

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

**DÉPARTEMENT DE L'HYDRAULIQUE
ET DE GÉNIE CIVIL**



N° d'ordre :
N° de série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Filière : **Aménagement Hydraulique et Génie Civil**

Option : **Génie Civil**

Par

BARKAT ABDEREZZAK

Thème

**VALORISATION DES DÉCHETS DE BRIQUE
DANS
LA RÉALISATION DES OUVRAGES EN BÉTON**

Soutenu Publiquement le : 05 / 11 / 2006

Devant le Jury Composé de :

M^r BEBBA Ahmed Abdelhafid	Maître de Conf.	Université de Ouargla	Président
M^r KENAI Saïd	Professeur	Université de Blida	Examineur
M^r KRIKER Abdelouahed	Maître de Conf.	Université de Ouargla	Examineur
M^r BENTEBBA M^{ed} Tahar	Maître de Conf.	Université de Ouargla	Rapporteur
M^r ZEKRI Kedour	Directeur	L.T.P.Sud / Ouargla	Invité

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire de Magister à :

- ✍ Mes Très Chers Parents pour leurs sacrifices et leurs encouragements permanents, que Dieu les protège,
- ✍ Ma Femme pour sa patience et tout ce qu'elle m'a apporté avec bonne grâce,
- ✍ Mes Enfants Romaissa, Cheima et Abdellah, que Dieu les guide dans le bon chemin,
- ✍ Mon Cher Regretté Oncle et Beau Père Hadj Abdellah, que Dieu le bénisse,
- ✍ Ma Belle Mère Fatma,
- ✍ Mes Frères, mes Beaux Frères, mes Sœurs et mes Belles Sœurs,
- ✍ Toute ma Famille, mes Proches et mes Amis fidèles,
- ✍ Tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu **DIEU** Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

J'adresse ma profonde gratitude à mon promoteur **M^r Mohamed Tahar BENTEBBA**, Maître de conférences à l'Université de Ouargla, qui a dirigé ce travail de recherche et qui m'a permis de mener à bon terme ce mémoire de thèse.

M^r Ahmed Abdelhafid BEBBA, Maître de conférences à l'université de Ouargla, trouve ici ma reconnaissance et mes remerciements d'avoir accepté de participer au jury et d'en être président.

M^r Saïd KENAI, Professeur à l'université de Blida, a accepté de participer au jury et d'en être examinateur. Qu'il trouve ici l'expression de ma grande gratitude.

M^r Abdelouahed KRIKER, Maître de conférences à l'université de Ouargla, m'a fait profiter de sa grande expérience. Il a accepté d'être membre de jury et d'examiner ce travail. Je lui en suis très reconnaissant.

Mes pensées vont à tous mes enseignants de l'université de Ouargla. Qu'ils trouvent ici mes sincères reconnaissances.

Je tiens également à remercier **M^r Kedour ZEKRI**, directeur du Laboratoire LTPS de Ouargla, sans qui la partie expérimentale de ce travail n'aurait pu être aussi riche. Il m'a fait également l'honneur d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie aussi l'ensemble des membres du laboratoire LTPS, unité de Ouargla, pour leur soutien qu'ils m'ont apportés, notamment **M^r Abdelatif HAFSI** et **M^r Nouredine MEDJAHED**.

Mes vifs remerciements s'adressent à **M^r Farid DEBIEB**, Maître assistant chargé de cours au centre universitaire de Médéa et à **M^{elle} Souhila BEDJOU**, Attachée de recherche au CNERIB Alger, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportés dans ce travail.

Je remercie pareillement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, notamment mes collègues et amis, qui m'ont apporté leur soutien au cours de ces années de travail. Je citerai en particulier mon cousin **Boudjema SELLAM**, **Mustapha KEBAILI**, **Nabil KEBAILI**, **El-hadj KADI** et **Yahdih SEMLALI** pour leur aide inestimable.

Mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement à mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent.

Qu'il me soit permis enfin d'adresser une pensée particulière à ma femme, pour sa patience et son soutien sans faille dans la réalisation de ce travail.

ملخص

الخرسانة هي المادة الأكثر استعمالا في ميدان البناء . تمثل الحبيبات 75 % من حجم الخرسانة. لذا، فمن المناسب دراسة إمكانية تامين بقايا الأجر المتناثرة في المصانع المتواجدة عبر ضواحي مدينة تقرت، وذلك كبديل للحبيبات الطبيعية التي تفتقر إليها المنطقة. الهدف الرئيسي لهذا البحث يكمن في دراسة المميزات الفيزيائية، الكيميائية و الميكانيكية لحبيبات بقايا الأجر، وكذا دراسة خصائص الخرسانة المستعملة لهذه الحبيبات، وذلك من أجل استعمال هذه الأخيرة، في بعض ميادين البناء، كحبيبات اصطناعية أقل وزنا من الحبيبات العادية.

الدراسة المخبرية لحبيبات بقايا الأجر وكذا للحبيبات الطبيعية قد تم القيام بها لثلاثة أقسام من الحبيبات: الرمل (5/0)، الحصى (8/3) و الحصى (15/8). كما تم الاستبدال الكلي للرمل أو الحصى أو الاثنين معا أثناء دراسة تركيبية خرسانة بقايا الأجر. الخرسانة قد تم صنعها على أساس علاقة نسبة الماء مع الاسمنت نسبيا ثابتة عند مختلف الخرسانيات المدروسة وكمية الاسمنت تقدر بـ 350 كغ / م³. كما تم دراسة خصائص الخرسانة المستعملة لبقايا الأجر و مقارنتها مع خصائص الخرسانة العادية و هذا في حالة صنعها و أثناء نضجها.

إن نتائج هذه الدراسة أظهرت إمكانية استعمال بقايا الأجر في الخرسانة و هذا بالرغم من ضعف خصائصها الميكانيكية. كما تم التحصل على مقاومة الأنضغاط جد مقبولة لهذه الخرسانة مقارنة بالخرسانة العادية مع خفة في الوزن. و فضلا عن ذلك، فإن مقاومة هذه الخرسانة للتمدد تفوق تلك الخاصة بالخرسانة الطبيعية، غير أنه تم تسجيل نسبة المسامية على مستوى هذه الخرسانة و كذا عملية تصاعد المياه بالامتصاص جد مرتفعة بالنسبة للخرسانة العادية. الكلمات الدالة: الخرسانة، بقايا الأجر، الحبيبات الطبيعية، الكتلة الحجمية، اقتصاد، المميزات الفيزيائية، الكيميائية و الميكانيكية، خصائص.

RÉSUMÉ

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les granulats représentent 75% du volume du béton. À cet effet, il est opportun d'étudier la possibilité de valorisation des déchets de brique qui sont en abondance dans les briqueteries situées aux alentours de Touggourt, comme substituant des granulats naturels qui font défaut dans la région.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier les caractéristiques physico mécaniques et chimiques des granulats à base de déchets de brique, ainsi que les propriétés des bétons à base de ces granulats, afin de pouvoir les utiliser, dans certains domaines de la construction, comme granulats artificiels plus légers que les granulats courants.

L'étude expérimentale a été portée sur trois classes granulaires : sable (0/5), gravillon (3/8) et gravillon (8/15) des granulats de la brique concassée ainsi que des granulats naturels. Des substitutions totales du sable ou des gravillons ou les deux à la fois ont été étudiées.

Les bétons sont formulés avec un rapport eau – ciment relativement constant et un dosage en ciment de 350 kg/m³. Les propriétés des bétons à base de déchets de brique à l'état frais et durci sont analysées et comparées à celles du béton ordinaire.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer des bétons à base de déchets de brique malgré la défaillance mécanique de ces granulats. La résistance à la compression de ces bétons est acceptable et comparable à celle du béton ordinaire avec réduction en poids du béton appréciable. Par ailleurs, pour le même niveau du béton, la résistance à la traction des bétons à base de déchets de brique dépasse celle du béton normal. Cependant, ils ont une porosité et une absorption capillaire assez importantes que le béton ordinaire.

Mots clés : Béton, Déchets de brique, Granulats naturels, Masse volumique, Économie, Caractéristiques physico mécaniques et chimiques, Propriétés.

ABSTRACT

The concrete material is the most used in the construction field. The aggregates represent 75% of the concrete volume. Therefore, it is appropriate to study the possibility of valorization of the brick waste abundant in the brickyards implanted around Touggourt, as substituting the natural aggregates which make defect in the region.

The main objective of this investigation is to study the physical, mechanical and chemical characteristics of the brick waste aggregates, as well as the properties of the concretes made up of these aggregates, so as to use them, in some building sides, like lighter artificial aggregates than the current aggregates.

The experimental study has been carried out on three granular classes: sand (0/5), gravel (3/8) and gravel (8/15) of the crushed brick as aggregate as well the natural aggregates. Total substitutions of the sand or the gravels or the both have been studied.

The concretes are formulated with water/cement ratio relatively constant and a dosage made of cement of 350 kg/m³. The properties of the concretes used the brick waste, at the cool and hardened state, are analyzed and compared to those of the ordinary concrete.

The results of this study showed that it is possible to use in the concrete the brick waste aggregates in spite of the mechanical failing of these aggregates. The concrete compressive strength is acceptable and comparable to the ordinary concrete with perceptible reduction of the weight concrete. Moreover, for the same grade of concrete the tensile strength of the concrete based on crushed brick exceed that the normal weight concrete. However, they have a rather important a porosity and capillary absorption than ordinary concrete.

Keywords : Concrete, Brick waste, Natural aggregates, Mass volumique, Economy, physical, mechanical and chemical characteristics, properties.

TABLE DES MATIÈRES

	pages
DÉDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ	IV
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTES DES FIGURES	XIV
LISTE DES PHOTOS	XVI
NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS	XVIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 – GÉNÉRALITÉS	
2 – OBJECTIF DE L'ÉTUDE	
3 – PLAN DE TRAVAIL	
PREMIÈRE PARTIE – RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	5
CHAPITRE I – PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES DU BÉTON	6
I. 1 – INTRODUCTION	6
I. 2 – OUVRABILITÉ	6
I. 3 – RÉSISTANCE	9
I. 3.1 – Introduction	
I. 3.2 – Résistance en Compression	
I. 3.3 – Résistance en Traction	
I. 3.3.1 – Essai en Traction Directe	
I. 3.3.2 – Essai de Traction par Fendage	
I. 3.3.3 – Essai de Traction par Flexion	
I. 3.4 – Moules et Éprouvettes Utilisés	
I. 3.5 – Résistance Caractéristique en Compression	
I. 3.6 – Résistance Caractéristique à la Traction	

I. 3.7 – Conclusion	
I. 4 – ÉLASTICITÉ	14
I. 5 – PERMÉABILITÉ	17
I. 6 – RETRAIT	18
I. 6.1 – Introduction	
I. 6.2 – Différents Types de Retrait	
I. 6.2.1 – Retrait Avant et en Cours de Prise	
I. 6.2.2 – Retrait Thermique	
I. 6.2.3 – Retrait Hydraulique	
I. 6.3 – Facteurs Agissant sur le Retrait	
I. 6.4 – Mesure du Retrait	
I. 6.5 – Conclusion	
I. 7 – DURABILITÉ	22
I. 7.1 – Introduction	
I. 7.2 – Résistance aux Agents Agressifs	
I. 7.3 – Résistance aux Cycles de Gel – Dégel	
I. 7.4 – Résistance à l’Abrasion	
I. 7.5 – Conclusion	
CHAPITRE II – CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU GRANULAT.	25
II.1 – INTRODUCTION	25
II.2 – DÉFINITIONS	25
II.3 – CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS	27
II. 3.1 – Caractéristiques de Fabrication	
II. 3.1.1 – Granularité	
II. 3.1.2 – Aplatissement	
II. 3.1.3 – Angularité	
II. 3.1.4 – Module de Finesse des Sables	
II. 3.1.5 – Propreté des Granulats	
II. 3.2 – Caractéristiques Intrinsèques	
II. 3.2.1 – Masses Volumiques	
II. 3.2.2 – Porosité	
II. 3.2.3 – Absorption d’Eau	
II. 3.2.4 – Résistance à la Fragmentation	
II. 3.2.5 – Friabilité des Sables	
II. 3.2.6 – Résistance au Gel	
II.4 – INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES GRANULAIRES	37
II. 4.1 – État de Surface des Granulats	

II. 4.1.1 – Forme et Texture des Granulats	
II. 4.1.2 – Propreté des Granulats	
II. 4.2 – Dimension Maximale « D »	
II. 4.3 – Granularité	
II. 4.4 – Rapport Granulat – Ciment	
II. 4.5 – Résistance des Granulats	
II.5 – CONCLUSION	41
CHAPITRE III – UTILISATION DES DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL ...	42
III.1 – INTRODUCTION	42
III.2 – DÉFINITIONS	42
III.3 – PRODUCTION DES DÉCHETS	43
III.3.1 – Sources de Production des Déchets	
III.3.2 – Sources de Déchets Utilisés en Génie Civil	
III.3.2.1 – Déchets de Construction et de Démolition	
III.3.2.2 – Sous- produits de l'Industrie	
III.4 – DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL	49
III.4.1 – Déchets Inertes	
III.4.2 – Déchets Banals	
III.4.3 – Déchets Dangereux	
III.5 – PRIORITÉS DE TRAITEMENT DES DÉCHETS INERTES	50
III.5.1 – Réduction à la Source	
III.5.2 – Valorisation des Déchets Inertes	
III.5.2.1 – Réutilisation	
III.5.2.2 – Recyclage	
III.5.3 – Élimination des Déchets Inertes	
III.6 – RECYCLAGE DES DÉCHETS DE CHANTIER	52
III.6.1 – Déchets de Construction et de Démolition	
III.6.1.1 – Déblais de Terrains Naturels	
III.6.1.2 – Matériaux de Démolition et Déchets de Construction	
III.6.2 – Matériaux de Chaussées	
III.6.3 – Élaboration des Granulats Recyclés	
III.6.4 – Opération de Recyclage	
III.6.5 – Granulats Recyclés Produits	
III.6.6 – Classification de la RILEM	
III.7 – BÉTONS DES GRANULATS LÉGERS	60

III.7.1 – Classification Selon la Matière Première	
III.7.2 – Classification Selon les Densités des Bétons	
III.7.2.1 – Bétons de Faible Densité	
III.7.2.2 – Bétons de Résistance Moyenne	
III.7.2.3 – Bétons de Structure	
III.8 – BÉTONS DES DÉCHETS DE BRIQUE	62
III.8.1 – Déchets de Brique : Recyclage et Normes	
III.8.2 – Propriétés des Bétons des Déchets de Brique	
III.8.3 – Utilisations des Bétons des Déchets de Brique	
III.8.4 – Utilisations Locales	
III.9 – CONCLUSION	69
DEUXIÈME PARTIE – ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	71
CHAPITRE IV – CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	72
IV.1 – INTRODUCTION	72
IV.2 – MATÉRIAUX UTILISÉS	72
IV.2.1 – Ciment	
IV.2.2 – Granulats	
IV.2.3 – Eau de Gâchage	
IV.3 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES GRANULATS	76
IV.3.1 – Échantillonnage des Granulats	
IV.3.2 – Analyse Granulométrique par Tamisage	
IV.3.3 – Masses Volumiques des Granulats	
IV.3.3.1 – Masses Volumiques Apparentes	
IV.3.3.2 – Masses Volumiques Réelles	
IV.3.3.3 – Masses Volumiques Absolues	
IV.3.4 – Absorption d’Eau	
IV.3.5 – Analyse Chimique des Granulats	
IV.3.6 – Essais Effectués sur les Sables	
IV.3.6.1 – Équivalent de Sable	
IV.3.6.2 – Friabilité des Sables	
IV.3.7 – Essais Effectués sur les Gravillons	
IV.3.7.1 – Porosité	
IV.3.7.2 – Propreté Superficielle	
IV.3.7.3 – Aplatissement	
IV.3.7.4 – Los Angeles	
IV.4 – CONCLUSION	89

CHAPITRE V – FORMULATION DES BÉTONS ET ESSAIS	91
V.1 – INTRODUCTION	91
V.2 – FORMULATION ET DOSAGE DES BÉTONS	92
V.3 – CONFECTION ET CURE DES ÉPROUVETTES	99
V. 3.1 – Moules pour Éprouvettes	
V. 3.2 – Confection des Éprouvettes	
V. 3.3 – Conservation des Éprouvettes	
V.4 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES BÉTONS	101
V. 4.1 – Essai d’Affaissement	
V. 4.2 – Masse Volumique du Béton Frais	
V. 4.3 – Mesure de l’Air Occlus	
V. 4.4 – Masse Volumique du Béton Durci	
V. 4.5 – Essai de Résistance à la Compression	
V. 4.6 – Essai de Résistance à la Traction par Flexion	
V. 4.7 – Essai d’Auscultation Dynamique	
V. 4.8 – Essai de Retrait	
V. 4.9 – Essai d’Absorption Capillaire	
V.4.10 – Essai d’Absorption par Immersion	
CHAPITRE VI – ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	109
VI.1 – INTRODUCTION	109
VI.2 – BÉTON FRAIS	109
VI.2.1 – Consistances des Bétons Frais	
VI.2.2 – Densité et Mise en Place des Bétons Frais	
VI.3 – BÉTON DURCI	112
VI.3.1 – Couleur et Aspects Extérieurs des Bétons	
VI.3.2 – Densité et Homogénéité	
VI.3.3 – Résistance à la Compression	
VI.3.3.1 – Évolution de la Résistance à la Compression	
VI.3.3.2 – Résistances sur Cube et sur Cylindre	
VI.3.3.3 – Facteurs Agissant sur la Résistance	
VI.3.3.4 – Relation entre Rc au Jeune Age et Rc à Long Terme	
VI.3.3.5 – Relation entre Résistance à la Compression et Densité	
VI.3.3.6 – Relation Entre Résistance à la Compression et Vitesse du Son	
VI.3.4 – Résistance à la Traction	
VI.3.5 – Relation Résistance Traction – Compression	
VI.3.6 – Module d’Élasticité	

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau N°</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Tableau I-1	: Appréciation de la Consistance par l’Affaissement au Cône d’Abrams	7
Tableau I-2	: Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Cylindriques	11
Tableau I-3	: Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Prismatiques	12
Tableau I-4	: Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Cubiques	12
Tableau II-1	: Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient d’Aplatissement	28
Tableau II-2	: Qualité du Sable en Fonction de la Valeur de l’ES	30
Tableau II-3	: Teneur en Fines (f) de la Fraction 0/4 mm	31
Tableau II-4	: Valeurs Spécifiées de (PS) et (VB)	31
Tableau II-5	: Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient d’absorption d’eau	34
Tableau II-6	: Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient Los Angeles	35
Tableau II-7	: Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient de Friabilité (F_s)	36
Tableau II-8	: Influence Qualitative des Paramètres d’État de Surface sur la Facilité de Mise en Œuvre du Béton et l’Adhérence Pâte – Granulat	38
Tableau II-9	: Récapitulation des Principales Qualités des Bétons en Fonction de leur G/S et de leur Granularité Continue ou Discontinue	39
Tableau III-1	: Répartition de la Production des Déchets de Chantier au Pays-Bas	45
Tableau III-2	: Capacité de Production de Briques Rouges dans la Wilaya de Ouargla	48
Tableau III-3	: Granulats de Débris de Démolition et/ou de Construction	57
Tableau III-4	: Classification des Gros Granulats Recyclés par la RILEM	58
Tableau III-5	: Classes du Béton de Granulats Recyclés	58

Tableau III-6	: Les Différents Limites Proposées par la RILEM	59
Tableau III-7	: Coefficients Multiplicateurs des Propriétés des Bétons Recyclés par Rapport aux Bétons Ordinaires	60
Tableau III-8	: Classification des Matières premières Minérales pour la Fabrication de Granulats Légers	61
Tableau III-9	: Caractéristiques Techniques d'un Béton de Briquillons	66
Tableau IV-1	: Caractéristiques Physiques du Ciment	73
Tableau IV-2	: Caractéristiques Mécaniques du Ciment	73
Tableau IV-3	: Composition Chimique du Ciment	74
Tableau IV-4	: Essais Effectués sur les Matériaux Granulats Utilisés	77
Tableau IV-5	: Masses Volumiques des Granulats	81
Tableau IV-6	: Coefficient d'Absorption d'Eau des Granulats	83
Tableau IV-7	: Analyse Chimique des Granulats Utilisés	84
Tableau IV-8	: Équivalents de Sable	85
Tableau IV-9	: Coefficient de Friabilité des Sables (F_s)	86
Tableau IV-10	: Porosité des Gravillons (n)	87
Tableau IV-11	: Propreté Superficielle des Gravillons (P)	87
Tableau IV-12	: Coefficient d'aplatissement (A_p)	88
Tableau IV-13	: Coefficient Los Angeles (LA)	89
Tableau V-1	: Composition Granulométrique des Bétons	92
Tableau V-2	: Composition Optimale d'un m^3 du Béton Type (B-O)	93
Tableau V-3	: Compositions Optimales d'un m^3 des Bétons Type (B-RN), (B-NR) et (B-RR)	99
Tableau V-4	: Essais Effectués sur les Bétons	101
Tableau VI-1	: Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges ainsi que l'Affaissement des Bétons	110
Tableau VI-2	: Rapport des Résistances d'un Cylindre sur Cube	116
Tableau VI-3	: Rapport des Résistances à 7 jours et à 28 jours	120

Tableau VI-4	: Résistance à la Compression et par Vitesse du Son sur Cube à 28 jours	122
Tableau VI-5	: Modules d'Élasticité des Bétons à 28 jours	125
Tableau VI-6	: Retrait aux Différents Ages des Bétons	127
Tableau A1-1	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Sable Naturel (0/5)	A1
Tableau A1-2	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Sable Recyclé (0/5)	A2
Tableau A1-3	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Gravillon Naturel (3/8)	A3
Tableau A1-4	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Gravillon Recyclé (3/8)	A4
Tableau A1-5	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Gravillon Naturel (8/15)	A5
Tableau A1-6	: Analyse Granulométrique par Tamisage du Gravillon Recyclé (8/15)	A6
Tableau A1-7	: Détermination du Coefficient d'Aplatissement du Gravillon Naturel (8/15)	A7
Tableau A1-8	: Détermination du Coefficient d'Aplatissement du Gravillon Recyclé (8/15)	A8
Tableau A1-9	: Masse Volumique et Air Occlus des Bétons Frais	A9
Tableau A1-10	: Masses Volumiques des Béton Durcis	A9
Tableau A1-11	: Résistance à la Compression des Bétons sur Cube	A9
Tableau A1-12	: Résistances à la Compression et Masses Volumiques des Bétons	A10
Tableau A1-13	: Vitesses de Propagation du Son dans les Bétons	A10
Tableau A1-14	: Résistance à la Traction des Bétons	A10
Tableau A1-15	: Pertes de Poids des Bétons au Cours du Temps	A11
Tableau A1-16	: Absorption d'Eau par Remontée Capillaire des Bétons	A11
Tableau A1-17	: Compacité et Porosité des Bétons	A11

LISTE DES FIGURES

<u>Figure N°</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Figure I-1	: Classes de Consistance Mesurées au Cône d'Abrams	7
Figure I-2	: Influence de la Dimension des Granulats sur le Retrait	21
Figure I-3	: Influence du Rapport Eau – Ciment et de l'Air Entraîné sur la Durabilité du Béton	23
Figure II-1	: Dimensions d'un Grain de Granulat	28
Figure II-2	: Cratère Provoqué à la Surface du Béton par l'Éclatement des Granulats Gélifs	36
Figure II-3	: Influence du Rapport G/C sur la Résistance du Béton	40
Figure III-1	: Répartition des Déchets par Secteurs Sources	44
Figure III-2	: Répartition des Quantités de Déchets de Chantiers ou de Démolition par Type	46
Figure III-3	: Répartition de la Production en Granulats Recyclés au Pays-Bas	56
Figure III-4	: Exemples de Courbes Granulométriques Correspondant à des Granulats de Chamotte	67
Figure IV-1	: Réduction d'un Échantillon par Quartage	78
Figure IV-2	: Courbes Granulométriques des Granulats Utilisés	79
Figure V-1	: Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-O)	94
Figure V-2	: Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-RN)	95
Figure V-3	: Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-NR)	96
Figure V-4	: Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-RR)	97
Figure V-5	: Appareil de Chargement de l'Éprouvette Prismatique	104
Figure VI-1	: Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges	111

Figure VI-2	: Densité et Air Occlus des Bétons Frais	111
Figure VI-3	: Masses Volumiques des Bétons Durcis	113
Figure VI-4	: Évolution de la Résistance à la Compression des Bétons	115
Figure VI-5	: Résistances à la Compression et Densités des Bétons	121
Figure VI-6	: Évolution de la Résistance à la Traction des Bétons	123
Figure VI-7	: Relation entre Résistance à la Traction et celle à la Compression	124
Figure VI-8	: Pertes de Poids des Bétons au Cours du Temps	127
Figure VI-9	: Absorption d'Eau par Capillarité des Bétons	128
Figure VI-10	: Compacité et Porosité des Bétons	129

LISTE DES PHOTOS

<u>Photo N°</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Photo IV-1	: Granulats Naturels	75
Photo IV-2	: Granulats Recyclés	75
Photo V-1	: Essai de Retrait	106
Photo V-2	: Essai d’Absorption Capillaire	107
Photo A2-1	: Diviseur à Couloirs pour Gravillons	A12
Photo A2-2	: Réduction d’un Échantillon par Quartage	A12
Photo A2-3	: Mini Concasseur à Mâchoires	A12
Photo A2-4	: Tamis à Mailles Carrées	A12
Photo A2-5	: Grilles à Fentes Parallèles	A12
Photo A2-6	: Éprouvette Graduée + Récipient	A13
Photo A2-7	: Pycnomètre + Récipient	A13
Photo A2-8	: Appareil Micro-Deval	A13
Photo A2-9	: Récipients de Mesure de la densité apparente des Granulats	A13
Photo A2-10	: Appareillage d’Équivalent de Sable	A13
Photo A2-11	: Appareil pour Essai Los Angeles	A13
Photo A3-1	: Moules et Éprouvettes Utilisés	A14
Photo A3-2	: Malaxeur à Béton	A14
Photo A3-3	: Table Vibrante	A14
Photo A3-4	: Appareillage de Slump – Test	A14
Photo A3-5	: Machine d’Essai de Compression	A15
Photo A3-6	: Machine d’Essai de Flexion	A15

Liste des Photos

Photo A3-7	: Appareil à Ultrasons	A15
Photo A3-8	: Aéromètre à Béton de 8 L	A15
Photo A4-1	} : Déchets de Brique au Sein des Briqueteries Locales	A16
À		
Photo A4-6		
Photo A4-7	: Déchets de Chantier au Sein de la Décharge de Bamendil	A17
Photo A4-8	: Déchets de Chantier au Niveau de la Décharge Sauvage Bo-Amer	A17

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

- Majuscules romaines

A_b	: Coefficient d'Absorption d'Eau
A_p	: Coefficient d'Aplatissement des Granulats
ACI	: American Concrete Institute
D	: Dimension Maximale des Granulats (en <i>mm</i>)
E_i	: Module d'Élasticité du Béton Instantané
ES	: Équivalent de Sable
ESP	: Équivalent de Sable (<i>Piston</i>)
ESV	: Équivalent de Sable (<i>Visuel</i>)
F	: Effort de Traction Maximal (en <i>Newton</i>)
F_s	: Friabilité des Sables
G	: Sensibilité au Gel des Gravillons
G _N	: Gravillon Naturel
G _R	: Gravillon Recyclé de Brique Concassée
H	: Hauteur des Moules et Éprouvettes Cylindriques (en <i>cm</i>)
L	: Longueur du Moule et Éprouvette (en <i>cm</i>)
LA	: Coefficient Los Angeles
Li	: Limite Inférieure
Ls	: Limite Supérieure
MF	: Module de finesse des Sables
P	: Propreté Superficielle des Gravillons
PS	: Équivalent de Sable à 10% de Fines
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais de Matériaux

S	: Section Normal de l'Éprouvette (en mm^2)
S_N	: Sable Naturel
S_R	: Sable Recyclé de Brique Concassée
VB	: Valeur de Bleu au Méthylène
V_{si}	: Valeurs Spécifiées Inférieures
V_{ss}	: Valeurs Spécifiées Supérieures

- **Minuscules romaines**

a	: Dimension de Base du Moule et Éprouvette (en mm^2)
d	: Dimension Minimale des Granulats (en mm)
f_{c28}	: Résistance en Compression à 28 jours
f_{cj}	: Résistance Caractéristique à la Compression du Béton à j jours (en MPa)
f_{ck}	: Résistance Caractéristique à la Compression d'un Béton
f_{t28}	: Résistance en Traction à 28 jours
f_{tj}	: Résistance Caractéristique à la Traction du Béton à j jours (en MPa)
g	: Accélération de la Pesanteur
j	: Age du Béton au Moment de l'Essai (en <i>jours</i>)
n	: Porosité des Granulats

- **Majuscules grecques**

\emptyset	: Diamètre des Moules et Éprouvettes Cylindriques (en cm)
-------------	--

- **Minuscules grecques**

ρ_a	: Masse Volumique Apparente
ρ_r	: Masse Volumique Réelle
ρ_s	: Masse Volumique Absolue
ϖ	: Densité du Béton

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 – GÉNÉRALITÉS

Le granulat est une matière première indispensable dans les industries du bâtiment et des travaux publics. Elle est produite et utilisée en très grandes quantités, dans tous les pays du monde ; toutefois les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation. Selon Michel [1], les granulats sont des matériaux dont le prix d'achat double tous les 50 kilomètres.

En parallèle, l'essor rapide du tissu urbain, dans tous les pays du monde, a provoqué une augmentation impressionnante des quantités de sous-produits et de déchets. Ces sous-produits proviennent des industries de fabrication de matériaux de construction et les déchets sont produits suite à des opérations de construction, de rénovation et de déconstruction.

Les sous-produits et les déchets, qui autrefois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique vers la fin du 20^{ème} siècle. Les quantités énormes qui sont produites sans cesse immobilisent de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage des déchets et réduisent ainsi les disponibilités de terrains sans compter la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences.

Pour répondre, d'une part, au besoin vital de la construction et d'autre part, au besoin universel de conserver les ressources et de protéger l'environnement, il a été question de se pencher beaucoup plus sur l'étude et la production de matériau granulat tant en quantité qu'en qualité. Par conséquent, une grande importance a été accordée à l'usage de déchets et de sous-produits comme granulats pour le béton [2].

Les déchets (dits inertes) peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers

des travaux publics ou encore en d'autres applications dans le domaine de la construction, en particulier, comme granulats pour le béton.

Parmi ces déchets, les débris de brique peuvent être concassés et utilisés comme granulats pour la fabrication du béton.

Historiquement, l'usage de brique concassée comme granulats dans le béton n'est pas nouveau. Le premier usage marqué de brique concassée avec le ciment portland était en Allemagne en 1860 pour la fabrication de produits en béton. Des recherches systématiques ont été exécutées depuis 1928 sur des mélanges de ciment, d'eau et de granulats en brique concassée [3].

Cependant le premier emploi considérable de brique recyclée comme granulats dans le béton a été marqué à la fin de la seconde guerre mondiale, dans les pays d'Europe qui ont été très ravagés, comme la République Fédérale Allemande par exemple [4].

Il y a eu plusieurs recherches dans les possibilités d'utiliser la brique concassée comme granulats en béton. Cependant, la plupart de ces travaux ont été faites pendant les années 40 et 50 du siècle passé en utilisant le type de brique qui était disponible.

Les travaux, qui ont été réalisés en utilisant les types de brique qui sont utilisés communément dans la construction d'aujourd'hui, se sont concentrés plus sur les propriétés mécaniques du béton du granulat de brique, plutôt que sur les propriétés du granulat de la brique lui-même. Ils ont montré que :

- Il était possible de réaliser un béton de haute résistance en utilisant la brique concassée comme granulat grossier, avec réduction en poids,
- Une haute résistance au cisaillement dans les poutres fabriquées du béton du granulat de brique, à comparer avec ceux du béton normal,
- Une perte de 7% dans la résistance de compression du béton en utilisant de la brique hollandaise concassée comme granulat grossier, comparée avec celle du béton fait avec les granulats naturels [3].

En effet, l'usage de granulat de brique pour la fabrication du béton est jugé, par conséquent, pour être une solution pour les régions où les granulats naturels font défaut et où une réduction dans le poids mort de structure peut être désirable [5].

2 – OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les granulats représentent 75% du volume du béton. À cet effet, il est opportun d'étudier la possibilité de valorisation des déchets de brique qui sont en abondance dans les briqueteries situées aux alentours de Touggourt (une ville de la wilaya de Ouargla – Algérie), comme substituant des granulats naturels qui font défaut dans la région.

Les bétons usuels ont une masse volumique de 2300 à 2500 kg/m^3 . Il est économiquement et techniquement intéressant de pouvoir réduire cette masse volumique en utilisant les déchets de brique comme granulats artificiels plus légers que les granulats courants et présentant des caractéristiques équivalentes pour certaines exigences des domaines d'applications.

L'étude donc consiste à étudier les caractéristiques physico mécaniques et chimiques des granulats à base de déchets de brique, ainsi que les propriétés des bétons à base de ces granulats, afin de pouvoir les utiliser dans certains domaines de la construction.

L'objectif visé par ce travail est d'évaluer expérimentalement le béton à base de déchets de brique en comparaison avec le béton ordinaire.

Pour que nos résultats soient exploitables, en particulier dans le domaine de la construction, notre étude a été portée sur la composition des bétons à partir d'un mélange ternaire de sable (0/5), de gravillon (3/8) et de gravillon (8/15).

3 – PLAN DE TRAVAIL

Le présent travail de recherche portant sur la valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, est scindé en deux grandes parties : une recherche bibliographique et une étude expérimentale.

La première partie qui est destinée à la recherche bibliographique, se divise en trois chapitres qui suivent :

Le chapitre I comporte les propriétés essentielles d'un béton ordinaire, à savoir, l'ouvrabilité, la résistance, l'élasticité, la perméabilité, le retrait et la durabilité.

Le chapitre II concerne les caractéristiques du matériau granulat et leur influence sur les propriétés du béton. Ceci pour mettre en évidence le comportement de ce dernier lors d'utilisation des granulats à base de déchets de brique.

Le chapitre III est consacré aux recherches effectuées sur l'utilisation des déchets (en particulier ceux de briques) dans les domaines du génie civil et des travaux publics. On y expose, aussi, les propriétés des granulats de brique concassée ainsi que celles des bétons à base de déchets de brique, résultantes des travaux antérieurs effectués par différents auteurs.

La deuxième partie est dédiée à l'étude expérimentale ainsi qu'aux interprétations des résultats trouvés et leur comparaison avec ceux de la littérature. Elle est présentée par les trois chapitres qui suivent :

Le chapitre IV est destiné à la caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection des bétons, selon les normes européennes, les normes françaises et les modes opératoires en vigueur. Les résultats expérimentaux trouvés sont comparés avec ceux donnés dans la littérature.

Le chapitre V est consacré à l'étude de la composition des différents bétons à confectionner et à l'étude expérimentale des propriétés du béton ordinaire « témoin » ainsi que celles des bétons à base de déchets de brique provenant de la briqueterie. La composition des différents bétons est formulée suivant la méthode dite « Dreux – Gorisse ».

Le chapitre VI expose les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre V. Une analyse et une discussion des résultats, suivies d'une comparaison avec ceux trouvés dans la littérature, sont également présentées dans ce chapitre.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent. Des recommandations sont également données en terme de contribution dans la valorisation de ce type de déchets dans la réalisation des ouvrages en béton.

PREMIÈRE PARTIE

**RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE I

PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES DU BÉTON

I. 1 – INTRODUCTION

Le matériau sur lequel se base ce travail est le béton, et en particulier son comportement lors d'utilisation des granulats à base de déchets de brique. Le béton est un matériau composite, formé de ciment, d'eau, de granulats (sable et gravillons) et éventuellement d'ajouts (additions ou adjuvants) destinés à améliorer certaines de ses propriétés.

La qualité d'un béton dépend de ses constituants qui ont une influence sur son comportement à l'état frais (ouvrabilité), ses performances à l'état durci (résistances, élasticité) et sa durabilité au cours du temps (perméabilité, retrait, etc.).

Ce chapitre est consacré donc, aux recherches dans les propriétés essentielles d'un béton ordinaire, à savoir, l'ouvrabilité, la résistance, l'élasticité, la perméabilité, le retrait et la durabilité, pour mettre en relief l'influence des constituants (en particulier des granulats) sur le comportement du béton lors d'usage des granulats à base de déchets de brique.

I. 2 – OUVRABILITÉ

L'ouvrabilité ou la maniabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour :

- Le remplissage parfait du coffrage,
- L'enrobage des aciers,
- Et l'obtention d'un parement brut de belle apparence [6].

« L'aptitude du béton frais à bien se mouler dans les coffrages et autour des armatures tout en restant homogène, bref, à bien se mettre en place, est appelée *ouvrabilité* » [7].

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité.

En pratique, on considère qu'un béton est ouvrable s'il a la consistance (*ferme, plastique, très plastique ou fluide*) requise pour les conditions de mise en œuvre considérées.

L'ouvrabilité peut, en général, être appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams (Slump-Test). Elle doit être mesurée et ajustée avant toute opération de bétonnage.

Le Tableau I-1 et la Figure I-1 suivants indiquent les (04) quatre classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré, définies selon les classes de la norme ENV 206 et les notations de la norme NF P18 305 [8].

Tableau I-1

Appréciation de la Consistance par l'Affaissement au Cône d'Abrams [8]

Classes	Consistance du Béton	Note	Affaissement au Cône (cm)
S1	Ferme	F	1 à 4
S2	Plastique	P	5 à 9
S3	Très Plastique	TP	10 à 15
S4	Fluide	FL	≥ 16

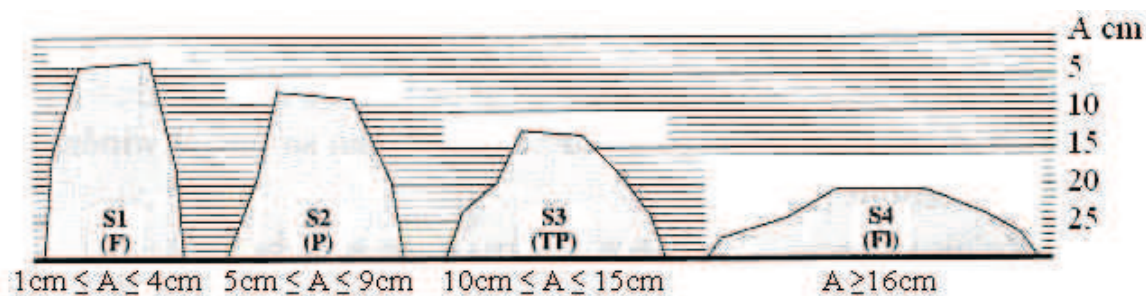


Figure I-1

Classes de Consistance Mesurées au Cône d'Abrams [8]

L'ouvrabilité dépend de nombreux facteurs, plus particulièrement :

- Granulométrie, surtout pour les éléments fins,
- Angularité des constituants ; granulats concassés ou non,
- Dosage en ciment,
- Emploi d'un plastifiant,
- Dosage en eau [9].

Cependant, il ne faut pas considérer que :

- Le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité,
- Et la forte cohésion du béton réduit les risques de ségrégation, mais rend difficile la pénétration dans les moules.

« Une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquences fâcheuses, une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale » [6].

De l'ouvrabilité dépendent, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et, corrélativement, résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité, ... etc. C'est pourquoi l'ouvrabilité, lors des essais d'étude, doit être considérée comme une qualité aussi importante que la résistance. Il arrive encore trop fréquemment d'avoir modifié sur le chantier, par défaut d'ouvrabilité, des formules de composition qui ont peut-être permis en laboratoire la confection de belles éprouvettes [6].

En conclusion, l'ouvrabilité du béton est une propriété fondamentale et importante qui, on l'oublie trop souvent, risquerait non seulement la mise en place incorrecte du matériau, mais d'entraîner pour le béton dans l'ouvrage un certain nombre de défauts dont, en particulier, des résistances localement insuffisantes [10].

Il y a une consistance optimale à déterminer et à maintenir constante pendant toute la durée du bétonnage.

I. 3 – RÉSISTANCE

I. 3.1 – INTRODUCTION

Ouvrabilité et résistance sont des qualités à rechercher de pair pour un béton, car elles sont étroitement liées l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton [6].

Depuis l'origine, le matériau béton est caractérisé essentiellement par sa résistance mécanique, mesurée en général à 28 jours d'âge et contrôlée par des essais destructifs ou non destructifs.

La résistance du béton se présente sous deux aspects essentiels : *résistance à la compression* et *résistance à la traction*.

I. 3.2 – RÉSISTANCE EN COMPRESSION

La résistance en compression est généralement considérée comme la propriété la plus importante du béton, car elle projette généralement une image globale de sa qualité puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté [11].

La résistance en compression, désignée par f_{c28} , est définie par des essais de compression simple, à 28 jours d'âge, sur des cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre.

Le cylindre de 16 ($\varnothing = 15,6$ cm), dont la section est de 200 cm^2 , est le plus couramment employé. La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres $\varnothing = 15$ cm de $H = 30$ cm [6].

D'autres dimensions peuvent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats « D » entrant dans la composition du béton. À savoir les (11×22) et les (25×50) [8].

Le diamètre du moule ou de l'éprouvette cylindrique, ne doit pas être inférieur à $4D$ [6]. Selon la norme européenne NF EN 12390-1 [12], il convient que la dimension de base du moule « a » soit au moins trois fois et demie supérieure à la

dimension maximale des granulats « D » du béton, que l'éprouvette soit cubique, cylindrique ou prismatique. Enfin, le choix du format des moules est conditionné par la dimension D du granulat [13].

Les valeurs-limites de D , en fonction de la dimension de base du moule « a », sont inscrites dans la dernière colonne des tableaux du § I.3.4.

I. 3.3 – RÉSISTANCE EN TRACTION

La résistance en traction à 28 jours est désignée par ft_{28} .

La résistance du béton à la rupture en traction est contrôlée, actuellement, par trois techniques d'essais différentes.

I. 3.3.1 – Essai en traction directe

Cet essai s'effectue par mise en traction de l'éprouvette cylindrique mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite [6].

On obtient alors directement :

$$ft = \frac{F}{S} \quad (\text{en MPa}) \quad (\text{I-1})$$

I. 3.3.2 – Essai de traction par fendage

L'essai, dit « Essai Brésilien », consiste à écraser un cylindre de béton entre les deux plateaux d'une presse de compression suivant deux génératrices opposées [9].

« L'éprouvette se rompt suivant un plan diamétral sous l'influence des contraintes de traction qui se développent normalement à la direction de la compression. On obtient ainsi, à la rupture, deux demi cylindres. Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre (en kg), la résistance en traction sera » [14] :

$$f_t = 2 \cdot \frac{P}{\Pi \cdot \varnothing \cdot L} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{I-2})$$

I. 3.3.3 – Essai de traction par flexion

C'est l'essai le plus couramment utilisé (§ V.4.6). Il consiste à rompre une éprouvette prismatique, de côté « a » et de longueur « 4a », par application d'un moment de flexion constant ($M = (P \cdot a) / 2$) entre les deux points d'application de la charge totale de rupture P (en *Newton*) [6].

La contrainte de rupture en traction par flexion est :

$$f_t = \frac{1,8 \cdot P}{a^2} \quad (\text{en MPa}) \quad (\text{I-3})$$

Ceci suppose que la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure, calculée par la formule de l'élasticité, $f_t = (M \cdot V) / I$ est affectée d'un coefficient 0,6 dont il valable en moyenne pour le prisme (7x7x28cm), mais ne l'est plus pour les autres prismes [9].

I. 3.4 – MOULES ET ÉPROUVETTES UTILISÉS

Les tableaux suivants résument les dimensions géométriques des moules et éprouvettes utilisés pour la mesure des résistances du béton :

Tableau I-2

Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Cylindriques [6]

Format	Dimensions De fabrication (mm)		Section (cm ²) Par un plan		D (mm)
	Diamètre a	Hauteur	Orthogonal	Diamétral	
Cylindre de 11	112,8	220	100	248	≤ 25
Cylindre de 16	159,6	320	200	511	≤ 40
Cylindre de 25	252,5	500	500	1262	≤ 63

Tableau I-3*Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Prismatiques [6]*

Prisme de	Dimensions De fabrication (mm)		Section a^2 (cm^2)	Distance Entre appuis Inférieurs $\ell = 3 a$ (mm)	Abouts $\frac{L - \ell}{2}$ (mm)	D (mm)
	Arête a de la base	Longueur $L = 4 a$				
7	70,7	282,8	50	212,1	35,3	≤ 16
10	100	400	100	300	50	≤ 25
14	141,4	565,6	200	424,2	70,7	$\leq 31,5$
20	200	800	400	600	100	≤ 50

Tableau I-4*Dimensions de Fabrication des Moules et Éprouvettes Cubiques [6]*

Format cube de	Dimensions de fabrication Arête a (mm)	Section (cm^2)	D (mm)
10	100	100	≤ 25
14	141,4	200	$\leq 31,5$
20	200	400	≤ 50
30	300	900	≤ 80

I. 3.5 – RÉSISTANCE CARACTÉRISTIQUE EN COMPRESSION

Les résultats des essais de résistance du béton en compression mesurés sur éprouvettes, même dans les cas des essais d'étude réalisés en laboratoire, présentent, en général, une certaine dispersion qui est fonction de la régularité des performances du béton et donc de sa qualité. Pour tenir compte de cette dispersion, la résistance d'un béton n'est pas exprimée à partir de la résistance moyenne des essais (f_{cm}).

La résistance à la compression d'un béton est exprimée par sa résistance caractéristique (f_{ck}) [8].

La résistance caractéristique en compression f_{ck} applicable à un « lot » de béton est celle pour laquelle :

- On ne peut pas trouver plus de $P\%$ de valeurs inférieures à cette valeur f_{ck} .
 - ♦ $P = 10\%$ (ou 0,10), si $f_{ck} < 30 \text{ MPa}$,
 - ♦ $P = 5\%$ (ou 0,05), si $f_{ck} \geq 30 \text{ MPa}$.

Chaque valeur est en principe la moyenne de trois éprouvettes.

- On ne peut pas trouver de valeur inférieure à la plus petite valeur f_{cmin} fixée.

On prendra $f_{cmin} = 0,8 \cdot f_{ck}$ sans descendre en dessous de $f_{ck} - 5 \text{ MPa}$ [15].

I. 3.6 – RÉSISTANCE CARACTÉRISTIQUE À LA TRACTION

La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée f_{tj} , est conventionnellement définie par la relation :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{cj} \quad (\text{en MPa}) \quad \text{béton ordinaire} \quad (\text{I-4})$$

Cette formule étant valable pour $f_{cj} \leq 60 \text{ MPa}$ [16].

$$f_{tj} = 0,5 + 0,05 \cdot f_{cj} \quad (\text{en MPa}) \quad \text{béton léger [9]} \quad (\text{I-5})$$

I. 3.7 – CONCLUSION

En conclusion, une bonne résistance à la compression est la qualité bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette bonne résistance est généralement liée à une bonne compacité, ce qui est favorable à la durabilité du béton.

La résistance d'un béton dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la classe et le dosage du ciment, la porosité du béton et le rapport du dosage en eau au dosage en ciment [17].

I. 4 – ÉLASTICITÉ

L'élasticité, c'est une propriété caractéristique du béton pour évaluer ses contraintes et ses déformations.

Le béton, comme tous les autres matériaux, a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée, c'est-à-dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées [17].

La notion de coefficient d'élasticité d'après sa définition :

$$E = \text{contrainte unitaire} / \text{déformation relative} = f_{cj} / (\Delta\ell / \ell)$$

est assez vague à cause du fluage [6].

En pratique, la déformation qui se produit au cours de chargement est considérée comme déformation élastique alors que son augmentation ultérieure, à charge constante, est considérée comme fluage. Le module élastique correspondant à cette distinction est *le module élastique sécant*.

En effet, la déformation totale (fluage compris) est trois fois plus grande que la déformation instantanée : $\Delta t \approx 3 \Delta i$.

Cela conduit à considérer deux modules élastiques :

- Un *module instantané* : E_{ij} ,
- Et un *module différé* : $E_{vj} \approx E_{ij} / 3$.

Le module d'élasticité du béton augmente lorsque sa résistance à la compression augmente. Cependant, chose certaine, il est conditionné par le module d'élasticité du granulat et par les proportions volumétriques qu'il occupe dans le béton [11].

Le BAEL 91 [18] propose les relations suivantes entre le module d'élasticité et la résistance à la compression du béton :

- Pour un chargement d'une durée d'application inférieure à 24 heures, le module de déformation instantané E_{ij} du béton âgé de j jours est pris égal à :

$$E_{ij} = 11\,000 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{en MPa}) \quad (\text{I-6})$$

- Pour un chargement de longue durée d'application le module de déformation E_{vj} est pris égal à :

$$E_{vj} = E_{ij} / 3, \text{ soit } \boxed{E_{vj} = 3\,700 \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ (en MPa)}} \quad (\text{I-7})$$

D'après Davidovici [18], pour les vérifications courantes l'âge du béton est généralement supérieur à 28 jours mais il est à noter que l'augmentation de résistance au-delà de 28 jours ne change pas d'une manière significative la valeur du module et il est donc inutile d'en tenir compte.

Par contre, Dreux et Festa expliquent [6] : « si on ne dispose pas d'autres valeurs de résistance que celle de f_{c28} , on peut admettre que, pour les grandes valeurs de j on a sensiblement :

$$f_{cj} = 1,1 f_{c28} \text{ et le module est noté } E_i \text{ »}$$

Cependant, la valeur de E_{ij} , proposée par le BAEL, est considérée un peu surestimée ; la formule recommandée est celle de l'Eurocode 2 :

$$\boxed{E_{ij} = 9\,500 \sqrt[3]{f_{cj} + 8}} \quad (\text{I-8})$$

Et il est proposé : $E_{ij} = 10\,000 \sqrt[3]{f_{cj}}$ en valeurs moyennes pour f_{cj} et E_{ij} [6].

Le module d'élasticité instantané peut se déterminer expérimentalement :

- Par chargement statique direct d'éprouvettes de béton avec mesure de la déformation correspondante à l'aide d'un extensomètre, on obtient le module d'élasticité statique (*module sécant*). Il décroît lorsque la contrainte augmente. La contrainte pour laquelle il a été déterminé doit être mentionnée.
- Par mise en vibration d'éprouvettes prismatiques de longueur L ; E_i étant proportionnel au carré de la fréquence F on obtient le module d'élasticité dynamique :

$$\boxed{E_{ij} = (2 \cdot L \cdot F)^2 \frac{\varpi}{g}} \quad (\text{I-9})$$

- Par vitesse du son, E_i étant proportionnel au carré de la vitesse du son en m/s :

$$E_{ij} = K \cdot V^2 \frac{\omega}{g} \quad (\text{I-10})$$

K étant une fonction du coefficient de poisson ν :

$$K = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (\text{I-11})$$

Le coefficient de poisson ν : est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale en valeurs relatives. Sa valeur varie de 0,15 à 0,30. On le prend souvent égal à 0,20.

Cette dernière mesure permet de se rendre compte in situ de la qualité du béton et de sa régularité, puisqu'elle peut être faite sur l'ouvrage lui-même [6].

Le module d'élasticité dynamique est lié essentiellement aux effets purement élastiques, en raison de l'absence de contrainte significative appliquée sur l'éprouvette. En conséquence, le module d'élasticité dynamique est considéré comme étant sensiblement égal au module d'élasticité tangent à l'origine déterminé dans les essais statiques et, de ce fait, nettement plus élevé que le module sécant déterminé par l'application d'une charge sur une éprouvette de béton [11].

En général, le module d'élasticité dynamique se trouve expérimentalement d'environ 25% supérieur au module d'élasticité statique instantané [6].

Par ailleurs, le béton ne se comporte pas comme un matériau parfaitement élastique sauf pour des contraintes faibles. Le module élastique correspondant, appelé module tangent. Pour calculer la déformation sous une contrainte σ'_0 par exemple, la valeur de module sécant correspondant à la déformation effective sous cette contrainte σ'_0 qu'il faudra prendre en compte ; on pourra admettre à titre d'approximation et à défaut de résultats expérimentaux que le module sécant est égal au module tangent diminué de 10% environ dans la zone des contraintes de services habituelles [6].

Le module d'élasticité du béton dépend de sa résistance, de son âge, du contenu d'humidité et de type de granulats [19]. Pour les bétons courants, le module d'élasticité d'un béton peut varier de 25 000 *MPa* à 45 000 *MPa*. Par contre, pour les bétons de granulats légers de structure, il est de moitié environ par rapport à celui du béton courant [9].

I. 5 – PERMÉABILITÉ

À l'exception des sollicitations mécaniques (chocs, abrasion, érosion, etc.), tous les effets néfastes associés à la durabilité (§ I.7) font intervenir l'écoulement de fluides (liquide ou gaz) à travers le béton, d'une part.

D'autre part, l'écoulement de fluides à travers le béton dépend de la porosité de ce dernier et aussi de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et de la continuité ou non des pores.

En effet, la perméabilité est la facilité avec laquelle les fluides peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton. Elle dépend, plus particulièrement, des pores de la masse interne de la pâte de ciment, qui représente la seule phase continue dans le béton. D'ailleurs, les granulats peuvent aussi contenir des pores, mais, habituellement, ceux-ci ne sont pas interconnectés. De plus, les granulats sont enrobés par la pâte de ciment de sorte que les pores des granulats ne participent pas à la perméabilité du béton. Le même processus s'applique aux vides ponctuels, comme les bulles d'air entraîné [11].

La perméabilité caractérise un transfert de fluide sous gradient de pression (selon la loi de Darcy). En mesurant le coefficient de perméabilité [20].

Dans le béton, le coefficient de perméabilité décroît avec la diminution :

- De la finesse de mouture du ciment,
- Et du rapport eau – ciment.

De façon générale, on peut dire que, plus la résistance de la pâte de ciment durci est élevée, plus la perméabilité du béton est faible [11].

Selon Gorisse [9], la perméabilité du béton est faible aussi pour les bétons dont les modules de finesse sont moyens. On notera donc l'importance de la granularité du sable sur les qualités du béton.

Il résulte qu'un béton est durable s'il présente une bonne compacité et une bonne étanchéité aux infiltrations de fluides.

Dans le cas général, les essais de perméabilité mesurent la réaction à la pression, ce qui est rarement la cause de l'infiltration des fluides dans le béton ordinaire. Un autre type d'essais (§ V.4.9), nécessaire, mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire d'un béton non saturé mis en contact avec de l'eau, mais sans pression hydraulique [11].

I. 6 – RETRAIT

I. 6.1 – INTRODUCTION

Au cours de son évolution, le matériau béton est l'objet de modifications physico-chimiques qui entraînent des variations dimensionnelles [17].

En l'absence de toute charge appliquée, le béton se déforme spontanément. Ces déformations sont liées à l'humidité du milieu de conservation [21].

Dans l'eau se produit une absorption accompagnée d'une augmentation de volume. Ce phénomène porte le nom de *gonflement*. Dans l'air non saturé, il se produit toujours une perte d'eau suivie d'une diminution des dimensions initiales. Ce phénomène porte le nom de *retrait* [14].

I. 6.2 – DIFFÉRENTS TYPES DE RETRAIT

I. 6.2.1 – Retrait avant et en cours de prise

En cas de départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation (rapport surface – volume de pièces élevé, très faible hygrométrie du milieu ambiant, temps chaud, vent violent), soit par absorption (coffrage, granulats poreux), une contraction importante du béton frais, avant et en cours de prise, peut se

produire et causer un retrait rapide du béton qui perturbe également l'hydratation du ciment.

Ce retrait sera limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure (revêtements superficiels, produits de cure) [17].

I. 6.2.2 – Retrait thermique

La prise puis le durcissement du béton s'accompagne toujours d'un dégagement de la chaleur de prise du ciment. Il est donc bien évident que lors du refroidissement le matériau subira une contraction ; ceci dans des proportions non négligeables, surtout pour les ouvrages en grandes masses [14].

I. 6.2.3 – Retrait hydraulique

a – Retrait endogène c'est la diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation du ciment non encore hydraté; on dit aussi retrait d'auto dessiccation ou *retrait d'hydratation*.

b – Retrait exogène c'est la diminution de volume de la pâte liante, d'un béton conservé dans l'air non saturé, provoquée par l'évaporation de l'eau libre ; on dit aussi retrait de dessiccation ou *retrait de séchage* [8].

Le retrait hydraulique est désigné, la plupart du temps, sans précision, sous le seul nom de : *retrait*.

La déformation due au retrait que l'on mesure expérimentalement (§ V.4.8) inclut donc une composante relative aux processus physico-chimiques liés aux réactions d'hydratation du ciment (déformations endogènes), et une composante liée au séchage exogène que subit le matériau [20].

I. 6.3 – FACTEURS AGISSANT SUR LE RETRAIT

Parmi les facteurs agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment : certains ciments sont plus sensibles que d'autres à la dessiccation (ciment à forte proportion de laitier par exemple),

- La finesse de mouture du ciment : cela nécessite une plus grande quantité d'eau de mouillage. Le retrait d'un béton grandit avec l'augmentation de la finesse de ciment,
- Le dosage en ciment : le retrait augmente avec le dosage en ciment,
- La quantité d'eau de gâchage : le retrait de la pâte de ciment hydraté est d'autant plus élevé que le rapport eau - ciment est plus élevé,
- Les vides d'air : l'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton,
- La présence d'éléments fins : proviennent en général de l'emploi de granulats argileux ou de granulats de broyage non dépoussiérés,
- La nature et la granulométrie des granulats : A même granulométrie, les granulats concassés provoquent un retrait plus élevé que le matériaux roulés,
- L'hygrométrie de l'ambiance : Le retrait croît quand l'humidité relative diminue [14] [22].

I. 6.4 – MESURE DU RETRAIT

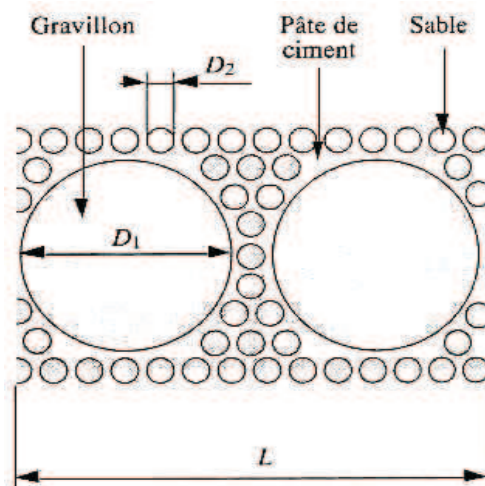
La mesure du retrait sur béton se fait par différentes méthodes. On peut accéder aux déformations de retrait sur éprouvettes cylindriques en béton à l'aide d'extensomètre [8].

Pour les études comparatives du béton en laboratoire, on a souvent recours aux éprouvettes prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$) pour lesquelles on utilise des rétractomètres (voir Photo V-1).

Le retrait mesuré sur béton est plus faible que celui mesuré sur mortier normal pour deux raisons principales :

- Le volume de la pâte liante dans un béton est généralement beaucoup plus faible que dans un mortier. Or c'est la pâte qui se rétracte et non le squelette granulaire qui, au contraire, s'oppose au retrait,
- D'autre part, les dimensions des granulats d'un béton sont plus importantes que celles du sable utilisé dans un mortier. Or ce sont les plus gros grains du granulat qui sont déterminants dans la limitation du

retrait. Plus le granulat est gros et mieux il limite les effets du retrait (voir Figure I-2) [8].



Le retrait
n'affectera en
réalité que la
distance
($L - 2D_1$)

Figure I-2

Influence de la Dimension des Granulats sur le Retrait [8]

Le phénomène de retrait peut être assimilé à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

En Algérie, on peut retenir les valeurs suivantes dans le cas de pièces non massives à l'air libre :

- Dans les régions humides (zone A) : $\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-4}$
- Dans les régions tempérées (zone B) : $\frac{\Delta l}{l} = 3 \times 10^{-4}$
- Dans les régions chaudes et sèches (zone B', C et D₁) : $\frac{\Delta l}{l} = 4 \times 10^{-4}$
- Dans les régions très sèches ou désertiques (zone D₂ et D₃) :
 $\frac{\Delta l}{l} = 5 \times 10^{-4}$ [23].

I. 6.5 – CONCLUSION

Le retrait c'est un phénomène lié, en grande partie, aux mouvements de l'eau. Par conséquent tout paramètre influant sur le bilan de l'eau dans le béton, influera sur son retrait.

Pour limiter le retrait, il est impératif donc :

- D'employer un minimum d'eau de gâchage,
- De tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait),
- De protéger le béton contre la dessiccation, pendant et après prise,
- De créer les joints au niveau des ouvrages (joints de dilatation, joints de fractionnement) [6] [22].

I. 7 – DURABILITÉ

I. 7.1 – INTRODUCTION

Le béton est un matériau durable. Ce qui est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agressions auxquelles il peut être exposé [11].

La durabilité du béton dépend de plusieurs facteurs (d'actions physiques, chimiques ou mécaniques) qui affectent sa durée de vie. Plus particulièrement *le gel*, *les agents chimiques* et *l'abrasion*. La résistance du béton à ces différents facteurs dépend essentiellement de sa qualité générale et de la qualité de chacun de ses constituants [19].

I. 7.2 – RÉSISTANCE AUX AGENTS AGRESSIFS

La détérioration du béton provient le plus souvent de son attaque par les agents chimiques : *acides* ou *salins*, contenus dans l'eau avec laquelle il est en contact, qui dissolvent la chaux du ciment en formant des composés nouveaux entraînant l'érosion, le gonflement et l'éclatement des bétons [24].

La résistance à l'agressivité du milieu ambiant est fonction de l'étanchéité d'un béton qui dépend en premier lieu de sa compacité et de la cure humide du béton qui consiste à tenter de limiter l'évaporation d'eau préjudiciable à la compacité [8].

I. 7.3 – RÉSISTANCE AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL

Le matériau béton résiste d'autant mieux aux cycles de gel - dégel que son rapport eau - ciment est faible et donc sa résistance plus élevée [8].

La résistance au gel et dégel du béton dépend de la qualité d'air entraîné, de la teneur en eau totale et des conditions d'humidité.

La durabilité du béton est très sensiblement améliorée par la présence d'air entraîné et qu'en effet le béton à air entraîné offre une meilleure résistance au gel et aux agents chimiques tels que les sels fondants.

La Figure I-3 suivante montre l'influence du rapport eau - ciment et de l'air entraîné sur la durabilité du béton. Le facteur de durabilité correspond au nombre de cycles de gel et de dégel pour produire une détérioration donnée, mesurée en laboratoire. On remarque que des bétons à faible rapport eau - ciment et à un pourcentage adéquat d'air entraîné, résisteront à un nombre très grands de cycles de gel et de dégel [19].

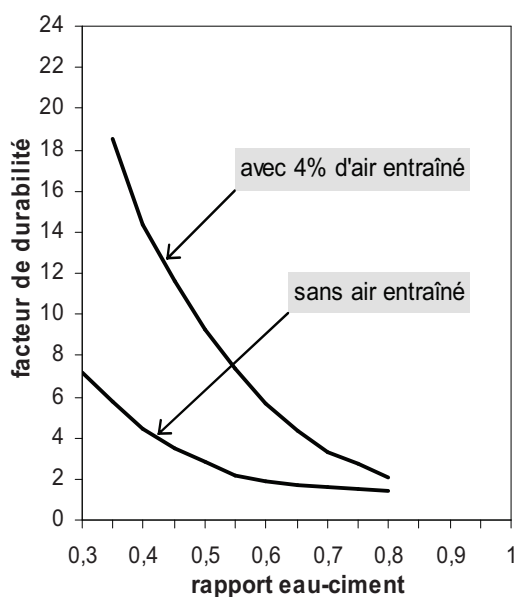


Figure I-3

*Influence du Rapport Eau - Ciment et de l'Air Entraîné
sur la Durabilité du Béton [19]*

I. 7.4 – RÉSISTANCE A L'ABRASION

La résistance à l'abrasion dépend de la dureté du béton : en effet de la résistance de la pâte de ciment durcie et de granulat ainsi que de l'adhérence pâte – granulat [25].

Par ailleurs, les bétons les plus résistants à la compression, résistent mieux à l'abrasion.

I. 7.5 – CONCLUSION

Un béton est d'autant plus durable qu'il présente :

- Un dosage en ciment au moins égal au minimum exigé par la norme,
- Un rapport eau – ciment optimal,
- Une quantité suffisante d'air entraîné,
- Une attention particulière à la cure avant son exposition au milieu agressif,
- Et une porosité plus faible.

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU

GRANULAT

II. 1 – INTRODUCTION

On appelle « granulats » ce qui constitue l'ensemble des matériaux granulaires, non cohérents et qui, agglomérés par un liant, forment le squelette du béton.

Il s'agit donc des éléments inertes entrant dans la composition des bétons : sables, gravillons, graviers, cailloux, etc [9].

Les granulats représentent les trois quarts du volume du béton et selon leur qualité, peuvent non seulement limiter la résistance du béton, mais d'affecter sa durabilité et ses performances structurales [11].

L'ensemble des matériaux granulaires, agglomérés par un liant, confère au béton sa compacité. Cette dernière ne sera maximale qu'en présence des granulats présentant des caractéristiques (qui seront indiquées par la suite) dont les unes sont intrinsèques et les autres découlent des techniques de fabrication [26].

II. 2 – DÉFINITIONS

Selon Maillot [27], la plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées au texte de la norme XP P18 - 540 d'octobre 1997.

Un granulat est un ensemble des grains compris entre 0 et 125 *mm*.

Ils sont dits :

- « *naturels* », lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique ;
- « *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.

Les granulats sont dits « *courants* » lorsque leur masse volumique réelle est supérieure ou égale à 2 t/m^3 . Ils sont dits « *légers* » dans le cas contraire.

Ils sont désignés par d/D , où d et D représentent la plus petite et la plus grande dimension du produit.

La dimension des granulats ne peut être quelconque. Elle doit être calibrée et répondre à des critères granulométriques précis qui dépendent de leur utilisation. En effet, le calibrage est une fourchette plus ou moins large obtenue à l'aide des opérations de concassage et de criblage qu'on appelle « **classe granulaire** », désignée par l'intervalle $d - D$ [1].

La norme française XP P18-540 [28] indique la terminologie usuelle des classes granulaires suivantes selon leurs dimensions :

- Fillers $0/D$ où $D < 2 \text{ mm}$ avec au moins 70 % de passant à $0,063 \text{ mm}$;
- Sables $0/D$ où $1 < D \leq 6,3 \text{ mm}$;
- Gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125 \text{ mm}$.

Les granulats destinés aux bétons hydrauliques sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

- La catégorie « **A** » correspond aux granulats destinés à la confection de béton de qualité (ouvrages d'art ou bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique $R_c \geq 35 \text{ MPa}$).
- La catégorie « **B** » correspond aux granulats destinés à de bons bétons, à la condition que leur coefficient d'absorption respecte les spécifications imposées aux granulats de catégorie « **A** ».
- Pour les bétons courants, les granulats de catégorie « **C** » conviennent, ainsi que les granulats dont deux caractéristiques au plus sont de

catégorie « **D** » et que les autres correspondent à celles de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la confection de bétons courants [6].

II. 3 – CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

Les granulats se caractérisent par un certain nombre de propriétés, quel que soit leur usage : en béton hydraulique, en chaussées ou encore en préfabrication. Ces propriétés dépendent :

- De l'origine des granulats : ce sont des caractéristiques liées à la roche ou au produit constituant les grains qu'on appelle « *caractéristiques intrinsèques* » ;
- Du traitement qu'ils ont subi entre leur extraction et leur passage à l'état de produits finis dans l'usine de traitement : ce sont les caractéristiques liées à l'élaboration des granulats qu'on appelle « *caractéristiques de fabrication* ».

Ces caractéristiques sont mesurées par des essais le plus souvent normalisés [27].

II.3.1 – CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION

Elles résultent en général des conditions de fabrication. À savoir : granularité, aplatissement, angularité, propreté des sables, propreté superficielle des gravillons, etc [28].

II. 3.1.1 – Granularité

La *Granularité* est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. La *Granulométrie* ou *Analyse Granulométrique* (§ IV.3.2) est la méthode d'essai qui a pour but de déterminer la granularité. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes classes granulaires constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats dont la dimension nominale est au plus égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers [8].

II. 3.1.2 – Aplatissement

L'emploi des granulats dans les bétons, ainsi que dans la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessite de n'utiliser que ceux ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas d'avoir des bétons très compacts, et, par ailleurs, en technique routière, ils conduisent à des couches de roulements trop glissantes [8].

La forme d'un granulat est définie par trois dimensions principales :

- Longueur **L** : distance maximale séparant deux plans parallèles,
- Épaisseur **E** : distance minimale séparant deux plans parallèles,
- Grosseur **G** : côté du plus petit tamis laissant passer le granulat.

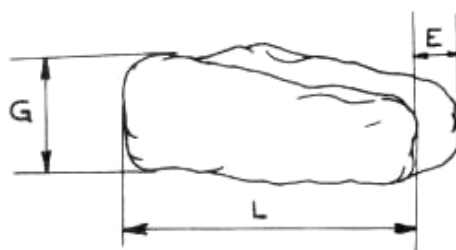


Figure II-1

Dimensions d'un Grain de Granulat [26]

La forme d'un granulat est caractérisée par la détermination de son coefficient d'aplatissement « A_p » (§ IV.3.7.3) à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Ce coefficient est le pourcentage pondéral de grains dont la grosseur excède 1,58 fois l'épaisseur ($G/E > 1,58$) [6].

La norme XP P18-540 [28] indique, pour les granulats destinés aux bétons hydrauliques, les valeurs maximales du coefficient d'aplatissement « A_p » en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau II-1

Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient d'Aplatissement

Catégorie	Vss en %
A	20
B et C	30
D	40

II. 3.1.3 – Angularité

C'est une caractéristique de fabrication qui caractérise l'état de surface des granulats, du point de vue de leur proportion d'arêtes vives. C'est-à-dire, c'est une appréciation qualitative, le granulat est roulé ou concassé ou semi – concassé [26].

II. 3.1.4 – Module de finesse des sables « MF »

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible et plus le sable est riche en éléments fins [8].

Le module de finesse des sables « MF » est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, aux tamis de 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 et 5 *mm* [28].

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité [6] [11].

La norme XP P18-540 [28] indique une limite inférieure $L_i = 1,8$ et une limite supérieure $L_s = 3,2$ pour les sables de catégories A et B.

II. 3.1.5 – Propreté des granulats

L'utilisation des granulats pollués, présence d'argile à la surface des granulats ou autres impuretés, provoquant une baisse des résistances mécaniques et une augmentation du retrait, sans oublier l'incidence de l'excès d'eau sur les caractéristiques du béton [6].

Il est impératif donc, que la propreté des granulats doit être toujours vérifiée, que ce soit, celle des sables ou des gravillons.

a – Propreté des sables est contrôlée en mesurant l'importance des pollutions argileuses dans les sables par l'essai dit « Équivalent de sable » et l'essai dit « Bleu de méthylène » :

- **Équivalent de sable « ES »** : l'essai consiste à séparer par agitation, dans une éprouvette, au moyen d'une solution lavante, les sables, qui décantent, et les éléments fins qui restent en suspension. On détermine ainsi un « équivalent de sable » dont la valeur est d'autant plus élevée que le sable est exempt d'impuretés argileuses [27].

Le tableau ci-après indique les spécifications relatives à la propreté des sables.

Tableau II-2

Qualité du Sable en Fonction de la Valeur de l'ES [6]

ES à vue	ES piston	Renseignement sur la qualité du sable en fonction de la valeur de l'ES
ESV < 65	ESP < 60	Sable argileux d'où risque de retrait ou de gonflement ; ne doit pas être utilisé dans la confection de bétons de qualité.
$65 \leq \text{ESV} \leq 75$	$60 \leq \text{ESP} \leq 70$	Sable légèrement argileux ; peut être admis à la confection de bétons de qualité courante risquant de présenter un retrait plus important, à moins que l'essai au bleu ne donne une valeur $\text{VB} \leq 1$.
$75 \leq \text{ESV} \leq 85$	$70 \leq \text{ESP} \leq 80$	Sable propre ; un $\text{ESV} > 75$ permet en fait d'obtenir des bétons de résistance relativement élevée, mais le fascicule 65 A spécifie un $\text{ESV} \geq 80$ pour les bétons de résistance > 30 MPa.
$\text{ESV} \geq 85$	$\text{ESP} \geq 80$	Sable très propre ; la très faible teneur en fines argileuses peut entraîner un défaut de plasticité que l'emploi d'un adjuvant plastifiant doit compenser.

La teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à $0,08 \text{ mm}$, d'après la norme XP P18-540 [28]. La dite norme indique la teneur maximale en fines (Limite supérieure) dans les sables mesurée sur la fraction $0/4 \text{ mm}$ en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau II-3*Teneur en Fines (f) de la Fraction 0/4 mm*

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0,08 mm
A	Ls 12
B	Ls 15
C	Ls 18
D	Pas de Spécifications

Dans Les cas où la teneur en fines « f » est supérieure à 10%, la propreté des sables est déterminée, sur la fraction 0/2 mm, limitée à 10% de fines, et selon l'essai d'**Équivalent de sable à 10% de fines**.

- **Essai au bleu de méthylène « VB »** : Dans les sables concassés ou broyés, le pourcentage des fines peut être important. Elles peuvent avoir une nocivité grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses d'où la nécessité de vérifier au moyen de l'essai au bleu de méthylène si elles sont ou non nocives [6].

La norme XP P18 - 540 [28] indique les valeurs limites d'Équivalent de sable à 10% de fines « PS » ainsi que la valeur spécifiée supérieure de l'Essai au bleu de méthylène « VB » en fonction de la catégorie des granulats. La conformité est obtenue si au moins l'une des valeurs spécifiées de PS ou de VB est respectée :

Tableau II-4*Valeurs Spécifiées de (PS) et (VB)*

Catégorie	PS (%)		Ou VB _{0/D} (g)
	Sables d'extraction alluvionnaire	Autres sables	
A	Vsi 65	Vsi 60	Vss 1
B, C et D	Vsi 60	Vsi 50	

b – Propreté superficielle des gravillons : La présence des impuretés, en particulier, de la gangue argileuse ou des poussières autour des grains dans les bétons, risque de compromettre l'adhérence pâte – granulats et en conséquence diminution de la résistance [6].

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm, que ces particules soient simplement mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm [29].

La propreté superficielle « P », c'est-à-dire le pourcentage de matières prohibées, vase et argile, éliminées lors de l'essai doit être $\leq 1,5\%$ dans le cas de gravillons n'ayant pas subi de concassage, valeur portée à 3 pour les gravillons de roches massives ou provenant d'extraction alluvionnaire ou marine d'indice de concassage « IC » ≥ 50 si $VB_F \leq 10$, VB_F étant la valeur de bleu sur le 0/0,125 exprimé en g/kg (l'indice de concassage « IC » est le pourcentage d'éléments $>$ au « D » du granulat élaboré contenu dans le matériau d'origine soumis au concassage) [6].

II.3.2 – CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES

Elles sont liées en général à la qualité de la roche exploitée. À savoir masse volumique réelle, absorption d'eau, Los Angeles, friabilité des sables, etc [28].

II. 3.2.1 – Masses volumiques

a – La masse volumique apparente d'un granulat est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides compris « volume apparent ».

Elle est utile à connaître pour le dosage volumétrique des granulats. Elle varie en fonction de la teneur en eau, notamment pour le sable qui foisonne.

Pour les granulats naturels courants, la masse volumique apparente varie de 1300 à 1600 kg/m^3 suivant la nature minéralogique et la teneur en eau [9].

Par contre, pour les granulats minéraux légers en terre cuite et autres matériaux légers concassés, elle varie de 900 à 1000 kg/m^3 pour les gravillons des classes (5/15) à (10/20) et de 1100 à 1300 pour les sables de classe (0/5) [30].

b – La masse volumique réelle d'un granulat est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume, vides intergranulaires exclus « volume réel ».

c – La masse volumique absolue d'un granulat est le rapport de sa masse sèche par le volume de matière solide sans aucun vide contenu dans les grains « volume absolu » [27].

Elle varie assez peu pour la plupart des granulats naturels courants : en moyenne 2450 à 2650 kg/m^3 . Sa détermination est nécessaire pour le dosage pondéral des granulats [9].

II. 3.2.2 – Porosité

La porosité des granulats contribue à la porosité globale du béton, vu qu'ils représentent environ les trois quarts du volume du béton [11].

La porosité est le rapport du volume des vides contenus dans les grains et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon : *porosité ouverte* [31].

Selon la norme française P 18 - 557 [32], la porosité ne se détermine que pour les classes de grains supérieures à 4 mm. En dessous de cette dimension, la porosité tend vers zéro et joue un rôle moins important dans l'ensemble du granulat.

D'après René Lesage [26], la méthode de détermination de la porosité n'est guère applicable aux sables à cause des difficultés expérimentales. Par ailleurs, la porosité qu'il faut prendre en compte dans les études de formulation de béton, est généralement très faible dans les cas des sables. Le seul cas particulier est celui des sables de granulats légers, pour lesquels on est tenu de prendre en compte la *porosité totale*.

II. 3.2.3 – Absorption d'eau

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, la présence de l'eau dans les pores des granulats provoque l'éclatement de ces derniers, donc du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures [8] (voir § II.3.2.6).

Selon Dreux et Festa [6], les différents textes réglementaires, pour définir la qualité des granulats, prennent en considération leur coefficient d'absorption d'eau, plutôt que d'imposer des valeurs limites de porosité.

Le coefficient d'absorption d'eau « A_b » est défini comme étant le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau pendant 24 h, à la masse sèche de l'échantillon [33]. En effet, il permet de mesurer le volume des pores accessibles à l'eau. Plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif [6].

La norme XPP18-540 [28] indique les valeurs spécifiées supérieures du coefficient d'absorption d'eau « A_b » en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau II-5

Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient d'absorption d'eau

Catégorie	Vss en %
A	2,5
B	5
C	6
D	Pas de spécifications

II. 3.2.4 – Résistance à la fragmentation

Dans les bétons, aussi bien que dans les chaussées, les granulats sont soumis à des contraintes pouvant entraîner leur rupture. La mesure de leur dureté, en conséquence de leur résistance à la fragmentation s'obtient par l'essai Los Angeles [27].

L'essai Los Angeles (§ IV.3.7.4) estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il se pratique sur des matériaux de classes comprises entre 4 et 50 mm, par introduction de la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie du matériau soumis à l'essai, puis 5 kg de l'échantillon pour essai dans la machine Los Angeles (Photo A2-10). En soumettant le matériau aux chocs de boulets par rotation du cylindre.

Le pourcentage du passant P au tamis de 1,6 mm, récupéré par la suite, représente le coefficient Los Angeles « LA » :

$$\boxed{LA = 100 \frac{P}{5000}} \quad [26] \quad (II-1)$$

La résistance à la fragmentation du granulat est d'autant meilleure que la valeur du coefficient Los Angeles est petite. La norme XP P18-540 [28] indique les valeurs maximales du coefficient Los Angeles « LA » en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau II-6

Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient Los Angeles

Catégorie	Vss en %
A	30
B et C	40
D	50

II. 3.2.5 – Friabilité des sables

Les qualités des sables sont appréciées au moyen de l'essai de friabilité des sables (§ IV.3.6.2), qui consiste à mesurer la résistance des sables à la fragmentation sous l'effet de chocs de billes d'acier en présence d'eau dans un cylindre en rotation.

Le pourcentage de la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai, représente le coefficient de friabilité du sable. Ce coefficient (F_s) est d'autant plus élevé que le sable est friable.

La norme XP P18-540 [28] n'indique que les valeurs maximales du coefficient de friabilité des sables « F_s » pour les bétons de ciment destinés aux chaussées :

Tableau II-7*Valeurs Spécifiées Supérieures du Coefficient de Friabilité (F_s)*

Catégorie	Vss en %
A	40
B	60

II. 3.2.6 – Résistance au gel

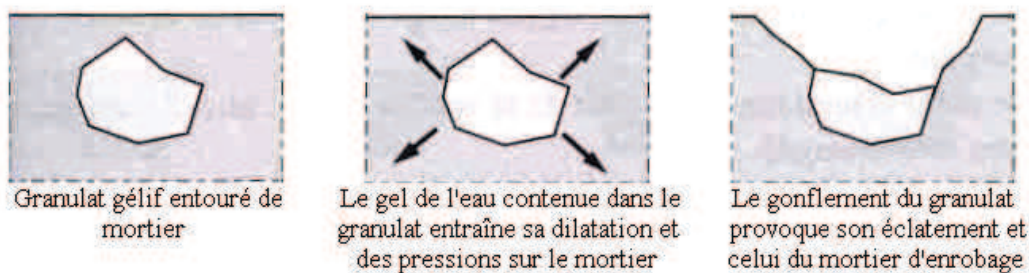
Un granulat, c'est sa porosité qui lui rend vulnérable vis-à-vis du gel.

On considère qu'un gravillon est non gélif si au moins l'une des trois valeurs spécifiées suivantes est vérifiée :

$$A_b \leq 1\%, LA \leq 25, G \leq 30 \quad (\text{II-2})$$

et que les granulats des catégories A, B et C, sont non gélifs [28].

La figure II-2 suivante montre les dégradations en surface provoquées par le gel :

**Figure II-2**

Cratère Provoqué à la Surface du Béton par l'Éclatement des Granulats Gélifs [8]

Selon René Lesage [26], les spécifications au gel ne sont obligatoires qu'au cas où le béton sera effectivement exposé au gel.

II. 4 – INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES GRANULAIRES

II.4.1 – ÉTAT DE SURFACE DES GRANULATS

L'état de surface d'un granulat (forme, rugosité, angularité et propreté) n'influe pas que sur l'adhérence pâte – granulat, il influe également sur l'aptitude du béton à être mis en œuvre c'est-à-dire à être malaxé, transporté, mis en place [26].

II. 4.1.1 – Forme et texture des granulats

La forme des granulats influence surtout les propriétés du béton frais. Pour une maniabilité donnée, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère. En effet, la mise en place d'un béton exige un excès d'eau pour lubrifier les grains du mélange de façon à atteindre une ouvrabilité normale. Cet excès d'eau sera d'autant plus faible que les grains seront plus arrondis ou cubiques. Une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect [6] [19].

La rugosité de la surface des granulats influe sur la résistance des bétons. Les granulats concassés ont une surface rugueuse et de forme angulaire, ce qui assure une meilleure adhérence pâte de ciment – granulat, et par conséquent une meilleure résistance du béton fabriqué avec les granulats concassés [34].

II. 4.1.2 – Propreté des granulats

Les granulats enrobés d'impuretés telles que la gangue argileuse ou des poussières fines risquent, d'une part, de rendre la mise en œuvre du béton beaucoup plus difficile, d'autre part, de compromettre leur adhérence avec la pâte de ciment.

Le Tableau II-8 suivant, présente l'influence qualitative des paramètres d'état de surface sur la facilité de mise en œuvre du béton et l'adhérence pâte – granulat [26].

Tableau II-8

Influence Qualitative des Paramètres d'État de Surface sur la Facilité de Mise en Œuvre du Béton et l'Adhérence Pâte – Granulat

Caractéristique du granulat	Mise en œuvre	Adhérence
Mal propreté du granulat	Défavorable	Très défavorable
Granulé roulé (angularité faible ou nulle)	Favorable	Défavorable
Granulé concassé (angularité maximale)	Défavorable	Favorable
Forme mauvaise (granulats roulés)	-	Défavorable
Forme mauvaise (granulats concassés)	Défavorable (lentilles d'eau sous les grains)	Très défavorable (lentilles d'eau sous les grains)
Rugosité des faces des grains	-	Très favorable

II.4.2 – DIMENSION MAXIMALE « D »

Un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. La contrainte de rupture à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés de gros granulat. En effet, l'adhérence pâte – granulat est influencée par les propriétés de surface et, à un certain degré, par la forme des gros granulats. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre [6] [11].

Par ailleurs, la dimension « D » du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner. À savoir l'épaisseur de la pièce, l'espacement des armatures, la densité du ferrailage, la complexité du coffrage, la possibilité et l'efficacité du serrage à la mise en œuvre, risque de ségrégation, etc [6].

L'effet du retrait est limité par l'utilisation des gros granulats. Le retrait mesuré sur béton est plus faible que celui mesuré sur mortier (voir § I.6.4).

II.4.3 – GRANULARITÉ

Selon Dreux et Festa [6], l'influence de la composition granulométrique sur la composition des bétons est relativement faible, tant en ce qui concerne les

proportions relatives de sable et de gravillon (rapport G/S) que la continuité ou la discontinuité de la courbe granulométrique.

En effet, l'influence du rapport G/S est relativement faible pour des $G/S \leq 2$ (valeurs les plus courantes), tandis que la résistance augmente plus sensiblement pour des valeurs plus élevées de G/S surtout pour les bétons fermes ; mais pour des raisons d'ouvrabilité, il ne convient pas de dépasser $G/S = 2.0$ à 2.2 pour les bétons courants, sauf à prendre des précautions particulières à la mise en œuvre.

Le Tableau II-9 ci-après récapitule les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S et de leur granularité continue ou discontinue [6]

Tableau II-9
*Récapitulation des Principales Qualités des Bétons en Fonction de leur G/S
et de leur Granularité Continue ou Discontinue*

Caractéristiques	Appréciations concernant les bétons	
	à G/S élevé par rapport à ceux à G/S faible	à granularité discontinue par rapport à ceux à granularité continue
Ouvrabilité	Moins bonne surtout pour $G/S > 2,2$	Moins bonne surtout si $G/S > 2,2$
Résistance en compression	Meilleure, surtout pour $G/S \geq 2,2$	Très légèrement supérieure
Résistance en traction	Sans corrélation apparente	Très légèrement inférieure
Module d'élasticité	Sans corrélation très nette sauf pour le module statique un peu plus élevé en fonction de G/S	Un peu plus élevé
Vitesse du son	Sans corrélation très nette	Légèrement supérieure
Indice sclérométrique	Un peu supérieur	Très légèrement supérieur
Retrait	Sans corrélation très nette	Moins élevé surtout si $G/S > 2,2$
Compacité, densité	Légèrement plus élevée pour $G/S > 2,2$	Un peu plus élevée

II.4.4 – RAPPORT GRANULAT – CIMENT

L'augmentation de la teneur en ciment (rapport G/C faible) affecte la résistance de tous les bétons de moyennes ou hautes résistances, c'est-à-dire, dépassant environ 35 MPa. Le rapport G/C est un facteur moins important quant à la résistance, mais, pour un rapport eau/ciment constant, il a été démontré qu'un béton plus faiblement dosé en ciment était plus résistant (figure II-3).

D'après Neville [11], l'explication la plus probable provient toutefois du fait que la teneur totale en eau du béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé.

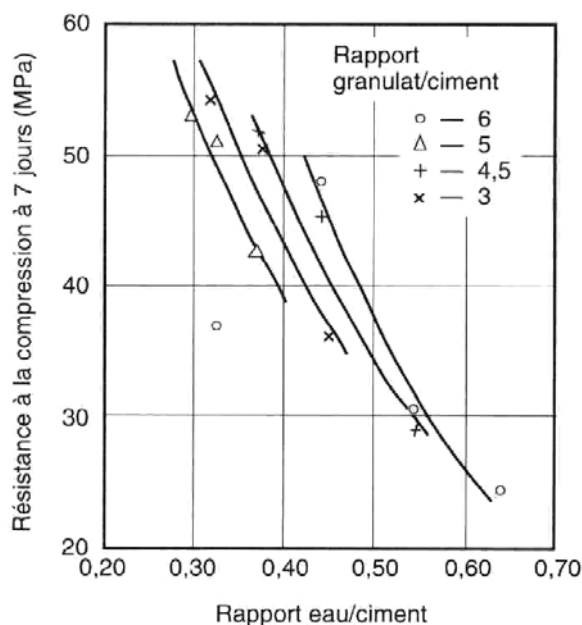


Figure II-3

Influence du Rapport G/C sur la Résistance du Béton [11]

II.4.5 – RÉSISTANCE DES GRANULATS

La résistance du béton n'est pas sensiblement influencée par la résistance des granulats tant que cette dernière est supérieure à la classe de résistance prévue par le projet. L'utilisation de granulats de faible résistance, inférieure à la classe de résistance nécessaire peut diminuer fortement la résistance du béton. D'où la nécessité d'un dosage en ciment plus élevé [34].

Par ailleurs, la résistance du béton (surtout en traction) est fonction de la plus ou moins bonne adhérence pâte – granulat. Cette qualité peut être considérée plus importante que la résistance et la dureté du gravillon lui-même. Cas par exemple du gravillon calcaire qui donne une résistance en traction nettement plus élevée, malgré la qualité de dureté du silex bien supérieure à celle du calcaire [6].

II. 5 – CONCLUSION

La durabilité du béton dépend de sa résistance, qui est, à son tour, liée à la qualité générale du béton et à la qualité de chacun de ses constituants. Enfin, pour qu'un granulat puisse être un bon constituant du béton, il faut donc :

- Qu'il soit convenable du point de vue pétrographique,
- Qu'il joue bien son rôle de « produit de remplissage » : pour cela, ses caractéristiques géométriques et physico – mécaniques doivent être appropriées à la destination du béton, ce qui implique des spécifications bien adaptées ; il serait peu économique d'exiger systématiquement « le meilleur banc de la meilleure carrière » [26].

CHAPITRE III

UTILISATION DES DÉCHETS

DANS LE GÉNIE CIVIL

III. 1 – INTRODUCTION

Les considérations économiques et environnementales affectent de plus en plus l’approvisionnement en granulats. Il y a des grands défis à la réalisation et au sens opposé des grandes objections à l’ouverture de nouveaux bancs de carrières. En même temps, on se heurte, dans certains pays, à des difficultés pour déposer à la décharge gravats et de sous-produits inertes de l’industrie et dans d’autres pays, à l’existence des décharges sauvages qui affectent l’environnement.

Ces deux types de résidus peuvent être transformés en granulats en vue de leur utilisation dans la fabrication du béton, ce qui se fait de plus en plus fréquemment dans plusieurs pays du monde.

Le traitement nécessaire des déchets n’est pas simple, parfois s’est plus onéreux, cas des déchets de démolition par exemple, et l’utilisation de granulats faits à partir de ces déchets demande des connaissances spécialisées, puisque aucun de ces matériaux n’est normalisé [11].

L’usage de granulat de brique pour la fabrication du béton est jugé, par conséquent, pour être une solution pour les régions où les granulats naturels font défaut et où une réduction dans le poids mort de structure peut être désirable [5].

III. 2 – DÉFINITIONS

Le mot « déchet » désigne la perte qu’une chose subit dans son volume, sa valeur ou dans quelqu’une de ses qualités. Il est synonyme de résidu rejeté parce qu’il n’est plus utilisable ou consommable, parce qu’il n’a plus de valeur [35].

Plusieurs définitions des déchets ont été proposées, ces dernières années. Un point commun à ces définitions est la notion que les déchets sont des matières indésirables dont le producteur veut se débarrasser [36].

Le terme « déchet » désigne :

Selon l'article n°1 de la loi Française n° 75-633 du 15 juillet 1975, " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon " [37].

Selon la Directive-Cadre de la Communauté Européenne n° 91-156/CEE du 18 mars 1991, " toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire " [37].

Et selon l'article n°3 de la loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer " [38].

Bref, Le terme « déchet » désigne : " résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication, d'utilisation ou de consommation " [39].

III. 3 – PRODUCTION DES DÉCHETS

III. 3.1 – SOURCES DE PRODUCTION DES DÉCHETS

Les sources de production des déchets ou de matières indésirables peuvent être classées en catégories et suivant les modalités de collecte :

- Résidentielles,
- Industrielles, commerciales et institutionnelles (ICI),
- Construction et démolition (CD).

Il est parfois difficile d'établir la source de production d'une matière donnée en raison du manque de suivi ou de modalités de collecte complexes (par exemple : collecte par sous-traitance ou véhicules assurant la collecte en divers endroits) [36].

III. 3.2 – SOURCES DE DÉCHETS UTILISÉS EN GÉNIE CIVIL

Deux principales sources de production de déchets utilisés dans le domaine de génie civil qu'on les rencontre généralement. Les déchets de construction et de démolition (C&D) et les sous-produits de l'industrie.

III. 3.2.1 – Déchets de construction et de démolition

a) – Production

Les déchets de construction et de démolition (C&D) qui sont à la fois lourds et volumineux, à travers le monde entier, ne cessent de se produire en des quantités énormes :

- Aux États-Unis, 31,5 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année. Ce qui représente près du quart des déchets municipaux solides [40],
- En Europe, 259 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année comme le montre la Figure III-1 suivante :

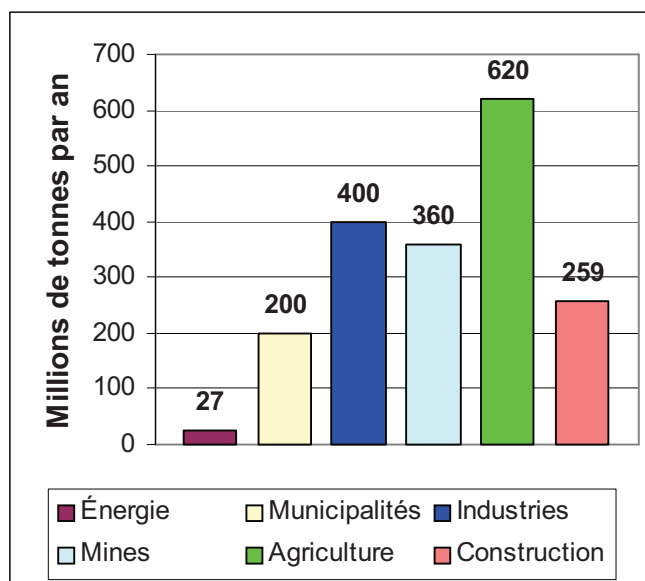


Figure III-1

Répartition des Déchets par Secteurs Sources [35]

- Au Royaume-Uni, 24 millions de tonnes de matériaux de démolition et de débris de construction sont produites chaque année [40],
- En Allemagne, en 1992, 43 millions de tonnes de matériaux de démolition ont été obtenus en ex-RFA [41],
- Au Pays-Bas, en 1993, plus de 12 millions de tonnes de déchets de chantier sont produites comme la montre le Tableau III-1 suivant :

Tableau III-1

*Répartition de la Production des Déchets de Chantier au Pays-Bas
(en Milliers de Tonnes) [41]*

Origines	Bâtiments		Travaux routiers et hydrauliques	Total déchets de chantier	Sol
	Résidentiels	Non Résidentiels			
Construction	848	766	NC	-	-
Rénovation	1 354	524	NC	-	-
Démolition	552	4 163	NC	-	-
Total	2 754	5 453	4 170	12 377	3 100

NC : Non Communiqué

- En Algérie, les déchets de construction et de démolition, qui sont généralement classés parmi les déchets industriels, restent inconnus et sont estimés approximativement à des millions de tonnes par an [42]. Et selon l'étude réalisée par Bedjou [43], les déchets issus du bâtiment sont estimés à 2,2 millions de tonnes par an.

b) – Répartition

Les travaux de construction, de rénovation et de démolition produisent des tas de matériaux de construction : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers, etc. Ces tas sont plus ou moins composite suivant la nature des ouvrages et l'âge de leur construction.

Les quantités de déchets de chantiers et de démolition se répartissent approximativement selon la Figure III-2 suivante :

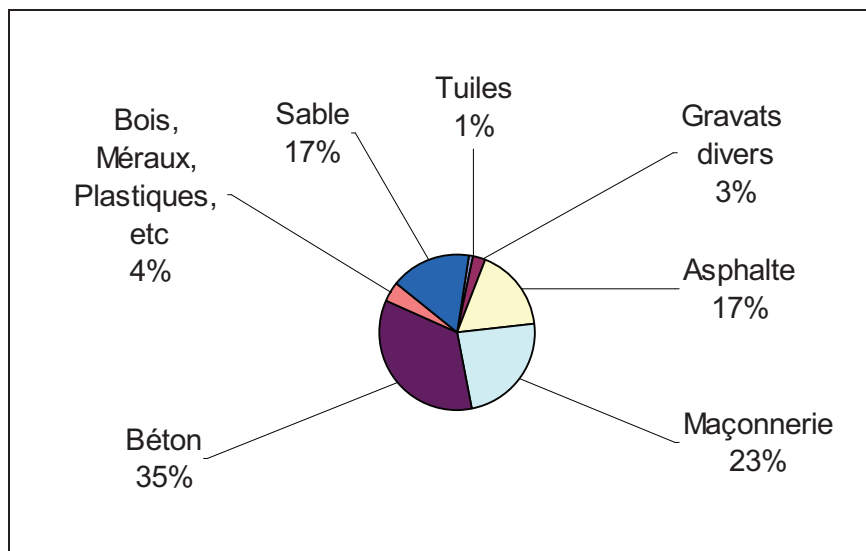


Figure III-2

Répartition des Quantités de Déchets de Chantiers ou de Démolition par Type [41]

III. 3.2.2 – Sous-produits de l'industrie

L'industrie constitue la source principale de sous-produits et de déchets utilisés dans le domaine de génie civil. Des quantités énormes qui se produisent sans cesse et qui augmentent toujours, des grandes surfaces de terrain immobilisées par les déchets stockés et de la réduction des disponibilités de terrain, ainsi que de la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences.

Le génie civil se considère comme un domaine d'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles ainsi qu'une large gamme de matériaux de construction.

Parmi les sous-produits et déchets utilisés en génie civil :

a) – Les laitiers de haut fourneau : sont utilisés comme matériaux de construction depuis assez longtemps. Les laitiers granulés sont utilisés dans l'industrie du ciment, dans la construction des couches de base, dans la fabrication

des briques. Les laitiers expansés sont utilisés pour la production des granulats légers et les laitiers refroidis à l'air, sont concassés et utilisés comme granulats pour les bétons. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. L'utilisation des laitiers de haut fourneau est réglementée par des prescriptions techniques [2] [44].

b) – les cendres volantes, provenant de la combustion des charbons dans les centrales thermiques, peuvent être utilisées à la fabrication des ciments, à l'exécution des bétons, où elles remplacent en partie le ciment portland, à la production des granulats légers et d'autres matériaux de construction, ainsi qu'à l'exécution des remblais dont elles ont un effet favorable grâce à leur faible poids. Notant que les cendres volantes sont sensibles au gel, du fait de leur composition granulométrique [44].

c) – Le mâchefer : c'est les résidus de la combustion de la houille, dans les centrales électriques anciennes. Il contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé [2].

d) – la terre cuite : les débris de terre cuite sont, généralement, classés parmi les déchets de démolition, que ce soit du point de vue recyclage ou réutilisation comme granulats légers (voir Tableaux III-3 et III-8). En effet, ceux sont : l'argile cuite non moulée (chamotte), l'argile cuite, les briques concassées, les surcuits et les incuits de briqueteries, ainsi que les débris de briques contenus dans les déchets de démolition et les décombres, qui sont désignés sous le nom collectif de « débris de terre cuite » [45].

Par commodité, quoi qu'il en soit et suite à l'axe de notre recherche qui s'intéresse aux déchets de briques de briqueteries, nous les classeront parmi les sous-produits de l'industrie.

En Algérie, la brique en terre cuite est le plus fréquemment utilisée comme élément de maçonnerie dans le secteur du bâtiment. Vu le développement économique de l'Algérie qui s'est engagée en domaine de construction et dans le

cadre de valorisation d'utilisation des matériaux locaux, en 1989, l'état algérien a encouragé l'industrie de fabrication des produits rouges. À cette époque, il y avait que 12 projets de production qui ont été initiés durant l'année 1988 et l'offre, estimé à un taux de satisfaction de 45%, était loin de satisfaire le marché national. Les besoins prévus jusqu'au l'an 1994, étaient de l'ordre de 7 millions tonnes/an en produits rouges et 5 millions tonnes/an pour les tuiles [46].

Actuellement, la wilaya de Ouargla compte seule (05) cinq briqueteries fonctionnelles d'une capacité de production total de 330 000 tonnes/an, comme la montre le Tableau III-2 suivant, et une sixième briqueterie en phase de la réalisation d'une capacité de production annuelle estimée à 140 000 tonnes. L'usine est une source de production des déchets de brique. Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. D'après les constatations et les informations recueillies aux niveaux des usines, le taux moyen des pertes local varie de 5 à 8% de la production annuelle.

Tableau III-2

Capacité de Production de Briques Rouges dans la Wilaya de Ouargla [47]

Dénomination Entreprise	Localisation	Capacité de production (t/an)	Production 2004 (t)
Sté Briqueterie Ténicha - SBT -	Zaouia-Labidia	50 000	41 000
Briqueterie Moderne OASIS - BMO -	Touggourt	40 000	35 855
Sté Témacine Briques - STB -	Témacine	70 000	64 779
EURL / Société Briqueterie Nezla	Nezla	120 000	81 000
Sté Production Mat. Const. - SPMC -	Témacine	50 000	44 000
Total		330 000	266 634

III. 4 – DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL

Dans le cadre de travaux de génie civil, on distingue trois catégories principales de déchets : les déchets inertes, les déchets banals et les déchets dangereux.

III.4.1 – DÉCHETS INERTES

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement [48].

Ces sont donc des matériaux, sans caractère polluant, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils sont constitués presque intégralement de minéraux tels que silicates, carbonates ou aluminates ; leur contenu en métaux lourds ou autres polluants est très faible [49] [50].

Selon l'article n°3 de la loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, déchets inertes : " tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement " [38].

Il s'agit donc :

- Des résidus minéraux provenant des industries d'extraction et des industries de fabrication de matériaux de construction [37],
- Des déchets provenant des activités de construction, de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...) en mélange ne contenant pas de substance dangereuse et ne contenant que des déchets presque minéraux [48] [49].

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve :

- Béton,
- Briques,
- Parpaings,
- Tuiles et céramiques,
- Terres et granulats non pollués et sans mélange [48].

III.4.2 – DÉCHETS BANALS

Les déchets banals ou les déchets industriels banals (DIB) sont non inertes et non dangereux générés par les activités, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou du service. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou de l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux, etc. [37] [48].

III.4.3 – DÉCHETS DANGEREUX

Les déchets dangereux ou les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets qui présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. En citant par exemple : pots de peinture, tubes de colle, certains déchets d'amiante, néons, etc. [48] [51].

III. 5 – PRIORITÉS DE TRAITEMENT DES DÉCHETS INERTES

Les solutions de traitement des déchets inertes sont analogues à celle applicables à l'ensemble des déchets. Elles stipulent que la priorité doit être donnée à la réduction de la production des déchets à la source, ensuite la valorisation et le recyclage et enfin l'élimination de manière favorable à l'environnement [52].

III.5.1 – RÉDUCTION À LA SOURCE

La réduction à la source englobe toute action permettant de diminuer la quantité de déchets générés à la suite de fabrication, de la distribution et de l'utilisation d'un produit [39], en citant par exemple :

- La terre cuite broyée ou concassée (chamotte) peut être régénérée dans le processus de fabrication, comme dégraissant, pour amaigrir l'argile très plastique [53],
- Éviter les cassures au niveau des produits lors de travaux de manutention et de transport,
- Pendant des projets de construction, il faut éviter de commander involontairement trop de matériaux [54].

III.5.2 – VALORISATION DES DÉCHETS INERTES

La valorisation de la matière est un mode d'exploitation des déchets qui vise à leur mise en valeur afin de les réintroduire dans le circuit économique. Elle couvre le réemploi, la réutilisation, la régénération et le recyclage de la matière [49].

III. 5.2.1 – Réutilisation

Lors de travaux de démolition, les briques récupérées peuvent être nettoyées et réutilisées sur le même chantier ou ailleurs. Par ailleurs, certaines briques anciennes ont une grande valeur architecturale et sont recherchées pour les rénovations historiques.

Lors de travaux de construction, le béton pré-mélangé en excès peut être utilisé dans la fabrication de bordures de terrains de stationnement, de jardinières ou dans l'aménagement paysager [54].

III. 5.2.2 – Recyclage

Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première naturelle. Il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse [49].

La brique, le béton et le mortier peuvent être concassés et utilisés comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction [54].

III.5.3 – ÉLIMINATION DES DÉCHETS INERTES

Le dernier maillon de la chaîne dans un plan de gestion de déchets inertes est leur élimination contrôlée, le produit final devra être dans la mesure du possible un déchet ultime, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, par l'extraction de la part valorisable [49] [55].

III. 6 – RECYCLAGE DES DÉCHETS DE CHANTIER

Au début des années 80, les déchets de construction et de démolition aboutissaient généralement dans des décharges. À l'époque, approximativement, 80 millions de tonnes de déchets de la démolition surviennent de reconstruction dans les Communautés Européennes de l'Est (CEE) chaque année. La quantité est supposée à être doublée à l'an 2000 et triplée à l'an 2020 [56]. Ce n'est qu'au cours des années 90, que de grands défis ont surgi, en Europe, quant à la façon d'éliminer ces déchets et que le recyclage est devenu un autre moyen d'évacuation des déchets [43].

Dès lors, la politique de gestion des déchets de construction et de démolition a suivi une stratégie de réduire les déchets d'une manière rentable et dans le respect de l'environnement, tout en se conformant à des règlements et aux priorités de traitement des déchets qui se basent sur le principe de 3R-É :

- Réduction de la quantité déchets à la source de sa production,
- Réutilisation directe de la matière ou du matériau récupéré,
- Recyclage, axé sur la fabrication de granulats,
- Élimination des déchets ultimes.

III.6.1 – DÉCHETS DE CONSTRUCTION ET DE DÉMOLITION

Parmi les déchets dits inertes, certains pourraient être recyclés, ce qui permettrait de réduire d'autant les extractions de granulats tout en prolongeant la vie des décharges qu'ils contribuent actuellement à saturer. Ces matériaux recyclables sont présents dans trois catégories de produits [57] :

- Les déblais de terrains naturels non pollués, extraits à l'occasion de travaux de terrassement (fondation d'immeuble, tranchée, plate-forme...),
- Les matériaux de démolition triables (béton, béton armé, béton cellulaire, fibrociment, pierres de taille, briques, tuiles...),
- Les déchets de construction, déchets de fin de chantier comportant le même éventail de produits que la démolition.

III. 6.1.1 – Déblais de terrains naturels

Les déblais de terrains naturels sont directement valorisables en matériaux pour travaux de génie civil et d'aménagement :

- **Terres** : sont réutilisées pour la réhabilitation des sols et talus excavés, constitution de nouveaux sols (jardins, espaces verts, parcelles agricoles...),
- **Sables et graviers** : sont réutilisés directement en granulats (bétons, couches de chaussées) ou en remblais routiers si argileux,
- **Sédiments et éléments grossiers** : sont réutilisés pour la fabrication de granulats par concassage – criblage, pour bétons, ballast, empierrement, chaussées, remblais, assainissement.

III. 6.1.2 – Matériaux de démolition et déchets de construction

Les matériaux de démolition et déchets de construction sont la source principale des granulats de recyclage et sont également valorisables en matériaux pour génie civil :

- **Les matériaux grossiers et durs** (bétons, pierres de taille...) donnent de granulats par concassage – criblage,
- **Les matériaux plus tendres et/ou friables** (tuiles, brique, céramiques, fibrociments) sont réutilisables comme tout-venant pour remblais compactés.

III.6.2 – MATÉRIAUX DE CHAUSSÉES

Les matériaux de chaussées sont de plus en plus recyclés et réutilisés aux mêmes fins que les déchets de construction et de démolition ou pour la construction de divers remblais [57].

De même, il est possible, techniquement, de recycler une grande partie des enrobés (couches de roulement). Mais cette solution qui permettrait de réduire de façon notable les extractions de granulats de la meilleure qualité (de nature généralement siliceuse), est encore peu pratiquée en raison du prix de revient élevé des granulats recyclés ; elle ne peut être envisagée que sur des chantiers de grande importance.

III.6.3 – ÉLABORATION DES GRANULATS RECYCLÉS

Les déchets inertes peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers de travaux publics ou encore comme granulats pour le béton.

L'élaboration des granulats recyclés à base de déchets de démolition et de construction consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise-roches hydraulique, à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille, puis à concasser les matériaux selon la granulométrie désirée. Cette dernière opération peut éventuellement être précédée d'un criblage [49].

La production de granulats recyclés, se base en général sur trois types d'installation :

- **Installation fixe** : Installation avec un ou plusieurs concasseurs d'une assez grande capacité,
- **Installation semi mobile** : Installation transportable avec 1 ou 2 concasseurs d'une assez grande capacité,
- **Installation mobile** : Petite installation transportable avec un concasseur d'une faible capacité [41].

III.6.4 – OPÉRATION DE RECYCLAGE

Une étude consacrée au recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition, réalisée en France, en 1992, par le Syndicat national des producteurs de granulats de recyclage, montre que :

- D'une manière générale, le coût des granulats de recyclage est supérieur de 10 à 12 Fois/tonne à celui des granulats naturels et leur qualité est moindre, du fait de leur hétérogénéité,
- À prix égal livré sur le chantier de mise en oeuvre, le granulat naturel bénéficie d'une distance de transport supérieure de 20 km environ, par rapport aux granulats recyclés,
- La rentabilité de l'opération de réutilisation et de recyclage des matériaux de démolition n'est guère envisageable que dans, le cas ou à proximité immédiate des grandes métropoles, capables d'assurer l'approvisionnement régulier d'une installation en matière première sélectionnée et peu éloignée.
- Le recyclage par une installation fixe collectant les matériaux de démolition sur une vaste aire géographique est techniquement réalisable mais plus incertaine sur le plan économique car le coût de collecte doit être plus attractif que le coût de mise en décharge. Ainsi, pour un chantier de démolition situé à 50 km de l'installation de recyclage, le coût de mise en décharge, pour être dissuasif, devrait être supérieur au coût du transport à l'installation et s'élever, au minimum à 50 Fois/m³.
- Le recyclage par une installation mobile n'est rentable, selon la profession, que pour des chantiers de démolition importants (au moins 30 000 tonnes) et présente souvent des difficultés au niveau de la commercialisation des produits.

Cependant, il y a lieu de prendre en compte l'impact environnemental très positif du recyclage qui permettrait de limiter l'encombrement inutile des décharges.

Quoi qu'il en soit, tout projet de création d'une filière de recyclage de matériaux de démolition devra étudier soigneusement les conditions susceptibles d'assurer la compétitivité de l'installation (proximité des centres de consommation, possibilité d'une collecte régulière de matériaux triés, peu éloignés, compétence

technique dans les granulats indispensable pour une bonne intégration dans les circuits de commercialisation). Parallèlement, une action de promotion par les pouvoirs publics est indispensable pour assurer l'approvisionnement (campagnes d'information et de sensibilisation, aide à la certification des produits recyclés, permis de démolir assortis d'une clause prescrivant des recommandations relatives au tri et à la destination des matériaux de démolition...) [57].

III.6.5 – GRANULATS RECYCLÉS PRODUITS

Les granulats recyclés dans les installations de concassage se produisent, en général, sous différents types de matériaux en fonction de leur nature. À titre d'exemple, au Pays-Bas, la production jusqu'à 1992 a été comme la montre la Figure III-3 suivante :

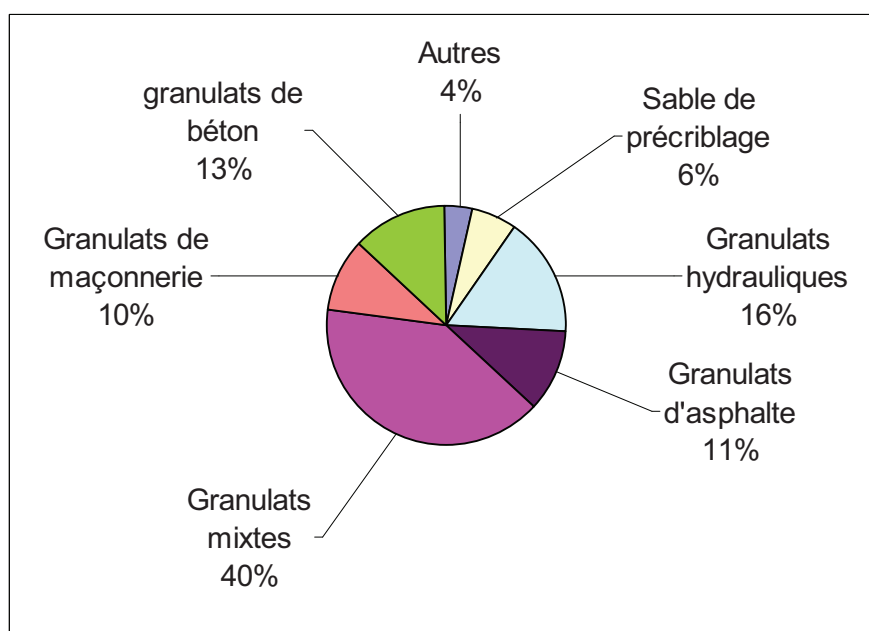


Figure III-3

Répartition de la Production en Granulats Recyclés au Pays-Bas [41]

Les prescriptions du chapitre – C des « matériaux et produits de construction » du cahier des charges type de la région wallonne en Belgique, classent les granulats recyclés produits de débris de démolition et/ou de construction en catégories, sous différents types, comme le montre le Tableau III-3 suivant :

Tableau III-3
Granulats de Débris de Démolition et/ou de Construction [58]

		Granulats de débris de béton	Granulats de débris Mixtes	Granulats de débris de Maçonnerie	Granulats de débris Hydrocarbonés	Granulats de débris Bitumineux
1 (A)	Concassés de béton et matériaux pierreux naturels (Débris de béton, granulats avec gangue de mortier, pierres naturelles, gravier,...) (%)	> 90	> 40	< 40	< 30	< 5
2 (B)	Matériaux type maçonnerie (%) (Brique, mortier, tuiles en terre cuite, ...)	< 10	> 10	> 60	-	-
3 (C)	Autres matériaux pierreux artificiels (%) (carrelages, ardoises, plinthes carrelages, scories, béton cellulaire, argile expansée, ...)	< 5	< 5	< 5	-	-
4 (D)	Matériaux hydrocarbonés (%) (Enrobés hydrocarbonés, bitume, goudron, roofing, ...)	< 5	< 5	< 5	> 70	> 95 (1)
5 (E)	Matériaux non pierreux (%) (Gypse, caoutchouc, plastique, isolation, verre, métaux, chaux, plâtre, ...)	< 0,5	< 1	< 1	< 1	< 1
6 (F)	Matériaux organiques (%) (Bois, déchets de plantes, papier agglomérés, ...)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Masse volumique sèche (kg/m³)	> 2200	> 1900	> 1600	> 2200	> 2200
	Absorption d'eau après 24 heures (%)	< 10	< 15	< 20	< 10	< 5

(1) ne peuvent contenir du goudron

III.6.6 – CLASSIFICATION DE LA RILEM

La pluralité des granulats recyclés produits au niveau des installations de concassage a posé le problème de normalisation de ces produits dans le marché des granulats. L'initiative du groupe de travail TC 121 de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais de Matériaux), en 3^{ème} congrès sur la démolition et la réutilisation du béton et de la maçonnerie, a permis d'élaborer une recommandation intitulée « Specifications for Concrete with Recycled Aggregates ». Lors de cette rencontre, organisée au Danemark (Odense) en 1993, la RILEM a spécifié dans cette recommandation de classer les gros granulats recyclés en trois types dont chacun serait sujet de limites spécifiques en impuretés, en plus des limites imposées par les normes européennes accordées comme les montre le Tableau III-4 suivant [41] [43]:

Tableau III-4

Classification des Gros Granulats Recyclés par la RILEM [43]

Types d'agrégats	Composition
Type I	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie
Type II	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de bétons
Type III	Un mélange d'au moins 80% d'agrégats naturels, pas plus de 10% d'agrégats recyclés de type I (jusqu'à 20% d'agrégats recyclés de type II)

Les classes de résistance du béton à base de ces types de granulats recommandés par la RILEM sont résumées dans le Tableau III-5 suivant :

Tableau III-5

Classes du Béton de Granulats Recyclés [41]

Classe de béton	Type I	Type II	Type III (*)
C16/20	X	-	-
C50/60	-	X	-

(*) : Aucune limite n'est donnée pour le Type III.

Les limites proposées sur ces types de granulats sont résumées au Tableau III-6 suivant :

Tableau III-6
Les Différents Limites Proposées par la RILEM [41]

Exigences mandataires	Type I	Type II	Type III
Densité sèche minimum (kg/m^3)	1800	2200	2400
Absorption d'eau maximum (%)	15	5	3
Teneur maximale de matériaux à densité sèche $< 2200 kg/m^3$ (%)	-	10	10
Teneur maximale de matériaux à densité sèche $< 1000 kg/m^3$ (%)	10	1	1
Teneur maximale de matériaux à densité sèche $< 1200 kg/m^3$ (%)	2	0,5	0,5
Teneur maximale en matériaux non minéraux (%)	1	1	1
Teneur maximale en matériaux organiques (%)	0,5	0,5	0,5
Teneur maximale en éléments fins ($< 0,80 mm$) (%)	3	3	2
Teneur maximale en sable ($< 1 mm$) (%)	3	3	3
Teneur maximale en chlorure (%)	0,06	0,06	0,06
Teneur maximale en sulfate (%)	1	1	1
Teneur maximale en matières étrangères (verre, métal, ...) (%)	5	1	1

Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons d'agrégats naturels, proposés par la RILEM, sont comme les montre le Tableau III-7 suivant :

Tableau III-7
*Coefficients Multiplicateurs des Propriétés des Bétons Recyclés par
 Rapport aux Bétons Ordinaires [41]*

Propriétés	Type I	Type II	Type III
Retrait	1,5	1,3	1
Module d'élasticité	0,7	0,8	1
Fluage	1,2	1,2	1
Résistance de traction	0,8	0,9	1

III. 7 – BÉTONS DES GRANULATS LÉGERS

Dans la construction d'un certain nombre d'ouvrages, une réduction de poids est de nature à entraîner des économies générales. L'emploi de granulats légers permet de réaliser des bétons qui diffèrent des bétons courants par leur densité faible, qu'on les appelle « bétons légers ».

Selon la norme européenne NF EN 206-1 [59], les bétons légers sont des « bétons dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure ou égale à 800 kg/m^3 mais inférieure ou égale à $2\ 000 \text{ kg/m}^3$. Ils sont produits entièrement ou partiellement à partir de granulats légers ».

III.7.1 – CLASSIFICATION SELON LA MATIÈRE PREMIÈRE

Le terme général de granulats légers recouvre en effet une grande variété de produits – depuis les matériaux naturels jusqu'aux produits artificiels, en passant par des sous-produits de l'industrie et des déchets de démolition – qui possèdent tous en commun, à des degrés différents, une certaine association de qualités [60].

Cette grande variété de produits peut être classée, selon la matière première de produits et le traitement qu'ils ont subi ou non, autre que mécanique, dans le Tableau III-8 suivant pour les granulats légers d'origine minérale.

Tableau III-8
Classification des Matières premières Minérales pour la Fabrication de Granulats Légers [60]

	Élaboration	Origine	Matières premières	Produits finis	Ordre grandeur production annuelle en France en T (1979)		
Matières premières naturelles	Sans traitement Thermique	Volcanique	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérîtes	Ponces Pouzzolanes Tufs volcaniques Cinérîtes	- 650 000 - -	Production mondiale : 19 500 Mt de cendres, lapilli pouzzolanes	
			Calcaires poreux Calcaires coquilliers Tufs calcaires Dialomites Spongolites Gaizes		- - -	Hors normes de légèreté d° d° production mondiale : 1 954 Mt	
			Sédimentaire	Diatomite Diatomite calcinée	220 000	Emplois signalés aux USA et URSS	
	Avec traitement thermique	Volcanique	Perlites	Perlite expansée			Matière première importée
		Altération	Vermiculites	Vermiculite exfoliée			Production mondiale : 607 Mt Matière première importée
		Sédimentaire à épimétamorphique	Argiles Schistes Ardoises	Argile expansée (thermomousse) (mousse d'argile) Gravillons céramiques creux schistes expansés ardoise expansée	35 000 - -	0 35 000	2 usines (+ 2 usines arrêtées) Au stade des études d° Usine pilote Surex (production arrêtée) 1 usine
Matières premières artificielles	Sans traitement Thermique	Démolition	Décombres, briquillons Cendres de foyers	Décombres, briquillons Mâchefers	-	Emplois occasionnels	
	Avec traitement thermique	Sous-produits industriels	Cendres volantes Laitiers Calcin	Mâchefers frits Cendres volantes frittées Laitier expansé Verre expansé	- 375 000 -	Grande-Bretagne : 400 000 t/an	

III.7.2 – CLASSIFICATION SELON LES DENSITÉS DES BÉTONS

Parmi les différentes définitions et classifications des granulats légers, la classification du comité 213 de l'ACI [61], paraît être une classification fonctionnelle, fondée sur l'utilisation des bétons légers et s'appuyant sur leurs masses volumiques apparentes. Elle indique trois types de bétons de granulats légers, selon leurs densités après séchage à l'air libre pendant 28 jours, en regard de l'utilisation à laquelle chaque type est généralement destiné.

III. 7.2.1 – Bétons de faible densité

Ces sont des bétons, particulièrement légers, employés principalement à des fins d'isolation. Avec de faibles densités, dépassant rarement 800 kg/m^3 , les valeurs d'isolation thermique sont élevées. Les résistances à la compression sont faibles ; elles se situent à peu près entre 7 et 70 kg/cm^2 .

III. 7.2.2 – Bétons de résistance moyenne

Ces sont des bétons de remplissage, d'une résistance suffisante à la compression, se situe approximativement entre 70 et 175 kg/cm^2 et leur valeur d'isolation thermique est moyenne.

III. 7.2.3 – Bétons de structure

Les bétons de structure à base de granulats légers sont définis comme des bétons ayant une résistance à la compression supérieure à 175 kg/cm^2 et une densité après séchage à l'air libre pendant 28 jours inférieure à 1850 kg/m^3 . Les valeurs d'isolation thermique des bétons légers de structure sont plus faibles et sensiblement plus élevées que celles des bétons normaux.

III. 8 – BÉTONS DES DÉCHETS DE BRIQUE

Objectif de ce paragraphe est de donner quelques renseignements sur les déchets de brique qu'on appelle « briquillons », « chamotte » ou « brique concassée ». Vu leur emploi occasionnel, il y a peu des données sur ces matériaux et leur utilisation comme granulats du béton, malgré la consommation universelle de leur

matière première « brique » en grande masse, en conséquence, leur génération en quantités énormes. Une simple indication (Tableau III-8), pour mémoire, sur l'existence de ces matériaux parmi la grande famille des granulats légers a été soulevée par Arnould dans son ouvrage de 544 pages rédigées sur « Granulats et bétons légers ». Corman, dans son ouvrage « Bétons légers d'aujourd'hui » [4], a reconnu qu'il trouve très peu de renseignements sur ces matériaux. Et Devenny et Khalaf [3], ont noté que, peu de travaux ont été rapportés en utilisant les types de brique qui sont utilisés habituellement dans la construction d'aujourd'hui. En Algérie, selon les informations disponibles, la recherche sur ces matériaux est presque négligeable.

On appelle « *briquillons* » : des briques morcelées provenant généralement de la démolition ou d'une mauvaise cuisson de briques (briques trop cuites) [62].

On appelle « *chamotte* » : terre cuite broyée ou concassée [4].

III.8.1 – DÉCHETS DE BRIQUE : RECYCLAGE ET NORMES

Il existe peu d'informations disponibles sur le devenir des débris de briques de terre cuite qui constituent la plus grande partie des déchets de démolition et de décombres. D'une part, techniquement, les débris de briques sont pratiquement recyclés comme composant d'un matériau type maçonnerie. D'autre part, l'absence quasi-totale des textes réglementaires qui régissent la fabrication et l'utilisation des granulats de débris de briques.

Des travaux ont été effectués au Danemark, envisageant un recyclage complet des maçonneries en brique de terre cuite. Ils consistent, après démolition des murs, de réduire les briques avec mortier, afin de séparer aisément des mortiers de chaux ou de ciment dégradés par des hautes températures. Les mortiers ainsi régénérés sont utilisés de nouveau. La partie terre cuite est ensuite triée en briques entières et en demi briques pour une éventuelle réutilisation et les autres petits éléments seront concassés pour produire des granulats [43].

Les débris de briques ont été très employés dans les pays d'Europe qui ont été très ravagés, à la fin de la seconde guerre mondiale, comme la République Fédérale Allemande par exemple [4]. Des tas de décombres de villes dont les débris de briques générés, se trouvent en quantités énormes. Vu la désorganisation des

moyens de production, il était difficile de se procurer des matériaux de construction, en conséquence, des débris de briques ont été utilisés pour produire des granulats et des normes ont été élaborées telles que :

- DIN 4155 : Corps creux et parpaings en T en béton de débris de briques.
- DIN 4158 : Hourdis creux de planchers en béton léger pour planchers nervurés en béton armé.
- DIN 4161 : Parpaings de béton de briques.
- DIN 4162 : Carreaux de cloisons en béton de débris de briques.
- DIN 4163 : Béton de débris de brique : conditions de fabrication et d'emploi [45].

III.8.2 – PROPRIÉTÉS DES BÉTONS DES DÉCHETS DE BRIQUE

Les briques concassées sont utilisées largement au Bangladesh pour la fabrication du béton et la performance de tel béton a été assez satisfaisante [5]. Et l'usage du concassé de briques comme granulat est d'intérêt particulier dans les pays tel que l'Inde et le Pakistan [63].

Selon Akhtaruzzaman et Hasnat [5], les résultats des essais du béton de granulats de brique concassée sont favorablement comparables avec ceux du béton normal, obtenus par l'ACI.

Bien que largement usagé, il n'y avait pas d'études systématiques des différentes propriétés du béton de granulats de brique [5]. Parmi les différentes propriétés, de granulats ainsi que de béton de granulats de brique concassée, résultantes des essais et des recherches sont :

- Les briques concassées, provenant des briques et tuiles, possèdent des résistances propres de 100 à 300 kg/cm^2 [45].
- L'absorption de brique concassée est estimée entre 5 et 15 % par rapport au poids de la matière dans son état sec. C'était nécessaire, par conséquent, à saturer les granulats de la brique concassée avant tout mélange pour empêcher le raidissement du béton. Dans la pratique et suite aux implications économiques, cette condition peut être accomplie

en vaporisant simplement le stock du granulat avec l'eau au lieu de l'immersion totale du granulat pendant 30min [3].

- La masse volumique apparente du béton de brique concassée varie de 2000 à 2080 kg/m^3 . Elle est approximativement de 17 % inférieure à celle du béton normal [5].
- La procédure de la reproduction du mélange pour bétons de granulat normal, peut être utilisée avec succès pour la production du béton de brique concassée [3].
- Pour les bétons de granulats de brique concassée, le rapport eau – ciment optimum est 0,55 ; bien que si la haute ouvrabilité est exigée, alors les mélanges puissent être faits avec un rapport eau – ciment jusqu'à 0,7 [3].
- L'ouvrabilité peut être appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams ou par essai VeBe [3].
- Il est nécessaire de procéder au maintien prolongé à l'état humide de tous les bétons de débris de briques, pour empêcher le dessèchement des liants et la ségrégation de surface du béton [45].
- La résistance à la compression nominale du béton de granulats de brique concassée est comprise entre 13.8 et 34.5 MPa [5].
- Le béton de débris de briques américain « *gravelite* » (= schiste argileux cuit) possède une densité de 1030 kg/m^3 et une résistance à l'écrasement de 210 kg/cm^2 [45].
- L'utilisation du granulat grossier de brique concassée peut produire un béton de structure de haute résistance avec une économie de poids allant jusqu'à 15 % pour une diminution de quelques 20 % de la résistance, par rapport à un béton normal [3].
- Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), le module d'élasticité, en général, est approximativement de 30% inférieur à celui du béton normal et approximativement de 40% plus grand que celui du béton léger [5].
- Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), la résistance à la traction est de 11% supérieure à ceux du béton normal [5].

- Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [2].
- Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal. Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton [2].

Les caractéristiques techniques d'un béton de briquillons sont données dans le Tableau III-9 suivant :

Tableau III-9
Caractéristiques Techniques d'un Béton de Briquillons [4]

Granulométrie (mm)	Composition du béton		Masse volumique apparente (kg/m^3)		Résistance à la compression à 28 jours (kg/cm^2)	Absorption d'eau (% en volume)
	Granulats (l)	Ciment (kg)	Frais	Sec		
2/20 à 10/20	1000	150	1300/1400	1080/1250	22/35	16/19
		200	1340/1420	1220/1300	28/50	16/24
		250	1350/1450	1280/1320	35/55	17/23

La Figure III-4 suivante, donne des exemples de courbes granulométriques correspondantes à des granulats de chamotte :

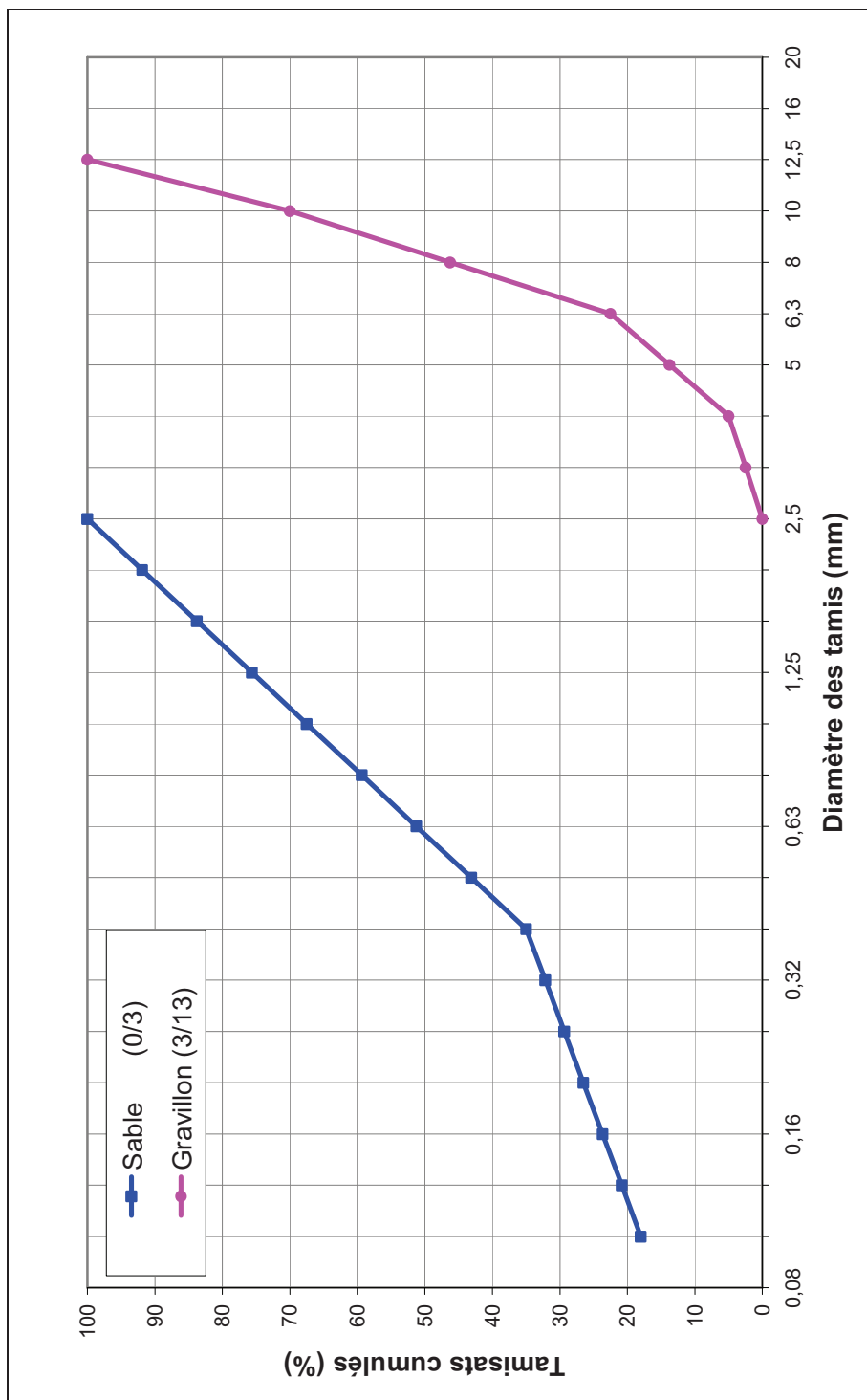


Figure III-4
*Exemples de Courbes Granulométriques Correspondant
à des Granulats de Chamotte [4]*

III.8.3 – UTILISATIONS DES BÉTONS DES DÉCHETS DE BRIQUE

Les débris de briques, surtout, ceux qu'on trouve en quantités énormes dans les tas de décombres de nos villes, ainsi que les incuits et surcuits de briqueterie, peuvent être concassés pour produire des granulats d'un béton léger :

- De structure pour semelles de fondation, pour parois de caves et éléments de construction en béton armé d'un poids spécifique de 1600 à 2100 kg/m^3 , d'une résistance à l'écrasement de 50 à 320 kg/cm^2 , présentant une élasticité remarquable à la pression et à la flexion composée, de faibles coefficients de retrait et des indices de conductibilité et de dilatation relativement bas.
- Isolant poreux pour les parois, les parpaings et les carrelages, avec des poids spécifiques de 1000 à 1600 kg/m^3 , une résistance à l'écrasement de 20 à 50 kg/cm^2 , une résistance à la traction de 5 à 10 kg/cm^2 , des coefficients de retrait de 0,20 à 0,30 mm/m (sans durcissement à la vapeur) et une faible conductibilité de la chaleur (λ environ 0,25 $Kcal/m^0C$ pour 1050 kg/m^3).
- mono granulométrique du groupe granulométrique 1/3 mm , avec lequel on peut produire des bétons poreux de débris de briques présentant une isolation thermique particulièrement poussée [45].
- Damé (béton non armé) nécessaire aux fondations massives, fondations de murs et soubassements ainsi que lors de la fabrication du béton de remplissage [62].

Le béton de débris de briques a déjà trouvé, il y a longtemps, son utilisation dans les revêtements de routes sur les ponts, suite de sa faible densité [45].

Les débris de brique sont utilisés aussi comme granulats dans la construction d'assises routières, comme matériaux de remblaiement, pour l'aménagement paysager [54].

Le béton à base de briques concassées présente, particulièrement, une bonne résistance au feu [11]. Les bétons classiques, confectionnés avec des ciments courants, en général, ne résistent pas à des températures supérieures à 300 0C [6].

Les bétons réfracteurs sont des bétons confectionnés avec du ciment alumineux et qui sont non armés, capables de résister non seulement à des températures élevées mais à certaines corrosions chimiques, à l'abrasion et aux chocs thermiques répétés [64]. Les granulats à base de brique concassée conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, carnaux de cheminées, conduites de fumées, de sols d'usines sidérurgiques, de parties de fours... [6].

III.8.4 – UTILISATIONS LOCALES

À nos jours, la très grande majorité des déchets inertes est éliminée en mélange, en particulier ceux du secteur du bâtiment, ce qui limite les possibilités de valorisation. Par ailleurs, les déchets de brique de l'industrie sont eux aussi éliminés dans des décharges qui sont parfois sauvages sans valorisation significative.

Des tas de débris de brique gênants dont le détenteur se défait, trouvent parfois des utilisations locales occasionnelles sous une forme assez dépourvue d'orthodoxie scientifique. Parmi les exutoires utilisés comme remède de la situation vivante et d'après les sources des briqueteries :

- Plates formes en béton,
- Chapes en mortier du ciment,
- Étanchéité : forme de pente en isolation de toiture,
- Réfection de planchers anciens,
- Béton réfracteur utilisé pour revêtement des wagons de brique,
- Remblaiement des fouilles et de site, etc.

III. 9 – CONCLUSION

Notre recherche dans les déchets, nous montre la possibilité d'utilisation de ces derniers (dits inertes) dans le domaine de génie civil, plus particulièrement, comme granulats, ce qui permettrait de réduire d'autant les extractions de granulats tout en prolongeant la vie des décharges qu'ils contribuent actuellement à saturer.

Les déchets inertes donc, peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers de travaux publics ou encore comme granulats pour le béton.

Parmi ces déchets, les débris de brique, qui peuvent être utilisés comme granulats pour la fabrication du béton et qui sont jugés, par conséquent, pour être une solution pour les régions où les granulats naturels font défaut et où une réduction dans le poids mort de structure peut être désirable.

En général, les granulats de la brique concassée produisent des bétons d'une résistance acceptable. Le granulats de la brique concassée peut être utilisé pour produire du béton de haute qualité. Selon Devenny et Khalaf [3], c'est possible d'avoir des bétons de haute résistance qui peut dépasser la résistance moyenne ciblée (63,0 MPa à 28 jours, avec E/C = 0,40 et brique de bonne résistance). Cependant, les granulats de la brique doivent être choisis correctement avant d'être utilisés dans la production de béton.

En effet, Devenny et Khalaf [3], ont trouvé que la résistance des granulats de la brique concassée est fonction de la résistance de la brique originale, ce qui représente un avantage au préalable, dans le choix de type de brique à utiliser et qui serait convenable comme granulats dans la production de béton.

Des essais effectués sur des bétons de débris de brique ont montré que, pour des bétons de masse volumique apparente de l'ordre de 2000 kg/m^3 , on avait des résistances à la compression identiques à celle des bétons normaux. Il faut dire, cependant, que de tels bétons ne peuvent être appelés « bétons légers » [4] [5].

DEUXIÈME PARTIE

**ÉTUDE
EXPÉRIMENTALE**

CHAPITRE IV

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

IV. 1 – INTRODUCTION

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

IV. 2 – MATÉRIAUX UTILISÉS

IV. 2.1 – CIMENT

« Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau » [65] [66].

Le ciment employé lors de l'étude est le ciment portland composé : CPJ - CEM II/A 42,5 de la cimenterie ERCE de AIN-TOUTA, dont les spécifications

physico-chimiques ainsi que mécaniques sont étudiées conformément à la norme algérienne NA 442 édition 2000.

Les caractéristiques physico – mécaniques ainsi que la composition chimique du ciment employé sont données sur les tableaux suivants et d’après la fiche de qualité du ciment.

Tableau IV-1
Caractéristiques Physiques du Ciment

Désignations		Unités	Mesures	Normes (*)
Poids spécifique		g/cm^3	3,10	-
Surface spécifique Blaine		cm^2/g	3540	-
Consistance normale		$\%H_2O$	25,10	-
Temps de prise	Début	$h : min$	2h : 00	$\geq 1h : 00$
	Fin	$h : min$	2h : 58	-
Expansion à chaud		Mm	1,80	≤ 10

Tableau IV-2
Caractéristiques Mécaniques du Ciment

Désignations	Ages	Mesures	Normes (*)
Résistance à la flexion (MPa)	02 jours	4,53	-
	07 jours	6,79	-
	28 jours	7,91	-
Résistance à la compression (MPa)	02 jours	21,25	$\geq 10,0$
	07 jours	37,69	-
	28 jours	47,48	$\geq 42,5$ et $\leq 62,5$

Tableau IV-3
Composition Chimique du Ciment

Propriétés	Teneur (%)	Normes
Silice SiO ₂	19,41	-
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	2,88	-
Oxyde d'aluminium Al ₂ O ₃	5,39	-
Oxyde de calcium CaO	62,21	-
Oxyde de magnésium MgO	1,75	-
Trioxysulfure de soufre SO ₃	2,02	≤ 3,5 (*)
Chlorures Cl ⁻	0,041	≤ 0,10 (*)
Perte au feu	4,68	-
Chaux libre CaO	0,96	≤ 2,0 (**)
Résidus insolubles	0,99	-

(*) : Norme européenne NF EN 197-1 [67].

(**) : [6].

L'essai de temps de prise ainsi que l'essai de la consistance normale ont été effectués sur le ciment en laboratoire L.T.P.S. Les résultats obtenus reflètent ceux de la fiche de qualité :

- Consistance normale : 27 %,
- Début de prise : 1 h : 4 min,
- Fin de prise : 2 h : 14 min.

IV. 2.2 – GRANULATS

Pour les besoins de notre étude, on a utilisé deux types de granulats, l'un est naturel (Photo IV-1) et l'autre recyclé (Photo IV-2) :



Photo IV-1

Granulats Naturels



Photo IV-2

Granulats Recyclés

Les granulats naturels sont :

- Le sable naturel alluvionnaire de classe granulaire (0/5), provenant de la carrière INERGA, région El Djamaa,
- Le gravillon naturel de classe granulaire (3/8), provenant de la station de concassage ‘‘BEN BRAHIM’’, Haoud El-Hamra Pk669,
- Le gravillon naturel de classe granulaire (8/15), provenant de la station de concassage ‘‘BEN BRAHIM’’, Haoud El-Hamra Pk669.

Les granulats recyclés sont obtenus par concassage des déchets de la brique pleine perforée (220x110x55mm) de terre cuite, provenant de la briqueterie de Temacine (Sarl – SPMC), au moyen d'un mini concasseur à mâchoires du Laboratoire des Travaux Publics du Sud, Unité de Ouargla (Photo A2-3).

Après concassage, les granulats ont été criblés afin d'avoir les classes granulaires suivantes :

- Le sable recyclé de brique concassée de classe granulaire (0/5),
- Le gravillon recyclé de brique concassée de classe granulaire (3/8),
- Le gravillon recyclé de brique concassée de classe granulaire (8/15).

Nous désignerons, dans ce qui suit, les différents granulats utilisés par les indications suivantes :

- **S_N** : Sable Naturel de Classe (0/5),
- **S_R** : Sable Recyclé de Brique Concassée de Classe (0/5),
- **G_N** : Gravillon Naturel de Classes (3/8) et (8/15),
- **G_R** : Gravillon Recyclé de Brique Concassée de Classes (3/8) et (8/15).

IV. 2.3 – EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, l'évolution des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion [68].

Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage du béton, à moins qu'elles ne contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses. En cas de doute, une analyse chimique s'impose [69]. En effet, l'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai [70].

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents bétons est une eau potable de robinet du laboratoire L.T.P.Sud, Unité de Ouargla.

IV. 3 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES GRANULATS

Une série d'essais d'identification a été effectuée sur le matériau granulat utilisé, naturel et recyclé, sable et gravillon, afin de les caractériser. Le Tableau IV-4, ci-dessous, donne la liste des différents essais effectués ainsi que la norme correspondante à chaque essai. Ces essais vont nous renseigner sur la qualité des granulats et sur la possibilité d'utiliser ces granulats dans la réalisation des ouvrages en béton.

Tableau IV-4
Essais Effectués sur les Matériaux Granulats Utilisés

Essais ou Analyses	Normes	SN	SR	GN	GR
Échantillonnage	[NF EN 932-1] [NF EN 932-2]	X	X	X	X
Analyse chimique	Mode opératoire	X	X	X	X
Analyse granulométrique	[NF EN 933-1] [NF EN 933-2]	X	X	X	X
Module de finesse	[XP P 18-540]	X	X		
Masses volumiques	[NF EN 1097-3]	X	X		
	[P 18-555]	X	X		
	Mode opératoire	X	X	X	X
	[P 18-554]			X	X
Absorption d'eau	[P 18-555]	X	X		
	[P 18-554]			X	X
Équivalent de sable	[P 18-598]	X			
Équivalent de sable à 10%	[P 18-597]		X		
Friabilité des sables	[P 18-576]	X	X		
Porosité	[P 18-554]			X	X
Propreté superficielle	[P 18-591]			X	X
Aplatissement	[NF EN 933-3]			X	X
Los Angeles	[P 18-573]			X	X

On note que, ces essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (L.T.P.S.), Unité de Ouargla.

IV. 3.1 – ÉCHANTILLONNAGE DES GRANULATS

L'échantillonnage est un procédé du prélèvement, a pour objectif d'obtenir un échantillon global qui soit représentatif des propriétés moyennes de la quantité de production d'un tel granulat [71]. Il s'effectue soit avec une sonde, manuelle ou mécanique, enfoncée dans le stock, soit à la pelle, manuelle ou mécanique.

Pour une prise d'essai donnée, l'échantillon de laboratoire doit être réduit jusqu'à une masse minimale spécifiée par l'essai [72]. La réduction de l'échantillon a été effectuée par deux procédés, utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la dimension maximale des grains :

- Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur (Photo A2-1),
- Réduction de l'échantillon par quartage (Photo A2-2).

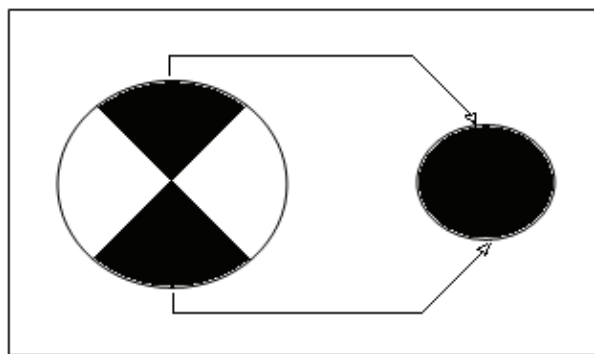


Figure IV-1

Réduction d'un Échantillon par Quartage [72]

IV. 3.2 – ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE

L'analyse Granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées [73], de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite *la Courbe Granulométrique*, courbe exprimant les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs [26].

L'analyse a été effectuée conformément à la norme européenne NF EN 933-1 [74], en utilisant les tamis préconisés par la norme européenne NF EN 933-2 [73] ainsi que les tamis nécessaires à la couverture des dimensions comprises entre :

- 0,08 mm et 2D Pour les sables,
- 0,63d et 2D Pour les gravillons [8].

Les résultats de cette analyse sont donnés sur des tableaux en annexe A1, et représentés graphiquement dans la Figure IV-2 suivante :

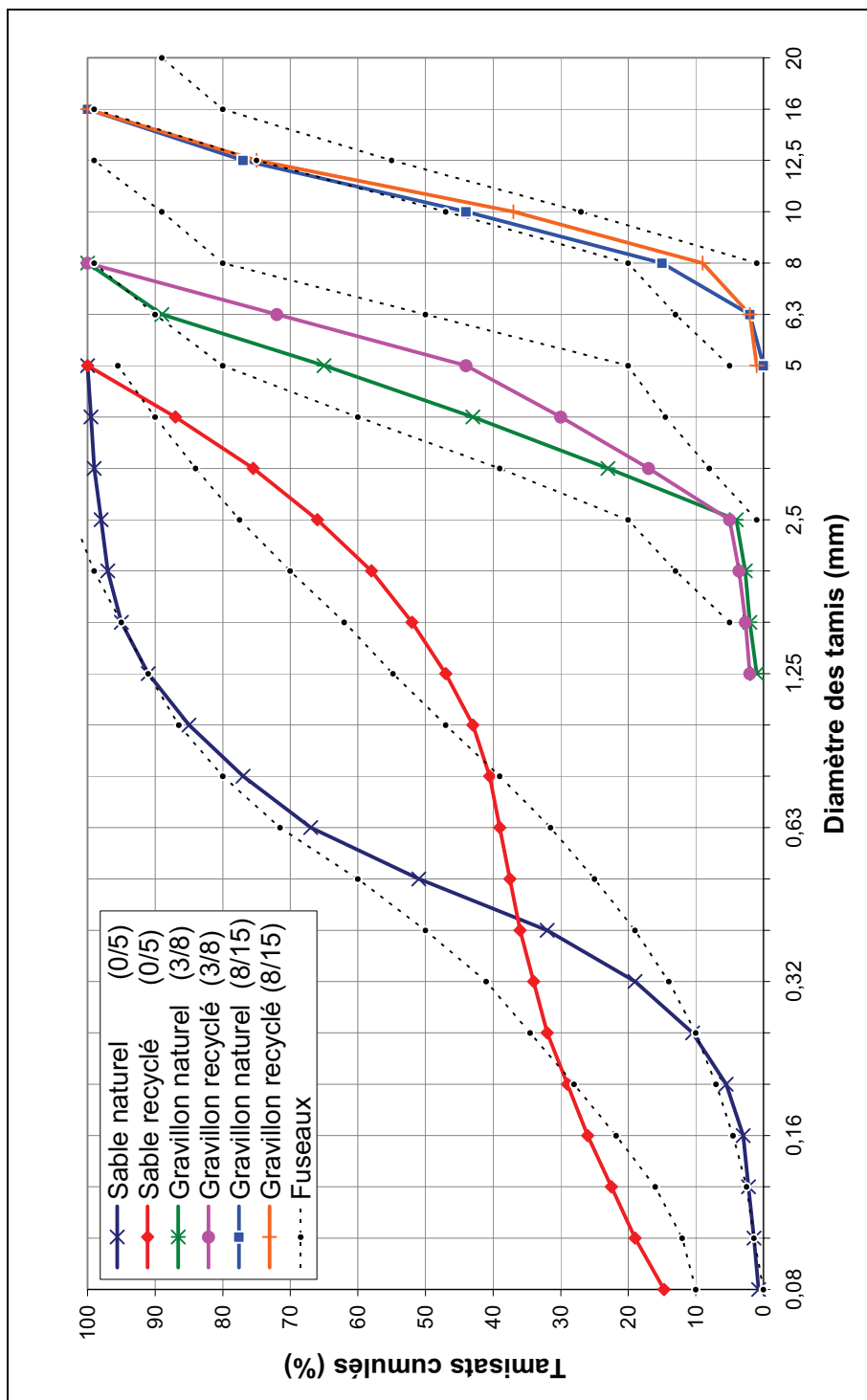


Figure IV-2
 Courbes Granulométriques des Granulats Utilisés

On remarque d'après les courbes granulométriques des granulats que :

a – Le sable naturel est un sable moyen à granulométrie étalée et qui s'inscrit dans le fuseau admissible pour les bétons ordinaires. Il est pauvre en éléments fins et grossiers,

b – Le sable recyclé est un sable grossier à granulométrie étalée et qui déborde le fuseau admissible dans sa partie grossière. Il présente une allure et une teneur en fines assez importante, assimilables avec celles trouvées par d'autres chercheurs (voir Figure III-4). En effet, selon Khayat et Ollivier [7], les teneurs en fines tolérées, dans le cas des sables entièrement broyés ou concassés, peuvent être assez importantes et il est nécessaire d'en tenir compte dans la composition,

c – D'après les modules de finesse de sable naturel (2,23) et de sable recyclé (2,89) ; les deux sables sont acceptables pour la confection des bétons,

d – Les deux gravillons de classe (3/8), naturel et recyclé, sont un peu proches et à granulométrie étalée. Leurs courbes granulométriques sont inscrites dans le fuseau granulaire des granulats de la catégorie B,

e – Les deux gravillons de classe (8/15), naturel et recyclé, sont assez proches l'un de l'autre et à granulométrie étalée. Leurs courbes granulométriques sont inscrites dans le fuseau granulaire des granulats des catégories A et B.

IV. 3.3 – MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS

IV. 3.3.1 – Masses volumiques apparentes

La masse volumique apparente (ρ_a) d'un granulat est le rapport de sa masse par son volume total y compris les vides entre les grains le constituant [6]. On la détermine en calculant le quotient :

$$\rho_a = \frac{M}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (\text{IV-1})$$

M étant la masse du granulat remplissant un récipient de volume V. Les masses volumiques apparentes (ρ_a) des sables ont été déterminées conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 1097 - 3 [75].

Par contre, les masses volumiques apparentes (ρ_a) des gravillons ont été déterminées conformément au mode opératoire de détermination du poids apparent de gros agrégats (Photo A2-9) [76].

IV. 3.3.2 – Masses volumiques réelles

La masse volumique réelle (ρ_r) d'un granulat est le rapport de sa masse sèche par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides contenus dans les grains [31]. On l'a déterminé conformément à la norme P 18-555 [33], pour les sables et la norme P 18-554 [31], pour les gravillons.

IV. 3.3.3 – Masses volumiques absolues

Les masses volumiques absolues (ρ_s), des gravillons (3/8) ainsi que des sables, ont été déterminées conformément au mode opératoire de la méthode de la mesure au pycnomètre (Photo A2-7) [8].

Par contre, les masses volumiques absolues (ρ_s) des gravillons (8/15) ont été déterminées conformément au mode opératoire de la méthode de l'éprouvette graduée (Photo A2-6) [8].

Les résultats des différents essais sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-5
Masses Volumiques des Granulats

Masse volumique (t/m^3)	Sable (0/5)		Gravillon (3/8)		Gravillon (8/15)	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
Masse volumique apparente (ρ_a)	1,612	1,219	1,244	0,930	1,364	0,997
Masse volumique réelle (ρ_r)	2,593	1,870	/	/	2,507	1,894
Masse volumique absolue (ρ_s)	2,630	2,364	2,614	2,281	2,614	2,280

L'analyse du Tableau IV-5 nous fait soulever les remarques suivantes :

- Les valeurs des masses volumiques apparentes sont respectivement les plus faibles. Par contre, celles des masses volumiques absolues sont respectivement les plus grandes pour l'ensemble des granulats, ce qui est logique.
- L'aspect léger des granulats de brique concassée par rapport aux granulats naturels est bien apparent et qui est du à la porosité des grains de la brique concassée.
- Les valeurs des masses volumiques apparentes 1219 et 997 kg/m^3 trouvées, respectivement pour les sables recyclés et les gravillons recyclés (8/15), confirment ceux indiquées par Huberty (§ II.3.2.1), pour les granulats minéraux légers en terre cuite et autres matériaux légers concassés,
- La masse volumique apparente des gravillons recyclés est à très peu de chose près la moitié de leur masse volumique réelle. Confirme ce qui a été indiqué par Cormon [4].
- Les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont de l'ordre de 25 % inférieures à celles des granulats naturels, ce qui représente un avantage économique en poids du béton,
- La masse volumique réelle des granulats recyclés est inférieure à 2 t/m^3 , donc on peut dire qu'ils sont des « granulats légers » d'après la norme XP P 18 - 540 (§ II.2).
- La masse volumique absolue des gravillons recyclés est plus faible que celle des sables recyclés. Selon Cormon [4], dans la majorité des cas, les gros granulats légers sont plus expansés en proportion que les petits et ont, de ce fait, une masse volumique absolue plus faible.

IV. 3.4 – ABSORPTION D’EAU

Les coefficients d’absorption d’eau « A_b » ont été déterminés conformément à la norme P18-555 [33], pour les sables et la norme P18-554 [31] pour les gravillons. Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-6
Coefficient d’Absorption d’Eau des Granulats (A_b)

Coefficient d’absorption d’eau (en %)	Sable (0/5)		Gravillon (8/15)	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
(A_b)	0,53	14,52	1,71	10,77

On remarque que les sables et les gravillons recyclés, absorbent beaucoup plus d’eau contrairement aux sables et aux gravillons naturels qui ont une faible absorption. Les valeurs d’absorption d’eau trouvées pour les sables et les gravillons recyclés confirment celles trouvées par Devenny et Khalaf, pour les briques concassées (§ III.8.2) et reflètent l’absorption d’eau maximum recommandée par la RILEM pour les agrégats recyclés de Type (I) dérivés essentiellement de maçonnerie.

IV. 3.5 – ANALYSE CHIMIQUE DES GRANULATS

L’analyse chimique sommaire des granulats utilisés a été réalisée au Laboratoire des Travaux Publics du Sud (L.T.P.S.), Unité de Ouargla. L’analyse chimique des granulats recyclés est la même pour l’ensemble des granulats recyclés puisqu’elle s’agit de la même brique concassée. Même remarque pour les gravillons naturels. Les résultats de cette analyse ont été donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV-7
Analyse Chimique des Granulats Utilisés

Éléments (%)	Sable roulé	Gravillon concassé	Brique concassée
Insolubles	94,61	24,43	93,71
Gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	1,82	2,80	2,19
Trioxyde de soufre SO ₃	0,33	0,52	0,40
Carbonate de calcium (Calcite) CaCO ₃	2,17	65,65	0,43
Chlorures Cl ⁻	0,065	0,004	0,041
Chlorure de sodium NaCl	0,107	0,007	0,067
Bilan chimique	99,10	93,41	96,84

L'analyse chimique des granulats montre, que le sable alluvionnaire roulé et la brique concassée sont constitués presque totalement des insolubles dont la silice SiO₂ est probablement dominante, contrairement au gravillon concassé d'origine calcaire qui est constitué de la calcite. Par ailleurs, les pourcentages de sulfates exprimés en SO₃ et de chlorures Cl⁻ sont un peu en excès de ceux dictés par la norme XP P18-540 [28], mise à part le pourcentage de chlorures au niveau des gravillons naturels.

En effet, selon Neville [11], le gypse et les autres sulfates ne doivent pas être présents dans les granulats, mais un taux maximal de 5% de SO₃ par rapport à la masse de ciment (incluant le SO₃ du ciment) est souvent toléré. Dans le cas de la norme britannique BS 3797 : 1990, la teneur en sulfates exprimés en SO₃ est limitée à 1% de la masse des granulats légers pour les bétons de structure [11]. Concernant les chlorures, selon Dreux et Festa [6], c'est la teneur en chlorures totale, qui doit être prise en compte dans le béton et qui a été spécifiée pour les bétons armés

par 0,65% dans le fascicule 65 A et 0,4% dans la norme française P18-325 et la norme européenne NF EN 206 -1.

IV. 3.6 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES SABLES

IV. 3.6.1 – Équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable a pour objet de contrôler la propreté du sable d'éléments fins et de poussières. Il a été effectué conformément à la norme française P18-598 [77], pour le sable naturel et la norme française P18-597 [78], pour le sable recyclé. Le Tableau IV-8 suivant indique les résultats des essais :

Tableau IV-8
Équivalents de Sable

Équivalent de sable	S _N (0/5)	S _R (0/5)
(ESV)	78	68
(ESP)	76	64

Les résultats trouvés indiquent que le sable naturel est un sable propre. Par contre, le sable recyclé est un sable légèrement argileux et selon la norme XP P18-540 [28], il est admissible à la confection de béton de qualité (catégorie A). En effet, ce sable a été élaboré par concassage et criblage sans dépoussiérage. Par ailleurs, selon Maillot [27], des éléments non nocifs très fins peuvent conduire à un ES très bas. Et d'après René Lesage [26], les fines même non nocives, dans des sables de concassage à teneur en fines sensiblement plus élevée, abaissent la valeur de l'équivalent de sable (il s'agit de difficulté due au mode opératoire).

IV. 3.6.2 – Friabilité des sables

L'essai de friabilité des sables a été effectué conformément à la norme française P18-576 [79]. Il consiste à introduire une charge de 2500 g de billes d'acier, puis une masse de 500 g du sable testé de classe granulaire 0,2-2

ou 0,2-4 mm , en ajoutant ensuite 2,5 l d'eau dans un cylindre de l'Appareil Micro-Deval (Photo A2-8). L'ensemble est soumis en 1500 tours de rotation.

Le pourcentage de la masse m des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai, représente le coefficient de friabilité du sable :

$$F_s = 100 \frac{500 - m'}{500} = \frac{m}{5} \quad (\text{IV-2})$$

m' : La masse de refus sur le tamis de 0,1 mm

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-9
Coefficient de Friabilité des Sables (F_s)

Coefficient de friabilité	S_N (0/5)	S_R (0/5)
(F_s) (en %)	25	68

La valeur trouvée pour le sable normal est acceptable. Par contre, celle du sable recyclé dépasse la valeur spécifiée supérieure (60%) de la catégorie B des granulats, indiquée spécifiquement aux bétons de ciment destinés aux chaussées dans la norme XP P18-540 [28]. Cela indique que ce sable recyclé à base de déchets de brique est un sable très friable et ne résiste pas à l'usure. Par ailleurs, la valeur trouvée est largement loin de celle trouvée avec un autre chercheur, qui est de l'ordre de 20% et dont la masse volumique réelle, du sable de brique recyclé utilisé, est supérieure à $2 t/m^3$ [43].

IV. 3.7 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES GRAVILLONS

IV. 3.7.1 – Porosité

L'essai de porosité des gravillons a été effectué conformément à la norme française P18-554 [31]. Les résultats sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV-10
Porosité des Gravillons (n)

Porosité	G_N (8/15)	G_R (8/15)
(n) (en %)	4,25	21,42

On remarque que le gravillon recyclé est beaucoup plus poreux que le gravillon naturel. Ceci confirme la légèreté du granulats recyclés due à sa porosité élevée et que les granulats recyclés en brique concassée sont beaucoup plus absorbants que les granulats naturels.

IV. 3.7.2 – Propreté superficielle

L'essai a été réalisé conformément à la norme française P18-591 [29]. Il consiste à déterminer la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm par élimination des poussières et des particules argileuses inférieures à 0,5 mm. L'élimination est réalisée par lavage de l'échantillon sur le tamis correspondant. Le rapport du passant à 0,5 mm au poids total de l'échantillon représente la propreté superficielle des gravillons :

$$P = 100 \frac{m}{M_s} \quad (IV-3)$$

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-11
Propreté Superficielle des Gravillons (P)

Propreté superficielle	G_N (8/15)	G_R (8/15)
(P) (en %)	0,52	1,03

Les résultats trouvés nous indiquent que les deux gravillons sont propres, d'après la norme française XP P18-540 [28].

IV. 3.7.3 – Aplatissement

L'essai d'aplatissement a été effectué conformément à la norme européenne NF EN 933 - 3 [80], par mesure du coefficient d'aplatissement.

Le coefficient d'aplatissement (A_p) est déterminé par un double tamisage, d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrées (Photo A2-4) utilisée pour l'analyse granulométrique, puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles (Photo A2-5), le rapport entre les dimensions des tamis « d » et les écartements des grilles « E » étant de 1,58 [6].

La conduite de l'essai est représentée sur les Tableaux A1-7 et A1-8 (en Annexe A1). Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-12
Coefficient d'Aplatissement (A_p)

Coefficient d'aplatissement	G_N (8/15)	G_R (8/15)
(A_p)(en %)	14	19

Les valeurs trouvées indiquent que les deux gravillons naturel et recyclé sont acceptables pour un granulat de catégorie (A) destiné à la fabrication de béton de qualité. Néanmoins, d'après l'analyse des pourcentages des coefficients d'aplatissement élémentaires des classes granulaires du gravillon recyclé de brique concassée (Tableau A1-8), on trouve que les valeurs des coefficients d'aplatissement élémentaires sont étalées sur une plage varie de 16 à 34%. Selon Neville [11], dans le cas des granulats concassés, la forme des éléments dépend, non seulement de la nature de la roche d'origine, mais aussi du type de concasseur et du rapport de réduction.

IV. 3.7.4 – Los Angeles

L'essai Los Angeles a été effectué conformément à la norme française P18-573 [81]. Il consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite par fragmentation du matériau testé de classe granulaire (10/14), soumis

aux chocs d'une charge de 11 boulets par la mise en rotation du cylindre de la machine Los Angeles (Photo A2-11) de 500 tours.

Le coefficient Los Angeles (LA) est le pourcentage du rapport de la masse m par le 5 kg du matériau testé :

$$LA = 100 \frac{m}{5000} \quad (IV-4)$$

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-13
Coefficient Los Angeles (LA)

Coefficient Los Angeles	G_N (8/15)	G_R (8/15)
(LA) (en %)	22	65

On remarque que le gravillon naturel convient bien pour la confection de béton de qualité (granulat de catégorie A). Par contre, la valeur du coefficient Los Angeles du gravillon recyclé de brique concassée est assez élevée. Selon Lesage [26], Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. Et selon la norme française P18-557[32], La résistance mécanique des roches est directement liée à leur porosité. La valeur trouvée du granulat recyclé est largement loin de celles trouvées avec d'autres chercheurs, qui sont de l'ordre de 30% [43] et de 31,6% [41].

IV. 4 – CONCLUSION

L'analyse des résultats des caractéristiques des différents matériaux étudiés dans ce chapitre nous conduit à faire les remarques suivantes :

- Le ciment, l'eau de gâchage ainsi que les gravillons naturels sont appropriés pour la confection des bétons,

- Une attention particulière est demandée lors de la composition des mélanges avec du sable naturel, du fait qu'il est peu chargé en éléments fins,
- Les granulats recyclés présentent une masse volumique réelle inférieure à $2 t/m^3$, donc on peut dire qu'ils sont des « granulats légers »,
- Le sable recyclé est un sable friable qu'il faut éviter dans les bétons soumis à l'usure. Il favorise la perméabilité et l'augmentation de l'air occlus dans les bétons par sa granulométrie grossière,
- Les gravillons recyclés présentent des propriétés acceptables pour la confection des bétons courants. Cependant, ils ont une faible résistance mécanique qui peut diminuer fortement la résistance globale du béton,
- Selon Ramos et Shah [25], il n'existe pas une relation rigoureuse entre la résistance des granulats et celle des bétons ; cependant de nombreux essais ont montré que plus la résistance du granulat est élevée, plus la résistance à la compression du béton est élevée,
- D'après Neville [11], la résistance à l'abrasion du granulat, telle que déterminée par l'essai Los Angeles, ne semble pas constituer une bonne indication de la résistance à l'abrasion du béton confectionné avec le granulat donné. Un granulat léger de grande qualité présente une bonne résistance à l'abrasion puisque, intrinsèquement, il s'agit d'un matériau céramique même si, en raison de sa structure poreuse, il n'est pas résistant aux chocs qui peuvent être associés à l'abrasion.

En conclusion, des différents mélanges seront confectionnés à base de ces matériaux afin d'apprécier les caractéristiques des granulats en brique concassée ainsi que leur influence sur les performances du béton.

CHAPITRE V

FORMULATION DES BÉTONS ET ESSAIS

V. 1 – INTRODUCTION

« Pour l'établissement des projets, dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise (ou spécifiée). Celle-ci, notée f_{c28} , est choisie à priori, compte tenu des possibilités locales et des règles de contrôle qui permettent de vérifier qu'elle est atteinte » [23].

En Algérie, pratiquement la majorité des bétons formulés pour les ouvrages courants, en particulier dans le secteur du bâtiment, sont à base d'un mélange ternaire de granulats à granularité continue dont :

- La résistance caractéristique spécifiée est de 20 à 25 MPa ,
- Et le dosage en ciment est de 350 à 400 kg/m^3 .

L'objectif de ce chapitre est d'étudier expérimentalement un béton à base de déchets de brique provenant de la briqueterie. Les résultats seront comparés au béton ordinaire usuel.

Partant d'un béton initial parfaitement connu du point de vue de sa composition et de ses propriétés mécaniques qu'on appelle « béton – témoin », nous nous sommes attachés à dégager, pour le besoin de notre étude, trois types de bétons à base de déchets de brique.

Les granulats employés dans la composition des bétons sont obtenus à partir d'un mélange ternaire de sable (0/5), de gravillon (3/8) et de gravillon (8/15). Le Tableau V-1 suivant nous indique la composition granulométrique des différents bétons à étudier :

Tableau V-1
Composition Granulométrique des Bétons

Types de béton	Granulats naturels			Granulats recyclés		
	S _N (0/5)	G _N (3/8)	G _N (8/15)	S _R (0/5)	G _R (3/8)	G _R (8/15)
B-O	X	X	X			
B-RN		X	X	X		
B-NR	X				X	X
B-RR				X	X	X

Avec :

- B-O** : Béton ordinaire usuel « béton – témoin »
- B-RN** : Béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée
- B-NR** : Béton de brique concassée avec sable naturel
- B-RR** : Béton entièrement en brique concassée

V. 2 – FORMULATION ET DOSAGE DES BÉTONS

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause.

Dans le cadre de notre travail, pour la formulation des mélanges nous avons donc opté pour l'utilisation de la méthode pratique pour la composition des bétons, dite « Dreux – Gorisse », qui est de loin la méthode la plus appréciable du point de vue pratique. Elle permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié ; seulement quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adapter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Le béton « témoin » à étudier est un béton ordinaire de :

- Classe B25, ayant une résistance caractéristique de 25 MPa mesurée sur cylindre ou 30 MPa mesurée sur cube,
- Ouvrabilité de consistance plastique (dont l'affaissement désiré varie de 5 à 9 cm) avec un serrage en vibration courante,
- Dimension maximale des granulats « D » égale à 16 mm,
- Dosage en ciment ciblé de 350 kg/m³.

Pour la confection des éprouvettes, une étude de la formulation du béton a été menée avec une série des essais d'ajustement et de correction de la formule du mélange, suite à la composition granulaire du mélange ternaire des granulats adaptée et aux propriétés du béton désirées, on a abouti à la composition optimale suivante (Tableau V-2) :

Tableau V-2

Composition Optimale d'un m³ du Béton Type (B-O)

Constituants	Poids (Kg)	Volume absolu (l)
Sable Normal (0/5)	676	257
Gravillon Normal (3/8)	255	98
Gravillon Normal (8/15)	887	340
Ciment	350	113
Eau efficace (E)	197	197
E / C	0,56	
Affaissement	6 cm	
La densité théorique du béton frais est de 2365 kg/m ³		

La composition granulaire du mélange ternaire des granulats du béton de type (B-O) ainsi que celles des bétons de type (B-RN), (B-NR) et (B-RR) sont représentées dans les figures suivantes :

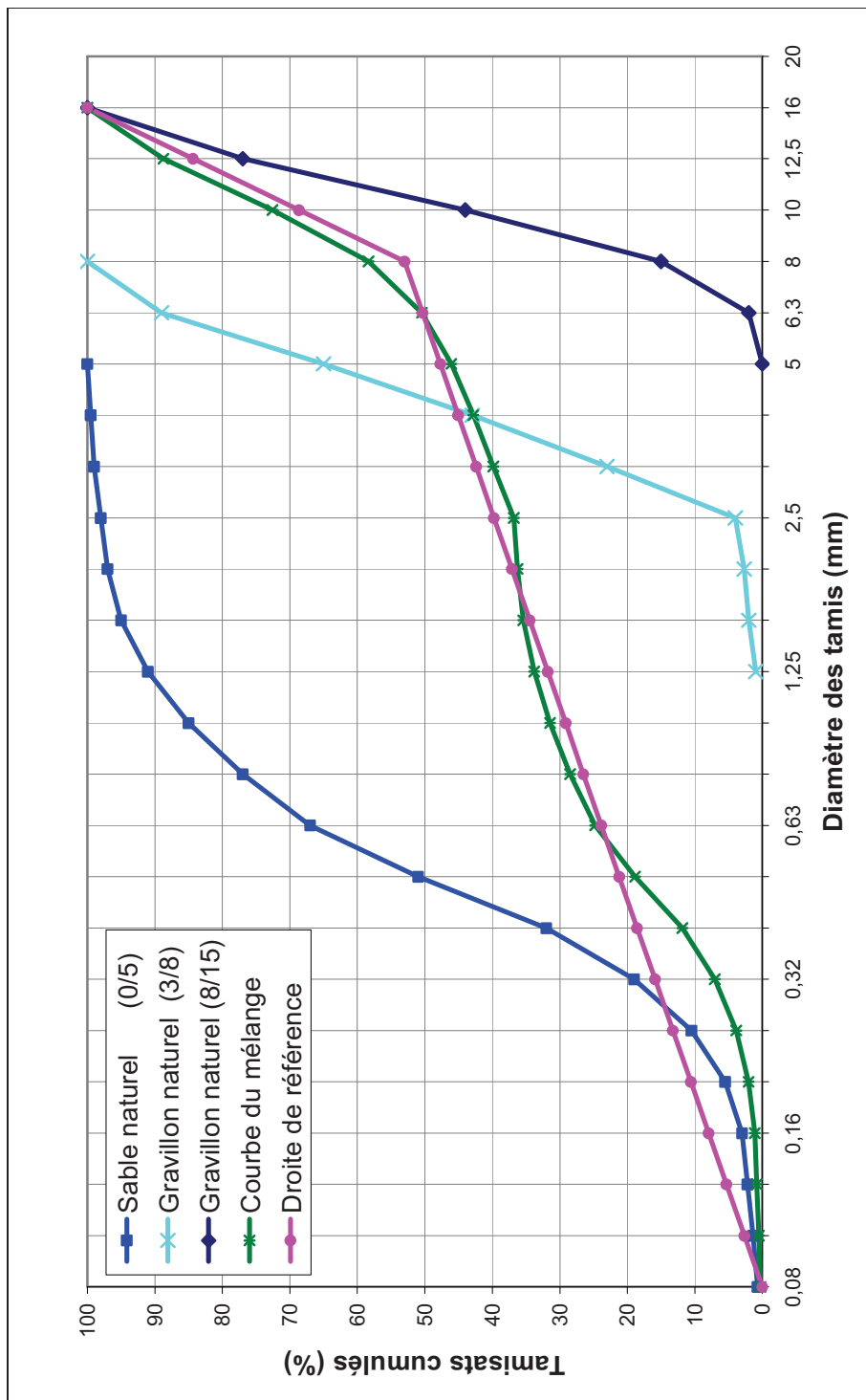


Figure V-1
Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-O)

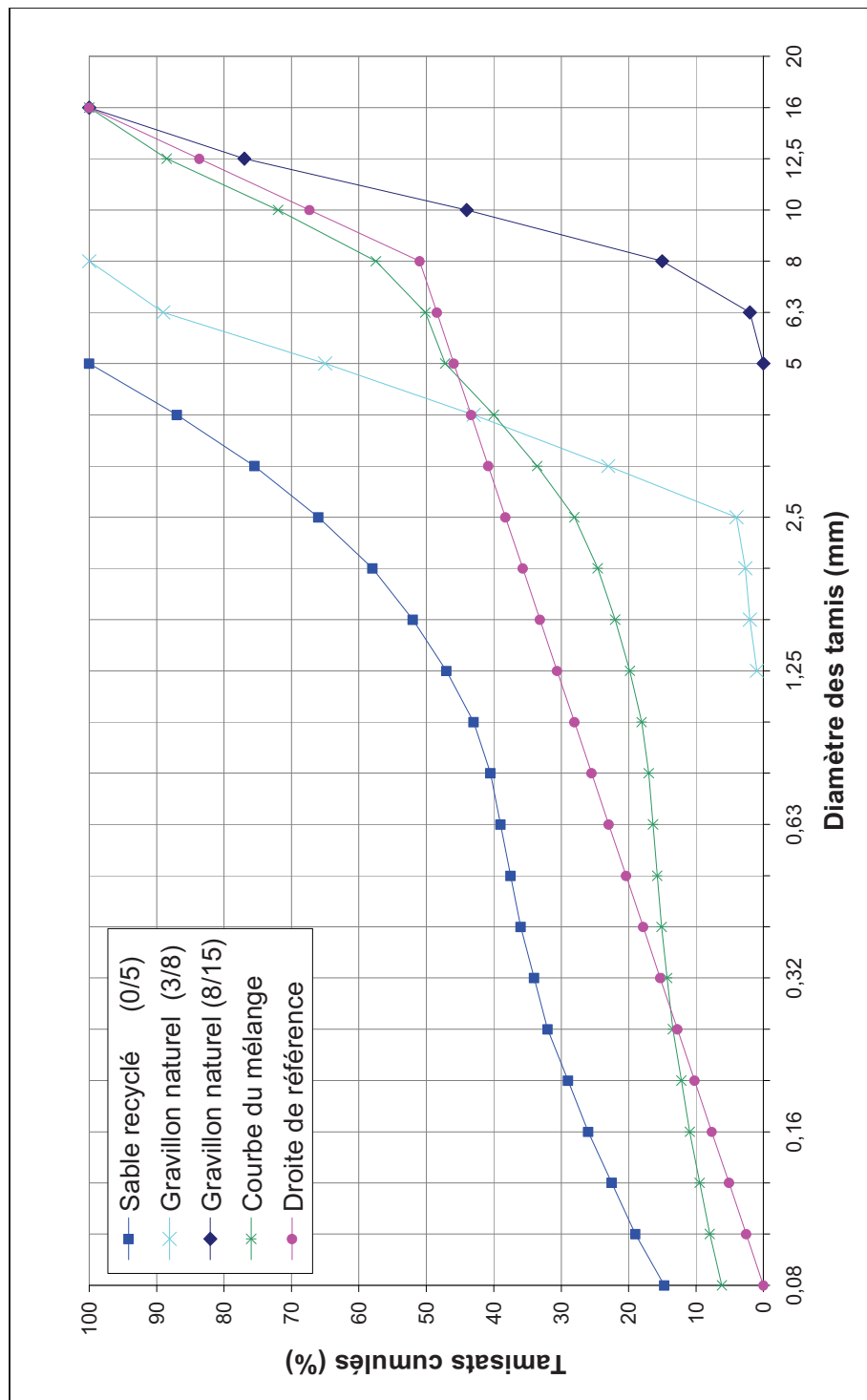


Figure V-2
Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-RN)

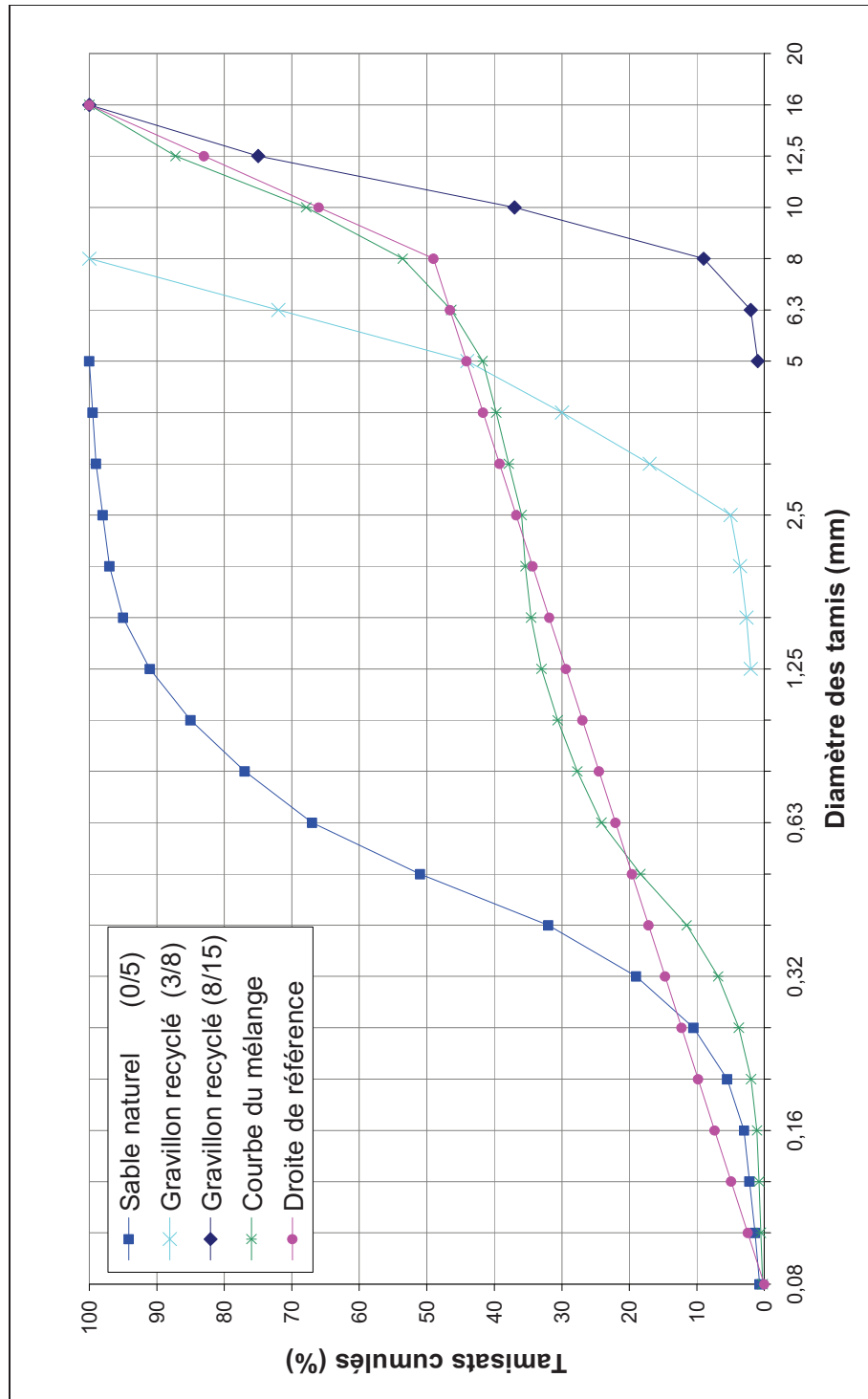


Figure V-3
Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-NR)

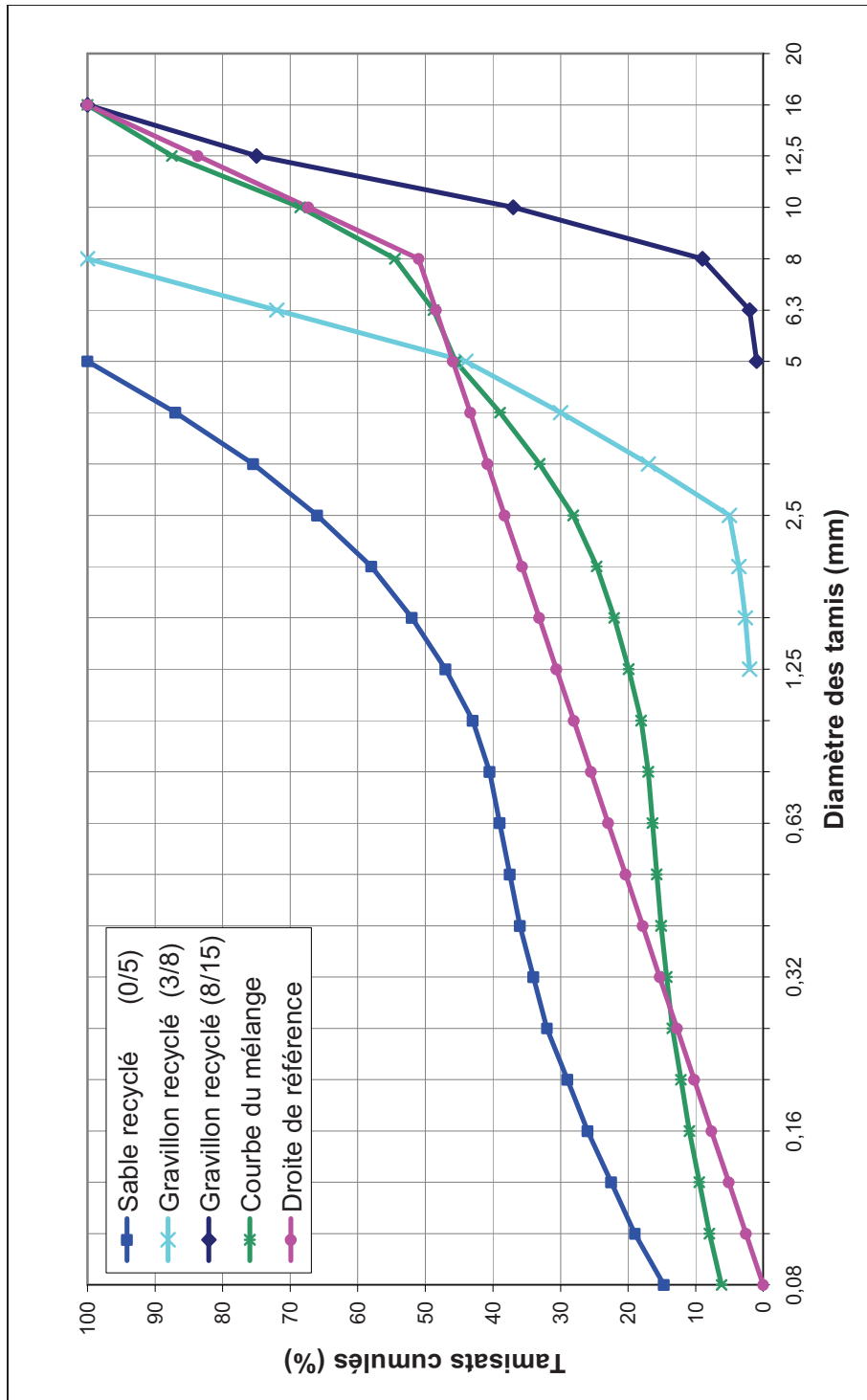


Figure V-4
Composition Granulaire du Mélange (Béton Type B-RR)

Afin d'avoir des résultats comparables aux ceux du béton « témoin », il est impératif qu'on maintient, pour les autres types des bétons, le même volume total absolu des constituants. En conséquence, un rapport eau – ciment relativement constant avec un dosage en ciment de 350 kg/m^3 . Les proportions des granulats à mélanger sont calculées en fonction du volume absolu de chaque classe granulaire [11].

Pour la formulation des bétons à base des déchets de brique on a utilisé la même procédure que celle du béton « témoin » avec un prémouillage des granulats recyclés. Selon Devenny et Khalaf [3], la procédure de la composition de mélanges des bétons avec granulat normal peut être utilisée pour concevoir des mélanges qui utilisent le granulat de la brique concassée. La seule différence est que les granulats de la brique concassée doivent être à l'état saturé à surface sèche (SSS) avant qu'ils soient utilisés. Et Selon Neville [11], les granulats dont l'absorption est supérieure à 10% devraient généralement subir un prétrempage.

Cela a été fait en submergeant le granulat dans un récipient d'eau pour une période de 30 *min*. Selon Devenny et Khalaf [3], des travaux antérieurs ont montré que, 30 *min* est pratiquement suffisante, au-delà pour une période de 24h produit seulement une augmentation de voisinage de 2% d'absorption de l'eau. Durant ce prémouillage, les granulats recyclés absorbent une quantité d'eau, qu'on appelle « Eau ajoutée », qui n'intervient plus, une fois absorbée, dans le calcul de résistance du béton, fonction du facteur C/E. Cette eau absorbée, qui ne sera restituée que très lentement au béton au cours de son durcissement et en fonction des conditions hygrométriques ambiantes, évite l'absorption de l'eau qui sert au gâchage du béton, qu'on appelle « Eau efficace », par les granulats recyclés [6].

Les compositions optimales des bétons type (B-RN), (B-NR) et (B-RR), qui serviront à la confection des éprouvettes pour essais, sont données dans le Tableau V-3 suivant :

Tableau V-3*Compositions Optimales d'un m³ des Bétons Type (B-RN), (B-NR) et (B-RR)*

Constituants	Béton (B-RN)	Béton (B-NR)	Béton (B-RR)
Sable Normal (0/5)	-	583 kg	-
Gravillon Normal (3/8)	128 kg	-	-
Gravillon Normal (8/15)	794 kg	-	-
Sable Recyclé (0/5)	605 kg	-	559 kg
Gravillon Recyclé (3/8)	-	184 kg	102 kg
Gravillon Recyclé (8/15)	-	716 kg	639 kg
Ciment	350 kg	350 kg	350 kg
Eau efficace (E)	197 l	197 l	197 l
Eau ajoutée	94 l	90 l	153 l
E / C	0,56	0,56	0,56
Affaissement	6 cm	6 cm	6 cm
Densité (*)	2168 kg/m ³	2120 kg/m ³	2000 kg/m ³

(*) : Densité théorique du béton frais.

V. 3 – CONFECTION ET CURE DES ÉPROUVETTES

V.3.1 – MOULES POUR ÉPROUVETTES

Conformément à la norme européenne NF EN 12390-1 [12], pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé les moules suivants (Photo A3-1) pour la confection des éprouvettes :

- Moule cubique 10x10x10 cm,
- Moule prismatique 7x7x28 cm,
- Moule cylindrique 16x32 cm.

V.3.2 – CONFECTION DES ÉPROUVETTES

La préparation des mélanges a été effectuée suivant un dosage pondéral des granulats et conformément à la norme française NF P 18 - 404 [13], qui consiste à :

- Introduire, en premier lieu, dans un malaxeur à béton, (Photo A3-2), les constituants dans l'ordre suivant : gravillons, liant, sable,
- Malaxer à sec les éléments de l'ordre de 1 *min*,
- Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 *min*.

La seule différence, entre le mélange du béton « témoin » et les autres mélanges des bétons à base de granulats de déchets de brique, est le prémouillage de ces granulats.

La gâchée exécutée pour l'essai d'étude en question doit être telle qu'elle permet d'obtenir un volume de béton compacté excédant celui des éprouvettes à remplir d'au moins 25%.

On mélange et on homogénéise la gâchée exécutée et on en prélève la quantité voulue pour le remplissage des moules en deux couches pour les moules cubiques ou prismatiques et en trois couches pour les moules cylindriques. Le serrage du béton doit être effectué immédiatement après le remplissage, par table vibrante (Photo A3-3), pour chaque couche du béton introduite.

V.3.3 – CONSERVATION DES ÉPROUVETTES

Après la mise en place du béton, les éprouvettes sont maintenues pendant 24 heures, dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire. Pour éviter toute évaporation de l'eau, la face supérieure du moule est recouverte d'un film en plastique, durant la période de conservation.

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai, à une température de 20 à 24 °C ± 2 °C, ou dans une salle en laboratoire à 20 à 26 °C ± 2 °C. La conservation des éprouvettes dans l'eau ou dans l'air libre a été faite selon le type d'essai.

V. 4 – ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES BÉTONS

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton fait avec granulat en brique concassée et comparer ceux-ci aux propriétés de béton ordinaire. Le Tableau V-4, ci-dessous, nous indique les types d'essais effectués sur les bétons, aux différents échéances d'âges ainsi que le mode de conservation des éprouvettes jusqu'au moment de l'essai et selon le type de test. Ces essais vont nous informer sur les qualités des bétons à base de brique concassée et dans le cas échéant d'utiliser ces granulats dans la réalisation des ouvrages en béton.

Tableau V-4
Essais Effectués sur les Bétons

Type d'essai	Mode de Conservation		Age (jours)
	Eau	Air	
Affaissement			Avant coulage
Masse volumique (béton frais)			Avant coulage
Air occlus			Avant coulage
Masse volumique (béton durci)		X	À 28 jrs
Compression	X		3, 7, 28 et 90 jrs
Traction par flexion	X		7, 28 et 90 jrs
Auscultation dynamique	X		À 28 jrs
Retrait et Pertes de poids		X	Jusqu'à 90 jrs
Absorption capillaire		X	Après 28 jrs
Absorption par immersion		X	Après 28 jrs

Les essais ont été effectués au moyen des trois éprouvettes par nature d'essai et aux différentes échéances d'âges.

V.4.1 – ESSAI D'AFFAISSEMENT

L'ouvrabilité des différents bétons composés a été appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams (Photo A3-4). L'essai d'affaissement (Slump-Test) a été effectué conformément à la norme européenne

NF EN 12350-2 [82]. Tous les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité constante pour faciliter la comparaison entre eux. Le résultat de l'affaissement est exprimé par un nombre entier A, arrondi au centimètre le plus voisin.

V.4.2 – MASSE VOLUMIQUE DU BÉTON FRAIS

La masse volumique du béton frais a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12350-6 [83]. Elle a été déterminée lors des essais d'étude et corrections de la formule des mélanges par la mise en place du béton frais dans un récipient rigide et étanche à l'eau de volume ($V=5 \text{ l}$) et de masse (m_1), puis pesé l'ensemble, soit la masse (m_2). La masse volumique du béton frais, arrondie aux 10 kg/m^3 les plus proches, est donnée donc par la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{V-1})$$

V.4.3 – MESURE DE L'AIR OCCLUS

La mise en place du béton enferme toujours une certaine quantité d'air, appelée « air occlus ». L'air occlus, c'est donc les vides d'air dans le béton qui ne sont pas intentionnellement créés.

La mesure de l'air occlus a été faite, par la méthode du manomètre, conformément au mode opératoire de la norme allemande DIN 1048 [84] à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres de volume (Photo A3-8). La mesure se fait par : introduction à ras bords de la quantité du béton frais (en trois couches serrées à l'aide d'une tige de piquage) dans un réservoir de forme évasée ; injection de l'eau par l'un de deux robinets du couvercle, qui enferme soigneusement le réservoir, jusqu'à ce que l'eau sorte par l'autre robinet ; pompage de l'air dans la sas à l'aide d'une petite pompe manuelle jusqu'à ce que l'aiguille de manomètre atteigne le niveau de pression initiale et enfin, une fois les deux robinets sont fermés, enfoncer le bouton vert pour commencer le test. La valeur lue sur le manomètre est égale au pourcentage apparent de l'air occlus.

V.4.4 – MASSE VOLUMIQUE DU BÉTON DURCI

Selon la norme européenne NF EN 206 -1 [59], un béton de masse volumique normale, c'est un béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure à $2\,000\text{ kg/m}^3$ mais inférieure ou égale à $2\,600\text{ kg/m}^3$.

La masse volumique du béton durci a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12390-7 [85]. Elle a été déterminée, à l'âge de 28 jours, sur une éprouvette prismatique ($7\times 7\times 28\text{ cm}$) de masse (m) constante après séchage à l'étuve et de volume réel (V). La masse volumique du béton durci mesurée en moyenne des trois éprouvettes est donnée par la formule suivante :

$$D = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{V-2})$$

Les résultats sont exprimés aux 10 kg/m^3 les plus proches

V.4.5 – ESSAI DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

L'essai de résistance à la compression du béton a été effectué conformément à la norme européenne NF EN 12390-3 [86], par application d'un effort de chargement sur une éprouvette cubique, dans le sens perpendiculaire à l'axe de coulage, jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression (Photo A3-5).

La résistance à la compression du béton est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{en MPa}) \quad (\text{V-3})$$

Avec : – F : la charge maximale à la rupture de l'éprouvette (en *Newtons*),
– A_c : l'aire de la section chargée de l'éprouvette (en mm^2).

La résistance à la compression du béton, à l'âge déterminé, est égale à la moyenne arithmétique, exprimée à $0,5\text{ MPa}$ près, des valeurs mesurées sur chacune des trois éprouvettes cubiques de 10 cm d'arête. Les résultats sont donnés sur le Tableau A1-11 en annexe A1 et sur la Figure VI-4 du chapitre VI suivant.

V.4.6 – ESSAI DE RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FLEXION

L'essai a été effectué conformément à la norme française NF P 18 - 407 [87], par l'emplacement de l'éprouvette prismatique (7x7x28 cm) dans l'appareil de chargement (Figure V-5) de la machine d'essai (Photo A3-6), en prenant comme faces de chargement ses faces e moulage.

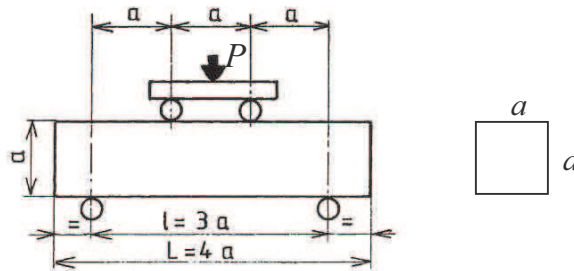


Figure V-5

Appareil de Chargement de l'Éprouvette Prismatique [87]

La résistance à la traction par flexion du béton est calculée d'après la formule (I-3) du chapitre I. Elle est égale, pour un âge déterminé, à la moyenne arithmétique, exprimée à 0,1 MPa près, des valeurs mesurées sur chacune des trois éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm).

V.4.7 – ESSAI D'AUSCULTATION DYNAMIQUE

L'essai d'auscultation dynamique, par vitesse du son, consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes sonique dans une éprouvette de béton à l'aide d'un appareil à ultrasons (Photo A3-7). L'essai a été effectué conformément à la norme française P 18 - 418 [88].

La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{en m/s}) \quad (\text{V-4})$$

Où :

D : distance entre faces de l'éprouvette mesurée en mètres,

T : temps de propagation d'ondes en secondes.

Les vitesses de propagation du son calculées, sont exprimées en mètres par seconde, sous la forme de la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes de chaque type du béton. Les résultats sont donnés sur le Tableau A1-13 en annexe A1.

La vitesse de propagation du son est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Elle fournit une indication sur les qualités des bétons, telles que :

- Homogénéité du béton,
- Cavités, fissures, défauts dus à l'effet du feu ou du gel,
- Module d'élasticité,
- Résistance à la compression.

La relation entre la vitesse du son et le module d'élasticité instantané E_i est celle donnée au paragraphe (§ I.4) par la formule (I-10). Par ailleurs, la résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = 16,7 \exp \cdot \frac{E_i}{122\,500} \quad [9] \quad (V-5)$$

V.4.8 – ESSAI DE RETRAIT

En l'absence de toute charge, le béton se déforme spontanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte de l'eau libre, par évaporation, qui se traduit par diminution du volume.

L'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton due aux vides d'air. Ces vides d'air sont beaucoup plus importants en présence des granulats poreux qui absorbent une quantité importante d'eau provoquant ainsi des retraites importants lors du durcissement ; d'où l'intérêt de l'étude du retrait.

Le retrait est, par définition, la différence entre la longueur de l'éprouvette aussitôt après démoulage et sa longueur, après séchage consécutif, dans des conditions parfaitement spécifiées [69].

L'essai de retrait a été réalisé conformément à la norme française NF P18 - 427 [89]. Il consiste à mesurer en fonction du temps la variation de longueur d'une éprouvette prismatique (7x7x28 cm), par rapport à sa longueur initiale, placée

dans un rétractomètres (Photo V-1) munis d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment. La longueur initiale (longueur de référence) est celle de prisme une jour après sa fabrication.



Photo V-1

Essai de Retrait

Pour chaque éprouvette, la variation de longueur relative « dL » est calculée par différence entre la mesure initiale au démoulage et la mesure finale aux échéances spécifiées (3, 7, 14, 28 et 90 jours).

La variation dimensionnelle de l'éprouvette « Vd », est définie par la formule suivante :

$$Vd = \frac{dL}{L} \quad (\text{en } \mu\text{m/m}) \quad (\text{V-6})$$

Avec : – dL : variation de longueur, exprimée en micromètres,
– L : longueur initiale entre les plots de mesure, exprimée en mètres.

Le retrait, à l'âge déterminé, est égal à la moyenne arithmétique, arrondie à la dizaine la plus proche, des valeurs mesurées sur chacune des trois éprouvettes.

V. 4.9 – ESSAI D'ABSORPTION CAPILLAIRE

Les essais d'absorption capillaire sont également intéressants et faciles à effectuer. Ils renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480 - 5 [90]. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette prismatique de béton posée à sa base sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés, (Photo V-2) :

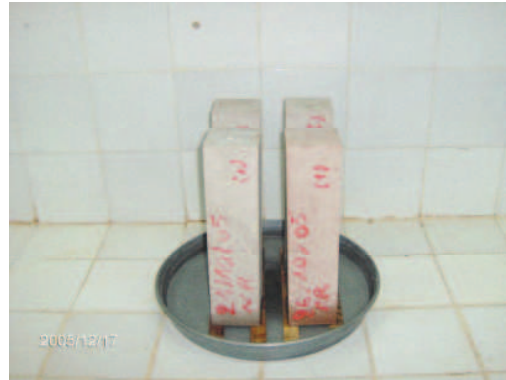


Photo V-2

Essai d'Absorption Capillaire

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (jusqu'à 90 minutes). À chaque échéance, l'éprouvette prismatique (7x7x28cm) séchée préalablement à l'étuve jusqu'à masse constante, est sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée (M_j) et replacée dans le récipient en position verticale.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \quad (\text{en } g/mm^2) \quad (V-7)$$

Avec :

M_0 : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes,

M_j : masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption
en grammes,

S : section de la base de l'éprouvette en millimètre carré.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type du béton sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées. Ils sont donnés sur le Tableau A1-16 en annexe A1 et la Figure VI-9 du chapitre VI suivant.

V. 4.10 – ESSAI D’ABSORPTION PAR IMMERSION

L’absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette à masse constante, en l’immergeant dans l’eau et en mesurant l’augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche [11].

L’essai d’absorption par immersion a été effectué, effectivement, en séchant des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) du béton à l’étuve jusqu’à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l’eau pendant 24h à 20°C à la pression atmosphérique (c’est-à-dire jusqu’à saturation du matériau). L’essai a pour but de déterminer la porosité du béton à base de brique concassée.

La porosité du béton est définie par la formule suivante :

$$\text{Porosité} = \frac{M_a - M_s}{\gamma_w \times V} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{V-8})$$

Avec :

M_a : masse de l’éprouvette saturée d’eau,

M_s : masse sèche de l’éprouvette,

γ_w : masse volumique de l’eau,

V : volume de l’éprouvette.

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque type du béton sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées. Ils sont donnés sur le Tableau A1-17 et sur la Figure VI-10.

CHAPITRE VI

ANALYSE ET DISCUSSION

DES RÉSULTATS

VI. 1 – INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, sont exposés les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre V. une analyse et une discussion des résultats, suivies d'une comparaison avec ceux reproduits dans la littérature, seront également présentées dans ce chapitre.

VI. 2 – BÉTON FRAIS

VI.2.1 – CONSISTANCES DES BÉTONS FRAIS

Afin de faciliter la comparaison des bétons entre eux, tous les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité constante appréciée par un affaissement au cône d'abrams de l'ordre de 6 *cm* de la classe de consistance des bétons plastiques.

Le Tableau VI-1 ainsi que la Figure VI-1 suivants donnent une indication sur les quantités d'eau totales réellement utilisées dans les mélanges ainsi que les quantités effectivement ajoutées aux mélanges (compte tenu du pourcentage élevé d'absorption d'eau de granulats à base de brique concassée). Un affaissement de l'ordre de 6 *cm* est maintenu constant pour les différents mélanges avec un rapport eau – ciment de (0,56), qui représente presque le rapport optimum pour les granulats de brique concassée selon Devenny et Khalaf (§ III.8.2).

D'après le Tableau VI-1 et la Figure VI-1 suivants, on remarque que :

- La quantité d'eau ajoutée au béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée ainsi que celle de béton de brique concassée avec sable naturel représentent presque la moitié de la quantité d'eau efficace,
- La quantité d'eau ajoutée au béton entièrement en brique concassée est de 80 % de celle de l'eau efficace,
- Le béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée a plus d'eau que le béton de brique concassée avec sable naturel. Cela confirme la grande absorption d'eau du sable recyclé par rapport aux gravillons recyclés,
- La quantité d'eau ajoutée au béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée ainsi que celle ajoutée au béton de brique concassée avec sable naturel représentent, respectivement 15 % du poids du sable recyclé utilisé dans le premier béton et 10 % du poids des gravillons recyclés utilisés dans le deuxième béton. On remarque que ces pourcentages représentent les coefficients d'absorption d'eau, respectivement du sable recyclé et des gravillons recyclé, trouvés en paragraphe (§ IV.3.4).

Tableau VI-1

*Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges
ainsi que l'Affaissement des Bétons*

Désignations	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Ciment (C)	350 kg	350 kg	350 kg	350 kg
Eau efficace (E)	197 l	197 l	197 l	197 l
Eau ajoutée	0	94 l	90 l	153 l
Eau totale	197 l	291 l	287 l	350 l
E / C	0,56	0,56	0,56	0,56
Affaissement	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm

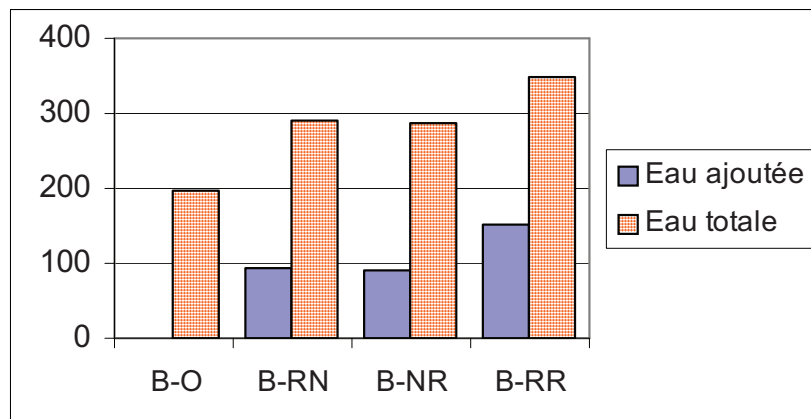


Figure VI-1

Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges (en Litres)

VI.2.2 – DENSITÉ ET MISE EN PLACE DES BÉTONS FRAIS

La Figure VI-2 suivante montre que la densité du béton frais diminue successivement par substitution successive des granulats naturels par les granulats recyclés et que le pourcentage de l'air occlus augmente dans le béton. Ceci se confirme par les résultats d'autres chercheurs lors d'une substitution croissante en granulats recyclés [41].

La quantité d'air occlus varie dans un béton courant entre 1 et 2,5 % [7]. En effet, la résistance du béton est influencée par le volume de tous les vides contenus dans le béton [11]. Et que 1 % d'air compte comme 10 kg d'eau et cela suffit à montrer que le volume d'air ne doit jamais être négligé [7].

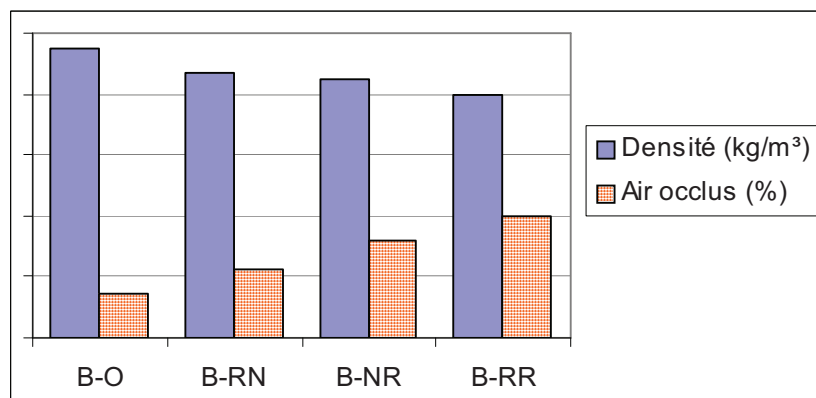


Figure VI-2

Densité et Air Occlus des Bétons Frais

VI. 3 – BÉTON DURCI

VI.3.1 – COULEUR ET ASPECTS EXTÉRIEURS DES BÉTONS

La couleur et l'aspect extérieur des bétons sont, en général, influencés par, la couleur du ciment, la couleur des granulats, le rapport eau / ciment (plus le rapport eau / ciment est élevé plus le béton est éclairé), le coffrage et le traitement de cure [91].

Les bétons étudiés sont confectionnés avec un rapport E/C constant. Ils sont influencés donc par la couleur du ciment et la couleur des granulats. Les bétons confectionnés avec du sable naturel (que soient des B-O ou des B-NR) ont un aspect extérieur de couleur grise éclairée correspond à celle du ciment. Par contre, les bétons confectionnés avec du sable recyclé (que soient des B-RN ou des B-RR) ont un aspect extérieur de couleur rouge éclairée correspond à celle du sable recyclé. Selon Queisser [91], la couleur du ciment (gris) n'a que peu d'influence sur les colorations foncées (noir, brun, rouge foncé).

Un aspect extérieur homogène est remarqué pour l'ensemble des bétons étudiés. Aucun phénomène de ségrégation n'est observé même en présence total des granulats à base de déchets de brique.

VI.3.2 – DENSITÉ ET HOMOGENÉITÉ

Lors des essais de compression, l'aspect interne des éprouvettes écrasées montre que les bétons à base de déchets de brique présentent une homogénéité convenable et comparable à celle de béton ordinaire.

Le Tableau A1-10 et la Figure VI-3 suivante montrent que la densité des bétons à base de déchets de brique est nettement très inférieure à celle du béton ordinaire. Cette diminution de densité est due à la faible densité des granulats à base de déchets de brique et qu'elle diminue par l'augmentation du dosage en granulat de brique concassée. Selon Neville [11], pour un dosage constant en granulat, la masse volumique du béton augmente avec la masse volumique du granulat.

Les trois types des bétons confectionnés à base de déchets de brique ont une masse volumique après séchage à l'étuve inférieure à 2000 kg/m^3 , donc on peut dire

sont des « bétons légers » d'après la norme européenne NF EN 206 -1 [59]. Ces résultats confirment ceux de travaux de Coquillat et Debieb [41].

La masse volumique du béton entièrement en brique concassée est presque de 25 % inférieure à celle du béton ordinaire, ce qui représente le même pourcentage entre les masses volumiques apparentes des granulats recyclés et celles des granulats naturels.

La masse volumique apparente du béton de brique concassée avec sable naturel est approximativement de 15 % inférieure à celle du béton normal. Ceci confirme le résultat trouvé par d'autres chercheurs [5].

Le remplacement total du sable léger, dans le béton entièrement en brique concassée, par un sable de densité normale a augmenté la masse volumique du béton de 160 kg/m^3 . Ceci confirme les résultats indiqués par Neville [11].

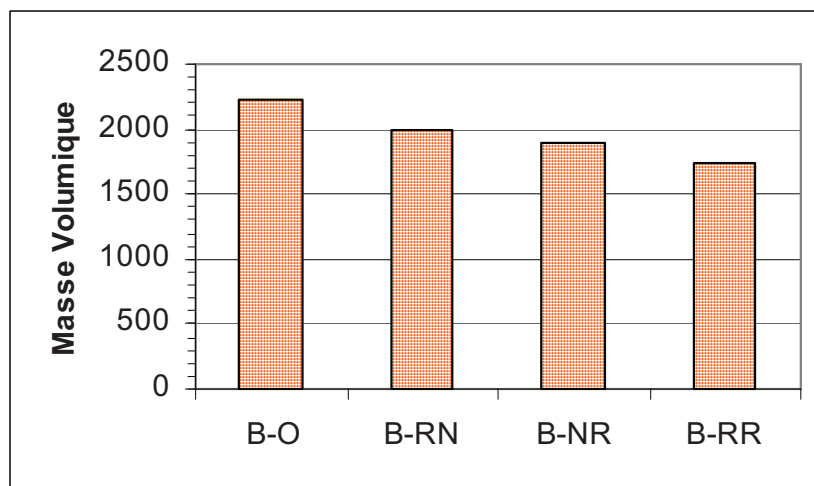


Figure VI-3

Masses Volumiques des Bétons Durcis (en kg/m^3)

VI.3.3 – RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

VI. 3.3.1 – Évolution de la résistance à la compression

D'après la Figure VI-4 suivante, on remarque que l'augmentation de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de brique, au cours du temps, se fait de la même manière que le béton ordinaire. Ceci est dû à la confection

de tous les bétons avec un rapport eau / ciment constant. Selon Neville [11], la relation entre la résistance du béton et le rapport eau / ciment n'est valable que pour un type de ciment (c'est-à-dire une hydratation identique du ciment) et un âge donné et suppose également que le béton a été mûri dans des conditions humides.

On remarque pour un âge donné, d'après le Tableau A1-11 que :

- La résistance des bétons à base de déchets de briques est inférieure à la moitié de celle du béton ordinaire à 03 jours d'âge,
- La résistance des bétons à base de déchets de briques est de l'ordre de la moitié de celle du béton ordinaire à l'âge de 07 jours et augmente au fur et à mesure au cours du temps jusqu'à ce qu'elle atteigne 81 % pour le béton (B-RN), 69 % et 66 % respectivement pour les bétons (B-NR) et (B-RR) à l'âge de 90 jours,
- Les bétons (B-RN) et (B-NR) ont une même résistance jusqu'à 28 jours d'âge et elle augmente de 15 % pour le béton (B-RN) à l'âge de 90 jours,
- Le béton entièrement en brique concassée (B-RR) a des résistances, au cours du temps, comparables avec celles des (B-RN) et (B-NR),
- L'emploi du sable naturel avec les gravillons recyclés n'apporte qu'une faible amélioration dans la résistance. Selon Cormon [4], le sable naturel augmente sensiblement la résistance du béton léger sans trop nuire à l'isolation thermique,
- Si on compare les valeurs des bétons à base de déchets de brique par celles trouvées par Debieb (dont Los Angeles est de 31,6 %) [41], on remarque qu'elles sont assimilables à l'âge de 28 jours. Les valeurs de (B-NR) et de (B-RR) à 3 jours correspondent à celles trouvées à 7 jours par Debieb et que les valeurs à l'âge de 90 jours sont nettement trop supérieures que celles trouvées par Debieb. On peut dire que la résistance des bétons à base de déchets de brique utilisés, progresse plus vite dans les premiers jours et que la résistance élevée remarquée est due à la bonne adhérence entre le mortier et les granulats. Selon Dreux et Festa [6], cette qualité peut même être plus importante que la résistance et la dureté du gravier lui-même.

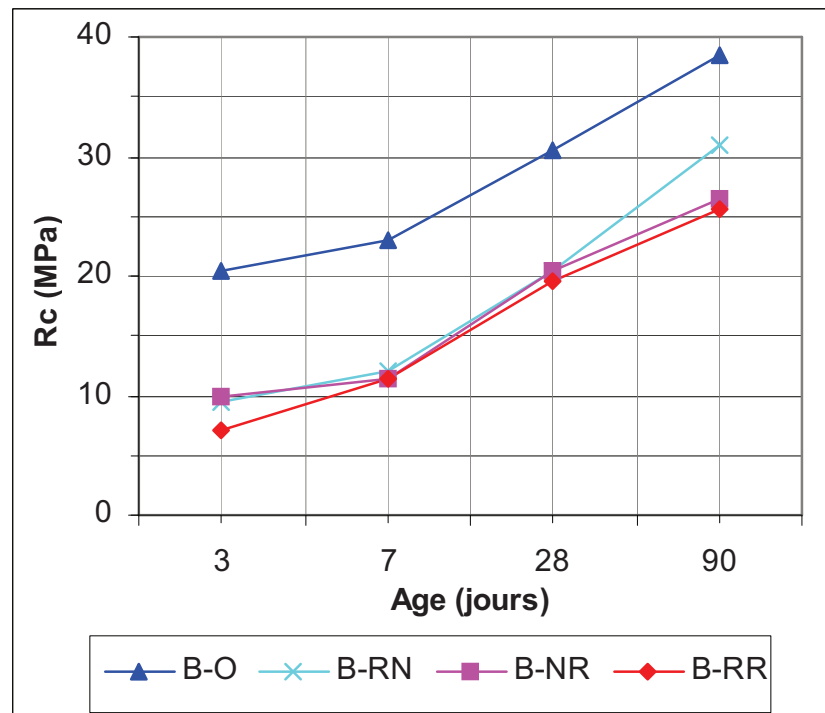


Figure VI-4

Évolution de la Résistance à la Compression des Bétons

VI. 3.3.2 – Résistances sur cube et sur cylindre

Les résistances mesurées sur cubes et sur cylindres sont tout à fait différentes du fait de l'effet de freinage des plateaux de la presse qui s'étend sur toute la hauteur d'un cube, mais il ne se manifeste pas sur toute la hauteur du cylindre [11]. Le Tableau VI-2 montre le rapport des résistances d'un cylindre à un cube selon la norme américaine ASTM et la norme britannique BS. Par ailleurs, ce rapport des résistances entre les éprouvettes cylindriques et cubiques augmente avec l'augmentation de la résistance. En effet, à l'âge de 7 jours on a trouvé un rapport des résistances, entre un cylindre de 16x32 cm et un cube de 10x10x10 cm, égale à 0,79 et qui augmente à 0,82 à l'âge de 28 jours.

La norme ENV 206 autorise les essais de compression sur cylindre d'élanement 2 (éprouvette 11x22 ou 16x32) et sur cube. Les résistances obtenues avec les essais sur cube sont supérieures à celles obtenues sur cylindres d'environ 20 % [8].

Selon Dreux et Festa [6], le rapport habituellement utilisé $R_{c_{cyl}}/R_{c_{cube}} = 0,83$ est bien valable pour les bétons de qualité courante (20 à 30 MPa) mais il est plus faible pour les bétons de moindre résistance.

À titre d'exemple, une comparaison des résistances a été effectuée uniquement sur le béton ordinaire à 7 jours et à 28 jours.

Tableau VI-2
Rapport des Résistances d'un Cylindre sur Cube

Rapport	Normes [11]		Trouvés	
	ASTM C 42-90	BS 1881 : Partie 120	À 7 jours	À 28 jours
$R_{c_{cyl}} / R_{c_{cube}}$	0,87	0,80	0,79	0,82

VI. 3.3.3 – Facteurs agissant sur la résistance

Selon Gilkey [11], « pour un ciment donné et des granulats acceptables, la résistance qui peut se développer dans un béton maniable confectionné dans des conditions identiques de malaxage, de mise en œuvre, de conservation et d'essai est influencée par :

- Le rapport massique entre le ciment et l'eau de gâchage,
- Le rapport massique entre le ciment et les granulats,
- La granulométrie, la texture, la forme, la résistance et la dureté des granulats,
- La dimension maximale des granulats. »

En pratique, le rapport eau / ciment est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton complètement compacté. Lors de la confection des mélanges et après une recherche, le sable naturel alluvionnaire choisi, a été jugé acceptable, dont les caractéristiques sont présentées au chapitre IV. Ce sable pauvre en éléments fins a engendré un béton raide non cohérent.

Selon ASTM-50 [11], Pour que le mélange présente une bonne cohésion et soit maniable, il doit contenir une quantité suffisante d'éléments de dimension inférieure au tamis de $300 \mu m$. Donc, on a opté à augmenter le niveau du sable dans la composition granulaire du mélange du béton ordinaire par augmentation de l'ordonnée du point de brisure de la droite de référence (Figure V-1), ce qui, a engendré un excès de grains de grosseur intermédiaire et même à un certain manque de maniabilité dont on est obligé d'ajouter d'eau pour avoir un affaissement de 6 cm et en conséquence, on a abouti à un rapport eau / ciment de 0,56. L'augmentation de l'eau a engendré une diminution de la résistance ciblée de 4 MPa , mesurée sur cylindre et selon la méthode « Dreux – Gorisse ».

Selon le Document Technique Réglementaire algérien DTR - BE 2-1 [92], pour un dosage en ciment compris entre 300 et 400 kg/m^3 , on peut adopter un rapport eau / ciment compris entre 0,4 et 0,6 avec une valeur moyenne de 0,5. On prend $E/C < 0,5$ si l'on cherche à réaliser des bétons fermes, ou si le sable présente une granularité peu chargée en éléments fins, ou si le gravier est à majorité de gros éléments et de nature très poreuse, ou pour des valeurs du rapport $G/S > 2$, ou encore si l'on emploie un adjuvant (plastifiant ou fluidifiant). Dans les cas contraires, on prend $E/C > 0,5$.

D'après Walker et Bloem [11], « la résistance du béton est due à : (1) la résistance du mortier, (2) l'adhérence entre le mortier et le gros granulat et (3) la résistance du gros granulat, c'est-à-dire la capacité du granulat à résister aux contraintes qui lui sont appliquées ».

La résistance du mortier a une grande influence sur la résistance finale du béton. La Figure VI-4, indique que la substitution du sable naturel du béton ordinaire par un sable recyclé a entraîné une diminution de 33 % de la résistance à l'âge de 28 jours. Par contre, la substitution du sable recyclé par un sable naturel dans le béton en brique concassée n'a entraîné qu'une augmentation insignifiante de la résistance du béton. Selon Cormon [4], lorsque le mortier atteint la résistance du granulat, la résistance générale du béton ne progresse pratiquement plus (la résistance d'une chaîne correspond à celle de son maillon le plus faible).

Donc, comme il a été indiqué au paragraphe (§ II.4.2), un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. En pratique, des fissures apparaissent dans un béton par application d'un effort de

chargement croissant. Selon Neville [11], les gros granulats empêchent la propagation des fissures, ce qui, sous l'accroissement de la charge, peut entraîner l'ouverture d'une autre fissure ; la rupture est toutefois graduelle et, même en traction. En effet, il s'agit ici de la résistance des gros granulats et de leur adhérence au mortier.

L'utilisation des granulats de forme non ramassée et à faible résistance, inférieure à la classe de résistance nécessaire, engendre une baisse dans la résistance du béton globale. Ceci confirme les explications de Komar (voir § II.4.5).

Par ailleurs, les granulats concassés ont, en générale, une surface rugueuse et de forme angulaire, ce qui assure une meilleure adhérence au mortier de ciment et par conséquent, une meilleure résistance du béton. Selon Devenny et Khalaf [3], une bonne adhérence peut être assurée entre les granulats de la brique et la pâte du ciment le fait que les granulats de la brique sont très anguleux, quels moyens ils ont une grande surface pour lier avec la pâte. Et Kibriya et Speare [63], ont trouvé que la nature anguleuse de la matière écrasée en brique et sa texture de la surface sont généralement favorables. Neville [11], explique que la propriété importante du béton léger est la bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydraté et qui est due à :

- La contribution de la rugosité superficielle de nombreux granulats légers à la bonne imbrication mécanique des deux matériaux ; en fait, il y a souvent pénétration de la pâte de ciment dans les pores ouverts situés à la surface des gros granulats,
- L'absence de contrainte différentielle induite entre les deux matériaux, tant par les charges appliquées que par les changements thermiques ou hygrométriques, du fait que le module d'élasticité des granulats légers qui est beaucoup plus faible que celui de granulats ordinaires, est assez semblable que celui de la pâte de ciment,
- La disponibilité, avec le temps, de l'eau absorbée par les granulats au moment du malaxage, pour hydrater les grains de ciment qui ne l'étaient pas encore complètement.

L'examen visuel des éprouvettes écrasées du béton de brique concassée avec sable naturel nous montre que la fissuration se produit, en général, par rupture des granulats de brique qui représentent une faible résistance mécanique et bonne

adhérence au mortier et parfois par décollement du mortier de granulat à surface vitrifiée qui empêche l'adhérence mortier – granulat.

VI. 3.3.4 – Relation entre Rc au jeune âge et Rc à long terme

Une relation entre la résistance à court terme et la résistance à long terme (le plus souvent à 28 jours) peut être établie, afin de ne pas attendre les délais habituels contractuels de plusieurs jours pour effectuer des corrections utiles de dosage d'un béton à la suite de dérives dans la qualité des constituants par exemple.

Les méthodes proposées sont nombreuses. Selon Gorisse [9], il n'existe aucune méthode qui puisse donner une relation univoque et immuable entre la résistance à court terme et la résistance à 28 jours ; du fait, que chaque ciment a une relation propre, fonction notamment de la chaleur d'hydratation.

D'après Neville [11], si, pour une raison quelconque, la résistance à 28 jours doit être évaluée à partir d'une résistance à plus court terme, 7 jours par exemple, une relation entre la résistance à 28 jours et celle à 7 jours doit être établie expérimentalement pour ce béton particulier.

Un rapport entre la résistance à « j » jours et celle à 7 jours, suite aux essais systématiques réalisés sur un très grand nombre d'éprouvettes avec divers bétons et aux âges différents, est donné par la formule générale proposée suivante :

$$\frac{Rc_j}{Rc_7} = 2,92 - \frac{1,77}{\sqrt{\log j}} \quad [6] \quad (VI-1)$$

Avec : $j = \text{âge du béton} > 7 \text{ jours}$.

Le BAEL 91 donne une formule pour l'évaluation de la valeur de la résistance à « j » jours, pour « j » ≤ 28 et $Rc_{28} \leq 40 \text{ MPa}$:

$$Rc_j = \frac{j}{4,76 + 0,83j} Rc_{28} \quad [6] \quad (VI-2)$$

Le Tableau VI-3 suivant montre le rapport des résistances à 7 jours et à 28 jours de différents bétons confectionnés, celui de la formule proposée ainsi que celui de BAEL 91. On voit que les rapports des bétons à base de déchets de brique

sont proches de celui de BAEL 91. La faible valeur de ces rapports par rapport à celle du béton ordinaire est due à la faible résistance de ces bétons aux premiers âges. Les valeurs trouvées de ces bétons sont plus proches de celles trouvées par d'autres chercheurs (0,52 trouvée par Debieb et 0,61 par Coquillat pour des bétons entièrement en brique concassée) [41].

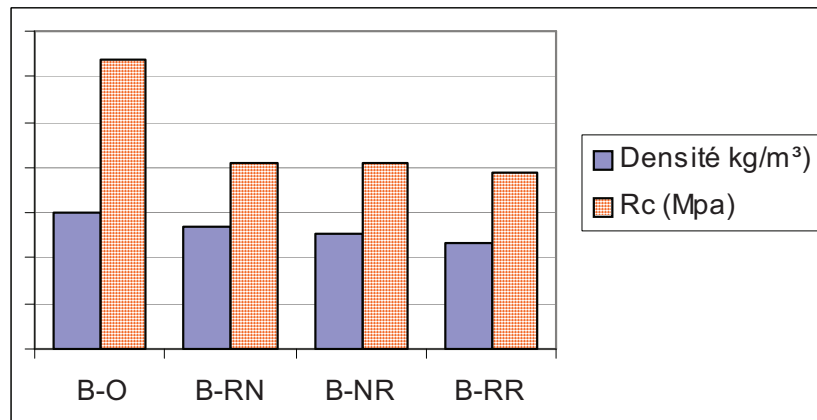
Tableau VI-3
Rapport des Résistances à 7 jours et à 28 jours

Types de Béton	R_{c7} / R_{c28}		
	Formule Proposée	BAEL 91	Résultats Trouvés
B-O	0,69	0,66	0,75
B-RN			0,59
B-NR			0,56
B-RR			0,59

VI. 3.3.5 – Relation entre résistance à la compression et densité

Le Tableau A1-12 et la Figure VI-5 suivante montrent que la masse volumique des bétons diminue par substitution successive des granulats naturels par des granulats recyclés à faible densité et en conséquence la résistance diminue. La résistance du béton diminue donc avec la diminution de sa masse volumique. Devenny et Khalaf [3], ont trouvé que la plus haute résistance du béton est atteinte par la présence de la plus importante densité des granulats de brique. Plus un béton sera dense plus sa résistance sera élevée.

La comité américaine 213 de l'ACI a défini les bétons de structure à base de granulats légers, comme a été indiqué au paragraphe (§ III.7.2), par leur résistance à la compression qui doit être supérieure à 175 kg/cm^2 et leur densité après séchage à l'air pendant 28 jours qui doit être inférieure à 1850 kg/m^3 . Cela conduit à dire qu'on peut utiliser le béton confectionné entièrement en brique concassée comme béton léger de structure.

**Figure VI-5**

Résistances à la Compression et Densités des Bétons

VI. 3.3.6 – Relation entre résistance à la compression et vitesse du son

Du Tableau VI-4 suivant, on remarque que la mesure par vitesse du son donne une meilleure estimation de la résistance à la compression pour le béton de brique concassée avec sable naturel ainsi que pour le béton entièrement en brique concassée. Par contre, les valeurs des résistances se divergent avec l'utilisation des granulats naturels. Selon Neville [11], il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre la valeur de la vitesse du son et la résistance du béton. En revanche, la vitesse des ondes est liée à la masse volumique du béton. Elle augmente par l'augmentation de la masse volumique du béton. Par conséquent, un béton qui assure une grande vitesse est un béton résistant.

Si on examine les valeurs du Tableau VI-4, on trouve que les pourcentages des résistances par vitesse du son ainsi que ceux des masses volumiques des différents bétons sont similaire. Ceci confirme la proportionnalité de la vitesse du son à la masse volumique du béton. La différence remarquée entre les résistances du béton ordinaire est due à la résistance mécanique des granulats lors de la compression.

Tableau VI-4
Résistance à la Compression et par Vitesse du Son sur Cube à 28 jours

Désignations		B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Rc	(MPa)	30,5	20,5	20,5	19,5
	(%)	100	67	67	64
Rc (V son)	(MPa)	25,0	22,0	21,0	20,0
	(%)	100	88	84	80
Masse Volumique	(kg/m ³)	2220	1990	1900	1740
	(%)	100	90	86	78

VI.3.4 – RÉSISTANCE À LA TRACTION

D'après, l'analyse des résultats du Tableau A1-14 ainsi que les courbes de la Figure VI-6, on constate que :

- Une augmentation de la résistance à la traction par flexion au cours du temps pour les différents bétons confectionnés,
- Le béton ordinaire et le béton entièrement en brique concassée ont une progression des résistances presque similaire au cours du temps,
- Le béton entièrement en brique concassée présente une bonne résistance à l'âge de 7 jours et 28 jours que le béton de brique concassée avec sable naturel. Cela est dû à la bonne adhérence mortier – granulats,
- Pour le même niveau du béton à l'âge de 28 jours (même résistance à la compression), la résistance à la traction du béton de granulats de brique concassée avec sable naturel et celle du béton de granulats entièrement en brique concassée sont respectivement de 17 % et 27 % supérieures à celle du béton normal. Cela montre la bonne adhérence mortier – granulats en brique concassée (surtout en traction) et confirme les résultats trouvés par Akhtaruzzaman et Hasnat (§ III.8.2).

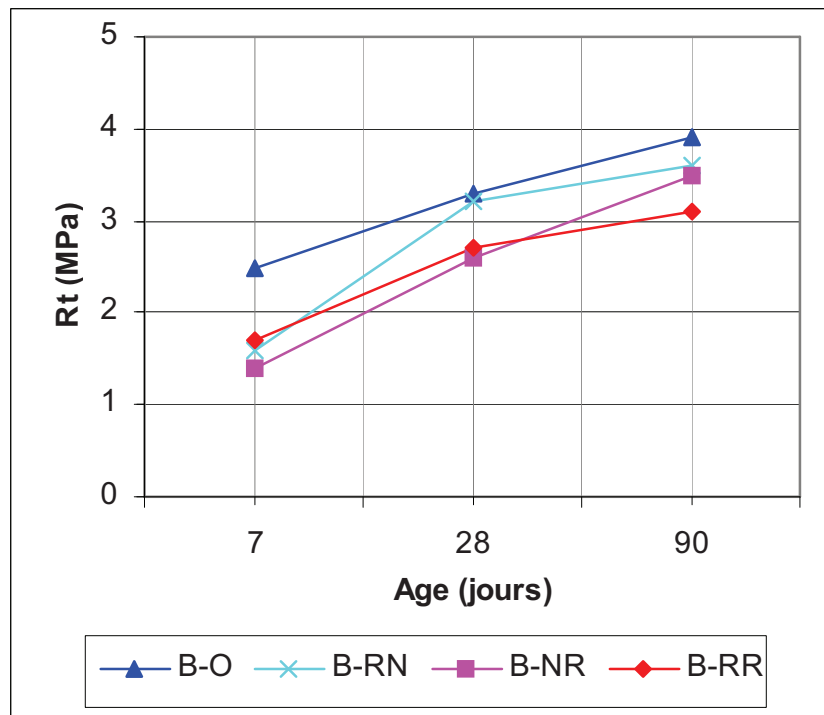


Figure VI-6

Évolution de la Résistance à la Traction des Bétons

VI. 3.5 – RELATION RÉSISTANCE TRACTION – COMPRESSION

De la Figure VI-7 suivante, on constate que :

- La résistance à la traction augmente avec la résistance à la compression au cours du temps pour l'ensemble des bétons confectionnés,
- Le rapport de la résistance à la traction à la résistance à la compression (R_t/R_c) du béton de brique concassée avec sable naturel à une allure linéaire qui est due à la valeur élevée de la résistance à la traction à l'âge de 7 jours,
- L'allure du rapport (R_t/R_c) diminue à l'âge de 90 jours pour l'ensemble des bétons. Selon Neville [11], au-delà d'un mois, la résistance à la traction augmente plus lentement que la résistance à la compression de sorte que ce rapport diminue avec le temps,
- Le niveau de l'allure du rapport (R_t/R_c) est supérieur pour le béton ordinaire que pour le béton entièrement en brique concassée. Cela indique que les deux résistances (R_t et R_c) sont proportionnelles et on

peut dire qu'il y a un lien entre elles. Selon Neville [11], il n'existe aucun rapport direct de proportionnalité et que le rapport de ces deux résistances dépendant du niveau de résistance global du béton,

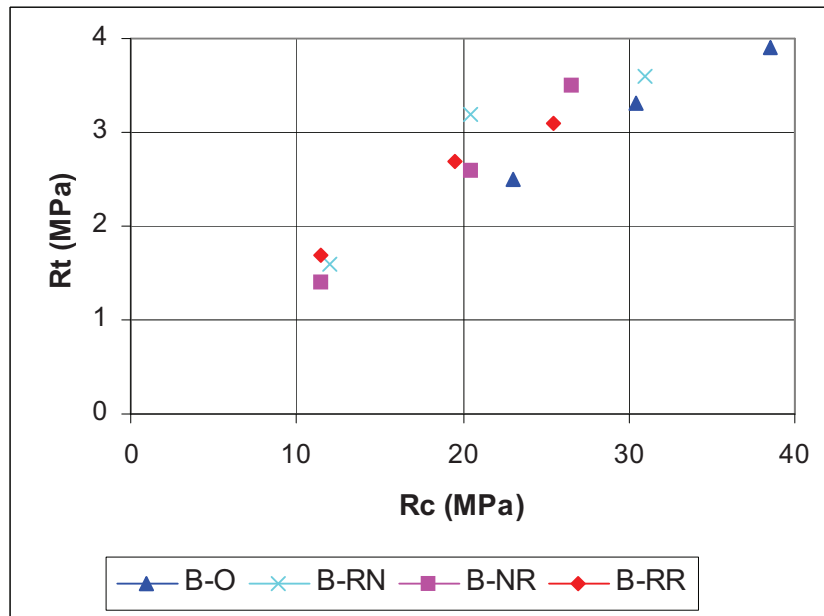


Figure VI-7

Relation entre Résistance à la Traction et celle à la Compression

La résistance à la traction peut être déduite de la résistance à la compression à partir d'une relation empirique dépendante des matériaux utilisés (voir § I.3.6).

VI.3.6 – MODULE D'ÉLASTICITÉ

Le Tableau VI-5 suivant indique les modules d'élasticité des différents bétons confectionnés et conservés à l'eau jusqu'à 28 jours d'âge. Les modules d'élasticité sont déterminés expérimentalement par mesure de la vitesse du son, ensuite, sont comparés à ceux déterminés par la formule proposée par Dreux et Festa et qui est mentionnée en paragraphe (§ I.4).

L'analyse des résultats du tableau nous conduit à soulever les remarques suivantes :

- Suite à la valeur élevée du module d'élasticité mesurée par vitesse du son sur l'éprouvette du béton ordinaire, on peut dire que les modules d'élasticité sont influencés par le mode de conservation humide,

- La différence remarquable entre les valeurs mesurées par vitesse du son avec celles de la méthode proposée confirme l'absence de relation physique entre la vitesse du son et la résistance du béton. Néanmoins, comme il a été indiqué au paragraphe (§ I.4), Le module d'élasticité du béton augmente lorsque sa résistance à la compression augmente,
- Les modules d'élasticité des bétons diminuent par substitution successive des granulats naturels par les granulats de brique concassée. Cela confirme que le module d'élasticité du béton est conditionné par le module d'élasticité du granulat et par les proportions volumétriques qu'il occupe dans le béton, comme il a été indiqué au (§ I.4),
- Les valeurs mesurées par vitesse du son ainsi que celles de la méthode proposée convergent par substitution successive des granulats naturels par des granulats légers. Ceci est dû au rapprochement du module d'élasticité des granulats de brique concassée à celui de la pâte de ciment. De ce fait, on peut dire que la mesure de module d'élasticité par vitesse du son est plus certaine pour le béton de brique concassée que pour le béton ordinaire,
- La valeur mesurée par vitesse du son du béton de brique concassée avec sable naturel montre que l'utilisation du sable naturel avec des granulats en brique concassée augmente sensiblement le module d'élasticité du béton.

Tableau VI-5*Modules d'Élasticité des Bétons à 28 jours*

Désignations	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
E_i (V. Son) (MPa)	49 300	34 600	26 100	20 100
E_i (Proposé) (MPa)	29 240	21 800	21 800	21 400

VI.3.7 – RETRAIT

Du Tableau VI-6 suivant, on constate que le béton à base de déchets de brique a enregistré, au jeune âge, de trop faibles valeurs du retrait dont un gonflement notable du béton ordinaire avec sable recyclé. Par ailleurs, le béton ordinaire a un retrait réversible à l'âge de 28 jours. Cette variation aberrante du retrait mesuré, au jeune âge, sur les différents bétons peut être due au mouvement d'humidité. Les éprouvettes destinées à l'essai ont été placées à l'air libre dans une salle non conditionnée. Selon Neville [11], un béton qui a séché à l'air à une humidité relative donnée gonfle lorsque, par la suite, il est placé dans de l'air ayant une humidité plus élevée. Cependant, seule une partie du retrait initial sera récupérée.

Le retrait à l'âge de 90 jours, semble non influencé par cette variation. La conviction forcée, donc les conditions du mûrissement n'ont d'effet sur la vitesse de séchage du béton (sauf au très jeune âge) étant donné que la diffusivité de l'eau dans le béton est si faible qu'une très petite vitesse d'évaporation est seulement possible. Le retrait mesuré, à l'âge de 90 jours, sur le béton ordinaire correspond à celui des régions chaudes et sèches, indiqué au paragraphe (§ I.6.4).

Le retrait peut se traduire par la diminution, parfois importante des dimensions des éprouvettes confectionnées, par pertes de poids dues au phénomène de prise et de durcissement des bétons. Le Tableau A1-15 et la Figure VI-8 présentent les pertes de poids mesurées sur les mêmes éprouvettes des bétons et en même temps de l'essai de retrait. On remarque ce qui suit :

- Les pertes de poids des différents bétons augmentent progressivement au cours du temps,
- Le béton ordinaire a des pertes de poids relativement faibles,
- Le béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée ainsi que le béton de brique concassée avec sable naturel ont des pertes de poids identiques,
- Le béton entièrement en brique concassée a des pertes de poids relativement grandes, surtout à long terme. L'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton due aux vides d'air (§ I.6.3). D'après Neville [11], dans les bétons qui contiennent une certaine quantité d'eau dans les pores des granulats, on observe une

variation plus grande dans l'allure des courbes de perte d'eau et donc de retrait.

- Le béton entièrement en brique concassée a des pertes de poids, à l'âge de 90 jours, identiques à celles d'un béton entièrement en granulats d'argile expansée, présentant une teneur en eau de 15 %. Ce dernier béton qui avait une perte de poids de 11 %, était conservé à l'air libre à une température de 20°C et une humidité relative de 50 % [4].

Tableau VI-6

Retrait aux Différents Ages des Bétons

Types de Béton	Retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours
B-O	126,05	227,14	264,00	187,89	472,11
B-RN	13,08	- 13,08	254,49	340,11	531,57
B-NR	- 99,89	151,98	254,49	279,46	695,68
B-RR	7,14	143,89	147,46	620,76	715,90

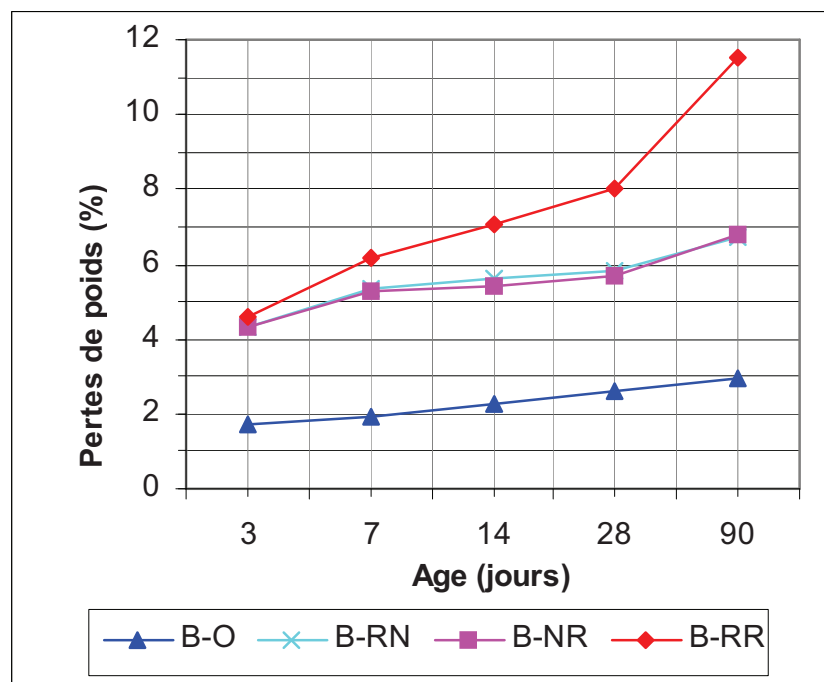


Figure VI-8

Pertes de Poids des Bétons au Cours du Temps

VI.3.8 – ABSORPTION CAPILLAIRE

La Figure VI-9 suivante, nous montre l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des différents bétons et on constate ce qui suit :

- Le béton « témoin » est le moins absorbant de l'eau par succion capillaire. Par contre, le béton entièrement en brique concassée est le plus absorbant,
- Le béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée est plus absorbant que le béton de brique concassée avec sable naturel. Cette absorption est due à la porosité de la pâte de ciment qui représente la seule phase continue dans le béton. La pâte de ciment est plus poreuse en présence de sable de brique concassée,
- L'absorption capillaire du béton entièrement en brique concassée représente presque le double de celle du béton « témoin ».

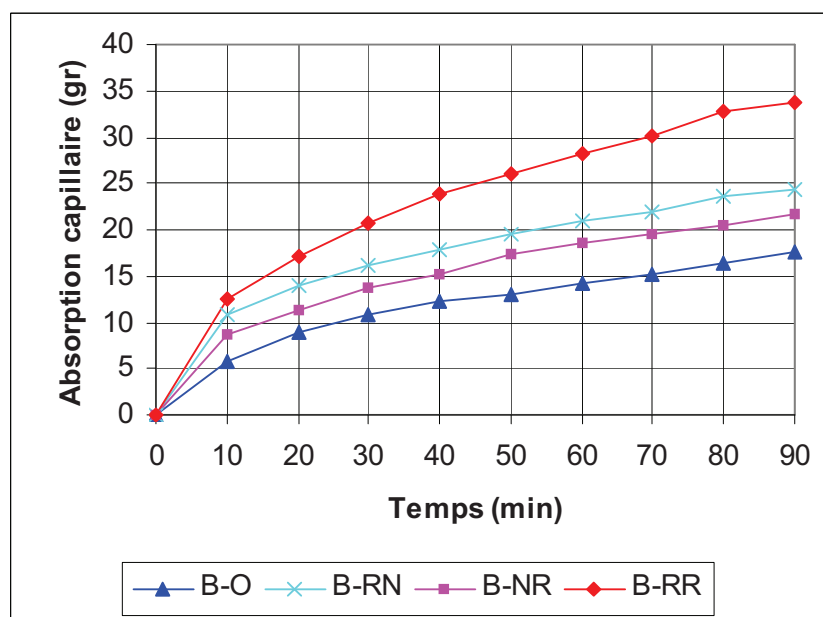


Figure VI-9

Absorption d'Eau par Capillarité des Bétons

VI.3.9 – COMPACITÉ ET POROSITÉ DES BÉTONS

Les résultats d'essai d'absorption d'eau par immersion mentionnés au Tableau A1-17 et la Figure VI-10, ont donné une idée sur la compacité et la porosité

des différents bétons confectionnés. L'analyse de ces résultats a conduit de conclure ce qui suit :

- La porosité d'un béton augmente (compacité diminue) par remplacement successive des granulats en granulats de brique concassée,
- En conséquence, la compacité d'un béton dépend de type des granulats utilisés,
- La résistance d'un béton croît avec sa compacité,
- Le béton entièrement en brique concassée est plus poreux, donc plus perméable. Selon Ramachandran [2], si de telles briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton,
- Le béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée est relativement plus poreux que le béton de brique concassée avec sable naturel. Ceci est dû à la pâte du mortier de ciment qui est plus poreuse en présence de sable recyclé,
- La compacité des bétons varie dans les limites du coefficient de compacité qui est 0,75 à 0,90 [9],
- La porosité du béton ordinaire mesurée correspond à celle d'un bon béton. Celle du béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée ainsi que celle du béton de brique concassée avec sable naturel correspondent à celle d'un béton satisfaisant. Par contre la porosité du béton entièrement en brique concassée correspond à celle d'un mauvais béton [9].

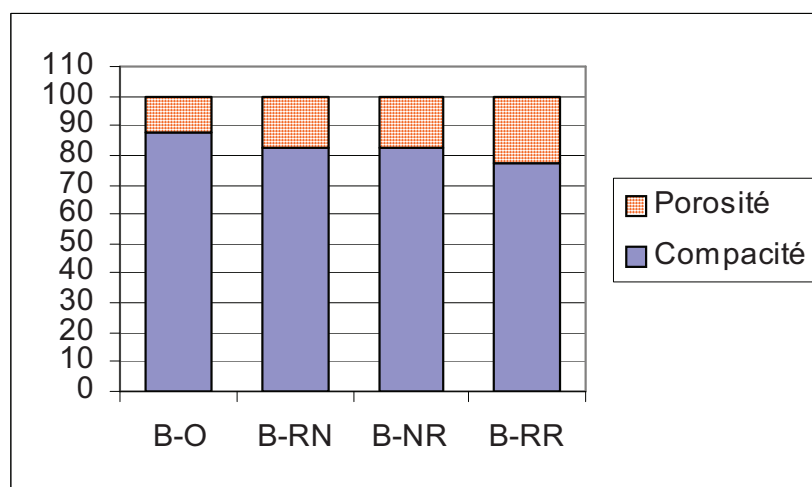


Figure VI-10

Compacité et Porosité des Bétons (en %)

CONCLUSION GÉNÉRALE
ET
RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE ET **RECOMMANDATIONS**

1 – CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude des caractéristiques des granulats à base de déchets de brique provenant de la briqueterie de Témacine et les propriétés des bétons à base de ces granulats ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le recyclage des déchets inertes pour produire des granulats contribue à limiter :
 - ♦ La mise en décharge de ces déchets,
 - ♦ Le déficit en granulats de la région,
 - ♦ Les transports des granulats vierges, et les transports de déchets (en sens inverse).
- Le recyclage des déchets de brique comme granulats est moins onéreux et ne demande pas pour son élaboration un matériel ou des stations spéciales comme celles conçues à l'élaboration des granulats recyclés à base de déchets de démolition et de construction.
- Des recherches antérieures ont montré que :
 - ♦ Il est possible de valoriser les déchets de brique comme granulats pour la fabrication du béton,
 - ♦ Les granulats de la brique concassée produisent, en général, des bétons dont la résistance est acceptable avec une réduction en poids appréciable,
 - ♦ La résistance des granulats de la brique concassée est fonction de la résistance de la brique originale, ce qui représente un avantage au préalable, dans le choix de type de brique à utiliser

et qui serait convenable comme granulats dans la production de béton,

- ◆ Le granulats de la brique concassée peut être utilisé pour produire du béton de haute qualité,
 - ◆ La résistance du béton est fonction de la densité des granulats de brique. Plus la densité des granulats est importante plus la résistance du béton est grande,
 - ◆ Des bétons de la brique concassée, de masse volumique apparente de l'ordre de 2000 kg/m^3 , ont donné des résistances à la compression identiques à celle des bétons normaux. En conséquence, ils ne peuvent être appelés « bétons légers »,
 - ◆ Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel,
 - ◆ Les granulats à base de brique concassée conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, conduites de fumées, de sols d'usines sidérurgiques, de parties de fours ...etc,
 - ◆ Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal. Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton.
- Les granulats recyclés, obtenus par concassage des déchets de briques, provenant de la briqueterie de Temacine, ont une masse volumique réelle inférieure à 2 t/m^3 . Il s'agit de « granulats légers », d'après la norme française [XP P 18 - 540].
 - La masse volumique apparente des granulats recyclés expérimentés est de l'ordre de 25 % inférieure à celle des granulats naturels, ce qui représente un avantage économique en poids du béton.
 - Le sable recyclé obtenu, est un sable friable, qui est déconseillé aux cas d'usure. Il favorise aussi la perméabilité et l'augmentation de l'air occlus dans le béton par sa granulométrie grossière.

- Les gravillons recyclés obtenus, présentent des propriétés acceptables pour la confection des bétons courants. Cependant, ils ont une faible résistance mécanique qui contribue à la diminution de la résistance globale du béton.
- La procédure de la reproduction du mélange pour bétons de granulats normal, peut être utilisée avec succès pour la production du béton de brique concassée.
- La quantité d'eau ajoutée aux mélanges à base de granulats de déchets de brique représente le coefficient d'absorption d'eau de ces granulats.
- Le pourcentage de l'air occlus dans le béton est d'autant plus élevé que le pourcentage des granulats en brique concassée augmente.
- L'aspect extérieur de couleur rouge éclairée des bétons confectionnés avec des sables de brique concassée peut offrir une voie nouvelle dans le domaine des bétons apparents.
- les bétons à base de déchets de brique confectionnés, présentent une homogénéité convenable et comparable à celle des bétons ordinaires.
- La masse volumique apparente du béton de brique concassée avec sable naturel est approximativement de 15 % inférieure à celle du béton normal.
- les bétons à base de déchets de brique obtenus sont des « bétons légers », d'après la norme européenne [NF EN 206 - 1].
- Le rapport de la masse volumique du béton ordinaire sur celle du béton entièrement en brique concassée est proportionnel au rapport de la masse volumique apparente des granulats naturels sur celle des granulats recyclés, ce qui représente l'avantage de pouvoir au préalable choisir les granulats recyclés en fonction du poids du béton désiré.
- La résistance à la compression des bétons à base de déchets de brique chute au fur et à mesure par substitution successive des granulats naturels par les granulats recyclés. Elle est de l'ordre de la moitié de celle du béton ordinaire à l'âge de 07 jours et augmente au fur et à mesure au cours du temps jusqu'à 66 à 80 % du béton ordinaire à l'âge de 90 jours.

- La résistance à la compression des bétons à base de granulats de déchets de brique trouvée est assimilable à celle trouvée par Debieb à l'âge de 28 jours, mais nettement supérieure à l'âge de 90 jours, malgré que les granulats de brique concassée utilisés par Debieb ont un Los Angeles de 31,6 % [Debieb 99, p. 96] qui est nettement inférieur au notre qui est de 65%. Ceci est dû à la bonne adhérence des granulats recyclés utilisés, dans notre étude, avec le mortier de ciment.
- La méthode d'estimation de la résistance à la compression du béton, par l'essai indirect d'auscultation dynamique, par vitesse du son, semble être fiable pour les bétons à base de déchets de brique.
- La résistance à la traction par flexion des bétons à base de déchets de brique chute par substitution partielle ou totale des granulats naturels par les granulats recyclés. Elle est de l'ordre de 30 à 45 % inférieure à celle du béton ordinaire à l'âge de 07 jours et augmente au fur et à mesure au cours du temps jusqu'à 80 à 90 % du béton ordinaire à l'âge de 90 jours.
- Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), la résistance à la traction du béton de granulats de brique concassée avec sable naturel et celle du béton de granulats entièrement en brique concassée sont respectivement de 17 % et 27 % supérieures à celle du béton ordinaire. Cette bonne résistance à la traction est due à la bonne adhérence mortier – granulats en brique concassée.
- Le module d'élasticité des bétons diminue par substitution successive des granulats naturels par les granulats de brique concassée. Cela confirme que le module d'élasticité du béton est conditionné par le module d'élasticité du granulat et par ses proportions volumétriques dans le béton.
- L'utilisation du sable naturel avec des granulats en brique concassée augmente sensiblement le module d'élasticité du béton.
- Le béton entièrement en brique concassée a des pertes de poids relativement grandes, surtout à long terme. L'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton due aux vides d'air.
- Le béton ordinaire avec le sable recyclé de brique concassée est plus absorbant que le béton de brique concassée avec le sable naturel. Cette

absorption est due à la porosité de la pâte de ciment (surtout en présence de sable de brique concassée) qui représente la seule phase continue dans le béton.

- L'absorption capillaire du béton entièrement en brique concassée est presque le double de celle du béton ordinaire.
- La porosité du béton augmente (compacité diminue) par substitution successive des granulats naturels par les granulats de brique concassée.
- Le béton entièrement en brique concassée est plus poreux, en conséquence plus perméable. Selon Gorisse [9], la porosité de ce béton correspond à celle d'un mauvais béton. Par contre, la porosité du béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée ainsi que celle du béton de brique concassée avec sable naturel correspondent à celle d'un béton satisfaisant.

Enfin, les recherches antérieures ont montré que l'utilisation du granulats grossier de brique concassée peut produire un béton de structure de haute résistance avec, une économie de poids allant jusqu'à 15 % et une diminution de quelques 20 % de la résistance, par rapport à un béton normal.

Par ailleurs, les bétons confectionnés dans cette étude, à base de granulats de déchets de brique de la briqueterie, ont donné des résultats satisfaisants et comparables à ceux trouvés dans les recherches antérieures, malgré la défaillance mécanique de ces granulats. Selon l'ACI [61], un défaut de résistance des grains peut ne pas empêcher l'utilisation d'un granulats dans un béton de structure.

Cependant, afin de valoriser ce type de déchets, d'apporter des améliorations aux caractéristiques des granulats à base de ces déchets et de connaître les performances extrêmes des bétons à base de ces granulats, des recommandations seront également données pour mieux apprécier et approfondir cette étude.

2 – RECOMMANDATIONS

- La résistance des granulats de la brique concassée est fonction de la résistance de la brique originale, en conséquence, de la qualité de la terre cuite. Donc, il est important d'assurer l'utilisation de l'argile de bonne qualité, de meilleur banc de la meilleure carrière.
- Les granulats recyclés produits ont une forme non ramassée qui dépend, en particulier, de la méthode de concassage utilisée. Selon Neville [11], les concasseurs à percussion produisent habituellement peu de particules plates ou allongées.
- Apporter des corrections à la courbe granulométrique du sable de déchets de brique concassée.
- Chercher la résistance extrême des bétons à base de granulats de déchets de brique concassée par :
 - ♦ La substitution partielle des granulats de la même classe granulaire,
 - ♦ L'augmentation du dosage en ciment,
 - ♦ La réduction de la grosseur maximale du gros granulat à 13 et à 10 *mm* [61],
 - ♦ L'utilisation d'un sable naturel moyen ($MF \approx 2,56$).
- Étudier la perméabilité et le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire en utilisant un sable de module de finesse moyen.
- Étudier l'isolation thermique ainsi que phonique des bétons à base de granulats de déchets de brique concassée.
- Étudier l'adhérence du béton à base de granulats de déchets de brique aux armatures (essais d'arrachement).

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Michel F.**, “ les Granulats – Industrie, Géologie et Environnement ”, UNICEM, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://www.unicem.fr/fr/documentaire/pdf/granulats.pdf>, (consulté en 2004).
- [2] **Ramachandran V. S.**, “ Utilisation des Déchets et Sous-produits comme Granulats du Béton ”, Conseil National de Recherches Canada, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd215f.html>, (consulté en 2004).
- [3] **Devenny A. et Khalaf F.M.**, “ The Use of Crushed Brick as Coarse Aggregate in Concrete ”, Masonry International, Vol. 12, N°. 3, 1999, p. 81 – 84.
- [4] **Cormon P.**, “ Bétons Légers d’Aujourd’hui ”, Éditions Eyrolles, Paris, 1973, p. 17 – 259.
- [5] **Akhtaruzzaman A.A. et Hasnat A.**, “ Properties of Concrete Using Crushed Brick as Aggregate ”, Concrete International, Vol. 5, N°. 2, Feb. 1983, p. 58 – 63.
- [6] **Dreux G. et Festa J.**, “ Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants ”, Éditions Eyrolles, 8^{ème} Edition, Paris, 1998, p. 26 – 394.
- [7] **Baron J. et Ollivier J.-P.**, “ Les Bétons, Bases et Données pour leur Formulation ”, Éditions Eyrolles, 2^{ème} Tirage, Paris, 1997, p. 188 – 293.
- [8] **Dupain R., Lanchon R. et Saint-Arroman J.-C.**, “ Granulats, Sols, Ciments et Bétons – Caractérisation des Matériaux de Génie Civil par les Essais de Laboratoire ”, Éditions Casteilla, 2^{ème} Édition, Paris, 2000, p. 26 – 394.
- [9] **Gorisse F.**, “ Essais et Contrôle des Bétons ”, Éditions Eyrolles, Paris, 1978, p. 32 - 139
- [10] **Derbala A.**, “ Contribution aux Possibilités d’Amélioration de la Qualité du Béton ”, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université de Blida, 1999.
- [11] **Neville Adam. M.**, “ Propriétés des Bétons ”, Éditions Eyrolles, Paris, 2000, p. 103 - 726

- [12] Norme Européenne **NF EN 12390-1**, Oct. 2001, “ Essai pour Béton Durci – Partie 1 : Forme, Dimensions et autres Exigences relatives aux Éprouvettes et aux Moules ”, Éditions AFNOR, Paris, 2001.
- [13] Norme Française **NF P 18-404**, Déc. 1981, “ Bétons – Essais d’Étude, de Convenance et de Contrôle – Confection et Conservation des Éprouvettes ”, Éditions AFNOR, Paris, 1981.
- [14] **Brahma A.**, “ Le Béton ”, Éditions OPU, Alger, 1996, p. 80 – 95.
- [15] Norme Française **NF P 18-010**, Déc. 1985, “ Bétons – Classification et Désignation des Bétons Hydrauliques ”, Éditions AFNOR, Paris, 1985.
- [16] **Mougin J.-P.**, “ Cours de Béton Armé, BEAL 91, Calcul des Éléments Simples et des Structures de Bâtiments ”, Éditions Eyrolles, 3^{ème} Tirage, Paris, 1997, p. 23.
- [17] **Fiches Techniques CIMBETON B1** “ Le Béton ”, Centre d’Information de l’Industrie Cimentier, Paris, 1997.
- [18] **Davidovici V.**, “ Formulaire du Béton Armé 1, Éléments de Calcul, Interface Béton Armé / Charpentes Métalliques ”, Éditions du Moniteur, Paris, 1996, p. 42 – 43.
- [19] **Figoli Y.**, “ l’Art de Bâtir ”, Modulo Éditeur, Volume 4, Québec, 1985, p. 108 – 113.
- [20] **de Larrard F.**, “ Construire en Béton – L’Essentiel sur les Matériaux ”, Presses ENPC, Paris, 2002, 199 p., p. 72 – 76.
- [21] **Bentata A.**, “ Étude Expérimentale d’un Béton avec Sable de Dune ”, Mémoire de Magister en Génie Civil – Université de Ouargla, 2004.
- [22] **Kedjour N.**, “ Propriétés et Pathologie du Béton ”, Éditions OPU, Alger, 1993, p. 129.
- [23] **D.T.R. – B.C. 2.41**, “ Règles de Conception et de Calcul des Structures en Béton Armé – C.B.A. 93 ”, Éditions CGS, Alger, 1994, p. 5 – 8.
- [24] **Kriker A.**, “ Durabilité du Béton à Base de Laitier ”, Mémoire de Magister en Génie Civil – ENP d’Alger, 1992.
- [25] **Benameur L.**, “ Comportement Structurel du Béton Léger à base d’Argile Expansé de Bouinan ”, Mémoire de Magister en Génie Civil - ENP d’Alger, 1991.
- [26] **Baron J. et Sauterey R.**, “ Le Béton Hydraulique, Connaissance et Pratique ”, Presses ENPC, Paris, 1995, p. 39 -57.
- [27] **Maillot R.**, “ Mémento Technique des Granulats ”, Presses École des Mines de Paris, Paris, 2001, p. 31 – 39.

- [28] Norme Française **XP P 18-540**, Oct. 1997, “ Granulats – Définitions, Conformité et Spécifications ”, Éditions AFNOR, Paris, 1997.
- [29] Norme Française **P 18-591**, Sept. 1990, “ Granulats – Détermination de la Propreté Superficielle ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [30] **Huberty J. M.**, “ Cours Spécialisé de Technologie du Béton, Chapitre XII : Les Bétons Spéciaux ”, Éditions Centre de Formation Professionnelle de la Technologie du Béton a.s.b.l. Kraainem, 1950, p. 12.
- [31] Norme Française **P 18-554**, Déc. 1990, “ Granulats – Mesures des Masses Volumiques, de la Porosité, du Coefficient d’Absorption et de la Teneur en Eau des Gravillons et Cailloux ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [32] Norme Française **P 18-557**, Sept. 1990, “ Granulats – Éléments pour l’Identification des Granulats ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [33] Norme Française **P 18-555**, Déc. 1990, “ Granulats – Mesures des Masses Volumiques, Coefficient d’Absorption et Teneur en Eau des Sables ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [34] **Komar A.**, “ Matériaux et Éléments de Construction ”, Éditions Mir, 3^{ème} Édition, Moscou, 1978, p. 188.
- [35] **Lefèvre M.**, “ la Gestion des Déchets en Europe : Notions de Droit Communautaire, Droit Allemand et Droit Français – Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ”, Recueil des communications, Éditeur GTZ, Alger, 2000.
- [36] “ Enquête sur l’Industrie de la Gestion des Déchets, 2000 – Guide de l’Enquête pour les secteurs des Entreprises et des administrations Publiques ”, Statistique Canada, Division des Comptes et de la Statistique de l’Environnement, [en ligne], 2002, Disponible sur : <http://www.unece.org/stats/documents>, (consulté en 2002).
- [37] “ Lexique Déchets ”, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.mines.inpl-nancy.fr/wwwenv/lexiques/lexique_dechet.htm, (consulté en 2004).
- [38] **Loi N° : 01-19 du 12 / 12 / 2001**, “ Relative à la Gestion, au Contrôle et à l’Élimination des Déchets ”, Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, N° : 77 du 15 / 12 / 2001.
- [39] **Pilon I. et Laquerre M.**, “ Guide d’Information sur le Recyclage des Matériaux Secs ”, RECYC – QUBEC, [en ligne], 2005, Disponible sur : http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/zzguide_509.pdf, (consulté en 2005).
- [40] “ Archives sur la Construction et la Démolition – Résumés – Bulletin d’Information sur la Technologie du Recyclage ”, Gouvernement du Canada, [en ligne], 2005, Disponible sur : <http://www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/rnet/consab-f.htm>, (consulté en 2005).

- [41] **Debieb F.**, “ Valorisation des Déchets de Briques et Béton de Démolition Comme Agrégats de Béton ”, Mémoire de Magister en Génie Civil – Université de Blida, 1999.
- [42] **Allal M.A.** et **Sayagh C.**, “ Recyclage des Déchets de Construction en Voiries – III^{ème} Congrès Algérien de la Route ”, Recueil des communications, Tome I, ARAL, Alger, 2001, p. 102.
- [43] **Bedjou S.**, “ Contribution à la Valorisation des Déchets de Construction – Étude du Recyclage des Débris de Terre Cuite ”, Mémoire de Magister en Génie Civil - ENP d’Alger, 2003.
- [44] **Nicolescu L.**, “ Généralités : Rapport Général – Colloque International sur l’Utilisation des Sous-produits et Déchets dans le Génie Civil ”, Recueil des communications, Volume III, ENPC, Paris, 1978, p. 15.
- [45] **Kleinlogel A.**, “ l’Influence des Divers Éléments Physico – Chimique sur les Bétons ”, Éditions Dunod, Paris, 1960, p. 75 – 140.
- [46] **Debaili F.**, “ Journées d’Information sur la Promotion de L’Investissement dans la Fabrication des Produits Rouges ”, Revue Construire N°34, CNAT, Alger, 1990.
- [47] “ Annuaire Statistique 2004 de la Wilaya de Ouargla ”, Ministère des Finances, DGB, DPAT, février 2005.
- [48] **Lanquetin A-S.**, “ Guide Pratique de l’Entreprise du Bâtiment – Déchets du Bâtiment : Quelles Solutions dans le Val d’Oise ? ”, Chambre Régionale de Métiers de Basse-Normandie, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://www.cm-cergy.fr/dossiers/guide-.pdf>, (consulté en 2004).
- [49] **Ademe P-C.**, “ Guide des Déchets de l’Artisanat ”, APCEDE, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://www.apcede.com/artisan/dechet/>, (consulté en 2004).
- [50] “ la Mise en Décharge des Déchets Inertes ”, Nouvelles Conditions 1999, Open, Service de l’Environnement (SEN), [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.fr.ch/sen/pdf/pdf_broch_fr/broch_inert.pdf, (consulté en 2004).
- [51] “ Module N° 1 : « Connaître les Déchets » ”, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://www.giraudbtp.com/life/fr/guidebonnepratique04/LiG3-GBPDC-volet1.htm>, (consulté en 2004).
- [52] **Boughazi M. A.**, “ Préface – Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ”, Recueil des communications, Éditeur GTZ, Alger, 2000.
- [53] **Schilling N.**, “ l’Industrie Française de la Terre Cuite : la Dynamique d’une Filière en Plein Développement ”, Fédération Française de Tuiles et Briques, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.fftb.org/actualites/cdp_fftb_court.pdf, (consulté en 2004).

- [54] “ Guide pour une Construction et une Rénovation Respectueuses de l’Environnement – Annexe E ”, Services d’Architecture et de Génie – Services Gouvernementaux Canada, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.ercr_handbook_appende-f.html, (consulté en 2004).
- [55] **Hueber D.**, “ Manuel d’Information sur la Gestion des Déchets Solides Urbains ”, Éditeur GTZ GmbH, Impression En Nakhla , Alger, 2001, p. 159.
- [56] **Bairagi N.K., Vidyadhara H.S. et Kishore Ravande**, “ Mix Design Procedure For Recycled Aggregate Concrete ”, Construction & Building Materials, Vol. 4, N°. 4, December 1990, p. 188.
- [57] “ Orientations Prioritaires et Objectifs à Atteindre dans le Monde d’Approvisionnements des Granulats ”, DRIRE de Franche-comté, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.franche-comte.drivre.gouv.fr/ssol/carrieres/.../hs/orien_prio.htm, (consulté en 2004).
- [58] “ Chapitre C : Matériaux et Produits de Construction ”, Cahier des Charges Type de la Région Wallonne, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://routes.wallonie.be/entreprise/cctrw99/cct/doc/chapitre_c.pdf, (consulté en 2004).
- [59] Norme Européenne **NF EN 206-1**, Fév. 2002, “ Béton – Partie 1 : Spécification Performances, Production et Conformité ”, Éditions AFNOR, Paris, 2002.
- [60] **Arnould M. et Virlogeux M.**, “ Granulats et Bétons Légers ”, Presse ENPC, Paris, 1986, p. 3 – 4.
- [61] Comité 213 de l’**A.C.I.**, “ Guide pour le Béton de Structure à Base de Granulats Légers ”, Traduction et Diffusion le C.A.T.E.D., Paris, 1970, p. 12 – 30.
- [62] “ Bouwmaterialen ”, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.lessius-ho.be/vip-term/databank_bouwmaterialen2.htm, (consulté en 2004).
- [63] **Kibriya T. et Speare P.R.S.**, “ The Use of Crushed Brick Coarse Aggregate in Concrete ”, Concrete for Environment Enhancement and Protection, Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, June 1996, p. 495 – 503.
- [64] **Olivier É.**, “ Technologie des Méthodes de Construction – Tome 3 : Les Bétons ”, Entreprise Moderne d’Édition, 5^{ème} Édition actualisée, Paris, 1980, p. 358.
- [65] Norme Algérienne **NA 442**, 2000, “ Liants Hydrauliques – Ciments Courants : Composition, Spécifications et Critères de Conformité ”, Éditions IANOR, Alger, 2000.
- [66] Norme Française **NF P 15-301**, Juin 1994, “ Liants Hydrauliques – Ciments Courants : Composition, Spécifications et Critères de Conformité ”, Éditions AFNOR, Paris, 1994.

- [67] Norme Européenne **NF EN 197-1**, Fév. 2001, “ Ciment – Partie 1 : Composition, Spécifications et Critères de Conformité des Ciments Courants ”, Éditions AFNOR, Paris, 2001.
- [68] Norme Française **XP P 18-303**, Août. 1999, “ Eau de Gâchage pour Béton ”, Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [69] “ Clauses Techniques : C.T. 7/75 ”, GRAND – DUCHE de Luxembourg, Ministère des Travaux Publics, Commission Permanente de Normalisation des Matériaux de Construction, [en ligne], 2004, Disponible sur : <http://www.etat.lu/pch/public/structureorg/labomater/>, (consulté en 2004).
- [70] Norme Européenne **NF EN 1008**, Juil. 2003, “ Eau de Gâchage pour Bétons – Spécifications d’Échantillonnage, d’Essai 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 ”, Éditions AFNOR, Paris, 2003.
- [71] Norme Européenne **NF EN 932-1**, Déc. 1996, “ Essai pour Déterminer les Propriétés Générales des Granulats – Partie 1 : Méthodes d’Échantillonnage ”, Éditions AFNOR, Paris, 1996.
- [72] Norme Européenne **NF EN 932-2**, Août 1999, “ Essai pour Déterminer les Propriétés Générales des Granulats – Partie 2 : Méthodes de Réduction d’un Échantillon de Laboratoire ”, Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [73] Norme Européenne **NF EN 933-2**, Mai 1996, “ Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 2 : Détermination de la Granularité – Tamis de Contrôle, Dimensions Nominales des Ouvertures ”, Éditions AFNOR, Paris, 1996.
- [74] Norme Européenne **NF EN 933-1**, Déc. 1997, “ Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 1 : Détermination de la Granularité – Analyse Granulométrique par Tamisage ”, Éditions AFNOR, Paris, 1997.
- [75] Norme Européenne **NF EN 1097-3**, Août 1998, “ Essai pour Déterminer les Caractéristiques Mécaniques et Physiques des Granulats – Partie 3 : Méthode pour la Détermination de la Masse Volumique en Vrac et de la Porosité Intergranulaire ”, Éditions AFNOR, Paris, 1998.
- [76] **Kedjour N.**, “ le Laboratoire du Béton ”, Éditions OPU, Alger, 2005, p. 126.
- [77] Norme Française **P 18-598**, Oct. 1991, “ Granulats – Équivalent de Sable ”, Éditions AFNOR, Paris, 1991.
- [78] Norme Française **P 18-597**, Déc. 1990, “ Granulats – Détermination de la Propreté des Sables : Équivalent de Sable à 10 % de Fines ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.

- [79] Norme Française **P 18-576**, Déc. 1990, “ Granulats – Mesure du Coefficient de Friabilité des Sables ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [80] Norme Européenne **NF EN 933-3**, Mars 1997, “ Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 3 : Détermination de la Forme des Granulats – Coefficient d’Aplatissement ”, Éditions AFNOR, Paris, 1997.
- [81] Norme Française **P 18-573**, Déc. 1990, “ Granulats – Essai Los Angeles ”, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [82] Norme Européenne **NF EN 12350-2**, Déc. 1999, “ Essai pour Béton Frais – Partie 2 : Essai d’Affaissement ”, Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [83] Norme Européenne **NF EN 12350-6**, Déc. 1999, “ Essai pour Béton Frais – Partie 6 : Masse Volumique ”, Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [84] Strassentest **Baustoff – Prüfsysteme**, “ Operating Instructions for Type 0333.79 Air Entrainment Meter 8 l with Hand pump in accordance with German Industrial Standard DIN 1048 ”.
- [85] Norme Européenne **NF EN 12390-7**, Sept. 2001, “ Essai pour Béton Durci – Partie 7 : Masse Volumique du Béton ”, Éditions AFNOR, Paris, 2001.
- [86] Norme Européenne **NF EN 12390-3**, Fév. 2003, “ Essai pour Béton Durci – Partie 3 : Résistance à la Compression des Éprouvettes ”, Éditions AFNOR, Paris, 2003.
- [87] Norme Française **NF P 18-407**, Déc. 1981, “ Bétons – Essai de Flexion ”, Éditions AFNOR, Paris, 1981.
- [88] Norme Française **P 18-418**, Déc. 1989, “ Béton – Auscultation Sonique, Mesure du Temps de Propagation d’Ondes Soniques dans le Béton ”, Éditions AFNOR, Paris, 1989.
- [89] Norme Française **NF P 18-427**, Déc. 1996, “ Bétons – Détermination des Variations Dimensionnelles entre deux Faces Opposées d’Éprouvettes de Béton Durci ”, Éditions AFNOR, Paris, 1996.
- [90] Norme Européenne **NF EN 480-5**, Sept. 1996, “ Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis – Méthodes d’Essai – Partie 5 : Détermination de l’Absorption Capillaire ”, Éditions AFNOR, Paris, 1996.
- [91] **Queisser A.**, “ Bétons et Mortiers – Cours Matériaux de Construction ”, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://www.expert-centre.epfl.ch/cours/.../mat2_2003-12-01_cours7.pdf, (consulté en 2004).
- [92] **D.T.R. – B.E. 2.1**, “ Règles d’Exécution des Travaux de Construction d’Ouvrages en Béton Armé ”, Éditions CGS, Alger, 1991.

ANNEXES

ANNEXE A1

FEUILLES DES ESSAIS EFFECTUÉS

Tableau A1-1

Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Sable Naturel de Classe (0/5)				
Procédé utilisé : Tamisage par voie sèche				
Masse sèche $M_1 = 2240,05$ g				
Masse sèche après lavage $M_2 =$ /				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$ /				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
5	0,00	0,00	0,00	100
2,5	36,07	36,07	1,61	98
1,25	176,74	212,81	9,50	91
0,63	527,98	740,79	33,07	67
0,315	1072,31	1813,10	80,94	19
0,160	353,25	2166,35	96,71	3
0,080	57,80	2224,15	99,29	0,70
Fond	P = 12,80			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm :				
$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 0,57$				
$\sum R_i + P = 2236,95$ g			MF = 2,23	
Pourcentage de pertes :				
$\frac{M_1 - (\sum R_i + P)}{M_1} \times 100 = 0,14$			< 1%	

Tableau A1-2
Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Sable Recyclé de Brique Concassée de Classe (0/5)				
Procédé utilisé : Lavage et Tamisage				
Masse sèche $M_1 = 2237,57$ g				
Masse sèche après lavage $M_2 = 1986,99$ g				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 = 250,58$ g				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
5	1,07	1,07	0,05	100
2,5	763,03	764,10	34,15	66
1,25	427,65	1191,75	53,26	47
0,63	178,22	1369,97	61,23	39
0,315	118,12	1488,09	66,50	34
0,160	160,75	1648,84	73,69	26
0,080	260,23	1909,07	85,32	14,70
Fond	P = 73,89			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 14,50$				
$\sum R_i + P = 1982,96$ g			MF = 2,89	
Pourcentage de pertes : $\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 = 0,20$			< 1%	

Tableau A1-3
Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Gravillon Naturel de Classe (3/8)				
Procédé utilisé : Tamisage par voie sèche				
Masse sèche $M_1 = 3084,77 \text{ g}$				
Masse sèche après lavage $M_2 = /$				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 = /$				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
8	3,34	3,34	0,11	100
6,3	326,67	330,01	10,70	89
5	737,94	1067,95	34,62	65
2,5	1882,75	2950,70	95,65	4
1,25	113,80	3064,5	99,34	1
0,63	3,76	3068,26	99,47	1
0,315	1,44	3069,70	99,51	0
Fond	$P = 6,75$			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 0,22$				
$\sum R_i + P = 3076,45 \text{ g}$				
Pourcentage de pertes :				
$\frac{M_1 - (\sum R_i + P)}{M_1} \times 100 = 0,27$				< 1%

Tableau A1-4
Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Gravillon Recyclé de Brique Concassée de Classe (3/8)				
Procédé utilisé : Tamisage par voie sèche				
Masse sèche $M_1 = 2418,66 \text{ g}$				
Masse sèche après lavage $M_2 = /$				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 = /$				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
8	6,44	6,44	0,27	100
6,3	664,91	671,35	27,76	72
5	671,86	1343,21	55,54	44
2,5	961,92	2305,13	95,31	5
1,25	59,22	2364,35	97,76	2
0,63	3,12	2367,47	97,88	2
0,315				
Fond	$P = 43,03$			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 1,78$				
$\sum R_i + P = 2410,50 \text{ g}$				
Pourcentage de pertes :				
$\frac{M_1 - (\sum R_i + P)}{M_1} \times 100 = 0,34$				< 1%

Tableau A1-5
Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Gravillon Naturel de Classe (8/15)				
Procédé utilisé : Tamisage par voie sèche				
Masse sèche $M_1 = 4603,41$ g				
Masse sèche après lavage $M_2 =$ /				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$ /				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
16	20,42	20,42	0,44	100
12,5	1047,61	1068,03	23,20	77
10	1534,03	2602,06	56,52	44
8	1294,04	3896,10	84,64	15
6,3	626,22	4522,32	98,24	2
5	61,08	4583,40	99,57	0
2,5	14,58	4597,98	99,88	0
Fond	$P = 3,86$			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 0,08$				
$\sum R_i + P = 4601,84$ g				
Pourcentage de pertes :				
$\frac{M_1 - (\sum R_i + P)}{M_1} \times 100 = 0,03$				< 1%

Tableau A1-6
Analyse Granulométrique par Tamisage (Norme EN 933-1)

Gravillon Recyclé de Brique Concassée de Classe (8/15)				
Procédé utilisé : Tamisage par voie sèche				
Masse sèche $M_1 = 3571,77$ g				
Masse sèche après lavage $M_2 =$ /				
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$ /				
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus (R_i) (g)	Masse des refus cumulés (R_n) (g)	Pourcentage des refus cumulés $(R_n/M_1) \cdot 100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100 - (R_n/M_1 \times 100)$
16	0,00	0,00	0,00	100
12,5	906,43	906,43	25,38	75
10	1355,50	2261,93	63,33	37
8	984,67	3246,60	90,90	9
6,3	259,69	3506,29	98,17	2
5	16,99	3523,28	98,64	1
2,5	19,37	3542,65	99,19	1
Fond	$P = 18,92$			
Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis 0,080 mm $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 = 0,52$				
$\sum R_i + P = 3561,57$ g				
Pourcentage de pertes :				
$\frac{M_1 - (\sum R_i + P)}{M_1} \times 100 = 0,29$				< 1%

Tableau A1-7

Détermination du Coefficient d'Aplatissement (Norme EN 933-3)

Gravillon Naturel de Classe (8/15)				
Masse de la prise d'essai $M_0 = 4603,41 \text{ g}$		Refus sur un tamis de 20 mm $R = 0,00$		
		Passant sur un tamis de 4 mm $P = 6,57 \text{ g}$		
		Matériaux éliminés $R + P = 6,57 \text{ g}$		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Classes granulaires d/D (mm)	M_{g_i} (g)	Écartement des grilles (mm)	Passant M_{e_i} (g)	$A_i = \frac{M_{e_i}}{M_{g_i}} \times 100$
16 / 20	20,42	10	0,00	0,00
12,5 / 16	1047,61	8	83,08	7,93
10 / 12,5	1534,03	6,3	176,46	11,50
8 / 10	1294,04	5	238,89	18,46
6,3 / 8	626,22	4	140,26	22,40
5 / 6,3	61,08	3,15	14,95	24,48
4 / 5	11,87	2,5	1,47	12,38
$M_1 = \sum M_{g_i} = 4595,27 \text{ g}$		$M_2 = \sum M_{e_i} = 655,11 \text{ g}$		
$A_p = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 14$				
Vérification :				
$100 \times \frac{M_0 - \{M_1 + (R + P)\}}{M_0} = 0,03$				< 1%

Tableau A1-8

Détermination du Coefficient d'Aplatissement (Norme EN 933-3)

Gravillon Recyclé de Brique Concassée de Classe (8/15)				
Masse de la prise d'essai $M_0 = 3571,77 \text{ g}$		Refus sur un tamis de 20 mm $R = 0,00$ Passant sur un tamis de 4 mm $P = 29,07 \text{ g}$ Matériaux éliminés $R + P = 29,07 \text{ g}$		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Classes granulaires d/D (mm)	M_{g_i} (g)	Écartement des grilles (mm)	Passant M_{e_i} (g)	$A_i = \frac{M_{e_i}}{M_{g_i}} \times 100$
16 / 20	0,00	10	0,00	0,00
12,5 / 16	906,43	8	164,68	18,17
10 / 12,5	1355,50	6,3	221,75	16,36
8 / 10	984,67	5	207,28	21,05
6,3 / 8	259,69	4	70,32	27,08
5 / 6,3	16,99	3,15	5,86	34,49
4 / 5	9,20	2,5	2,15	23,37
$M_1 = \sum M_{g_i} = 3532,48 \text{ g}$		$M_2 = \sum M_{e_i} = 672,04 \text{ g}$		
$A_p = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 19$				
Vérification :				
$100 \times \frac{M_0 - \{M_1 + (R + P)\}}{M_0} = 0,29$				< 1%

Tableau A1-9*Masse Volumique et Air Occlus des Bétons Frais*

Désignations	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Masse Volumique (kg/m^3)	2370	2170	2120	2000
Air occlus (%)	1,50	2,40	3,40	4,20

Tableau A1-10*Masses Volumiques des Bétons Durcis*

Désignation	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Masse Volumique (kg/m^3)	2220 ± 10	1990 ± 10	1900 $\pm 0,0$	1740 ± 10

Tableau A1-11*Résistance à la Compression des Bétons sur Cube*

Types de Béton	3 jours		7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
B-O	20,5 $\pm 0,5$	100	23,0 $\pm 1,0$	100	30,5 $\pm 1,0$	100	38,5 $\pm 1,0$	100
B-RN	9,5 $\pm 0,0$	46	12,0 $\pm 0,5$	52	20,5 $\pm 1,0$	67	31,0 $\pm 0,5$	81
B-NR	10,0 $\pm 0,5$	49	11,5 $\pm 0,0$	50	20,5 $\pm 0,5$	67	26,5 $\pm 1,5$	69
B-RR	7,0 $\pm 0,5$	34	11,5 $\pm 0,0$	50	19,5 $\pm 0,5$	64	25,5 $\pm 2,0$	66

Tableau A1-12*Résistances à la Compression et Masses Volumiques des Bétons*

Désignations	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Masse Volumique à l'Air (kg/m^3)	2260	2020	1940	1780
Masse Volumique À l'Étuve (kg/m^3)	2220	1990	1900	1740
Rc (MPa)	30,5	20,5	20,5	19,5

Tableau A1-13*Vitesses de Propagation du Son dans les Bétons*

Désignation	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Vitesse du Son (m/s)	4970	4390	3910	3580

Tableau A1-14*Résistance à la Traction des Bétons*

Types de Béton	7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
B-O	2,5 ± 0,3	100	3,3 ± 0,1	100	3,9 ± 0,2	100
B-RN	1,6 ± 0,1	64	3,2 ± 0,1	97	3,6 ± 0,4	92
B-NR	1,4 ± 0,4	56	2,6 ± 0,2	79	3,5 ± 0,3	90
B-RR	1,7 ± 0,1	68	2,7 ± 0,3	82	3,1 ± 0,2	80

Tableau A1-15
Pertes de Poids des Bétons au Cours du Temps

Types de Béton	Pertes de poids (%)				
	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours
B-O	1,71	1,90	2,24	2,60	2,93
B-RN	4,35	5,36	5,65	5,84	6,70
B-NR	4,32	5,28	5,41	5,68	6,76
B-RR	4,60	6,17	7,09	8,03	11,54

Tableau A1-16
Absorption d'Eau par Remontée Capillaire des Bétons

Bétons	Absorption d'eau par capillarité en grammes								
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
B-O	5,68 ± 1,53	9,02 ± 0,77	10,94 ± 0,88	12,18 ± 0,76	13,09 ± 0,66	14,25 ± 0,70	15,08 ± 1,03	16,49 ± 0,79	17,59 ± 1,21
B-RN	10,76 ± 0,82	14,08 ± 1,22	16,24 ± 1,28	17,72 ± 0,88	19,50 ± 1,51	20,89 ± 2,02	21,97 ± 1,09	23,66 ± 1,19	24,31 ± 1,70
B-NR	8,62 ± 0,06	11,41 ± 1,19	13,62 ± 0,60	15,09 ± 0,59	17,27 ± 0,13	18,50 ± 0,25	19,61 ± 0,44	20,39 ± 0,44	21,57 ± 0,54
B-RR	12,43 ± 0,87	17,05 ± 0,64	20,64 ± 1,01	23,93 ± 1,34	26,14 ± 1,26	28,15 ± 1,15	30,21 ± 0,95	32,76 ± 1,07	33,74 ± 1,13

Tableau A1-17
Compacité et Porosité des Bétons

Désignations	B-O	B-RN	B-NR	B-RR
Porosité (%)	12,16	17,59	17,33	22,32
Compacité (%)	87,84	82,41	82,67	77,68

ANNEXE A2

MATÉRIELS ET ESSAI D'IDENTIFICATION

DES GRANULATS



Photo A2-1
Diviseur à Couloirs pour Gravillons



Photo A2-2
Réduction d'un Échantillon par Quartage



Photo A2-3
*Mini Concasseur
à Mâchoires*



Photo A2-4
Tamis à Mailles Carrées



Photo A2-5
Grilles à Fentes Parallèles



Photo A2-6
Éprouvette Graduée + Récipient



Photo A2-7
Pycnomètre + Récipient



Photo A2-8
Appareil Micro-Deval



Photo A2-9
*Récipients de Mesure de la densité
Apparente des Granulats*



Photo A2-10
Appareillage d'Équivalent de Sable



Photo A2-11
Appareil pour Essai Los Angeles

ANNEXE A3

MATÉRIELS ET ESSAIS DE BÉTONS



Photo A3-1
Moules et Éprouvettes Utilisés



Photo A3-2
Malaxeur à Béton



Photo A3-3
Table Vibrante



Photo A3-4
Appareillage de Slump - Test



Photo A3-5
Machine d'Essai de Compression



Photo A3-6
Machine d'Essai de Flexion

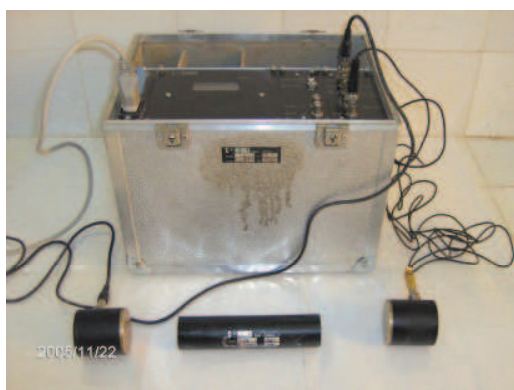


Photo A3-7
Appareil à Ultrasons



Photo A3-8
Aéromètre à Béton de 8 L

ANNEXE A4

DÉCHETS DE BRIQUE



Photo A4-1
*Déchets de Brique au Sein
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-2
*Déchets de Brique au Sein
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-3
*Déchets de Brique au Niveau
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-4
*Déchets de Brique au Sein
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-5
*Déchets de Brique au Sein
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-6
*Déchets de Brique au Sein
d'une Briqueterie Locale*



Photo A4-7
*Déchets de Chantier au Sein de
la Décharge de Bamendil*



Photo A4-8
*Déchets de Chantier au Niveau de
la Décharge Sauvage Bo-Amer*