sable Naturel 0/5	2,79		--	--	--	--	--	818,98	
Sable Naturel Rectifié 0/5	2,67		--	837,71	--	818,52	--	--	
Sable Recyclé 0/5	2,58		--	--	667,60	--	702,74	--	
Gravier Naturel 5/12,5	2,55		564,67	400,55	--	--	452,80	426,67	
Gravier Naturel 12,5/20	2,57		630,33	542,39	--	--	594,88	568,64	
Gravier Recyclé 5/12,5	2,32		--	--	380,00	316,66	--	--	
Gravier Recyclé 12,5/20	2,39		--	--	620,34	571,37	--	--	
G/S	-		-	1,91	1,13	1,50	1,08	1,49	1,22
Eau	Calculée		01,00	Litre	192,91	192,91	163,33	163,33	192,91
	Ajoutée	0			25,18	63,29	52,25	21,56	43,52
	Totale	192,91			218,09	226,62	215,58	214,47	236,43
Affaissement	-	cm	6,5	7,0	7,5	6,5	8,0	7,5	
Masse Volumique App. ( $M_{v_{app}}$ )	Réelle	kg/m <sup>3</sup>	2397,5	2367,5	2287,5	2312,5	2372,5	2437,5	
	Calculée		2365,12	2348,58	2244,57	2272,95	2314,89	2400,72	

### III.2/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS FRAIS:

Les essais réalisés sur les bétons frais sont : la mesure de l'ouvrabilité évaluée à l'aide du cône d'Abrams, et la mesure de la densité réelle.

La consistance désirée pour ces bétons est une ouvrabilité plastique et tenant compte des caractéristiques intrinsèques des granulats, un ajustement a été apporté sur le dosage en eau dans le but d'assurer un écoulement du béton qui correspond à la consistance désirée.

Les résultats sur bétons frais sont exprimés sous forme d'histogrammes, qui présentent, pour chaque type de béton, les quantités d'eau de gâchage (calculée et ajoutée) et les masses volumiques apparentes.

#### III.2.1/ DOSAGE EN EAU:

Comme le dosage en ciment est constant, le dosage en eau nécessaire pour la mise en œuvre d'un béton dépend essentiellement de la nature des granulats (sable ou gravier) qui le constitue. Les résultats obtenus pour chaque type de béton sont présentés dans la figure III.1.

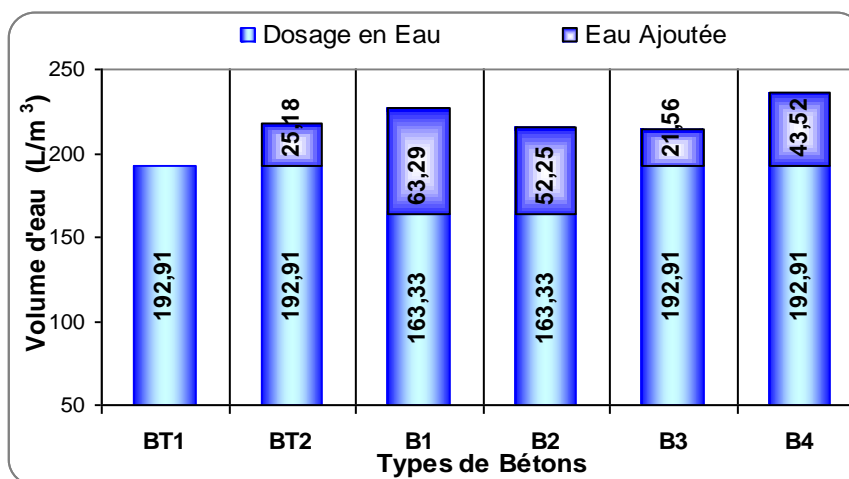


Figure III 1: Dosage en eau pour chaque type de béton

Celle-ci, montre que la demande en quantités d'eau de gâchage dans le cas des bétons à base de sable concassé (BT2 et B4) est plus importante que celle demandée dans le cas du béton à base de sable roulé (BT1). Cela est probablement lié à la structure de la surface de chaque sable : le sable roulé est un sable dense, à surface lisse par contre le sable naturel concassé est caractérisé par une structure anguleuse avec une surface spécifique très importante.

D'autre part, on remarque que le pourcentage des fines a également une influence sur la quantité du dosage en eau. Le BT2 qui a un pourcentage en fines inférieur que celui du BT4, nécessite un dosage en eau moins faible. Il est à noter que la composition granulométrique du sable utilisé pour la composition BT2 a été rectifiée d'où une partie de

finer a été retirée de la granularité tout en respectant la norme prescrite pour les limites de fines dans un sable.

En outre, on a constaté que, le dosage en eau du béton recyclé B1 est inférieur à celui du béton B4 en considérant le dosage total. Par contre, la quantité d'eau d'ajustement pour maintenir la consistance plastique de la composition B1 est supérieure à celle de B4, est ce qui semble logique vu le caractère absorbant des granulats recyclés. Toutefois, cette quantité pour le B4 est aussi importante et ceci est attribué au fort module de finesse du sable de carrière ainsi que la présence dans celui-ci d'un pourcentage considérable de fines. Il est à remarquer aussi que le dosage en eau calculer à partir de la formule de Bolomey donne un dosage supérieur pour le mélange B4 à celui de B1 et ceci est la conséquence du coefficient de qualité granulaire G qui est pris pour les granulats recyclés comme étant de qualité médiocre par rapport aux granulats naturels.

Le dosage en eau du béton B1, à base des granulats recyclés, est supérieur à celui du béton B2, à base de gravier recyclé et sable naturel, cela est due à l'absorption d'eau élevée du sable recyclé par rapport au sable naturel.

### III.2.2/ MASSE VOLUMIQUE APPARENTE:

La figure III.2, relative à l'évolution de la masse volumique apparente du béton frais, montre que les bétons composés à base des granulats recyclés présentent les plus faibles masses volumiques apparentes et cette diminution est étroitement liée à la présence en volume des recyclés dans le volume granulaire total, où le mélange B1 dont celui-ci est entièrement composé de recyclés. Tandis que, les bétons naturels présentent les plus grandes masses. Cela peut être expliqué par la densité intrinsèque des granulats.

Le béton naturel B4 présente une masse volumique plus élevée que les autres bétons, à cause de la composition du sable qui a un taux élevé des fines (18,29 %) et par conséquent un minimum de vides intergranulaires.

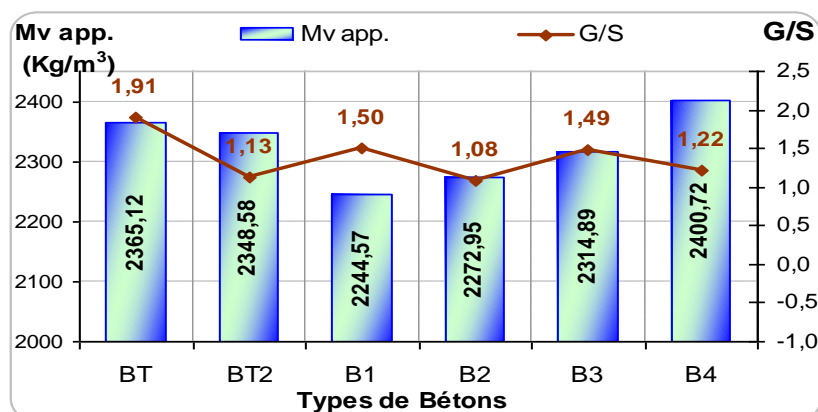


Figure III.2:- Masses volumiques apparentes et G/S des différents types de bétons

### III.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS DURCIS:

Les essais et les mesures réalisés sur les bétons durcis sont: la mesure de leurs masses volumiques, ainsi que leurs résistances à la compression et à la traction par fendage.

#### III.3.1/ MASSE VOLUMIQUE APPARENTE:

La figure III.3 illustre la variation dans le temps de la masse volumique apparente des bétons composés sans adjuvant et ceci jusqu'à échéance de 3 mois.

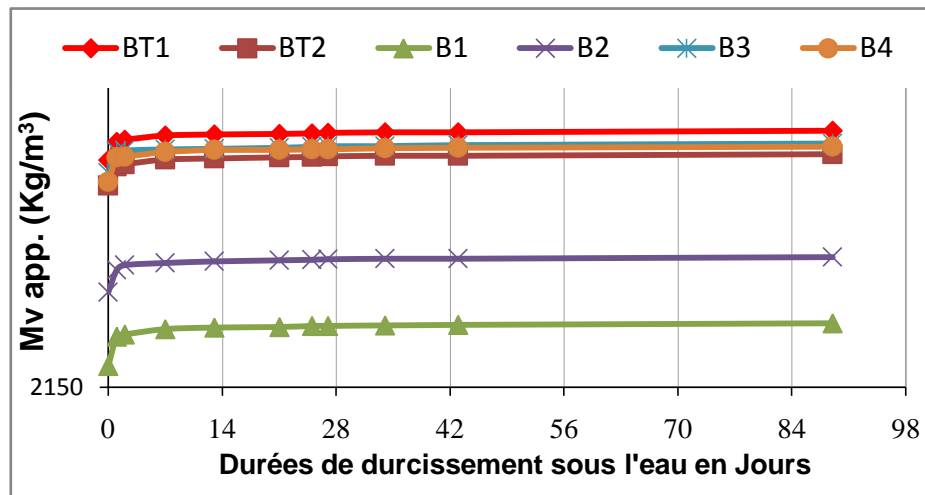


Figure III.3:- Evolution des masses volumiques apparentes des bétons durcis.

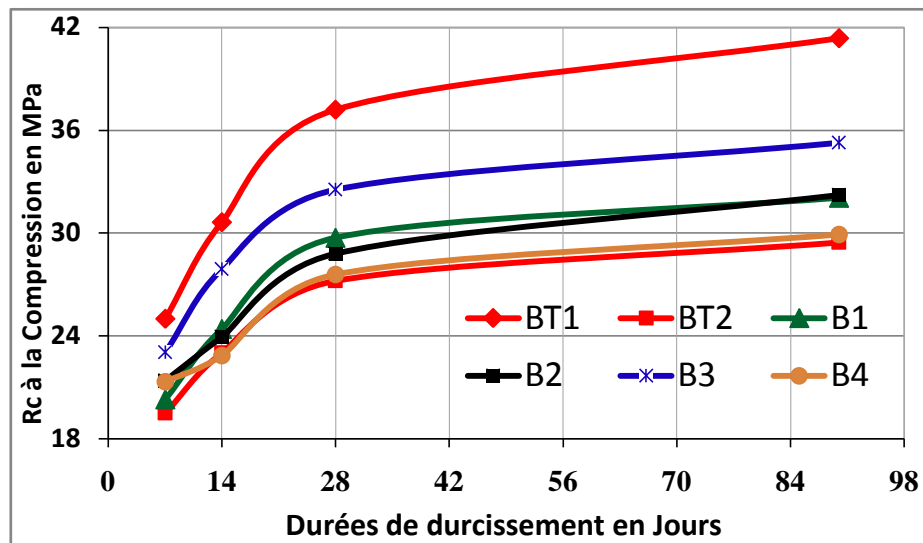
Les éprouvettes moulées sont conservées à l'air libre et à température ambiante (température à l'intérieur du laboratoire) durant 24 heures après le coulage. Juste après le démoulage elles sont pesées et immergées ensuite dans l'eau. Après une journée de placement dans celle-ci, on a constaté que les masses volumiques apparentes des bétons durcis enregistrent une augmentation avec des pourcentages différents, cela est dû à l'absorption d'eau par capillarité multidirectionnelle. Au bout de 48 heures, les masses volumiques semblent se stabiliser à palier ce qui correspond à un stade de saturation en eau des éprouvettes.

#### III.3.2/ RESISTANCE A LA COMPRESSION:

L'évolution des résistances à la compression des bétons sans adjuvant dans le temps est présentée dans la figure III.4.

De façon globale l'ordre de supériorité des résistances est respecté à chaque échéance. La qualité des granulats est mise en évidence et ceci est parfaitement illustré par le béton BT1 composé uniquement de matériaux nobles à savoir un gravier naturel et un sable roulé.

Cependant, les bétons BT2 et B4 composés eux aussi de matériaux naturels mais avec un sable de carrière enregistrent les plus faibles performances, on constate que les courbes qui représentent ces deux bétons se superposent parfaitement malgré la présence de moins de fines dans l'un par rapport à l'autre.



**Figure III.4:** Evolution des résistances à la compression des bétons sans adjuvants.

A 28 jours tous les bétons ont dépassé la valeur de la résistance visée, le béton le plus performant BT1 arrive jusqu'à 186 %, et le béton le plus faible BT2 atteint une résistance de 136 % de la résistance visée à 28 jours. Ce qui peut s'expliquer par la sous estimation des résistances des bétons en fixant la résistance caractéristique à la compression visée à 20 MPa. Cette précaution a été dictée par la qualité intrinsèque des bétons de démolition. Ceux-ci ont présenté des caractéristiques mécaniques (LA et MDE) à la limite des valeurs admises par les normes. En outre, les granulats recyclés sont composés de mélange d'anciens bétons qui n'ont pas été conçus d'une même formulation ou n'ayant pas les mêmes résistances mécaniques.

Le béton B3 composé de sable recyclé et gravier naturel présente des performances proches à celles obtenues avec le BT1, ce qui augure une application sans gros risques de telle composition mixte comme béton de structure. Les bétons B1 et B2 composés eux aussi de mélanges mixtes, présentent une similitude dans leur comportement et mieux que les bétons formulés de gravier naturel et sable de carrière.

Jusqu'à 90 jours, les performances obtenues avec des compositions granulaires mixtes soit en sable ou gravier recyclé, sont presque identiques à ce que présentent les différents intervenants algériens dans la fabrication de bétons traditionnels.

Les enseignements tirés de ces formulations :

- Influence en premier lieu de la qualité des granulats

- L'absorption d'eau par les granulats et principalement les recyclés semble fournir une relation directe avec les performances mécaniques.
- Pour les mélanges mixtes, le choix d'un sable recyclé est plus performant que le choix de gravier recyclé.

#### ■ ETUDE COMPARATIVE DES BETONS BT1, BT2 ET B1 :

La figure III.5 montre que la résistance du béton BT1 est nettement meilleure que celle des bétons B1 (RAC) et BT2 (NAC), à toutes les échéances. Cela est dû à l'effet du rapport E/C et la qualité des granulats, qui sont plus meilleurs pour le béton de référence.

A 7 jours, la résistance du béton B1 est légèrement supérieure à celle du béton BT2. Tandis que l'écart de résistance pour ces deux bétons devient plus important à partir du quatorzième jour. Cela est probablement à cause de la finesse du sable et la meilleure distribution granulométrique du béton B1.

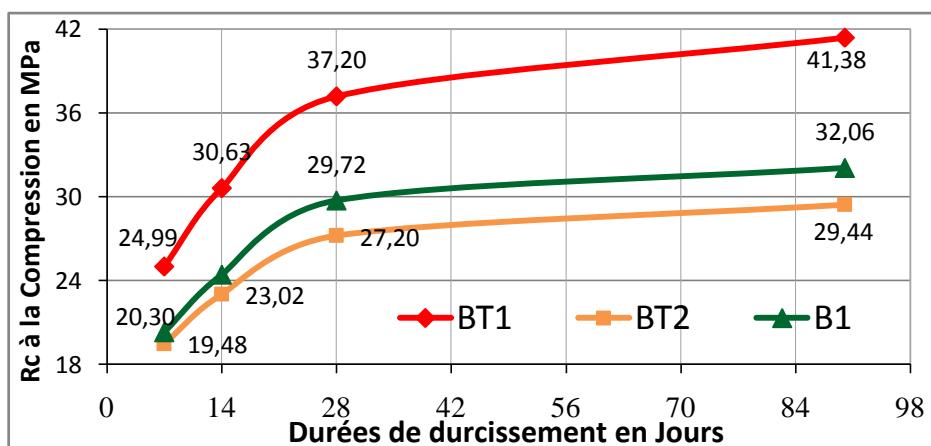


Figure III.5:- Evolution des résistances à la compression des bétons BT1, BT2 et B1.

#### ■ ETUDE COMPARATIVE DES BETONS B1 (RAC) ET B2 (SN+GR):

À toutes les échéances, les résistances des bétons B1 (RAC) et B2 (SN+GR) sont relativement identiques et elles évoluent avec la même cinétique (figure III.6). Cela est peut être expliqué par la présence du même type de gravier dans les deux bétons, le même dosage en eau et la même densité.

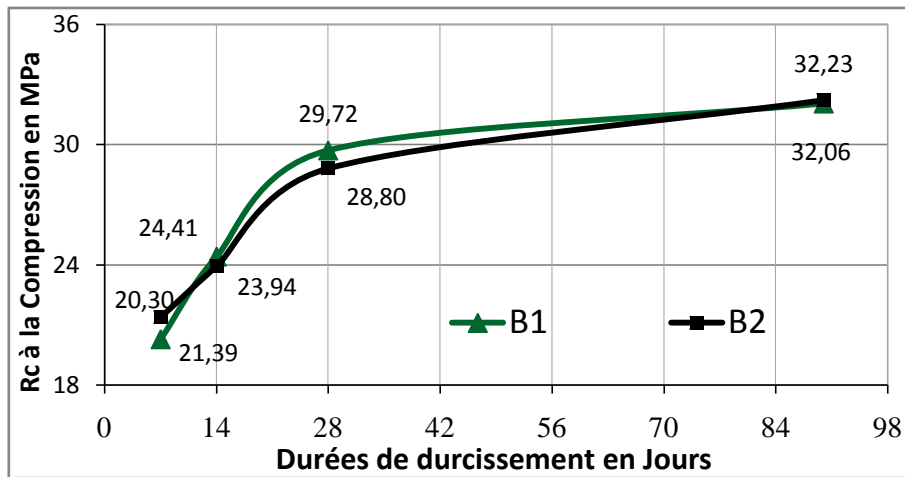


Figure III.6:- Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B2

■ ETUDE COMPARATIVE DES BETONS B1 (RAC) ET B3 (SR+GN):

Les performances du béton B3, à base de sable recyclé et gravier naturel, sont plus meilleures que celles du béton B1 (RAC) (la figure III.7). C'est probablement à cause du dosage en eau du béton B1 d'une part et la qualité des graviers d'autre part. L'évolution des résistances dans le temps est proportionnelle pour les deux bétons.

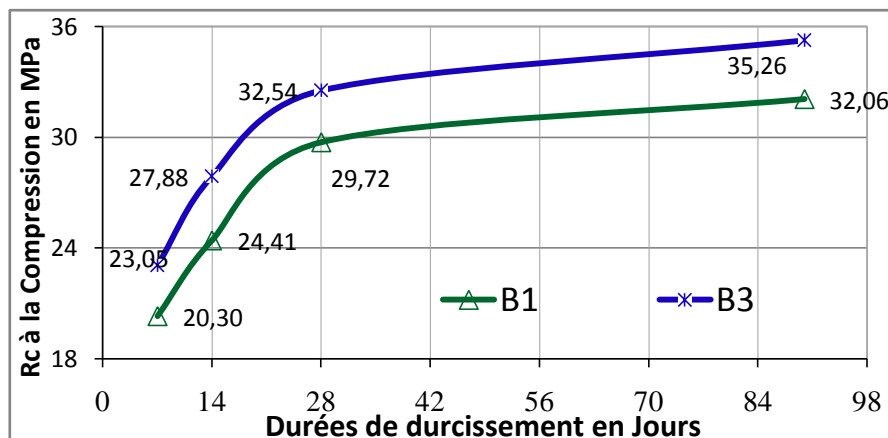


Figure III.7:- Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B3

■ ETUDE COMPARATIVE DES BETONS B1 (RAC) ET B4 (NAC):

La figure III.8 montre qu'à 7 jours la résistance du B4 (NAC) est supérieure à celle du B1 (RAC), mais à partir du 14<sup>ème</sup> jour les performances du béton B1 deviennent supérieures à celles du béton B4. C'est probablement l'influence du dosage en eau et la finesse des sable ( $M_f = 2,41$  pour les recyclés et  $M_f = 3,48$  pour les naturels) ainsi que le facteur d'homogénéisation du béton recyclé B1.

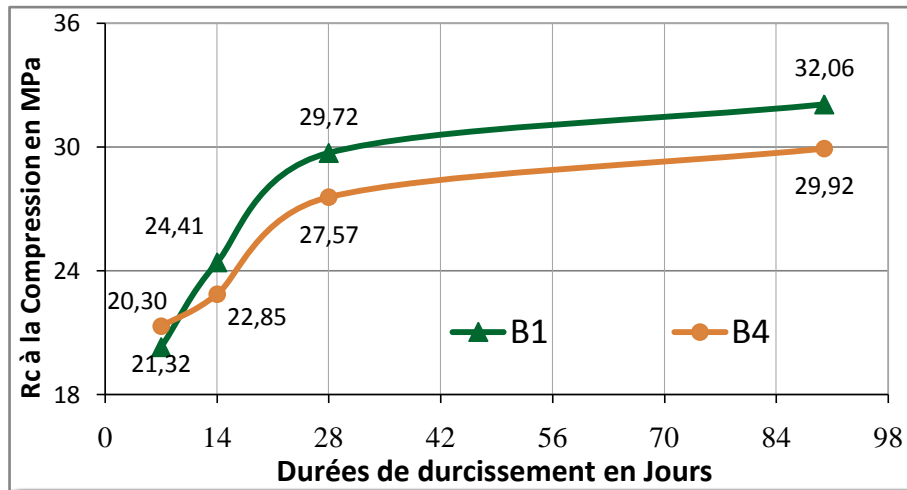


Figure III.8- Evolution des résistances à la compression des bétons B1 et B4

### III.3.3/ RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE:

Les résistances à la traction par fendage des bétons sans adjuvant à 28 jours sont présentées à la figure III.9.

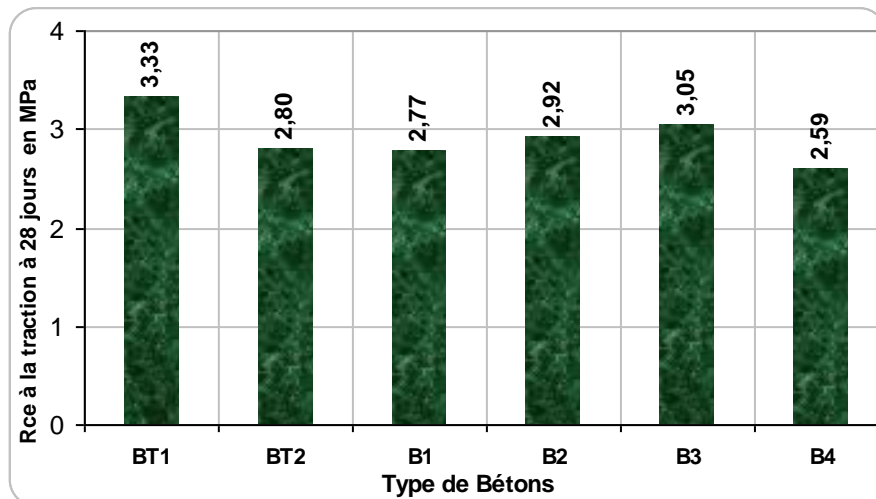


Figure III.9: Les résistances à la traction par fendage des bétons sans adjuvant à 28 jours.

On peut remarquer que le comportement à la traction par fendage des éprouvettes est peu différent de leur comportement à la compression. L'écart de résistance en traction entre les différents bétons est assez faible par rapport à celui observé en compression, néanmoins. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important dans la résistance à la traction et celle des granulats recyclés est très rugueuse ce qui a amélioré l'adhérence pâte granulat. Cette rugosité s'est accentuée lors de la fabrication des granulats sous l'effet des impacts pour la démolition et le concassage.

En général, il existe plusieurs facteurs intervenant dans le comportement du béton à la traction: l'adhérence pâte-gravier, la nature des granulats, l'étendue granulaire et le dosage en eau ...etc.).

#### **III.4/ CONCLUSION:**

D'après la série des essais effectuée sur le béton sans adjuvant frais et durci, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'absorption d'eau par les granulats recyclés est bien évidente et ne peut être quantifiée avec certitude vu le caractère aléatoire du vieux mortier collé aux granulats. Ceci peut être néfaste davantage pour la fraction 5/12,5 qui a une aptitude à être entièrement constituée de vieux mortier.
- ✓ Les valeurs de caractérisation mécanique des granulats recyclés et qui sont à la limite admissible par la normalisation, est reflétée par les performances mécaniques des bétons à base de ces recyclés.
- ✓ L'application des granulats recyclés a permis de mettre en évidence qu'ils peuvent fournir un béton de résistance caractéristique à 28 jours bien supérieure à 20 MPa, valeur admise antérieurement dans la formulation du béton avec beaucoup plus de méfiance quant à son comportement.
- ✓ La résistance à la traction par fendage n'a pas décelé aucun phénomène palpable d'être mis en relief pour le cas des granulats recyclés.

# **CHAPITRE IV:**

**FORMULATION ET COMPORTEMENTS**

**DES BETONS AVEC ADJUVANTS**

## IV/ FORMULATION ET COMPORTEMENTS DES BETONS AVEC ADJUVANTES :

On a constaté dans le chapitre précédent que la demande en eau de gâchage des bétons formulés est importante, d'où on a jugé utile d'optimiser le dosage en eau par l'emploi d'un superplastifiant SP 40, ce qui améliorerait probablement les comportements rhéologiques et les propriétés mécaniques des bétons.

On a maintenue le dosage en ciment et la consistance des bétons constants ( $C = 350 \text{ kg/m}^3$  et  $A_{ff} = 7 \pm 2 \text{ cm}$ , béton plastique), afin de comparer les résultats obtenus avec ceux de la première série.

### IV.1/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS:

Les compositions des différents bétons confectionnés dans cette série sont présentées par le tableau IV.1.

**Tableau IV.1:** Compositions des différents bétons avec adjuvants formulés.

Composants		Mv abs.	Unité	Type du Béton			
		T/m <sup>3</sup>		BT2A	B1A	B2A	B3A
CEM II 42,5		3,1	kg/m <sup>3</sup>	350,00	350,00	350,00	350,00
Sable Recyclé 0/5		2,58		-	667,60	-	702,74
Sable Naturel 1 rectifié 0/5		2,67		837,71	-	818,52	-
Gravier Naturel 5/12,5		2,55		400,55	-	-	452,80
Gravier Naturel 12,5/20		2,57		542,39	-	-	594,88
Gravier Recyclé 5/12,5		2,32		-	380,00	316,66	-
Gravier Recyclé 12,5/20		2,39		-	620,4	571,37	-
G/S			-	1,13	1,50	1,08	1,49
Eau	Calculée	1,00	Litres	192,91	163,33	163,33	192,91
	Ajouté			6,50	39,12	36,67	11,57
	Total			199,41	202,45	200,00	204,48
Superplastifiant SP 40		1,20	% du C	0,6 %	2,0 %	1,5 %	1,00 %
Affaissement			cm	07,5	07,5	08,5	07,0
Masse volumique		Réelle	kg/m <sup>3</sup>	2380,0	2257,5	2292,5	2350,0
		Calculée		2332,16	2220,45	2256,55	2304,90

## IV.2/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS FRAIS:

Les essais réalisés sur les bétons frais sont la mesure de l'ouvrabilité du béton, qui est évaluée à l'aide du cône d'Abrams, et la mesure de la densité réelle du béton.

### IV.2.1/ DOSAGE EN EAU ET EN SUPERPLASTIFIANT:

Le dosage en ciment est constant, d'où les quantités d'eau et du superplastifiant nécessaires pour la mise en œuvre des bétons dépendent essentiellement de la nature et la qualité des granulats utilisés.

Les figures IV.1 et IV.2 représentent respectivement, les valeurs de dosage en eau et plastifiant pour les différents types de bétons testés, et une comparaison entre bétons avec et sans adjuvant.

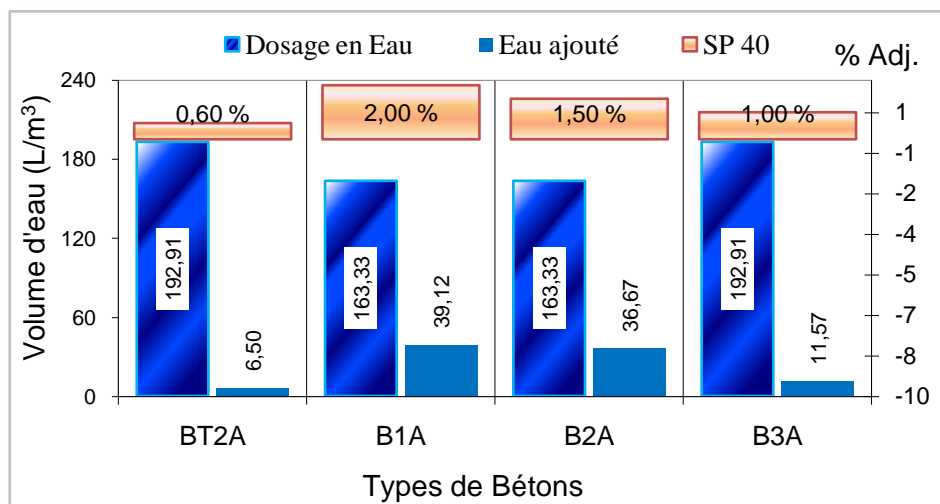


Figure IV.1: Dosage en eau et en adjuvant pour chaque type de béton.

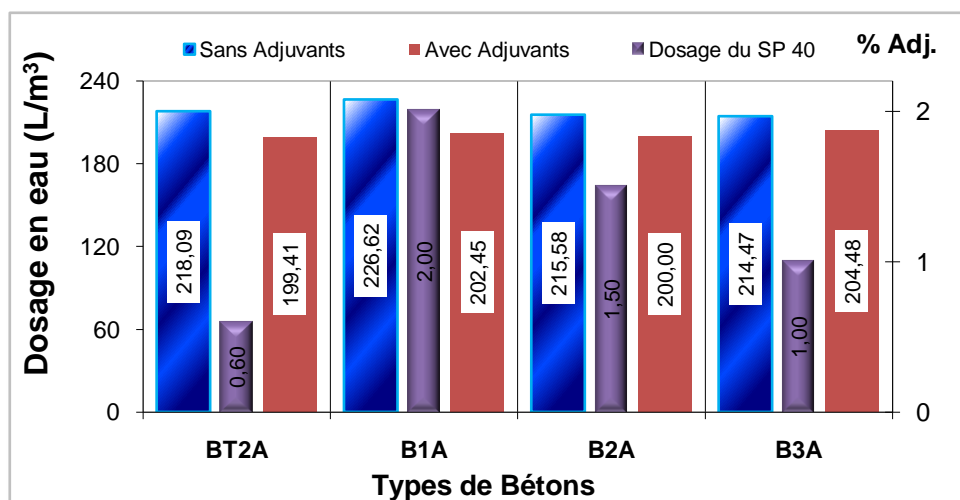


Figure IV.2: Comparaison des dosages en eau de bétons avec et sans adjuvants.

Le fort dosage du superplastifiant est enregistré pour le béton recyclé B1A (figure IV.1), mais la quantité d'eau n'a pas diminué autant (12% seulement) (figure IV.2), et le dosage en eau et en superplastifiant du béton B2A sont supérieurs à ceux du béton B3A, cela est due à la structure poreuse des granulats recyclés, et l'adjuvant est absorbé avec l'eau par les granulats.

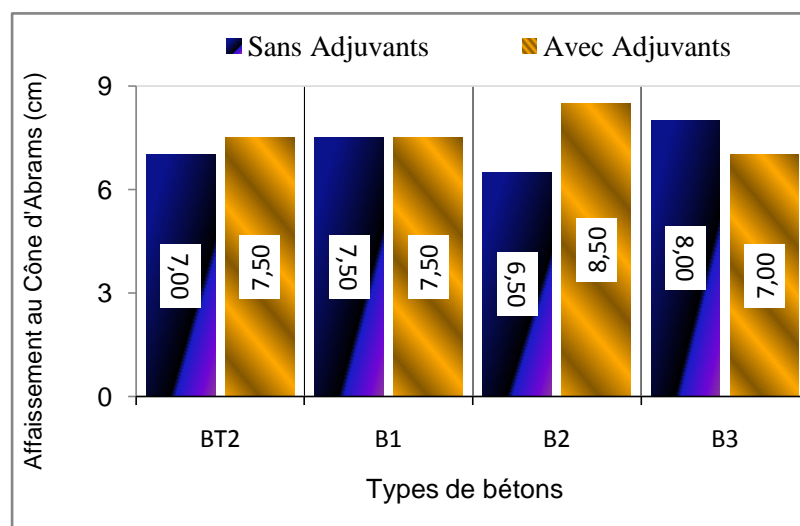
On a constaté que l'influence du superplastifiant sur le dosage en eau des bétons est faible pour tous les bétons, et avec différents pourcentages, de 5 % pour le béton B3A à 11 % pour le béton B1A (figure IV.2).

■ **ETUDE COMPARATIVE DES BETONS SANS ET AVEC ADJUVANTS AU NIVEAU DE LA CONSISTANCES:**

Le rôle principal du superplastifiant est de réduire la teneur en eau en gardant une même maniabilité du béton.

En général, l'ouvrabilité des bétons adjuvés est améliorée par rapport à celle des bétons sans adjuvants (figure IV.3) même si cette amélioration n'est pas celle escomptée. L'influence du superplastifiant SP 40 est remarquablement constatée dans le cas des bétons à base des granulats naturels et beaucoup plus pour avec l'utilisation des graviers naturels.

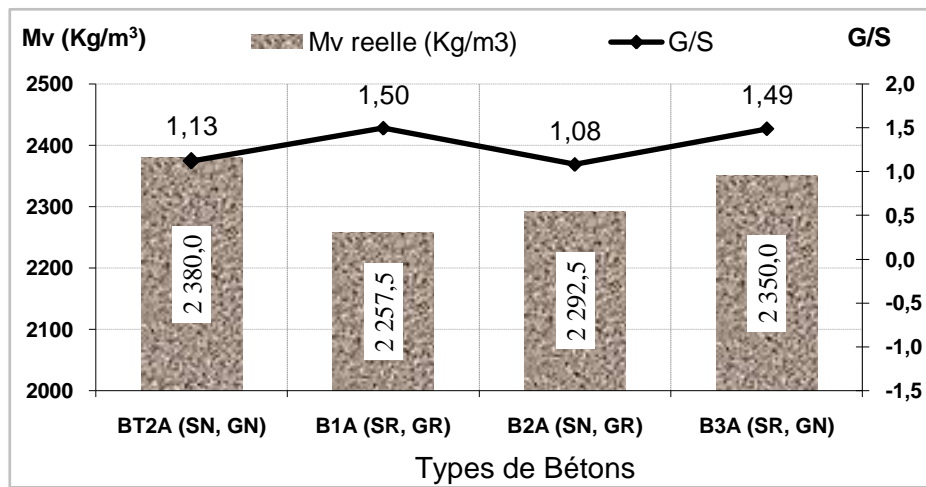
Il est à signaler la difficulté d'avoir une consistance du béton fixe, puisque il intervient plusieurs facteurs, la nature et la structure des granulats, le dosage en superplastifiant qui n'est pas constant, la conduite de l'essai lui-même : le mouillage du moule, l'énergie du piquage, l'enlèvement du moule et l'inclinaison du plateau.



**Figure IV.3:** Comparaison des consistances de bétons avec et sans adjuvants.

**IV.2.2/ MASSES VOLUMIQUES APPARENTES:**

Les masses volumiques apparentes des différents types de béton frais avec adjuvants et les rapports Gravier/Sable (G/S) sont présentés dans la figure IV.3.



**Figure IV.4 :** *Masses Volumiques Apparentes des différents types de béton frais*

Le béton à base des granulats recyclés B1A possède la plus faible masse volumique, alors que la plus élevée est celle du béton naturel BT2A (Figure IV.3). Ceci est dû essentiellement aux masses volumiques intrinsèques des granulats.

La masse volumique du béton B3A à base de sable recyclé et gravier naturel est plus élevée que celle du béton B2A à base de sable naturel et gravier recyclé, cela due probablement à la densité intrinsèque du gravier naturel d'une part et le rapport G/S d'autre part. Il est à noter que l'ajout de superplastifiant à améliorer légèrement la compacité des bétons adjuvés par rapport à ceux sans adjuvés.

**IV.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS DURCIS:**

Les essais réalisés sur les bétons durcis sont la mesure des résistances à la compression et à la traction par fendage.

**IV.3.1/ RESISTANCE A LA COMPRESSION:**

Les résultats de mesure des résistances à la compression des bétons adjuvés sont illustrés par la figure IV.5.

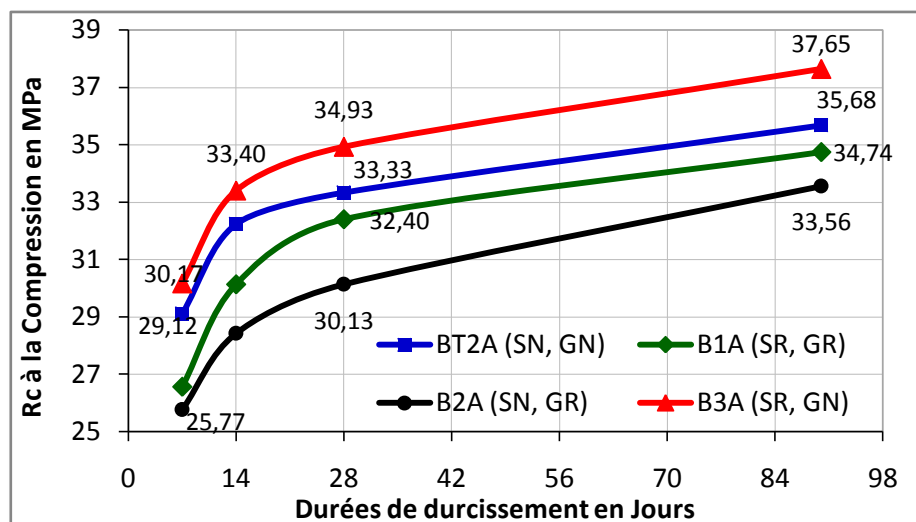


Figure IV.5: Evolution des résistances à la compression des bétons adjuvés.

A 7 jours, les résistances à la compression de tous les bétons adjuvés, ont dépassé la résistance visée à 28 jours (20 MPa).

Les meilleures résistances sont obtenues avec le béton B3A pour toutes les échéances, c'est peut-être dû principalement à la meilleure dureté du gravier naturel d'une part et la finesse du sable recyclé d'autre part, d'où moins de vides intergranulaires.

Les deux rapports E/C des bétons B1A et B2A sont presque égaux, mais la résistance du béton B1A est supérieure à celle du béton B2A, c'est peut être dû à l'influence du rapport G/S et la diminution des vides intergranulaires dans le béton B1A.

Les performances mécaniques les plus faibles sont enregistrées par le béton B2A à base de sable naturel et gravier recyclé, configuration qui a nécessité une quantité importante en eau de gâchage et un dosage en superplastifiant aussi important. Il semble que cette composition présente un excès d'eau, relatif au volume de la fraction granulaire 5/12,5 qui est moindre dans cette composition par rapport aux autres configurations. Puisque c'est cette fraction qui est susceptible d'absorbée plus d'eau que la fraction 12,5/20. Ce constat est mis en évidence par l'affaissement au cône d'Abrams qu'a donné le béton B2A (figure IV-3).

#### IV.3.2/ RESISTANCE A LA LA TRACTION PAR FENDAGE:

La figure IV.6 montre les résistances à la traction par fendage des différents bétons avec adjuvant.

Comme dans le cas de la compression, le béton de sable recyclé et gravier naturel B3A développent les meilleures résistances à la traction par fendage, cependant le béton naturel BT2A marque la plus faible résistance. L'influence de la résistance est due à plusieurs

facteurs : la compacité du béton, le rapport E/C, la dureté des granulats et l'adhérence pâte granulats.

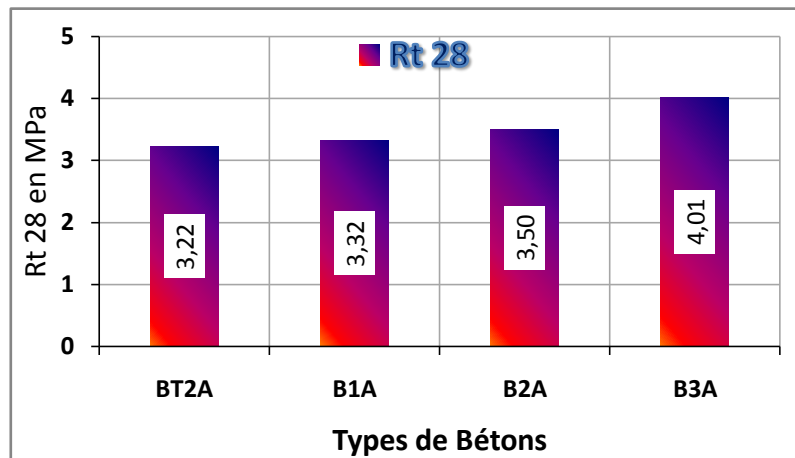


Figure IV.6: Evolution des résistances à la traction par fendage des bétons avec adjuvant.

#### IV.4/ COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DES BETONS SANS ADJUVANT ET AVEC ADJUVANT:

##### IV.4.1/ RESISTANCE A LA COMPRESSION :

Malgré le dosage le plus faible du superplastifiant SP 40, on remarque d'après la figure IV.7 que la résistance du béton naturel (NAC) est améliorée sensiblement en incorporant le superplastifiant. La cinétique d'accroissement des résistances de 0 à 28 jours du béton sans adjuvant est plus rapide que celle du béton adjuvanté, et elle se stabilise pour les deux bétons après 28 jours, cela due à l'effet secondaire du superplastifiant dans le béton à court terme.

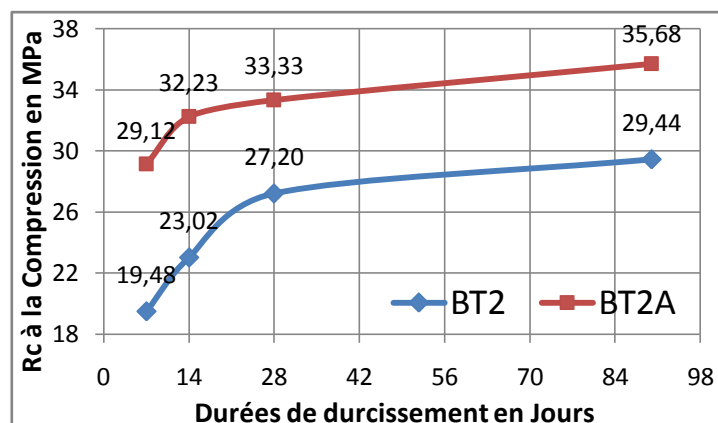
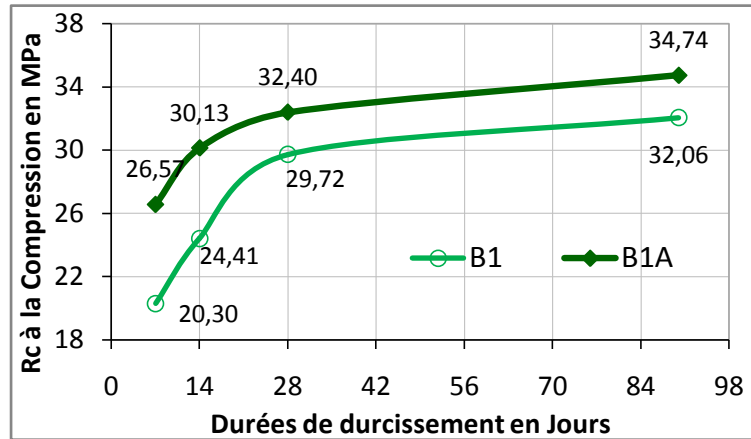


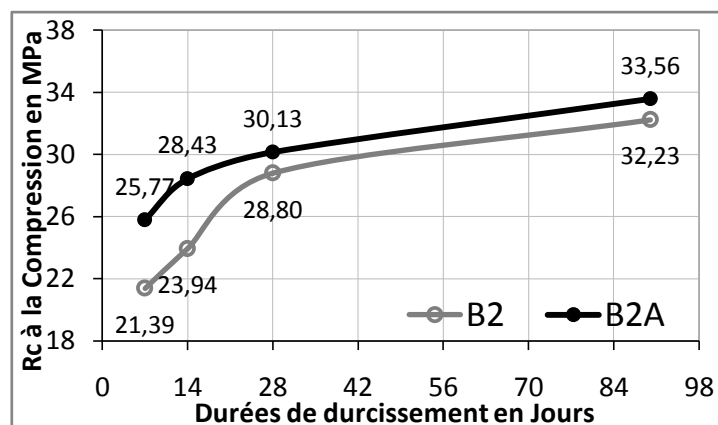
Figure IV.7 : Comparaison des résistances à la compression des bétons BT2 et BT2A.

Pour le cas des bétons constitués uniquement de granulats recyclés (B1 et B1A), la quantité d'eau du béton recyclé adjuvanté est diminuée de 11 % par rapport à celui sans adjuvant. Malgré l'incorporation du superplastifiant avec son dosage maximal autorisé mais la résistance à la compression n'est améliorée que légèrement (figure IV.8).



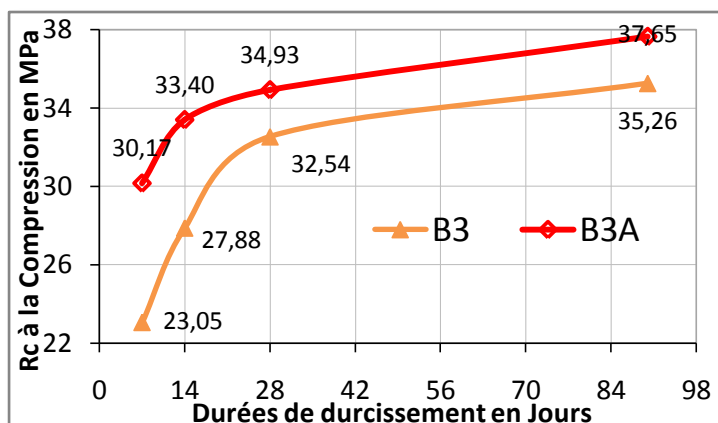
**Figure IV.8 :** Comparaison des résistances à la compression des bétons **B1** et **B1A**

L'ajout de superplastifiant dans le béton de sable concassé et gravier recyclé (B2) a diminué la quantité d'eau de gâchage de 9 % à ouvrabilité égale, mais une légère amélioration est observée au niveau des résistances à la compression surtout entre les échéances de 7 à 28 jours (figure IV.9).



**Figure IV-9 :** Comparaison des résistances à la compression des bétons **B2** et **B2A**

La figure (IV.10) montre que pour la même ouvrabilité, l'ajout de superplastifiant a permis l'amélioration des résistances du béton B3A à base sable recyclé et gravier naturel et de réduire le dosage en eau de 5 % en préservant l'ouvrabilité du béton.



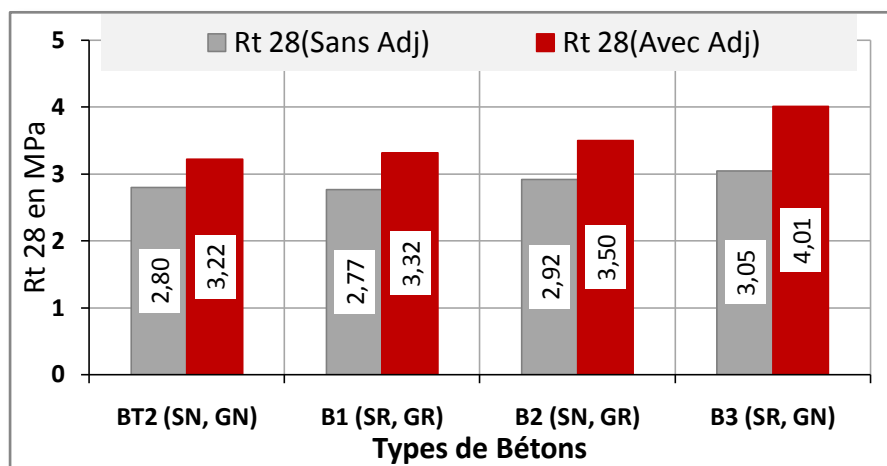
**Figure IV.10 :** Comparaison des résistances à la compression des bétons **B3** et **B3A**

#### IV.4.2/ RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE :

Les résistances à la traction de tous les bétons sont améliorées par l'ajout du superplastifiant (figure IV.11), mais avec des différents degrés, selon la quantité d'eau de gâchage réduite et la quantité du superplastifiant ajouté.

La meilleure amélioration de la résistance à la traction par fendage est observée pour le béton B3A de sable recyclé et gravier naturel, comme pour le cas de la résistance à la compression. C'est peut être à cause de son homogénéisation du mélange et une meilleure cohésion au niveau du mortier (pâte-sable recyclé).

Les bétons à base granulats recyclés (gravier ou sable) ont montrés une amélioration sensible par rapport au béton naturel (NAC), cela est due probablement à la surface rugueuse et poreuse des granulats recyclés qui permettent à la laitance d'entrer dans ces pores et l'adhérence mortier gravier devient meilleure.



**Figure IV.11 :** Comparaison des résistances à la traction par fendage des différents bétons avec et sans adjuvants.

**IV.5/ CONCLUSION :**

D'après les résultats obtenus sur les différents bétons adjuvantés, les enseignements qui peuvent être tirés sont les suivants :

- ✓ L'ajout de superplastifiant améliore le comportement des différents bétons au jeune âge et leur permet de dépasser la résistance visée à 28 jours.
- ✓ Pour une même consistance (plastique), les résistances de tous les bétons, ont été remarquablement améliorées par l'ajout de superplastifiant, et cela à toutes les échéances.
- ✓ Les cinétiques d'évolution des résistances dans le temps, des bétons initiaux (sans adjuvants) sont supérieures que celles des bétons adjuvantés. Ce comportement est dû à l'effet secondaire du superplastifiant.
- ✓ Le comportement des bétons de granulats naturels est plus meilleur en présence d'adjuvant que sans adjuvants.
- ✓ l'utilisation d'un superplastifiant de type haut réducteur d'eau a permis de montrer sans efficacité pour l'utilisation de granulats naturels. Cependant, en présence de granulats recyclés l'effet n'est pas escompté.
- ✓ Le gain en résistance apporter par le superplastifiant pour le cas des bétons à base de granulats recyclés n'est pas aussi papable. Face à des granulats à forte porosité la recommandation d'adjuvant ne se fait sentir, puisque celui-ci va se diluer dans l'eau et par conséquent être absorbé par les granulats.

# **CHAPITRE V:**

**ETUDE DES BETONS**

**AVEC DIFFERENTS RAPPORTS (G/S).**

## V/ ETUDE DES BETONS AVEC DIFFERENTS RAPPORTS (G/S):

Les comportements rhéologique et mécanique du béton sont étroitement liés à sa composition, à savoir la qualité, la propreté et granularité des granulats, le rapport eau sur ciment (E/C) ainsi que le rapport gravier sur sable (G/S).

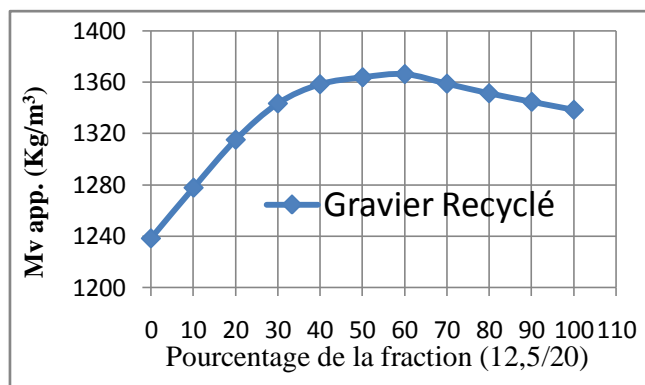
Dans cette série, on a étudié l'influence du rapport Gravier/Sable (G/S) sur les propriétés du béton que se soit naturel ou recyclé, en fonction du dosage en ciment.

En fonction de la consistance plastique maintenue constante ( $A_{ff} = 7 \pm 2$  cm), le dosage en eau est déterminé en tenant compte du dosage en ciment et le rapport G/S. la résistance à la compression à 28 jours, caractéristique de mesure choisie pour trouver l'optimum du rapport G/S et selon le dosage en ciment approprié.

Comme la proportion gravier est composée de deux fractions (5/12,5 et 12,5/20), on a eu recours à une optimisation de ces deux fractions par la détermination de la compacité maximale que pourrait donner celles-ci. Sachant que la méthode Dreux-Gorisse ne départage ces deux fractions que sur la base de la granularité (en fonction de la taille).

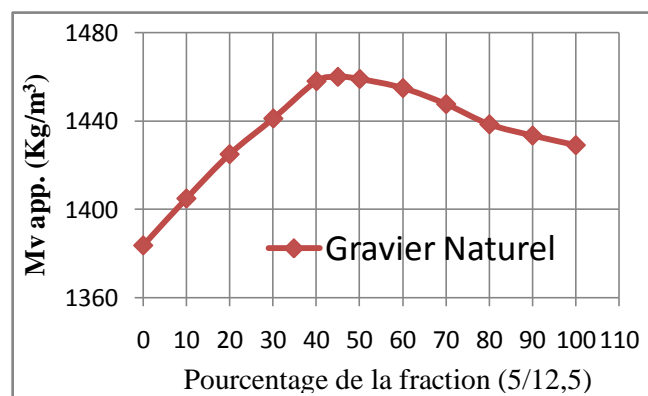
### V.1/ OPTIMISATION DES MELANGES DES FRACTIONS DES GRAVIERS:

Les masses volumiques apparentes des mélanges et les proportions des fractions (5/12,5 et 12,5/20) des graviers recyclés et naturels sont représentées dans les figures V.1 et V.2.



**Figure V.1 :** Variation des masses volumiques apparentes en fonction des proportions de la fraction (12,5/20) du gravier recyclé.

**Figure V.2 :** Variation des masses volumiques apparentes en fonction des proportions de la fraction (5/12,5) du gravier naturel.



D'après les figures V.1 et V.2 ci-dessus, on peut distinguer que :

- L'optimum de la masse volumique apparente du mélange des deux fractions du gravier recyclé est atteint avec un pourcentage de 40 % de la fraction (5/12,5) et 60 % de la fraction (12,5/20).
- La masse volumique apparente maximale des mélanges des deux fractions du gravier naturel est atteinte avec un pourcentage de 45 % de la fraction (5/12,5) et 55 % de la fraction (12,5/20).

## V.2/ COMPOSITION ET FORMULATION DES BETONS:

Deux types de béton, naturel et recyclé, ont été formulés avec différents rapports G/S, variant de 1,0 à 3,0, pour deux dosages en ciment, faible ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) et élevé ( $400 \text{ kg/m}^3$ ). Les graviers recyclés sont prémouillés, pour éviter l'influence d'un surdosage excessif en eau des bétons.

Les compositions des bétons formulés sont présentées dans les tableaux V.1, V.2 et V.3.

**Tableau V.1:** Compositions des bétons recyclés formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec  $C=300 \text{ kg/m}^3$ .

Composants	$M_V$ $T/m^3$	Unité	Types du Béton					
			BR31	BR32	BR33	BR34	BR35	
G/S	-	-	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	
CEM II 42,5	3,1	$\text{kg/m}^3$	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	
Sable Recyclé	2,56	$\text{kg/m}^3$	893,75	714,98	595,81	510,69	446,87	
Gravier Recyclé 5/12,5	2,32		522,99	627,56	697,27	747,08	784,46	
Gravier Recyclé 12,5/20	2,39		370,76	444,92	494,34	529,65	556,15	
Eau	Calculée	1,00	Litre	165,35	165,35	165,35	165,35	165,35
	Ajouté			66,1	49,61	24,80	19,84	16,54
	Total			231,49	214,96	190,15	185,19	181,89
$E_{\text{total}}/C$	-	-	0,76	0,77	0,72	0,63	0,62	
Affaissement	-	cm	6,5	7,0	7,5	6,5	7,0	
Masse volumique	Réelle	-	$\text{kg/m}^3$	2 330,00	2 327,50	2 290,00	2 287,50	2 290,00
	Calculée	-		2 318,99	2 302,42	2 277,57	2 272,61	2 269,37

**Tableau V.2:** Compositions des bétons recyclés formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec  $C=400 \text{ kg/m}^3$ .

Composants		$M_V$ T/m <sup>3</sup>	Unité	Types du Béton				
				BR41	BR42	BR43	BR44	BR45
G/S		-	-	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
CEM II 42,5		3,1	kg/m <sup>3</sup>	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0
Sable Recyclé		2,56	kg/m <sup>3</sup>	852,45	681,96	568,29	487,12	426,21
Gravier Recyclé 5/12,5		2,32		498,82	598,59	665,08	712,59	748,21
Gravier Recyclé 12,5/20		2,39		353,63	424,36	471,50	505,21	530,43
Eau	Calculée	1,00	Litre	220,47	220,47	220,47	220,47	220,47
	Ajouté			43,5	37,0	33,0	22,0	10,6
	Total			263,99	257,45	253,47	242,52	231,02
$E_{\text{total}}/C$		-	-	0,66	0,66	0,64	0,63	0,61
Affaissement		-	cm	8,0	8,0	08	6,5	8,0
Masse volumique	Réelle	-	kg/m <sup>3</sup>	2 380,00	2 390,00	2 375,00	2 365,00	2 357,50
	Calculée	-		2 368,89	2 362,36	2 358,34	2 347,44	2 335,87

**Tableau V.3:** Compositions des bétons naturels formulés avec différents rapports G/S de 1,0 à 3,0 et avec  $C=300 \text{ kg/m}^3$ .

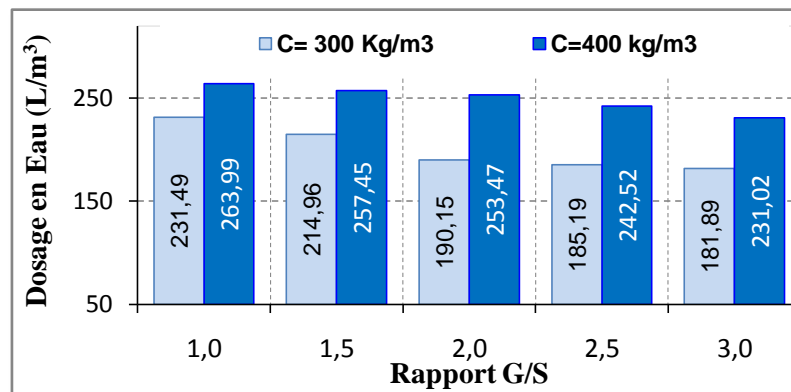
Composants		$M_V$ T/m <sup>3</sup>	Unité	Types du Béton				
				BN31	BN32	BN33	BN34	BN35
G/S		-	-	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
CEM II 42,5		3,1	kg/m <sup>3</sup>	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Sable Naturel		2,74	kg/m <sup>3</sup>	956,59	765,25	637,71	546,60	478,29
Gravier Naturel 5/12,5		2,66		573,27	687,88	764,31	818,90	859,87
Gravier Naturel 12,5/20		2,63		383,33	460,00	511,11	547,61	575,01
Eau	Calculée	1,00	Litre	165,35	165,35	165,35	165,35	165,35
	Ajouté			74,4	74,4	66,1	41,3	24,8
	Total			239,76	239,76	231,49	206,69	190,15
$E_{\text{total}}/C$		-	-	0,80	0,80	0,80	0,77	0,69
Affaissement		-	cm	7,0	7,0	07	7,5	6,5
Masse volumique	Réelle	-	kg/m <sup>3</sup>	2 470,00	2 472,50	2 455,00	2 432,50	2 422,50
	Calculée	-		2 452,95	2 452,89	2 444,62	2 419,80	2 403,32

### V.3/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS FRAIS:

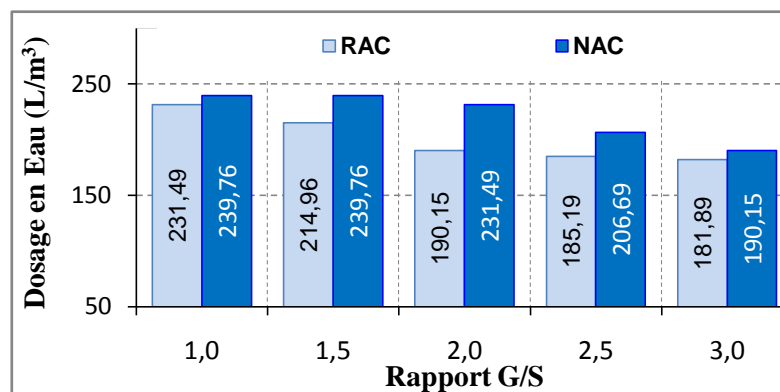
La variation du rapport G/S, entraîne une modification du dosage en eau et la variation de la masse volumique. Sachant que celle-ci évolue en fonction du niveau de remplacement entre sable et gravier, de la densité de chaque composant et de la nature des granulats naturels ou recyclés.

#### V.3.1/ DOSAGE EN EAU:

Les résultats obtenus du dosage en eau nécessaires pour la mise en œuvre des bétons recyclés et naturels en fonction du rapport G/S sont présentés dans les figures V.3 et V.4.



**Figure V.3:** Le dosage en eau en fonction du rapport G/S et du dosage en ciment des bétons recyclés.



**Figure V.4:** Le dosage en eau en fonction du rapport G/S et de la nature du béton, avec  $C=300 \text{ kg/m}^3$ .

Pour le cas des granulats recyclés, le dosage en eau du béton est en fonction du dosage en ciment (figure V.3). Un dosage élevé en ciment donne une surface spécifique développée donc une quantité d'eau en plus pour l'hydratation.

Les quantités d'eau les plus élevées sont enregistrées pour les bétons qui ont les plus grandes quantités de sable (Cas S = G) (figures V.3 et V.4), et cela est constaté pour les deux dosages en ciment  $C = 300 \text{ kg/m}^3$  et  $C = 400 \text{ kg/m}^3$ . Tandis que, les plus faibles dosages en

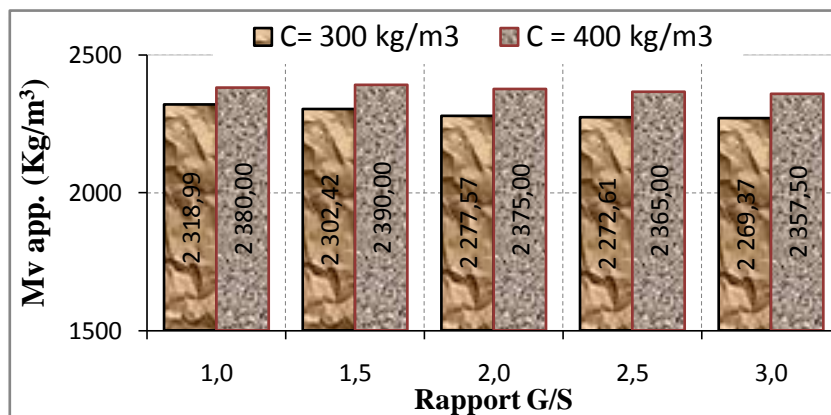
eau sont obtenus pour les bétons qui ont le plus grand rapport G/S (Cas de G/S = 3). Les dosages diminuent en fonction de l'augmentation du rapport G/S. lorsque le volume de gravier augmente au dépend de celui du sable, la surface spécifique des granulats se trouve diminue et par conséquent la quantité d'eau de gâchage diminue.

Pour maintenir une consistance plastique, et pour un dosage en ciment de  $300 \text{ kg/m}^3$ , la différence de dosage en eau des bétons recyclés par rapport à celui des bétons naturels, varie de 10 à  $43 \text{ l/m}^3$ , selon le rapport G/S, (figure V.4).

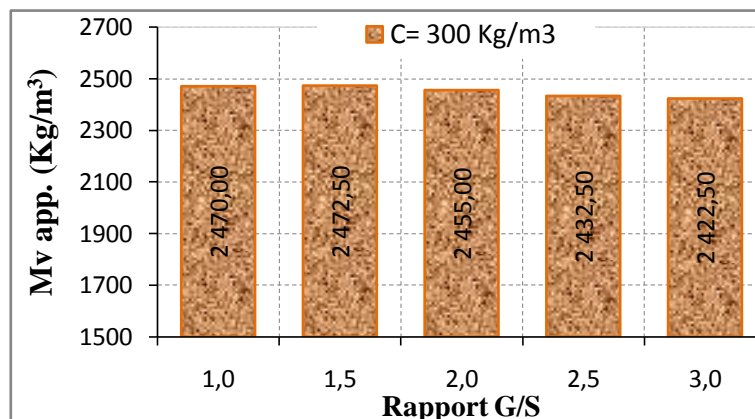
En général, le dosage en eau varie selon la nature et la qualité des granulats et les granulats recyclés ont un taux d'absorption d'eau plus élevé. Cependant, on a constaté que les quantités d'eau de gâchage des bétons naturels sont plus élevées que celles des bétons recyclés, quelque soit le rapport G/S, cela est due principalement au prémouillage des graviers recyclés et le sable naturel possède un module de finesse trop élevé.

### V.3.2/ LES MASSES VOLUMIQUES APPARENTES:

Les masses volumiques apparentes des différents types de béton frais sont présentées dans les figures V.5 et V.6.



**Figure V.5:** Variation des masses volumiques en fonction du rapport G/S et du dosage en ciment des bétons recyclés.



**Figure V.6:** Variation des masses volumiques en fonction du rapport G/S des bétons naturels.

Les figures V.5 et V.6 montrent que les masses volumiques de tous les bétons sont décroissantes lorsque le rapport G/S augmente. Celles-ci sont reliées aux masses volumiques des granulats utilisés et les quantités d'eau de gâchage. Puisque le volume de gravier devient dominant avec l'accroissement du rapport G/S et en plus les sables recyclés et naturels présentent des masses volumiques supérieures à celles des graviers. La quantité d'eau de gâchage diminue également quand le volume de sable diminue.

Les quantités des granulats de bétons recyclés faiblement dosés en ciment sont légèrement supérieures à celles des bétons fortement dosés, mais les masses volumiques de ces derniers sont plus grandes, cela est due au dosage et la masse volumique du ciment.

#### V.4/ EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES BETONS DURCIS:

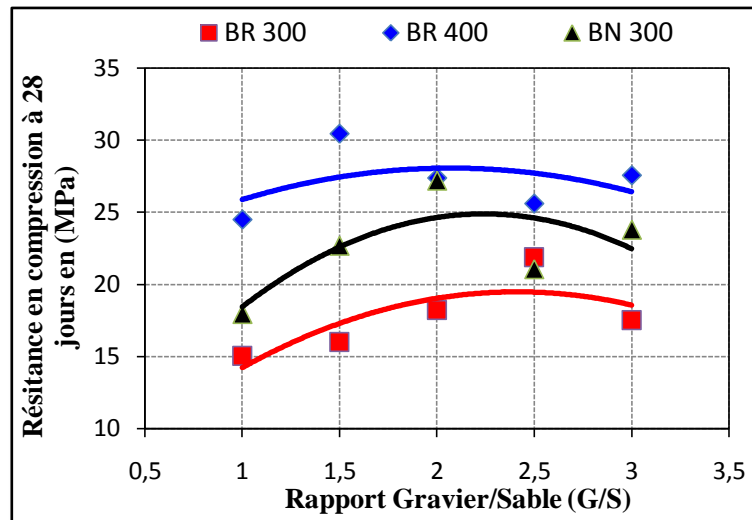
##### ▪ INFLUENCE DE LA VARIATION DU RAPPORT G/S SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION:

L'ensemble des résultats obtenus des résistances à la compression à 28 jours des bétons sont données par le tableau V.4.

**Tableau V.4:** Les résistances à la compression à 28 jours des bétons avec les différents rapports G/S et les deux dosages en ciment.

	Béton avec Granulats Recyclés					Béton avec Granulats Naturels				
Dosage en ciment	<b>C = 300 Kg/m<sup>3</sup></b>					<b>C = 300 Kg/m<sup>3</sup></b>				
Type de Béton	BR31	BR32	BR33	BR34	BR35	BN31	BN32	BN33	BN34	BN35
G/S	01	1,5	02	2,5	03	01	1,5	02	2,5	03
Rc <sub>28</sub> (MPa)	15,0	16,0	18,2	21,9	17,5	18,0	22,7	27,2	21,0	23,8
Dosage en ciment	<b>C = 400 Kg/m<sup>3</sup></b>									
Type de Béton	BR41	BR42	BR43	BR44	BR45					
Rc <sub>28</sub> (MPa)	24,5	30,4	27,4	25,6	27,6					

L'évolution de la résistance en compression à l'âge de 28 jours en fonction de l'augmentation du rapport G/S pour les bétons recyclés et naturels dosés à 300 et 400 kg/m<sup>3</sup>, est représentée par la figure V.4



**Figure V.7:** Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport G/S des bétons recyclés et naturels.

L'évolution de la résistance à la compression à 28 jours (figure V.7), est d'autant plus sensible à la variation du dosage en ciment, la résistance du béton recyclé dosé à  $400 \text{ kg/m}^3$  (BR400) est de l'ordre de 55 % de plus en moyenne de celle du béton dosé à  $300 \text{ kg/m}^3$  (BR300).

Le béton naturel dosé à  $300 \text{ kg/m}^3$  en ciment (BN300), enregistre une augmentation de la résistance à la compression en fonction de l'accroissement du rapport G/S. Un maximum est obtenu pour la valeur de  $G/S = 2$ , ceci s'accorde avec ce qui a été trouvé dans différentes littératures. Au-delà de cette valeur, une diminution de la résistance est constatée à cause d'un sujet de ségrégation due au manque de mortier, ce qu'on a constaté lors de la mesure de la maniabilité.

Les bétons recyclés BR300 et BR400, dosés respectivement à  $300$  et  $400 \text{ kg/m}^3$  en ciment, présentent une évolution semblable à celle obtenue pour le béton naturel (BN300). Cependant, les meilleures résistances ne sont pas obtenues pour le même rapport G/S. On a constaté que les optimums des résistances sont obtenus avec  $G/S = 2,5$  pour le béton dosé à  $300 \text{ Kg/m}^3$  et avec  $G/S = 1,5$  pour le béton dosé à  $400 \text{ kg/m}^3$ . Ceci est probablement dû à un excédent d'eau, alors que le rapport E/C est presque le même pour les deux dosages en ciment. Or, une augmentation de la quantité de ciment devrait être suivie par une diminution de la quantité d'eau.

En termes de volume des granulats recyclés (sable+ gravier), les mélanges dosés à  $300 \text{ kg/m}^3$  en ciment possèdent un volume supérieur à celui des mélanges dosés à  $400 \text{ kg/m}^3$  en ciment. Ces derniers se trouvent démunis principalement en sable lorsque le rapport G/S augmente. Cependant, pour avoir une rhéologie adéquate et le réseau constitué par les gros granulats se desserre, il faut la présence d'un volume de pâte (ou mortier) suffisant pour éviter une probable ségrégation.

**V.5/ CONCLUSION :**

Les essais réalisés et les résultats obtenus sur les bétons avec différents rapports gravier/sable variant de 1,0 à 3,0 montrent que :

- ✓ La ségrégation des bétons à faible pourcentage en sable a compliqué la mesure de la maniabilité.
- ✓ Le dosage en eau dépend étroitement du rapport G/S.
- ✓ Le rapport G/S affecte les masses volumiques réelles des bétons, et qui dépendent des caractéristiques intrinsèques des composants.
- ✓ Le rapport G/S influe sur la résistance du béton, mais la tendance et l'amplitude de cette variation dépendent du type de sable, du type de gravier et du dosage en ciment.
- ✓ L'augmentation du rapport G/S diminue les surfaces spécifiques des granulas (moins de fines), ce qui favorise l'apparition de ségrégation du béton et la chute des résistances.
- ✓ Les performances des bétons sont dominées en premier lieu par le rapport E/C puis par le rapport G/S. Pour mettre en relief ce dernier, un ajustement du dosage en eau devrait se faire pour chaque valeur du rapport G/S.
- ✓ Les résultats obtenus sont en parfaites concordances avec ceux trouvés dans la littérature.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux de démolition en tant que source de granulats pour les bétons hydrauliques. Dans ce contexte, il est aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation des granulats recyclés.

A partir de cette étude préliminaire et sur la base des résultats des essais rhéologiques et mécaniques sur les bétons à base des granulats recyclés avec et sans adjuvants pour un dosage en ciment constant et avec des rapports G/S variables de 1,0 à 3,0 pour deux dosages en ciment faible et élevé, on peut conclure ce qui suit:

- ✓ Les études sur les déchets de démolition ont commencé après la deuxième guerre mondiale. Actuellement, la valorisation de ces déchets a dépassé le stade d'expérimentations et connaît un développement assez important dans certains pays et plus particulièrement dans le secteur routier. La typologie et la qualité des déchets de construction et de démolition se diffèrent d'un pays à un autre et leur recyclage est beaucoup plus à caractère environnemental qu'économique.
- ✓ La meilleure méthode de démolition est la déconstruction sélective, qui est plus coûteuse, mais assure des granulats de bonne qualité.
- ✓ L'absorption d'eau très élevée et la résistance mécanique des granulats recyclés ont freiné leur utilisation dans le béton structural, par le suspecte d'avoir des conséquences néfaste sur la durabilité, l'insuffisance des études et le manque des normes spécifiques.
- ✓ La granularité des granulats est influencée par leur méthode d'élaboration. Les granulats recyclés préparés au niveau du laboratoire sont plus meilleures que ceux naturels acheminés de la carrière, selon la finesse des sables ou la continuité des courbes granulaires.
- ✓ Les granulats recyclés se caractérisent principalement par la présence hétérogène du vieux mortier de ciment attaché aux granulats. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécaniques de ces granulats sont dépendantes du volume et qualité de ce mortier. Ce qui a compliqué la caractérisation exacte de ces granulats.
- ✓ Les caractéristiques intrinsèques et mécaniques des granulats recyclés de cette étude sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, selon les seuils proposés dans la littérature, ils peuvent être qualifiés de qualité moyenne. Cela est dû à l'existence de la pâte cimentaire attachée aux granulats recyclés qui est poreuse et friable et de la nature des granulats naturels employés antérieurement d'une part et à la dégradation du béton démoli par des pathologies telle que la carbonatation d'autre part.

- ✓ La porosité importante des granulats recyclés a conduit à un fort taux d'absorption, qui a atteint 11 fois celui des graviers naturels, celui-ci a affecté le comportement rhéologique du béton frais et qui compromettrait la durabilité de ces bétons surtout s'ils seront utilisés dans des milieux agressifs.
- ✓ Le prémouillage des granulats recyclés a minimisé le dosage en eau des bétons et il a facilité leurs ouvrabilités.
- ✓ Les résistances mécaniques, à la compression à tout âge et à la traction par fendage à 28 jours, des bétons sans adjuvants à base des granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires selon la source et la taille, sont acceptables par rapport à celles des bétons naturels, probablement due à la qualité du béton structurel utilisé comme source de granulat. Ces performances mécaniques mettent en évidence, que les granulats recyclés peuvent fournir des bétons de résistance caractéristique à 28 jours en compression dans les limites de 25 à 30 MPa sans aucune technologie adaptée. La composition mixte sable recyclé et gravier naturel est la mieux envisageable dans l'immédiat et le problème de l'indisponibilité de granulats en fins constaté pour certaines régions en Algérie, se trouve résolu.
- ✓ L'incorporation d'un superplastifiant SP 40, n'a pas donné d'amélioration significative escomptée que ce soit en gain sur le dosage en eau ou l'amélioration des performances mécaniques des bétons recyclés, contrairement aux bétons naturels. Economiquement l'utilisation des adjuvants dans les bétons recyclés est dispensable.
- ✓ L'utilisation des granulats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse aux problèmes des déchets de démolition. Le béton recyclé peut être utilisé dans les structures de moindres portances et dans des conditions d'agressivité faibles.
- ✓ Les performances des bétons sont dominées en premier lieu par le rapport E/C puis par le rapport G/S. Ce dernier influe sur la résistance du béton, mais la tendance et l'amplitude de cette variation dépendent du type de sable, du type de gravier et du dosage en ciment. Un rapport G/S de 2,0 est le mieux adapté pour de bonnes résistances en présence de granulats recyclés.
- ✓ On a pu mettre en évidence la faisabilité des granulats recyclés comme substituts aux granulats naturels, tant que sur le plan de l'exploitation des ressources naturels que sur celui de l'environnement et de l'économie.

### **Les perspectives:**

- ✓ Large investigation concernant d'autres paramètres de composition.
- ✓ Confronter les résultats obtenus en laboratoire avec ceux de chantier à grand échelle.
- ✓ Etude de la microstructure des bétons recyclés.
- ✓ Etude de la durabilité de ces bétons.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: A. CHAREF, "*La problématique des granulats au Maroc*", Push-Button Publishing, (2007).
- [2]: Norme Française XP P 18-540, "*Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540*", (1997).
- [3]: R. MAILLOT, "*Mémento technique des Granulats*", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
- [4]: DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE, "*La Technologie du Béton*", Guf\Formation\Béton\Technobeton V05\_01U, 140 p.
- [5]: J. BARON, et R. SAUTREY, "*Le béton hydraulique*", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p., (1982).
- [6]: V. PHOUMMAVONG, "*Cours en ligne matériaux de construction*", Université Nationale du Laos, <http://www.la.refer.org/materiaux/>
- [7]: A. M. NEVILLE, "*Propriétés des bétons*", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p., (2000).
- [8]: G. ARQUIE & C. TOURENQ, "*Granulats*", Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 717 p., (1990).
- [9]: J. ALEXANDRE & J. SEBILEAU, "*Laitier de haut fourneau*", Centre Technique et de Promotion des Laitiers, Paris édition, 340 p., (1988).
- [10]: S. HACHAICHI, "*Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton*", Thèse de Magister, 92 p., (2008).
- [11]: Le LERM, "*Déchets de chantiers de bâtiment*", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME, (1999).
- [12]: ADEME, "*Guide des déchets de chantiers de bâtiment*", Paris, (1998).
- [13]: H. DJELAL & V. NOUVEL, "*Gestion des déchets de démolition et environnement*", XXVI<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).
- [14]: N. BOURMATTE, "*Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité*", Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 159 p., (2005).
- [15]: M. QUEBAUD, "*Caractérisation des granulats recyclés : Étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats*", Thèse de doctorat, Université d'Artois, 247 p., (1996).
- [16]: RILEM, "*Demolition and Reuse of concrete*", Report of technical committee, 37-DRC, T.C Hansen, E&FN SPON, 305 p., (1988).
- [17]: F. PELLERIN, "*Caractérisation des granulats recyclés fabriqués avec du béton de ciment et des enrobés bitumineux pour utilisation dans les fondations routières*", Thèse de master es sciences, Université de Laval, 165 p., (2000).
- [18]: C. CIMPELLI, "*Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'île-de-France : Les bétons et produits de démolition recyclés*", 43 p., (1996).

- [19]: T. C. HANSEN, "*Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*", demolition and recycling of concrete, 19(3), pp:201-246, (1986). (rapporté par [13])
- [20]: H. HUSSAIN & D. LEVACHER, "*Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons*", XXI<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, (2003).
- [21]: Norme Française P 18-553, "*Granulats -Préparation d'un échantillon pour essai*", AFNOR, (1990).
- [22]: Norme Française EN 932-1, "*Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage*", AFNOR, (1996).
- [23]: J. BARON & J. P. OLIVIER, "*Les bétons, bases et données pour leur formulation*", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, R. BERTRANDY et C. PIKETTY, "*Les granulats pour bétons*", 2<sup>ème</sup> tirage, Edition Eyrolles, 522 p., (1997).
- [24]: G. DREUX & J. FESTA, "*Nouveau guide du bétonnet ses constituants*", Edition Eyrolles, 8<sup>ème</sup> édition, 409 p., (1998).
- [25]: R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN, "*Granulats, Sols, Ciments et Bétons*", Editions Casteilla, 2<sup>ème</sup> édition conforme aux normes européennes, 236 p., (2000).
- [26]: F. GABRYSIK, "*Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2*", Académie de Nancy-Metz, [http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment\\_Pro/](http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/)
- [27]: Y. DESCANTES, Y. FOSSE & G. EHRET, "*Automated measurement of aggregate properties Part 1: Crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles*", Materials and Structures, 39(1), pp:3–12, (2006).
- [28]: Norme française XP P 18-566, "*Granulats : Analyse granulométrique, aplatissement, allongement – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie*", AFNOR, (2002).
- [29]: Norme Française EN 12-620, "*Granulats pour béton hydraulique*", (2004).
- [30]: Norme Française EN 933-3, "*Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement*", AFNOR, (1996).
- [31]: T. YAMATO & M. SOEDA, "*Physical properties of recycled aggregate and the utilization as concrete aggregate*", International seminar on Recycled Concrete, (2000). (rapporté par [39])
- [32]: J. L. DURVILLE & H. HERAUD, "*Description des roches et des massifs rocheux*", Techniques de l'ingénieur C 352, 13 p., (1995).
- [33]: CH. GHERDAOUI, "*Influence des fines minérales sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de sable de carrières de la région de Guelma*", Mémoire de Magister, Université Badji M. - Annaba, 94 p., (2007).
- [34]: Norme Française P 18 554, "*Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux*", (1990).

- [35]: Norme Française P 18-555, "*Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables*", AFNOR, (1990).
- [36]: Norme Française P 18-558, "*Granulats: Détermination de la masse volumique absolue des fines*", AFNOR, (1990).
- [37]: Norme Française EN 1097-3, "*Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3: Détermination de la Masse volumique apparente*", AFNOR, (1996).
- [38]: Norme Française EN 1097-6, "*Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient de l'absorption d'eau*", AFNOR, (1996).
- [39]: L. MIREN ETXEBERRIA, "*Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete*", Thèse de doctorat, Université polytechnique de Catalogne - Espagne, 242 p., (2004).
- [40]: R.S. RAVINDRARAJAH, M. STEWARD & D. GRECO, "*Variability of Recycled Concrete Aggregate and its Effects on Concrete Properties*", 2nd International Conference on Engineering Materials, San Jose, USA, (2001).
- [41]: Norme Française XP P 18-598, "*Granulats- Equivalent de sable*", AFNOR, (1991).
- [42]: Norme Française XP P 18-597, "*Granulats- Détermination de la propriété des sables : équivalent de sable à 10 % de fines*", AFNOR, (1990).
- [43]: Norme Française EN 933-8, "*Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8: évaluation des fines - équivalent de sable*", AFNOR, (1996).
- [44]: Norme Française EN 933-9, "*Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9: Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène*", AFNOR, (1996).
- [45]: Norme Française XP P 18-591, "*Granulats - détermination de la propriété superficielle*", AFNOR, (1990).
- [46]: J. S. FERGUS, "*Investigation and Mix Proportions for utilizing Recycled Portland Cement Concrete as Aggregate*", National Seminar on PCC Pavement Recycling and Rehabilitation; St. Louis, Missouri, USA, Federal Highway Administration Report; pp:144-160, (1981).
- [47]: Norme Européenne EN 206-1, "*Béton Partie 1: Spécification, performances, production et conformité*", (2002).
- [48]: V.W.Y. TAM, "Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials", **Resources, Conservation and Recycling**, 52(1), pp:39-57, (2007).
- [49]: Norme Européenne EN 1367-1, "*Résistance à l'alternance gel-dégel*",
- [50]: A. AJDUKIEWICZ & A. KLISZCZEWICZ, "*Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC*", *Cement & Concrete Composites*, 24(2), pp:269-279, (2002).
- [51]: I. B. TOPÇU & S. SENDEL, "*Properties of concretes produced with concrete aggregate*", Civil Engineering Department, Université d'Osmangazi, Turkey, (2004).

- [52]: V. W. Y. TAM, X. F. GAO & C. M. TAM, "*Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*", *Cement & Concrete Research*, 35(6):1195–203, (2005).
- [53]: D. SANI, G. MORICONI, G. FAVA & V. CORINALDESI, "*Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates*", *Waste Management*, 25(2), pp:177-182, (2005).
- [54]: Norme Française XP P 18-573, "*Granulats - Essai Los-Angeles*", AFNOR, (1990).
- [55]: Norme Française EN 1097-2, "*Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation*", AFNOR, (1996).
- [56]: Norme Française XP P 18-574, "*Granulats - Essai de fragmentation dynamique*", AFNOR, (1990).
- [57]: Norme Française P 18-577, "*Granulats - Essai Micro-Deval*", AFNOR, (1990).
- [58]: Norme Française EN 1097-1, "*Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) (indice de classement P 18-650.1)*", AFNOR, (1996).
- [59]: J. BARON et J. P. OLIVIER, "*Les bétons, bases et données pour leur formulation*", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, K. KHAYAT et J. P. OLIVIER, "*Viser une consistance adaptée aux moyens de mise en œuvre - indice de la mise en œuvre sur la formulation des bétons*", 2<sup>ème</sup> tirage, Edition Eyrolles, 522 p., (1997).
- [60]: F. GABRYSIK, "*Matériaux - Les Bétons - Chapitre 4*", Académie de Nancy-Metz, [http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment\\_Pro/](http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/)
- [61]: S. S. JANKAR et C. B. K. RAO, "*Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning*", *Cement & concrete research*, 34(11), pp:2021-2027, (2004).
- [62]: S. BETHMONT, "*Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplacants*", Thèse de Doctorat, ENPC Paris, France, 166 p., (2005).
- [63]: M. WESTERHOLM, D. LAGERBLAD, J. SILFWERBRAND & E. FORSSBERG, "*Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*", *Cement & Concrete Composites*, 30(4), pp:274-282, (2008).
- [64]: M. S. RASHWAN & S. ABOURIZK, "*The properties of recycled concrete*", *Concrete International*, 19(7), pp:56–60, (1997).
- [65]: C. S. POON, Z. H. SHUI, L. LAM & S. C. KOU, "*Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete*", *Cement & Concrete Research*, 34(1), pp:31–36, (2004).
- [66]: C. S. POON & C. S. LAM, "*The effect of aggregates-to- cement (A/C) ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks*", *Cement & Concrete Composites*, 30(4), pp:283-289, (2008).
- [67]: T. MUKAI, M. KIKUCHI & N. ISHIKAWA, "*Study on the properties of concrete containing recycle concrete aggregate*", *Cement Association of Japan*, 32d review, (1978), (rapporté par [39]).

- [68]: T.C. HANSEN & H. NARUD, "*Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*", Concrete International- design and construction, 5(1), pp:79-83, (1983).
- [69]: A. NEALEN & S. SCHENK, "*The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties*", In Darmstadt concrete, Annual Journal 13, TU Darmstadt, (1998).
- [70]: M. BARRA & ALL., "*Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation, use of recycled concrete aggregate*", Sustainable Construction. ISBN 0-7277-2726-5. pp:19–30, (1998).
- [71]: K. KOKUBU, TSHIMIZU & A. UENO, "*Effects of recycled aggregate qualities on the mechanical properties of concrete, InternacionaI Workshop on Recycled Concrete*", Tokyo, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Japan Society for the Promotion of Science, pp:107–115, (2000).
- [72]: H. DONZA, O. CABRERA & E. F. IRASSAR, "*High-strength concrete with different fine aggregate*", Cement & Concrete Research, 32(11), pp:1755-1761, (2002).
- [73]: R. JONES et M. F. KAPLAN, "*The effects of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure*", Magazine of Concrete Research, 9(26), pp:89-94, (1957). (rapporté par [7])
- [74]: O. ÖZKAN, I. YÜKSEL & O. MURATÖĞLU, "*Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag*", Waste Management, 27(2), pp:161-167, (2007).
- [75]: A. KILIÇ & ALL., "*The influence of the aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete*", Cement & Concrete Composites, 30(4), pp: 290-296, (2008).
- [76]: M. F. KAPLAN, "*Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates*", ACI Journal Proceedings, 55, pp:1193-1202, (1959) ( rapporté par [7]).
- [77]: S. CHANDRA & L. BERNTSSON, "*Lightweight Aggregate concrete*", Noyes Publications, 406 p., (2002).
- [78]: E. WIRQUIN, R. HADJIEVA-ZAHARIEVA & F. BUYLE-BODIN, "*Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés*", Materials and Structures, 33(6), pp:403-408, (2000).
- [79]: R. HADJIEVA-ZAHARIEVA, "*Durabilité des bétons à base de granulats recyclés*", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 350 p., (1998) (rapporté par [70]).
- [80]: FT OLORUNSOGO & N. PADAYACHEE, "*Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*", Cement & Concrete Research, 32(2), pp:179–185, (2002).
- [81]: Y. MALIER, "*Les bétons à haute performance, caractérisation, durabilité et applications*", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 673p., (1992).
- [82]: Projet de recherche, "*Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM)*", hautes écoles et instituts de recherche, République fédérale d'Allemagne, www.b-i-m.de

- [83]: S. HASABA, M. KAWAMURA, T. KAZUYUKI & T. KUNIO, "*Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregates*", Trans. Jap. Concr. Inst., 3, pp:55–60, (1981), (rapporté par [39]).
- [84]: A. KATZ, "*Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*", Cement & Concrete Research, 33(5), pp:703–11, (2003).
- [85]: M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, "*Influence of recycled aggregate quality on concrete properties*", laboratoire Central des Matériaux et Structures, Espagne.
- [86]: F. LORANGER, "*Caractérisation de matériaux recyclés (bétons, enrobes et fondations granulaires) et évaluation de leur performance dans les bétons conventionnels et compactes au rouleau*", Mémoire de Maître ES Sciences, Université Laval, 198 p., (2001).
- [87]: L. BERREDJEM & N. ARABI, "*Les matériaux de démolition des déchets inertes, une source de granulats pour béton*", Séminaire national sur l'environnement et industrie, Sheraton Oran, pp :31-43, (2009).
- [88]: 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).
- [89]: S. W. TABSH & A. S. ABDELFATAH, "*Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*", Construction and Building Materials, 23(2), 1163-1167, (2009).
- [90]: B. GONZALEZ FONTEBOA, "*Hormigones conàridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecànicas y comportamiento estructural a cortante*", Thèse de Doctorat, Université de la Coruna - Espagne, (2002).
- [91]: H. C. ERNTROY & B. W. SHACKLOCK, "*Design of high strength concrete mixes*, proc. Of a symposium on mix design and quality control of concrete", Cement and Concrete Assoc., London, pp:55-73, (1954) (rapporté par [39]).
- [92]: T. MUKAI & ALL. "*Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete*", seminar on "energy and resources conservation in concrete technology", Japan-US co-operative science programme, San Francisco, (1979) (rapporté par [39]).
- [93]: M. TAVAKOLI & P. SOROUSHAN, "*Strengths of recycled Aggregate Concrete Made Using Field- Demolished Concrete as Aggregate*", ACI materials Journal, (1996).
- [94]: T. ÖZTURAN & C. ÇEÇEN, "*Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths*", Cement & Concrete Research, 27(2), pp:165-170, (1997).
- [95]: J.P. GONÇALVES & ALL., "*Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars*", Cement & Concrete Research, 37(6), pp:924-932, (2007).
- [96]: M. J. ESTEFANO de OLIVEIRA, C. SILVEIRA de ASSIS & A. W. TERNI, "*Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate*", Université Estadual Paulista, Brazil.

- [97]: A. RAO, "*Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete*", Thèse de Doctorat, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur - Inde, (2005).
- [98]: A. RAO, N. JHAB KUMAR & S. MISRA, "*Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*", Resources, Conservation and Recycling, 50(1), pp:71-81, (2007).
- [99]: S. M. LEVY & P. HELENE, "*Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*", Cement and Concrete Research, 34(11), pp:1975–1980, (2004).
- [100]: R. N. SWAMY, "*The Alkali-Silica Reaction in Concrete*", Blackie and Son. Ltd, Glasgow, 336 p., (1992).
- [101]: F.R. GOTTFREDSSEN & F. THOGERSEN, "*Recycling of concrete in aggressive environment*", 3rd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry Odense”, Denmark, pp:362-370, (1993).
- [102]: A. GOKCE, S. NAGATAKI, T. Saeki & M. Hisada, "*Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: the role of air content in demolished concrete*", Cement and Concrete Research, 34(5), pp:799–806, (2004).
- [103]: R.M. SALEM & E.G. BURDETTE, "*Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete*", ACI Materials Journal, 95(5), pp:558–563, (1998).
- [104]: M. Barra de Oliveira & E. VAZQUEZ, "*The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete*", Waste Management, 16(1-3), pp:113–117, (1996).
- [105]: Norme Française P 15-301, "*Liants hydrauliques - Définitions, classification et spécification des ciments*", AFNOR, (1994).
- [106]: Norme Française EN 197-1, "*Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*" AFNOR, pp:1-41, (2001).
- [107]: Norme Européenne EN 196-3, "*Méthodes d'essais des ciments, partie 3: détermination du temps de prise et de la stabilité*", AFNOR Tome 3, (1995).
- [108]: Norme Française EN 196-6, "*Finesse de mouture des ciments*", AFNOR,
- [109]: Norme Française NF P 15-442, "*Finesse de mouture des ciments mesurée au perméabilimètre de Blaine*", AFNOR,
- [110]: Norme Française P 18-560, "*Granulats - Analyse granulométrique par tamisage*", AFNOR, (1990).
- [111]: Norme Française XP P 18-572, "*Granulats - Essai d'usure Micro-Deval*", AFNOR, (1990).
- [112]: Norme Française P 18-421, "*Béton frais mise en place par micro table vibrante*", (1981).
- [113]: Norme Française P 18-451, "*Béton frais essais d'affaissement au cône*", Béton et constituants du béton, T2 ciment et chaux, recueil de normes françaises AFNOR, (1990).

- [114]: British Standard, 1881- BS. partie 116, (1983).
- [115]: Norme Française P 18-408, "*Bétons : Essai de Fendage*", AFNOR, (1990).
- [116]: Norme Française EN 1008, "*Eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*", (2003) Indice de classement : P 18-211.
- [117]: Norme Française XP P 18-541, "*Granulats- Granulats pour béton hydrauliques, spécifications*", AFNOR, (1994).
- [118]: Norme Française EN 934-2, "*Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions et exigences*", (2002).

## ANNEXES

**Annexe 1:** Les Spécifications des granulats pour les bétons hydrauliques [26].

Catégories	A	B	C	D
<b>Gravillons</b>				
Los Angeles	$V_{ss} \leq 30$	$V_{ss} \leq 40$		$V_{ss} \leq 50$
Passants à 2 D	$V_{si} = 100$			FTP R (1)
Passants à 1,58 D	$V_{si} = 99$			FTP R (1)
Passants à D	$V_{si} \geq 80$ ; $V_{ss} \leq 99$ ; $V_{ss}-V_{si} = 15$	$V_{ss}-V_{si} = 19$		FTP R (1)
Passants à $(d+D)/2$ (si $D^3 \geq 2,5 d$ )	$V_{si} \geq 25$	$V_{si} \geq 20$ ; $V_{ss} \leq 80$		FTP R (1)
	$V_{ss} \leq 75$	$V_{ss} - V_{si} = 40$		
	$V_{ss}-V_{si} = 35$			
Passants à d	$V_{si} \geq 1$ ; $V_{ss} \leq 20$ ; $V_{ss}-V_{si}=15$	$V_{ss}-V_{si} = 19$		FTP R (1)
Passants à 0,63 d	$V_{ss} = 5$			FTP R (1)
Propreté	Gravillons de roches massives : $V_{ss} = 3$ Gravillons alluvionnaires si $IC \geq 50$ (2) et $VBF \leq 10$ . $V_{ss} = 3$ Autres cas: $V_{ss} = 1,5$			
Coefficient d'aplatissement	$V_{ss} = 20$	$V_{ss} = 30$		$V_{ss} = 40$
Absorption d'eau	$V_{ss} = 2,5$	$V_{ss} = 5$	$V_{ss} = 6$	FTP R (1)
<b>Sables</b>				
Passants à 2 D	$V_{si} = 100$			
Passants à 1,58 D	$V_{si} = 99$			
Passants à D	$V_{si} = 85$ ; $V_{ss} = 99$			
Module de finesse	$V_{ss} - V_{si} = 0,6$	$V_{ss} - V_{si} = 0,7$		$V_{ss} - V_{si} = 0,8$
	$V_{si} \geq 1,8$ ; $V_{ss}^2 < 3,2$			
Teneur en passants à 0,08 mm de la fraction 0/4 mm fines	$V_{ss} \leq 12$	$V_{ss} \leq 15$	$V_{ss} \leq 18$	FTP R (1)
	et $V_{ss}-V_{si} = 3$	et $V_{ss}-V_{si} = 5$	et $V_{ss}-V_{si} = 6$	FTP R (1)
	ou $CV \leq 20\%^3$	ou $CV \leq 20\%^3$	ou $CV \leq 20\%^3$	
Propreté $VB_{0,D}$ , ou PS (%) sur sables roulés ( $IC \leq 50$ ) <sup>(2)</sup> PS (%) sur autres sables	$V_{ss} = 1$			
	$V_{si} = 65$		$V_{si} = 60$	
	$V_{si} = 60$		$V_{si} = 50$	
Absorption d'eau	$V_{ss} = 2,5$	$V_{ss} = 5$	$V_{ss} = 6$	FTP R (1)
<b>Sablons</b>				
Passants à 1,58 D	$V_{si} = 100$			FTP R (1)
Passants à D	$V_{si} = 85$ ; $V_{ss} = 99$			
Passants à 0,08 mm	$V_{ss} = 10$			FTP R (1)
Propreté VB	$V_{ss} = 1$	$V_{ss} = 2$		FTP R (1)
<b>Fillers</b>				
Passants à 2 mm	$V_{si} = 100$			
Passants à D	$V_{si} = 85$ ; $V_{ss} = 99$			
Passants à 0,125 mm	$V_{si} \geq 80$ ; $V_{ss}-V_{si}=10$			
Passants à 0,063 mm	$V_{si} \geq 70$ ; $V_{ss}-V_{si}=10$			
Propreté VBF	$V_{ss} = 10$			

(1) FTP R : La "Fiche Technique du produit" doit être " Renseignée ", même si la norme n'impose pas de spécifications pour cette catégorie de granulats,

(2) IC : Indice de concassage, Soit D, la dimension maximale du granulat élaboré par concassage d'un granulat d'origine, IC est le pourcentage d'éléments du granulat d'origine dont la dimension est supérieure à D,

(3) CV : Coefficient de variation, C'est le rapport entre l'écart type estimé et la moyenne arithmétique,

## Annexe 2: Un récapitulatif des spécifications exigées par la norme "XP P 18-540" Cas général [27].

Propriété	Valeur limite absolue ou valeur spécifiée ( $V_s$ ) si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois	Valeur limite absolue si plus de 14 résultats datant de moins de 15 mois (borne = $V_s \pm U$ )	Alcali-réaction : alcalins actifs	datant de moins de 15 mois	de 15 mois (borne = $V_s \pm U$ )
<b>Propriété</b>					
<b>Fillers :</b> - passant à 2 mm - passant à 0,125 mm - passant à 0,063 mm	$\geq 99\%$ $\geq 80\%$ $\geq 70\%$	$\geq 94\%$ $\geq 75\%$ $\geq 65\%$	<b>Propreté des fillers :</b> $V_{Bia}$	$\leq 1$	$\leq 1,3$
<b>Granularité des sables (sable résultant) :</b> - passant à D mm - passant à 0,08 mm - dispersion	$\geq 85\%$ $\leq 12\%$	$\geq 80\%$ $\leq 15\%$	<b>Propreté des sables :</b> - $E_{SV}$ - $E_S$	$\geq 75$ $\geq 70$ (65 et 60 pour sables concassés ou broyés)	$\geq 70$ $\geq 65$ (60 et 55 pour sables concassés ou broyés)
<b>Granularité des gravillons</b> (passant à 0,5 mm) :	étendue $\leq 3$ points ou coefficient de variation $\leq 20\%$	$\geq 1,65$ et $\geq 3,35$ $\geq$ moyenne - 0,50 et $\leq$ moyenne + 0,50	- valeur de bleu $V_{Bia}$	$\leq 1$	$\leq 1,3$
- module de finesse : valeurs limites	$\geq 1,8$ et $\geq 3,2$		<b>Propreté des gravillons</b> (passant à 0,5 mm) :	$\leq 1,5\%$ $\leq 3\%$	$\leq 2\%$ $\leq 3,5\%$
- tolérance sur $V_s$	$\geq$ moyenne - 0,35 et $\leq$ moyenne + 0,35		- gravillons non concassés - gravillons concassés		
<b>Granularité des gravillons</b> si $D \geq 2,5$ d : passant à (d + D)/2	$\leq$ moyenne + 17,5 $\leq 75$ $\geq$ moyenne - 17,5 $\geq 25$		<b>Teneur en soufre total :</b> - exprimée en S - exprimée en $SO_3$	$\leq 0,4\%$ $\leq 1\%$	$\leq 0,45\%$ $\leq 1,1\%$
<b>Absorption d'eau Ab</b>	$\leq 5\%$	$\leq 5,5\%$	<b>Teneur en sulfates :</b> - exprimée en $SO_3$	$\leq 0,15\%$	$\leq 0,20\%$
<b>Résistances mécaniques :</b> - coefficient Los Angeles - coefficient de friabilité des sables (sables alluvionnaires et sables de recyclage)	$\leq 40$ $\leq 60$	$\leq 43$ $\leq 65$	<b>Matières organiques</b>		Essai colorimétrique négatif
<b>Coefficient d'aplatissement</b>	$\leq 30\%$	$\leq 34\%$	<b>Teneur en chlorures</b>	A communiquer si $> 0,06\%$	
<b>Homogénéité</b>	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$	<b>Teneur en éléments coquilliers des gravillons</b>	$\leq 10\%$	$\leq 15\%$
<b>Impuretés prohibées et débris végétaux</b>	$\leq 0,1\%$	$\leq 0,12\%$			
<b>Sensibilité au gel</b>	$\leq 50\%$	$\leq 55\%$			

$E_S$  : équivalent de sable au piston (P 18-598)  
 $E_{SV}$  : équivalent de sable visuel (P 18-598)  
 $V_{Bia}$  : valeur de bleu des fines (P 18-592)  
 $V_{Biu}$  : valeur de bleu turbidimétrique des fines (P 18-595)

**Annexe 3:** La fiche technique du ciment CEM II 42,5, élaborée par le laboratoire de l'usine "Hadjar Essoud".

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE				CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
CODE	% EN MASSE	CODE			CODE	EN MPA	
NA 235	PAF 975°C 1 - 5	NA230	CONSISTANCE NORMAL	25 - 27,5	NA 234	RESISTANCES A LA COMPRESSION	
NF P15 467 FLUOX	CaO 56 - 63	NA230	DEBUT DE PRISE	100 - 170	2j	> 12,5	
NF P15 467 FLUOX	SiO2 19-27	NA230	FIN DE PRISE	180 - 270	7j	> 22	
NF P15 467 FLUOX	Al2O3 4 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	0,3 - 5	28j	> 42,5	
NF P15 467 FLUOX	Fe2O3 2,5-3,5	NA231	AIR MASSIQUE	3200 -3700	NA 234	RESISTANCES A LA FLEXION	
NF P15 467 FLUOX	MgO 1- 2	NA231	MASSE VOLUMIQUE	3,05 -3,12 g/cm <sup>3</sup>	2j	3 - 4	
NF P15 467 FLUOX	K2O 0,3-0,6	INSTR	REFUS AU TAMIS 45µ	18 - 28	7j	5 - 7	
NF P15 467 FLUOX	Na2O 0,1-0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER µm/m	≤ 800	28j	6,2 - 8	
NF P15 467 FLUOX	SO3 2 - 3	COMPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS (Hors gypse)			
GLYCOL	CaOL 0,5 -2,5	C3S	50 - 65	CLINKER	75		
NF P15 467 FLUOX	CL <sup>-</sup> 0 -0,02	C2S	10 - 25	GYPSE	5		
		C3A	9 - 12	LAITIER/TUF	20		
		C4AF	7 - 11				

**PRECAUTION D'EMPLOI**

Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industriels)
- Travaux à la mer
- Bétonnage au dessous de 5° C

\* LE PRODUIT DECRIT SUR CETTE FICHE CONFORME A LA NORME NA 442 VERSION 2000


\* LES CARACTERISTIQUES DU PRODUIT CI-DESSUS INDIQUEES SONT MESUREES AU LABORATOIR DE LA SCHS

**Annexe 4:** Les caractéristiques principales du plastifiant **PLASTIMENT BV 40**, fournis par le fabricant Sika, Alger.

## PLASTIMENT® BV 40

### Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2



**Présentation**

PLASTIMENT BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité,
- facilite la mise en place du béton,
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment,
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

**Domaines d'application**

1. **Augmentation des résistances mécaniques.**  
 PLASTIMENT BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du béton. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.


■ les bétons armés à hautes performances,  
 ■ les bétons précontraints,  
 ■ les bétons préfabriqués étuvés.

2. **Réduction du dosage en ciment.**  
 PLASTIMENT BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques.

3. **Amélioration de la maniabilité.**  
 PLASTIMENT BV 40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10 % environ. Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferrillées et dans le cas de bétons pompés.

4. **Augmentation du délai de mise en œuvre.**  
 A dosage élevé, PLASTIMENT BV 40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :  
 ■ à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %.  
 ■ à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h.  
 PLASTIMENT BV 40 est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AERS.

Cette combinaison conduit à :  
 ■ l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,  
 ■ la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),  
 ■ l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.



PLASTIMENT® BV 40 1/3

**Caractéristiques**

Aspect Liquide brun foncé

Conditionnement

- Fût de 250 kg
- Conteneur perdu de 1000 litres
- Vrac

Stockage

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut subir une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation

Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

**Données techniques**

Densité 1,185 ± 0,015

pH 4,5 ± 1


Extrait sec 38,5 ± 1,9 %

Teneur en ion CF ≤ 0,1 %

Teneur en Na<sub>2</sub>O éq. ≤ 2,0 %

Temps de prise (NF EN 480-2)

	CEM I 52,5 PM ES CP2 HTS		CEM I 52,5 Gargenville	
	La Tril	5°C	20°C	5°C
PLASTIMENT® BV40 0,5%	11 h 00	15 h 00	10 h 00	22 h 00
PLASTIMENT® BV40 1,25%	24 h 00	26 h 00	20 h 00	33 h 00



PLASTIMENT® BV 40 2/3

**Annexe 5:** Les caractéristiques principales du plastifiant SIKAMENT FF 86, fournis par le fabricant Granitex, Alger.

Numéro de version  
Version n°47.2004  
SIKAMENT® FF 86

**SIKAMENT® FF 86**  
Plastifiant Réducteur d'Eau pour bétons à hautes performances.

Conforme à la norme NF EN 924-2 tab. 1 et 2

**NF CE**

**Présentation**  
Le SIKAMENT® FF 86 est un réducteur d'eau de synthèse très puissant. Il permet la confection de bétons à très faible rapport E/C ayant des caractéristiques mécaniques très élevées à toutes les échéances et en particulier aux jeunes âges.

**Domaines d'application**  
Bétons à hautes performances  
Le SIKAMENT® FF 86 permet de réduire très fortement la quantité d'eau de gâchage et de réduire ainsi le rapport E/C. Il permet ainsi d'obtenir des bétons à hautes performances et à des gains de résistances très importants.  
Le SIKAMENT® FF 86 est utilisé pour :  
■ les bétons à caractéristiques mécaniques initiales et finales élevées,  
■ les bétons appariés de grande civi,  
■ les ouvrages d'art, etc.

L'emploi du SIKAMENT® FF 86 dans des bétons additionnés de fumées de silice autorise, par la séquestration des grains de ciment et de silice, l'obtention de très hauts rapports E/C. La formulation et avec des granulats de qualité courante, les bétons peuvent atteindre des résistances supérieures à 70 MPa.  
Leur très faible perméabilité leur confère une durabilité exceptionnelle à l'égard des agressions physiques (gel-dégel, abrasion...) et chimiques (carbonatation, acido-faïence, environnement agressifs...). Nous conseillons :


**Préfabrication**  
Le SIKAMENT® FF 86 permet d'obtenir des résistances élevées à très court terme, d'un économie de temps et d'énergie dans les usines de préfabrication. Les caractéristiques mécaniques importantes sont nécessaires à la réalisation de pièces telles que :  
■ voûtes,  
■ poutres précontraintes, etc.

**Caractères généraux**  
Le SIKAMENT® FF 86 permet la confection de bétons fluides parfaitement :  
■ bétons à haute performance avec ou sans fumées de silice (résistance caractéristique > 50 MPa),  
■ bétons préfabriqués, étuvés ou non.

**Caractéristiques**  
Cétons : marbre à gris  
Conditionnement : ■ 50 kg de 250 kg  
■ Vrac

1

SIKAMENTS FF 86 1/2



**Conservation**  
3 ans dans son emballage initial

**Données techniques**  
densité : 1,23 ± 0,02  
pH : 7 à 11  
Teneur en ions Cl<sup>-</sup> : < 0,1 %  
Teneur en Na<sub>2</sub>O eq. : ≤ 6,0 %  
Extrait sec : 40 ± 1,5 %

**Conditions d'application**  
Dosage  
Plage d'utilisation recommandée : 0,4 à 2 % du poids du ciment selon les performances recherchées.  
Ce dosage pourra être déphasé pour obtenir des réductions d'eau très importantes notamment lors de la confection de bétons avec fumées de silice.


**Mise en œuvre**  
Le SIKAMENT® FF 86 est ajouté en même temps que l'eau de gâchage. Son effet sera maximum s'il est introduit sur un béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.  
Il peut également être introduit dans le camion malaxeur sur le chantier juste avant le placement, sous réserve d'effectuer un malaxage d'au moins 1 minute par m<sup>3</sup> de béton.

**Précautions d'emploi**  
En cas de contact avec la peau, laver à l'eau.  
Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Mintel 3513, code SIKASECUR ou sur l'internet www.sika.fr

**Mentions légales**  
Produit réservé à un usage strictement professionnel  
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.  
Et à l'exception des produits Sika, sont fournis en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance des conditions normales d'emploi et d'usage.  
Les différences entre nos produits, matériaux et applicatifs dans des conditions normales, en pratique, ne sont pas garanties. Elles sont à la charge de l'utilisateur.  
Nous ne sommes pas responsables des dommages résultant de l'usage non conforme de nos produits, matériaux et applicatifs.  
Tous les commentaires sont acceptés sous réserve de consultation préalable de nos représentants. Les sites de propriétés obtenus par nos clients sont publiés sur notre site internet.  
Tous les commentaires sont acceptés sous réserve de consultation préalable de nos représentants. Les sites de propriétés obtenus par nos clients sont publiés sur notre site internet.

2

SIKAMENTS FF 86 2/2




**d'application**  
Dosage  
Le dosage précis du PLASTIMENT® BV 40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.  
Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment).  
Comme retardateur : à partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment).  
Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais préalables est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacté, plastique) et des conditions climatiques.  
(Ne pas dépasser 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.

**Mise en œuvre**  
Introduire le PLASTIMENT® BV 40 dans l'eau de gâchage.  
Manipulation non dangereuse.  
En cas de contact avec la peau, laver à l'eau.  
Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Mintel 3513, code SIKASECUR ou sur l'internet www.sika.fr


**Mentions légales**  
Produit réservé à un usage strictement professionnel  
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.  
Et à l'exception des produits Sika, sont fournis en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance des conditions normales d'emploi et d'usage.  
Les différences entre nos produits, matériaux et applicatifs dans des conditions normales, en pratique, ne sont pas garanties. Elles sont à la charge de l'utilisateur.  
Nous ne sommes pas responsables des dommages résultant de l'usage non conforme de nos produits, matériaux et applicatifs.  
Tous les commentaires sont acceptés sous réserve de consultation préalable de nos représentants. Les sites de propriétés obtenus par nos clients sont publiés sur notre site internet.  
Tous les commentaires sont acceptés sous réserve de consultation préalable de nos représentants. Les sites de propriétés obtenus par nos clients sont publiés sur notre site internet.

3

PLASTIMENT® BV 40 3/3



**Annexe 6:** Les caractéristiques principales du superplastifiant - haut réducteur d'eau MEDAPLAST SP 40, fournis par le fabricant Granitex, Alger.

NOTICE TECHNIQUE		2	1	3	6
<b>MEDAPLAST SP 40</b>		Superplastifiant - Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2			
<b>DESCRIPTION</b>	<b>DOMAINES D'APPLICATION</b>				
<p>Le <b>MEDAPLAST SP 40</b> est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.</p> <p>En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bétons à hautes performances</li> <li>• Bétons auto-plaçant</li> <li>• Bétons pompés</li> <li>• Bétons précontraints</li> <li>• Bétons architecturaux</li> <li>• Coulis d'injection</li> </ul>				
<b>CARACTERISTIQUES</b>	<b>DOSAGE</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forme.....Liquide</li> <li>• Couleur.....Marron</li> <li>• PH.....8,2</li> <li>• Densité..... 1,20 ± 0,01</li> <li>• Teneur en chlore..... &lt; 1g/L</li> </ul>	<p>Plage de dosage recommandée :</p> <p style="padding-left: 40px;">0,6 à 2,5% du poids de ciment</p> <p style="padding-left: 40px;">Soit 0,5 l à 2 l par 100 kg de ciment</p> <p>Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.</p>				
<b>PROPRIETES ET EFFETS</b>	<b>MODE D'EMPLOI</b>				
<p>Grâce à ses propriétés le <b>MEDAPLAST SP 40</b> permet :</p> <p><b>Sur béton frais :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'améliorer la fluidité</li> <li>- d'augmenter la maniabilité</li> <li>- de réduire l'eau de gâchage</li> <li>- d'éviter la ségrégation</li> <li>- de faciliter la mise en œuvre du béton</li> </ul> <p><b>Sur béton durci :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge</li> <li>- de diminuer la porosité</li> <li>- d'augmenter la durabilité</li> <li>- de diminuer le retrait</li> </ul>	<p>Le <b>MEDAPLAST SP 40</b> est introduit dans l'eau de gâchage.</p> <p>Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.</p>				
	<b>CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE</b>				
	<p>Le <b>MEDAPLAST SP 40</b> est conditionné en bidon de 12 et 25 Kg et en fût de 270 kg.</p> <p><b>Délai de conservation :</b></p> <p>12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C &lt; t &lt; 35°C).</p>				
	<b>ESSAIS DE LABORATOIRE</b>				
	<p>Compte rendu d'essais conformes aux normes établi par le CNERIB en Juin 2005.</p>				
<p>Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Ils sont donnés à titre indicatif. Il appartient au client de s'assurer que le produit convient à l'utilisation envisagée.</p>					
		<p><b>Granitex</b></p> <p>Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger</p> <p>Tél: 213 (0) 21 51 66 81 / 82 Fax: 213 (0) 21 51 64 22 / (0) 21 51 65 23</p> <p>Site Web: www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz</p>			