

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

**UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**N° D'ordre :
Série :**

**Thèse de
DOCTORAT EN SCIENCES
En Génie Civil**

Option : Matériaux

**GRANULATS RECYCLES DE SUBSTITUTION POUR
BETONS HYDRAULIQUES**

BETON DE DEMOLITION - DECHETS DE BRIQUES - DECHETS DE VERRE

**Présentée par : BOURMATTE Nadjoua
Directeur de thèse : Pr HOUARI Hacène**

Composition de Jury :

Président:	Pr LASSOUED Rachid	Université des Frères Mentouri constantine
Rapporteur de thèse:	Pr CHIKH Nasr Eddine	Université des Frères Mentouri constantine
Examineurs:	Pr BELACHIA Mouloud	Université de Skikda
	Pr BENOUIS Abdelhalim	Université de Guelma
	Dr TEKKOUK Abdelhadi	Université des Frères Mentouri constantine
Membre invité:	Pr HOUARI Hacène	

Soutenue le 12 Mars 2017

Remerciements

Je voudrais remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur HOUARI Hacène, mon Directeur de thèse, qui en dirigeant ce travail, a toujours su me témoigner une grande confiance et me laisser une large part d'initiative. Je voudrais lui exprimer ici ma profonde gratitude pour l'intérêt, les conseils et le soutien qu'il m'a prodigués.

Je voudrais également adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur CHIKH NasrEddine Professeur à l'Université de Constantine, d'avoir accepté d'être mon rapporteur de thèse, Monsieur LASSOUED Rachid Professeur à l'Université de Constantine, pour avoir sacrifié de son temps, et accepter de présider le jury.

Je désire très sincèrement remercier Monsieur BELACHIA Mouloud Professeur à l'université de Skikda, Monsieur BENOUIS Abdelhalim professeur à l'Université de Guelma et Monsieur TEKKOUK Abdelhadi Maître de conférences A à l'Université de Constantine, pour avoir accepté la lourde tâche d'en être les examinateurs, malgré leurs multiples responsabilités.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les Professeurs et Membres des Laboratoires qui m'ont offert de l'aide que ce soit en Algérie ou en France: Messieurs LIMAM Ali, PERRA Jean, DEBICKI Gérard, Professeurs à l'INSA de Lyon, Monsieur MESBAH Habib Professeur à l'INSA de Rennes.

Je remercie Mademoiselle AMOURI Chahinez Maitre de conférences à l'Université de Constantine pour avoir été toujours disponible quand je criais au secours. Son soutien que je n'oublierai jamais (encore une fois merci ma très chère amie).

Je remercie en particulier ma mère (à qui je confiais tous mes soucis) pour son soutien lorsque j'ai passé de nombreux moments difficiles seule, m'épauler et me remonter le moral avec une patience infinie, m'a vraiment été chère. Qu'elle trouve dans ce travail le témoignage de ma gratitude. Je remercie également toute ma famille, mon mari et mes enfants: Marwa, Mouaiz et Moumene.

A la mémoire de mon père

Résumé

L'industrie des matériaux de construction est toujours accompagnée par des produits secondaires ou des déchets qui ont une incidence sur l'environnement. Dans les pays occidentaux le rejet des déchets solides, provenant des usines des matériaux de construction et de démolition des constructions, dans les décharges publiques est strictement interdit. La gestion des déchets solides est une des principales préoccupations environnementales dans le monde. Avec la rareté de l'espace de décharge, l'utilisation des déchets est devenue une alternative intéressante à l'élimination ; la recherche est menée sur l'utilisation des déchets et sous-produits en béton. Ces produits comprennent le béton de démolition, les déchets de verre et de brique, chacun de ces déchets a un effet spécifique sur le comportement du béton frais et durci, le programme de recherche comprend donc les travaux portant sur la valorisation de ces déchets, ainsi que sur le développement de nouveaux matériaux : bétons classiques ou autoplaçants et mortiers à base de ces granulats recyclés avec intégration de matières premières algériennes.

Dans notre étude, l'élaboration d'une première variété de bétons classiques était en faisant varier les taux de substitution en graviers recyclés de béton de démolition de (0- 25- 50 et 100%) avec variation du dosage en ciment : 250 - 350 et 450 Kg/m³, et des taux de (0 - 25 - 50%) en sable de déchets de verre pour une deuxième variété, tandis que pour l'élaboration des bétons autoplaçants, on a adopté des taux de substitution de (0 - 10 - 20 - 30 - 40 et 50%) en poudre de déchets de brique et (0 - 25 - 50 - 75 et 100%) en sable de déchets de brique pour les mortiers.

Dans cette étude, on a pu constater le comportement à l'état frais et durci des différents bétons élaborés, en confrontant les résultats avec ceux des études antérieures. Les granulats de béton recyclés sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des granulats recyclés est semblable à celle de la pierre concassée. Les bétons fabriqués avec ces granulats présentent une maniabilité acceptable. La résistance à la compression varie selon le taux de substitution : Plus le taux de substitution augmente, plus la résistance à la compression diminue, alors on peut utiliser ces granulats avec des taux limités dans le béton et le mortier.

Mots clés : bétons classiques / autoplaçants - déchets - environnement - granulats recyclés - mortiers - valorisation.

Abstract

The building materials industry is always accompanied by secondary products or waste that have an impact on the environment. In Western countries the rejection of solid waste from factories building materials and demolition of buildings in Discharges is strictly prohibited. The management of solid waste is a major environmental concern in the world. With the rarity of discharge space, the use of waste has become an attractive alternative to disposal; This research is conducted on the use of waste and by-products in concrete. These products include concrete demolition, waste glass and brick, each waste has a specific effect on the behavior of fresh and hardened concrete. The research program therefore includes work on waste recycling construction / demolition and by-products, as well as the development of new materials : traditional concretes/self-compacting or mortars based on these recycled aggregates with integration of Algerian raw materials.

In our study, the development of a first variety of conventional concretes was by varying the substitution rates of recycled concrete coarse aggregates: (0 - 25 - 50 - 100 %) with variation in cement dosage : 250, 350 and 450 Kg/m³ and rates of (0 - 25 - 50%) of glass waste for a second variety, while for the production of self-compacting concretes, we have adopted rates of (0 - 10 - 20 - 30 - 40 et 50%) of powder brick waste and (0 - 25 - 50- 75 - 100%) of brick waste sand for mortars.

In this study, we have seen the behavior of fresh and hardened of different materials developed with recycled aggregates, by comparing the results with other previous studies. The recycled concrete aggregates are generally more absorbent and less dense than ordinary aggregates. The shape of the recycled aggregates is similar to that of the crushed stone. Concretes made with these aggregates have good handling qualities, The compressive strength will vary depending on the substitution rate. More the substitution rate of recycled aggregates is increasing compressive strength decreases, and then we can use these aggregates with limited rates in concrete and mortar.

Keywords: traditional concrete / self-compacting concrete - waste - environment - recycled aggregates - mortars - valuation.

ثانوية أونفايات التي لها تأثير على البيئة. في الدول الغربية ر النفايات الصلبة من مصانع المواد و هدم المباني في مواقع دفن النفايات ممنوع منعاً باتاً. إدارة النفايات الصلبة ه البيئية الرئيسي . ساحة المكب ، أصبح استخدام النفايات بديلاً مهماً للتخلص منها، و أجريت استخدام النفايات والمنتجات الثانوية في الخرسانة وخليط . وتشمل هذه المنتجات مخلفات الهدم الخرسانية الزجاج من هذه النفايات لديها تأثير معين على سلوك الخرسانة اللب . وبالتالي يشمل برنامج البحث العمل على إعادة تدوير هذه مخلفات ، وكذلك تطوير مواد جديدة: الكلاسيكية/ذاتية القولية خليط أساس هذه الركام المعاد تدويرها باستخدام مواد أولية جزائية. الخرسانة الكلاسيكية كان بتغيير نسبة التعويض بحصى الخرسانة المهذمة (0-25-50 100%) مع تغيير تركيز الاسمنت 250-350-450 كلغ/ 3 و نسبة التعويض (0-25-50%) برمل بقايا الزجاج بالنسبة للنوع الثاني من الخرسانة الكلاسيكية اما بالنسبة للخرسانة ذاتية القولية تبيننا نسب التعويض (0-10-20-30-40 50%) من غيرة نفايات الطوبة المسحوقة و (0-25-75-50 100%) من رمل بقايا الطوبة لخلانط الرمل.

في هذه الدراسة ، المنجزة في الحالتين أليذ المهدمة المعاد تدويرها عادة ما تكون أكثر قدرة على الامتصاص و أقل كثافة العادية . بها . هذه المواد تدويرها لها صف السيولة مقبولة باختلاف نسبة التعويض. استبدال الركام المعاد تدويره ذلك يمكننا استخدام هذه المجاميع مع أ ي . مفناحية: ات كلاسيكية / ذاتية القولية, النفايات, البيئة, المعاد تدويره, تقييم.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE : DECHETS, REGLEMENTATION ET ENVIRONNEMENT

.1 Introduction	4
.2 Déchets et environnement.....	4
.2.1 Déchets en Algérie	4
.2.2 Naissance d'une véritable politique environnementale.....	6
.2.3 Problématiques des déchets.....	7
.2.4 Lois Algériennes concernant les déchets	10
.3 Gestion des déchets	11
.3.1 Définition.....	11
.3.2 Principe de gestion des déchets	11
.3.3 Technique de gestion des déchets.....	12
.3.3.1 Décharge.....	12
.3.3.2 Incinération.....	13
.3.3.3 Compost et fermentation	15
.3.3.4 Traitement biologique et mécanique	15
.3.3.5 Pyrolyse et gazéification	16
.4. Recyclage des déchets	16
.4.1 Définition	16
.4.2 Législation européenne relative aux déchets	17
.4.3 Technique de recyclage	17
.4.3.1 Procédés de recyclage	17

.4.3.2 La chaîne de recyclage.....	17
.5 Déchets utilisés dans le domaine de genie civil...	18
.5.1 Laitier.....	18
.5.1.1 Laitier de haut fourneau	18
.5.1.2 Laitier d'acier	19
.5.1.3 Sous-produits provenant des centrales thermiques	19
.5.1.4 Mâchefer	19
.5.1.5 Scories	20
.5.1.6 Cendres volantes.....	20
.5.1.7 Déchets divers	20
.6 Conclusion	23

CHAPITRE : GRANULATS RECYCLES ET BETONS

II.1 Introduction	24
II.2 Origine des granulats	24
II.3 Granulats de recyclage	25
II.3.1 Béton de démolition	25
II.3.1.1 Caractéristiques des granulats recyclés de béton.....	26
II.3.1.2 Caractéristiques morphologiques et physiques	29
II.3.1.3 Domaines d'utilisation des granulats recyclés de béton	31
II.3.1.4 Incorporation de granulats de béton de démolition dans les bétons	32
II.3.1.5 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de béton de démolition	37
II.3.2 Déchets de verre	40
II.3.2.1 Composition du verre	40
II.3.2.2 Réaction alcali-silice du verre	43
II.3.2.3 Réaction pouzzolanique du verre	47
II.3.2.4 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de déchets de verre	50
II.3.3 Déchets de brique.....	51
II.3.3.1 Définition	51
II.3.3.2 Principe de fabrication des briques	53
II.3.3.3 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de déchets de brique	57
II.4 Conclusion	58

CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1 Introduction	60
III.2 Matériaux de base utilisés	61
III.2.1 Matériaux utilisés pour Bétons à base de granulats de béton de démolition	62
III.2.2 Matériaux utilisés pour Bétons à base de déchets de verre.....	68
III.2.3 Matériaux utilisés pour Bétons Autoplaçants à base de déchets de brique.....	71
III.2.4 Matériaux utilisés pour Mortiers à base de déchets de brique.....	79
III.3 Composition des bétons et mélanges retenus.....	82
III.3.1 Composition des bétons ordinaires.....	82
III.3.1.1 Composition du béton BR0.....	82
III.3.1.2 Composition du béton BR100.....	83
III.3.1.3 Composition du béton BRV.....	84
III.3.2 Mélanges retenus.....	85
III.4 Essais de caractérisation des bétons ordinaires	87
III.4.1 Essais sur béton frais.....	87
III.4.2 Essais sur béton durci.....	88
III. 5 Concept des bétons autoplaçants	89
III. 6 Formulation du béton autoplaçant.....	100
III.7 Confection des mélanges et conservation des éprouvettes.....	103
III.8 Essais de caractérisation des bétons autoplaçants.....	105
III.8.1 Essais de caractérisation du BAP à l'état frais.....	105
III.8.2 Essais de Caractérisation du BAP à l'état durci.....	111
III.9 Essais sur mortiers.....	114
III.10 Conclusion	114

CHAPITRE IV : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction.....	116
IV.2 Béton à base de granulats recyclés de béton	116
IV.2.1 Ouvrabilité	116
IV.2.2 Air occlus.....	118

IV.2.3 Densité	119
IV.2.4 Résistance à la compression	120
IV.2.5 Résistance à la traction	121
IV.3 Béton à base de déchets de verre	123
IV.3.1 Résistance à la compression	123
IV.3.2 Résistance à la traction	125
IV.4 Béton autoplaçant à base des déchets de briques	127
IV.4.1 Etalement	128
IV.4.2 Boite en L	129
IV.4.3 Stabilité au tamis.....	130
IV.4.4 Essai de l'entonnoir	131
IV.4.5 Densité	131
IV.4.6 Résistance à la compression	133
IV.4.7 Résistance à la traction par flexion	134
IV.4.8 Absorption capillaire	136
IV.4.9 Variations pondérales et dimensionnelles	136
IV.5 Mortier à base de déchets de brique	138
IV.5.1 Résistance à la compression	138
IV.5.2 Résistance à la traction	141
IV.6 Conclusion	142
CONCLUSIONS GENERALES.....	145

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Figure .1: Compositions des déchets du bâtiment	10
Figure II.1 Schéma de fonctionnement d'une centrale de recyclage/concassage	27
Figure II.2 Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles	35
Figure II.3 Corrélation entre l'absorption d'eau et la densité des granulats recyclés	36
Figure II.4 Expansion de barres de mortiers confectionnées en remplaçant du ciment par du verre fin en présence de granulats poreux	44
Figure II.5 Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre	45
Figure II.6 Effet d'agent entraîneur d'air sur la réaction alcali silice (10% de verre)	46
Figure II.7 Effet du rapport E/C sur l'expansion d'éprouvettes de mortiers (10% de verre)	46
Figure II.8 Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes	48
Figure II.9 Schéma de la fabrication des Briques	56
Figure III.1 Composition granulométrique du sable de référence CEN	81
Figure III.2 Evolution de la Résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant	93
Figure III.3 Retrait des BAP et des BV	95
Figure III.4 Effet du dosage en superplastifiant sur le retrait total	96
Figure III.5 Perte de masse en fonction du temps	99
Figure III.6 Etapes de fabrication de BAP	104
Figure III.7 Essai de stabilité au tamis.....	109
Figure III.8 Mesure de la résistance à traction par flexion des 7x7x28 cm	112
Figure IV.1 Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton	117
Figure IV.2 Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton	118
Figure IV.3 Variation de la densité du béton frais en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton	119
Figure IV.4 Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les trois dosages à 28j	120
Figure IV.5 Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés de béton	121
Figure IV.6 Effort de traction appliqué sur le béton à base de granulats recyclés de béton pour les trois dosages à 28j	122

Figure IV.7 Influence du taux de substitution sur la résistance à la Traction des bétons à base de granulats recyclés de béton pour les trois dosages	122
Figure IV.8 Résistance à la compression du béton à base de déchets de verre en MPa	123
Figure IV.9 Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps	124
Figure IV.10 Résistance à la traction du béton à base de déchets de verre à en MPa	126
Figure IV.11 Développement de la résistance à la traction des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps	127
Figure IV.12 Etalement des BAP avec différents dosages avec T50	128
Figure IV.13 Résultats de l'essai de la boîte en L	130
Figure IV. 14 Résultats de l'essai de la stabilité au tamis	130
Figure IV.15 Résultats de l'essai de l'entonnoir	131
Figure IV.16 Densité des BAP	132
Figure IV.17 Résistances à la compression des BAP	133
Figure IV 18 Résistance à la traction par flexion des BAP	134
Figure IV. 19 Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction par flexion	135
Figure IV.20 Confrontation des résultats de corrélation avec le BAEL	135
Figure V.21 Influence du taux de substitution en déchets de brique sur l'absorption d'eau par capillarité des BAP	136
Figure IV.22 Evolution de la perte en poids des BAP	137
Figure IV.23 Evolution de la déformation du retrait totale des différents mélanges	138
Figure IV.24 Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression des mortiers	139
Figure IV.25 Evolution de la résistance à la compression des mortiers à base de déchets de brique .	140
Figure IV.26 Influence du taux de substitution sur la résistance à la traction des mortiers	141
Figure IV.27 Evolution de la résistance en Traction des mortiers à base de déchets de briques	142

Liste des photos

Photo II.1 Composition des granulats recyclés de béton.....	25
Photo II.2 Interface granulat naturel / pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton	31
Photo II.3 Réaction pouzzolanique	47
Photo II.4 Briques en terre crue	52
Photo II.5 Briques en terre cuite	52
Photo III.1 Sable de verre utilisé	70
Photo III.2 Déchets de briques utilisés dans les BAP	75
Photo III.3 Filler calcaire utilisé dans les BAP	77
Photo III.4 Dispositif de mesure de l'air occlus	88
Photo III.5 Dispositif de l'essai de compression	89
Photo III.6 Dispositif de l'essai de traction par flexion	89
Photo III.7 Malaxeur utilisé	103
Photo III.8 Moules cubiques 10x10cm et moules prismatiques 7x7x28cm	104
Photo III.9 Cône d'Abrams pour la détermination de l'étalement	106
Photo III.10 Etalement pour T50	107
Photo III.11 Essai d'entonnoir	108
Photo III.12 La boîte en L	109
Photo III.13 Plots de retrait	112
Photo III.14 Retractomètre	113
Photo III.15 Essais d'absorption capillaire	114
Photo IV.1 Analyse de la galette à l'essai de l'étalement	129

Liste des tableaux

Tableau III.1 Caractéristiques physiques des granulats ordinaires	62
Tableau III.2 Analyse granulométrique des granulats ordinaires.....	63
Tableau III.3 Caractéristiques mécaniques des granulats ordinaires	63
Tableau III.4 Caractéristiques physiques des granulats recyclés (béton démolé)	64
Tableau III.5 Analyse granulométrique des granulats recyclés (béton démolé)	65
Tableau III.6 Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés (Béton démolé)	65
Tableau III.7 Composition chimique du clinker	66
Tableau III.8 Propriétés physiques du ciment	66
Tableau III.9 Composition minéralogique du clinker	67
Tableau III.10 Résistances mécaniques du ciment (bars)	67
Tableau III.11 Analyse chimique de l'eau de gâchage	68
Tableau III.12 Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats ordinaires	68
Tableau III.13 Analyse granulométrique des granulats ordinaires	69
Tableau III.14 Analyse granulométrique des granulats recyclés (déchets de verre)	70
Tableau III.15 Masses volumiques et équivalent de sable des granulats ordinaires	71
Tableau III.16 Caractéristiques physiques des granulats ordinaires.....	72
Tableau III.17 Analyse granulométrique des granulats ordinaires et Coefficient d'aplatissement	73
Tableau III.18 Caractéristiques mécaniques des granulats ordinaires (gravillon 8/15)	73
Tableau III.19 Composition chimique des déchets de brique broyés	74
Tableau III.20 Caractéristiques des déchets de brique broyés	74
Tableau III.21 Composition chimique du clinker	75
Tableau III.22 Composition minéralogique du clinker	76
Tableau III.23 Composition chimique du filler calcaire	76
Tableau III.24 Caractéristiques physiques des fillers	77
Tableau III.25 Caractérisation de Glenium 26	78
Tableau III.26 Caractéristiques physiques et chimiques des déchets de briques	79
Tableau III.27 Analyse granulométrique des granulats recyclés (déchets de briques)	80
Tableau III.28 Composition chimique du clinker.....	81

Tableau III.29 Propriétés physiques du ciment	81
Tableau III.30 Résistances mécaniques du ciment (bars)	82
Tableau III.31 Analyse chimique de l'eau de gâchage	82
Tableau III.32 Pourcentages pondéraux du mélange (granulats ordinaires)	83
Tableau III.33 Pourcentages pondéraux du mélange (granulats de Béton de démolition)	84
Tableau III.34 Pourcentages pondéraux du mélange	84
Tableau III.35 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR0)	85
Tableau III.36 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR25)	86
Tableau III.37 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR50)	86
Tableau III.38 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR100)	86
Tableau III.39 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Bétons BO, BRV25 et BRV50)	87
Tableau III.40 Quantité des constituants de base des deux compositions	101
Tableau III.41 Comportement des deux compositions à l'état frais	102
Tableau III.42 Composition des BAP	103
Tableau III.43 Essais et Valeurs recommandées caractérisant les BAP	110
Tableau IV.1 Résultats de l'essai de l'étalement des BAP	128
Tableau IV.2 Résistance à la Compression des mortiers à base de déchets de brique	139
Tableau IV.3 Résistance à la Traction des mortiers à base de déchets de brique	141

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'activité du bâtiment et des ouvrages d'art consomme des ressources naturelles et génère des quantités non négligeables de déchets, le besoin en bétons nouveaux pour répondre à la demande des grands projets d'aménagement nécessite de puiser davantage dans les carrières de granulats alluvionnaires, Ceci peut entraîner comme conséquence la pollution de nappes d'eau souterraines et la transformation des sites naturels, de plus la réglementation sur l'ouverture de nouvelles carrières, oblige à chercher des solutions dans le domaine du recyclage.

L'utilisation de granulats recyclés, bien qu'ils ne représentent qu'une faible part de la production, ne cesse de progresser. Leur réemploi dans le mortier et le béton conduit à une économie de granulats alluvionnaires. Le recyclage paraît d'autant plus intéressant qu'il génère un secteur d'activité nouveau pris en charge par l'ensemble « activités locales et industriels ».

La présente étude porte sur l'analyse des caractéristiques et le réemploi des granulats recyclés de béton et de contribuer à la réutilisation des déchets et sous-produits dans la fabrication des bétons et mortiers, Le programme de cette recherche comprend donc des travaux portant sur la valorisation de ces matériaux avec intégration de matières premières algériennes, Valoriser ces granulats issus des bétons de démolition ou d'autres déchets pour la fabrication d'un béton hydraulique peut étendre leur domaine d'utilisation actuel. Malgré plusieurs études de recherche pour une éventuelle utilisation avec des liants hydrauliques pour la construction d'ouvrages ou de bâtiments, les granulats recyclés trouvent peu d'application en tant que granulats de béton. Néanmoins des Pays comme la Suisse ou encore le Danemark ont adopté des normes pour la fabrication de béton de granulats recyclés.

Cette valorisation présente un intérêt d'ordre économique. En effet, le réemploi des matériaux de démolition pourrait être envisagé directement sur site ou sur les plateformes de recyclage chargées du traitement. Ces plateformes pourraient alors s'occuper de la fabrication de béton à base de ces granulats recyclés. La diminution des coûts de transports des granulats et des déchets de démolition constitue l'enjeu économique principal de ce projet, les granulats n'étant pas toujours disponibles à proximité des chantiers de construction.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci diminuerait l'épuisement des ressources naturelles.

En outre, le code de l'environnement (modifié par ordonnance le 17 décembre 2010) précise que « tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation ». De ce fait, le recyclage et le réemploi des déchets inertes représentent des solutions intéressantes et s'intègrent au concept de développement durable.

L'évolution actuelle de la réglementation en matière d'environnement conduit les producteurs de déchets à les valoriser ou les réutiliser en particulier dans différents domaines de la construction et par voie de conséquence de limiter la mise en décharge uniquement des déchets ultimes après stabilisation.

Les voies actuelles de valorisation des granulats recyclés sont des applications qui n'exigent pas de performances très élevées, telles que les blocs préfabriqués de construction, le béton de fondation, le béton de propreté. Ces granulats sont également réutilisés comme fond de forme dans les constructions routières, comme remblai et comme fond de tranchée ou drainage de plate-forme.

Plusieurs recherches à travers le monde ont permis de poser le problème de la faisabilité des bétons à base de granulats recyclés, les résultats obtenus à cet effet sont encourageants, cependant la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des granulats recyclés conduit à des bétons présentant des performances inférieures à celles des bétons classiques.

La condition fondamentale pour la valorisation de ces granulats est qu'ils remplissent la fonction requise dans la position qu'ils occupent et qu'ils continuent à remplir celle-ci durant toute l'existence de la construction sans manifester d'effets secondaires négatifs qui conduisent à des désordres dans l'ouvrage.

Afin d'atteindre nos objectifs, notre thèse a été structurée sur base de deux grandes parties : La première partie fait l'objet d'une recherche bibliographique tandis que la deuxième partie concerne l'approche expérimentale et regroupe les deux derniers chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue bibliographique détaillée sur les déchets, la politique et l'utilisation de ces produits dans le génie civil ainsi que l'intérêt et l'activité de

recyclage des matériaux de construction et de démolition sont présentes. L'aspect normatif du recyclage et la situation en Algérie sont également soulignés.

Le deuxième chapitre présente les propriétés et l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons et mortiers, une banque de données sur les études antérieures nous a permis de faire une confrontation de résultats.

Le troisième chapitre résume les différents matériaux et procédures utilisés dans le cadre du programme expérimental, les modalités d'essais sont également présentées.

En comparaison avec les granulats naturels, dans le quatrième chapitre, les propriétés des granulats recyclés utilisés et leurs caractéristiques spécifiques sont discutées.

Le dernier chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats de l'étude expérimentale, les propriétés des bétons classiques/autoplaçants et des mortiers à base des granulats recyclés aux états frais et durci sont analysées et confrontées avec les résultats trouvés dans quelques travaux antérieurs entretenus à travers le monde.

Enfin, les conclusions générales ainsi que les recommandations pour de futurs travaux sont présentées.

CHAPITRE :
DECHETS - REGLEMENTATION
ET ENVIRONNEMENT

CHAPITRE : DECHETS, REGLEMENTATION ET ENVIRONNEMENT

. 1 Introduction

La protection de l'environnement devient de plus en plus une préoccupation collective. Dans une vision intégrée de développement durable, la problématique des déchets doit être placée dans une perspective holistique de gestion des risques et des ressources, qui couvre tout le cycle de vie du déchet, depuis sa génération jusqu'au traitement ultime. Elle anticipe le déchet dès le stade projet, inclut les stratégies de réduction à la source, de valorisation et d'élimination.

Le recyclage permet une meilleure gestion des ressources, par valorisation des « déchets » et par économie des granulats naturels traditionnels. Son impact environnemental et écologique est conditionné également par la limitation des zones de dépôt, de l'ouverture de carrières et de l'exploitation des lits alluvionnaires.

Dans ce chapitre, nous présentons la réglementation concernant les déchets, la gestion et l'activité de recyclage de ces matériaux en abordant le cas de certains pays qui ont adopté cette politique et en soulignant la situation en Algérie. Nous présentons aussi les différents déchets utilisés dans le domaine du génie civil.

.2 Déchets et environnement

Un déchet 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 (loi française du 1975 du code de l'environnement).

.2.1 Déchets en Algérie

Le gisement de déchets ménagers produit annuellement en Algérie comporte une fraction récupérable non négligeable que les services du MATET estiment les valeurs suivantes:

Papiers 385 000 tonnes/an

Plastiques 130 000 tonnes/an

Métaux 100 000 tonnes/an

Verre 50 000 tonnes/an

Matière diverse 95 000 tonnes/an

D'après les données nationales, on peut résumer ce qui suit : [49]

- ❑ L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions tonnes de déchets ménagers.
- ❑ L'Algérie compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares.
- ❑ La décharge coûte annuellement à l'Algérie 0,19 % du PIB en impacts sur la santé et 0,13 % du PIB en pertes économiques (potentiel de recyclage et de valorisation non réalisés).
- ❑ Chaque année 200 000 tonnes de déchets d'emballages sont rejetés en Algérie. Les plastiques constituent 95% de ces emballages et les métaux représentent les 5% restants.
- ❑ Des 200 000 tonnes de déchets d'emballages rejetés annuellement, seulement 4000 tonnes sont récupérées soit 2% du gisement.
- ❑ Chaque année, 22000 tonnes de déchets d'activité de soins sont produits en Algérie.
- ❑ Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 1000 schémas directeurs de gestion des déchets solides urbains pour les différentes communes du pays.
- ❑ Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 300 Centres d'enfouissement Technique et décharges contrôlées.
- ❑ Il existe en Algérie 317 incinérateurs opérationnels pour la destruction des déchets d'activité de soins.
- ❑ Chaque année, les algériens utilisent près de 300 millions de piles et accumulateurs, soit environ 12 unités par habitant. On estime que 70% de ces piles finissent dans la nature ou à la décharge avec tous les risques de contamination de l'environnement par le mercure, le cadmium, le plomb, le zinc et le lithium.

.2.2 Naissance d'une véritable politique environnementale [50]

L'Algérie est en train de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la prolifération de l'habitation précaire. Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement. Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 Md, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), prévu jusqu'en 2010.

Le secteur de l'environnement connaît actuellement des mutations à travers notamment le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

- Sur le plan de la politique environnementale, le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) fixe les différents programmes environnementaux du pays pour 2001-2010. Ces politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution (FEDEP) qui intervient notamment pour aider les entreprises industrielles à réduire ou à éliminer leurs pollutions et les unités de collecte, de traitement et de recyclage des déchets, ainsi que par la nouvelle fiscalité écologique basée sur le principe du pollueur payeur afin d'inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement.

- Sur le plan législatif et réglementaire, plusieurs lois ont été promulguées :
 - Loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
 - Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.
 - Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.
 - Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.
 - Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.
 - Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable

- Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005. Le montant de la taxe est de 24.000DA/tonne de déchets liés aux activités de soin des hôpitaux et cliniques et de 10 500 DA/tonne de déchets industriels dangereux stockés.

➤ Sur le plan institutionnel, création de plusieurs organismes :

- Le Centre National des Technologies de Production plus Propres (CNTPP)
- L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.
- L'Agence Nationale des Déchets.
- Le Conservatoire National des Formations à l'environnement
- Le Centre National de Développement des Ressources Biologiques
- Le Commissariat National du Littoral.
- Le Centre National des Technologies de Productions plus Propres.
- Le Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable.

.2.3 Problématique des déchets [49]

➤ Déchets Solides et Urbains

Selon l'Agence Nationale des Déchets en Algérie, la production de déchets ménagers est estimée à 7 M tonnes/ an, chiffre en constante augmentation.

Les estimations chiffrées font état de 0,7kg/hbt/ jour dans les grandes villes, contre 0,5kg/hbt/jour dans les villes plus moyennes.

La solution technique retenue par l'Algérie pour le traitement des déchets ménagers est l'enfouissement. A ce titre, plusieurs centres d'enfouissement techniques (CET) ont été réalisés.

C'est la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets qui a fixé les bases de la mise en place d'un programme national de gestion des déchets ménagers (PROGDEM). Le schéma directeur a été défini et des appels d'offres sont lancés au niveau de chaque wilaya.

➤ Déchets Industriels

Le cadastre relatif à l'élimination des déchets spéciaux a été réalisé en 2002 et a donné lieu au Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux (PNADGES) qui a permis de caractériser le

déchets par typologie et niveau de dangerosité. Ce document est important car il permet de contrôler le suivi de l'évolution de la production des déchets spéciaux.

En effet, les estimations données par le MATET sont alarmantes : les stocks de déchets spéciaux sont estimés à 2.8 Mt. La production de déchets spéciaux est estimée à 325 000 tonnes/an. Ce stockage massif et la production non contrôlée de ces matières dangereuses ne sont évidemment pas anodins en terme de santé publique et d'incidence sur l'environnement.

Compte tenu de la législation en vigueur et conformément au principe du pollueur payeur défini dans le cadre du FEDEP (Fonds National de l'Environnement et de Dépollution), chaque industriel est responsable de ses déchets produits et à ce titre, il est tenu de les traiter.

Pourtant le cadre législatif n'est pas encore suffisamment contraignant puisque les industriels préfèrent encore s'acquitter de la taxe de déstockage plutôt que de traiter leurs déchets.

Le gisement de déchets spéciaux est essentiellement centré dans les régions Est (1ère région productrice de déchets spéciaux), Centre et Ouest dans les wilayas d'Alger, de Bejaïa, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran. 87% des déchets produits proviennent de ces zones, soient 282 000 tonnes/ an et détiennent à elles seules 95% des déchets détenus en stock.

➤ **Déchets Hospitaliers**

Ces déchets hospitaliers comprennent :

- Les Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux (DASRI)
- Les Déchets d'Activités de Soins Assimilables aux Ordures Ménagères (DAOM)
- Les Ordures Ménagères (OM)
- Les Recyclables (cartons notamment, papiers, plastiques...)
- Autres déchets Industriels Dangereux qui comprennent au moins une trentaine de filières.
- Autres déchets Industriels Non Dangereux.
- Les déchets radioactifs.
- Sont aussi gérés par les structures de santé les déchets verts.
- En Algérie, ils classent de plus les Pièces Anatomiques Identifiables d'Origine Humaine dans les déchets.

➤ **Déchets de la construction/démolition**

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement.

Les granulats recyclés qui proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes sont constitués de résidus des procédés de production et de transformation (déchets chimiques, emballages, bois traités ou non traités...). Ces déchets de démolition font partie des déchets industriels dans la classification usuelle (à distinguer des déchets urbains et des déchets agroalimentaires).

Il est nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets industriels.

Quatre grandes catégories présentées dans la Figure .1 permettent de classer ces déchets industriels:

- **Les déchets inertes désignés (DI):** La Directive européenne 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets définit un déchet inerte comme un déchet ne pouvant subir aucune modification physique, chimique ou biologique. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique. Ces déchets n'entraînent pas de pollution de l'environnement et ne peuvent nuire à la santé humaine.

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

- **Les déchets industriels banals (DIB) :** Un déchet est dit banal si est traité par les mêmes procédures que ceux employés pour les déchets ménagers. Ces déchets ne sont ni inertes, ni toxiques. Cette appellation est en cours de modification : Déchets Non Dangereux (DND).

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

- **Les déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD):** En opposition avec les DIB, ce type de déchet est traité par des procédés qui diffèrent de ceux employés pour les ordures ménagères. Ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement. Leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes.

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

- **Les déchets d'emballages** dont le traitement impose une valorisation au-delà d'une certaine quantité.

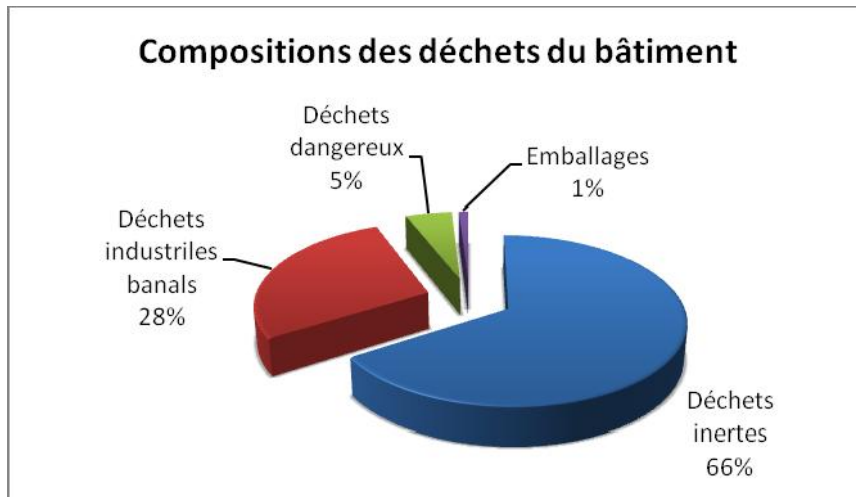


Figure .1: Compositions des déchets du bâtiment

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

En effet, la composition approximative des déchets de démolition se répartit comme suit: [73]

- béton (40 %),
- briques (30 %),
- bois (10 %),
- plastique (5 %),
- métaux (5 %),
- autres éléments (10 %).

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

.2.4 Lois Algériennes concernant les déchets [50]

- Loi N°90-08 portant code communal**
- Loi N°01-19 du 12/12/2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des Déchets
- Loi N°03-10 du 19/07/2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret exécutif n° 02-175 de la 20/05/2002** portant création de l'Agence Nationale des Déchets.

- ❑ **Décret exécutif n° 02-372 du 11/11/2002** relatif aux déchets d'emballages
- ❑ **Décret exécutif n° 04-199 du 19/07/2004** fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages « ECO-JEM »
- ❑ **Décret exécutif n° 04-410 du 14/12/2004** fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations,
- ❑ **Décret exécutif 07-205 du 30/06/2007** fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés

.3 Gestion des déchets

.3.1 Définition

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tout les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant.

La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité.

.3.2 Principe de gestion des déchets

Il y a plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions. La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- Réduire
- Réutiliser
- Recycler

Classe les politiques de gestion des déchets selon la préférence qu'on doit leur accorder. La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changé d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets: l'objectif est d'utiliser au maximum les matériaux et de générer le minimum de rebuts.

Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un « quatrième R »:

«Repenser», qui implique que le système actuel a des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "repensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile. Afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile. La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. Plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées (Paye quand tu jettes: *Pay As You Throw*) qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains.

L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production des déchets.

.3.3 Technique de gestion des déchets

.3.3.1 Décharge

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, et reste la pratique la plus courante dans la plupart des pays.

Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront.

Les anciennes carrières ou celles mal gérées peuvent avoir de forts impacts sur l'environnement, comme l'éparpillement des déchets par le vent, l'attraction des vermines et les polluants comme les lixiviats qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières. Un autre produit des décharges contenant des déchets nocifs et le biogaz, la plupart du temps composé de méthane et de dioxyde de carbone, qui est produit lors de la fermentation des déchets.

Beaucoup de décharges sont aussi équipées de systèmes d'extraction des gaz installés après le recouvrement pour extraire le gaz produit par la décomposition des déchets. Ce biogaz est souvent brûlé dans une chaudière pour produire de l'électricité. Il est même préférable pour l'environnement de brûler ce gaz que de le laisser s'échapper dans l'atmosphère, ce qui permet de consommer le méthane, un gaz à effet de serre encore plus nocif que le dioxyde de carbone. Une partie de ce biogaz peut aussi être utilisé comme carburant.

Beaucoup d'autorités locales, particulièrement dans les zones urbaines, ont des difficultés pour ouvrir de nouvelles décharges car les riverains s'y opposent. Peu de personnes veulent d'une décharge dans leur voisinage. C'est pourquoi le coût de stockage des déchets solides dans ces régions est plus coûteux, les détritiques devant être transportés plus loin pour être stockés.

Certains s'opposent aux décharges quelque soient les conditions ou le lieu, en expliquant qu'au final le stockage en décharge laissera une planète véritablement polluée avec plus aucune fissure ou espace sauvage.

Cet état de fait et la prise en compte croissante des impacts de la consommation excessive des ressources a permis, dans plusieurs régions, d'accroître les efforts pour minimiser la quantité de déchets mis en décharge. Ces efforts sont la mise en place de taxes ou prélèvements sur les déchets mis en décharge, le recyclage des matériaux, leur transformation en énergie, la conception de produits nécessitant moins de ressources, et une législation imposant aux fabricants la prise en charge des coûts d'emballage et de stockage des déchets. Un sujet connexe est le concept d'écologie industrielle, où les flux de matière entre les industries sont étudiés. Les sous produits d'une industrie peuvent être utiles à une autre, cela permet de réduire les flux de déchets.

.3.3.2 Incinération

L'incinération est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant. L'incinération est souvent appelée « Énergie à partir des déchets » ou « des déchets vers l'énergie »; ces appellations sont trompeuses puisqu'il y a d'autres façons de récupérer de l'énergie à partir de

déchets sans directement les brûler (voir fermentation, pyrolyse et gazéification).

Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés, comme les déchets médicaux biologiques. Beaucoup d'organisations utilisent aujourd'hui exposition des déchets à haute température pour les traiter thermiquement (cela inclut aussi la gazéification et la pyrolyse). Cette technique inclut la récupération du métal et de l'énergie des déchets solides municipaux comme le stockage adapté des résidus solides (mâchefers) et la réduction du volume des déchets.

L'incinération est une technique éprouvée et répandue, en Europe comme dans les pays en voie de développement, même si elle est soumise à controverse pour plusieurs raisons. Les controverses concernent généralement les problèmes environnementaux et sanitaires liés aux incinérateurs qui ont fonctionné dans le passé, avant l'application des normes actuelles.

En premier lieu, il s'agit d'un mode d'élimination de déchets qui a un taux de valorisation limité. L'incinération détruit les ressources naturelles contenues dans les déchets et ne permet pas de récupérer 100% du pouvoir calorifique des déchets. L'énergie récupérée, sous la forme de chaleur ou d'électricité, provient du refroidissement des fumées de combustion dans une chaudière, qui permet de récupérer de la chaleur, qui peut être utilisée directement ou à son tour entraîner une turbine pour produire de l'électricité. L'incinération est malgré tout identifiée en France en 2002 comme la deuxième source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité (après l'hydraulique) et pour la production de chaleur (après la biomasse).

Deuxièmement, l'incinération des déchets solides des villes produit une certaine quantité de polluants atmosphériques (dioxines et furannes, métaux lourds, gaz acides, poussières), dont les valeurs limites d'émissions sont fixées par la réglementation. Au cours des années 1990, des avancées dans le domaine du contrôle des rejets et de nouveaux règlements gouvernementaux ont permis une réduction massive de la quantité des différents polluants atmosphériques, y compris les dioxines et de furannes. L'Union européenne et l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) ont pris la décision de créer des normes très strictes concernant l'incinération des déchets.

L'incinération produit aussi un grand nombre de résidus solides (mâchefers) qui doivent être éliminés en décharge ou qui font l'objet d'un traitement si une valorisation en technique routière est envisagée.

Dans les années 1980, l'entreposage en lieu sûr des mâchefers, qui à cette époque étaient aussi mélangés aux cendres, était un problème environnemental important. Au milieu des années 90, des expériences en France ont été réalisés pour traiter et élaborer des mâchefers

(extraction des métaux ferreux et d'aluminium, criblage, broyage, concassage, maturation à l'air libre pour favoriser des réactions de carbonatation et d'oxydation). Les résultats positifs des suivis de plate-forme expérimentale utilisant des mâchefers sous les routes ont permis le développement de cette filière.

.3.3.3 Compost et fermentation

Les déchets organiques, comme les végétaux, les restes alimentaires, ou le papier, sont de plus en plus recyclés. Ces déchets sont déposés dans un composteur ou un digesteur pour contrôler le processus biologique de décomposition des matières organiques et tuer les agents pathogènes. Le produit organique stable qui en résulte est recyclé comme paillis ou terreau pour l'agriculture ou le jardinage.

Il y a un très large éventail de méthodes de compostage et de fermentation qui varient en complexité du simple tas de compost de végétaux à une cuve automatisée de fermentation de déchets domestiques divers. Ces méthodes de décomposition biologique se distinguent en aérobie, comme le compost, ou anaérobie, comme les digesteurs, bien qu'il existe aussi des méthodes combinant aérobie et anaérobie.

.3.3.4 Traitement biologique et mécanique

Le traitement biologique et mécanique (TBM) est une technique qui combine un tri mécanique et un traitement biologique de la partie organique des déchets municipaux. Le TBM est aussi parfois appelé TMB (traitement mécanique et biologique) cela dépend de l'ordre dans lequel s'effectuent les opérations.

La partie « mécanique » est souvent une étape de tri du vrac. Cela permet de retirer les éléments recyclables du flux de déchets (tels les métaux, plastiques et verre) ou de les traiter de manière à produire un carburant à haute valeur calorifique nommé combustible dérivé des déchets qui peut être utilisé dans les fours des cimenteries ou les centrales électriques.

La partie « biologique » réfère quant à elle à une fermentation anaérobie ou au compostage. La fermentation anaérobie détruit les éléments biodégradables des déchets pour produire du biogaz et du terreau. Le biogaz peut être utilisé pour créer de l'énergie renouvelable. La partie « biologique » peut aussi faire référence à une étape de compostage.

Dans ce cas les composants organiques sont traités par des micro-organismes à l'air libre.

Ils détruisent les déchets en les transformant en dioxyde de carbone et en compost. Il n'y a aucune énergie produite par le compostage.

Le TBM est de plus en plus reconnu comme une méthode efficace dans les pays où les techniques de gestion des déchets évoluent comme le Royaume-Uni ou l'Australie, pays où la compagnie WSN Environnemental solutions a pris une position majeure dans le développement des usines de type TBM.

.3.3.5 Pyrolyse et gazéification

La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes liées de traitements thermiques où les matériaux sont chauffés à très haute température et avec peu d'oxygène.

Ce processus est typiquement réalisé dans une cuve étanche sous haute pression. Transformant les matériaux en énergie cette méthode est plus efficace que l'incinération directe, plus d'énergie pouvant être récupérée et utilisée.

La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux. L'huile pyrolytique et les gaz peuvent être brûlés pour produire de l'énergie ou être raffinés en d'autres produits. Les résidus solides (charbon) peuvent être transformés plus tard en produits tels les charbons actifs.

La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur.

La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur.

.4 Recyclage des déchets

.4.1 Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent, c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

.4.2 Législation européenne relative au recyclage des déchets

En 2007, la production, le stockage, le traitement et le recyclage des déchets est désormais encadrée en Europe par une législation de plus en plus élaborée. L'incinération des déchets dangereux est l'objet de la Directive n° 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000. Le stockage de déchets industriels spéciaux est définie par la Directive n°1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets et la Décision de la Commission n° 2000/532/CE du 3 mai 2000 ainsi que la Décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux.

.4.3 Technique de recyclage

.4.3.1 Procédés de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

.4.3.2 La chaîne de recyclage

a. Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.

Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

b. Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

c. Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés, pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

.5 Déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil

.5.1 Laitiers

.5.1.1 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. [83]

.5.1.2 Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable, il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison des problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement/maturation se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.

.5.1.3 Sous-produits provenant des centrales thermiques

Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de « mâchefer ». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées « cendres volantes ». Certaines particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four.

Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon. [83]

.5.1.4 Mâchefer

Le mâchefer 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.

À la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (ex : verre, ferrailles, gros imbrûlés). Ils sont classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques en 3 catégories:

- Mâchefers de catégorie « V » à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant);
- Mâchefers intermédiaires de catégorie « M »;
- Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie « S ».

.5.1.5 Scories

Ces résidus constituent environ 2,5 % de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers.

.5.1.6 Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Et sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classifiées selon leurs teneurs en CaO et du type du charbon brûlé.

.5.1.7 Déchets divers

) Verre de récupération

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales: les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

) Pneus usagers

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait.

) *Ciment durci*

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton [83]. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.

) *Résidus d'incinérateurs*

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins.

) *Boues rouges*

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Elles sont stockées soit au fond des océans (en France, en Allemagne), soit près des usines comme au Canada.

Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

) *Déchets de démolition*

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature:

- les bétons armés sans enduit ni plâtre ;
- les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes. [83]

) Déchets de production de l'industrie du béton

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- les débris de béton générés tout au long des étapes de la production; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.
- les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture.

) Sables de fonderies

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (exp. résines phénoliques).

Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge.

Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques.

La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à L'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables: «les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche ». [83]

.6 Conclusion

L'enjeu de cette étude n'est donc pas de subvenir à un manque actuel de granulats naturels mais plutôt de contribuer à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles pour l'avenir, point fort du Grenelle de l'environnement.

La valorisation de ces granulats issus du recyclage présente un intérêt d'ordre économique, technique et environnemental. Le réemploi de ces matériaux dans la fabrication des bétons contribuerait à la prolongation de la durée de vie des carrières existantes et au même temps à l'élimination des déchets dans les décharges.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci permet de résoudre dans l'avenir le manque de granulats naturels.

Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés de ces déchets (granulats recyclés) destinés pour bétons ou mortiers en fonction de leur origine, ce qui facilitera leur valorisation.

***CHAPITRE II:
GRANULATS RECYCLES
ET BETONS***

CHAPITRE : GRANULATS RECYCLES ET BETONS

.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les différentes caractéristiques des granulats recyclés utilisés dans cette étude et l'action de ces granulats recyclés sur les bétons. Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine ainsi que sur la normalisation française et européenne, ce qui nous a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche méthodologique pour l'étude des bétons et des mortiers.

On présente aussi quelques résumés des études sur le recyclage des granulats utilisés dans les bétons, en indiquant leurs démarches, les facteurs d'influence, les réponses retenus et les principaux résultats afin d'avoir une synthèse qui justifie notre choix de matériaux.

Ce chapitre porte donc sur les granulats recyclés utilisés dans cette étude à savoir les granulats recyclés de béton de démolition, de déchets de verre et de déchets de brique, leurs influences sur les bétons ordinaires, autoplaçants et mortiers de façon à mieux comprendre leur comportement vis-à-vis de la présence de ces granulats.

.2 Origine des granulats

Les granulats sont des fragments de roche destinés à la fabrication d'ouvrages, de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépend de leur provenance et des techniques de production. Leur taille est comprise entre 0 et 125 mm, trois grandes familles de granulats sont définies en fonction de leur origine:

➤ Les granulats alluvionnaires ou de carrière

Sont des matériaux meubles, non consolidés. Ils proviennent de lits de rivière, les fonds de lacs ou certains fonds marins. L'extraction des granulats alluvionnaires se fait « à sec » ou « dans l'eau », à l'aide de pelles hydrauliques. La technique d'exploitation varie en fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique. Ces granulats peuvent être traités suite à leur extraction. Ils sont concassés si leur granulométrie est trop importante. Cette opération est suivie d'un criblage, d'un lavage et d'un calibrage.

➤ **Les granulats de roches massives**

Qui proviennent de l'exploitation de ces roches, cette matière première est présente dans différentes situations géologiques: couches plus ou moins massives de roches sédimentaires, massifs de granit, anciennes coulées volcaniques, roches métamorphiques... Leur extraction se fait généralement à l'explosif. Les granulats sont ensuite concassés, lavés et criblés.

➤ **Les granulats de recyclage et artificiels**

Sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons, ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers ou d'autres déchets comme les briques et le verre.

Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours.

.3 Granulats de recyclage

.3.1 Béton de démolition

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition: En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont :

- des granulats naturels concassés partiellement
- de la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels. Photo II.1



Photo II.1 Composition des granulats recyclés de béton [42]

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente. En effet, Le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction

de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial appelé béton parent dans la littérature.

II.3.1.1 Caractéristiques des granulats recyclés de béton

La principale particularité des granulats issus du recyclage du béton est l'existence d'une gangue de ciment ancien attachée aux granulats naturels primaires.

Elle a une influence importante sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés, car elle détermine, en grande partie, les caractéristiques géométriques (forme, état de surface), physiques (porosité et absorption d'eau). Mécaniques (friabilité, résistance aux chocs et à l'usure) et physico-chimiques de ces granulats (ils ne peuvent pas être considérés comme inertes). [51]

Lorsque les granulats recyclés sont issus de produits de démolition, il apparaît une autre particularité : la présence de différents types d'impuretés indésirables: minérales: comme le gypse, le verre, les chlorures, les briques ou bien organiques: comme le papier, le bois, les plastiques, etc.

Cette présence d'impuretés introduit une hétérogénéité importante des granulats recyclés et pose des problèmes liés à l'échantillonnage et à la représentativité des résultats lors de leur caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité des bétons incluant ces granulats. [51]

Une installation de génération moderne de production de granulats recyclés dont le schéma de fonctionnement est présenté dans la figure II.1 comprend des dispositifs qui procèdent au retrait de certaines de ses impuretés :

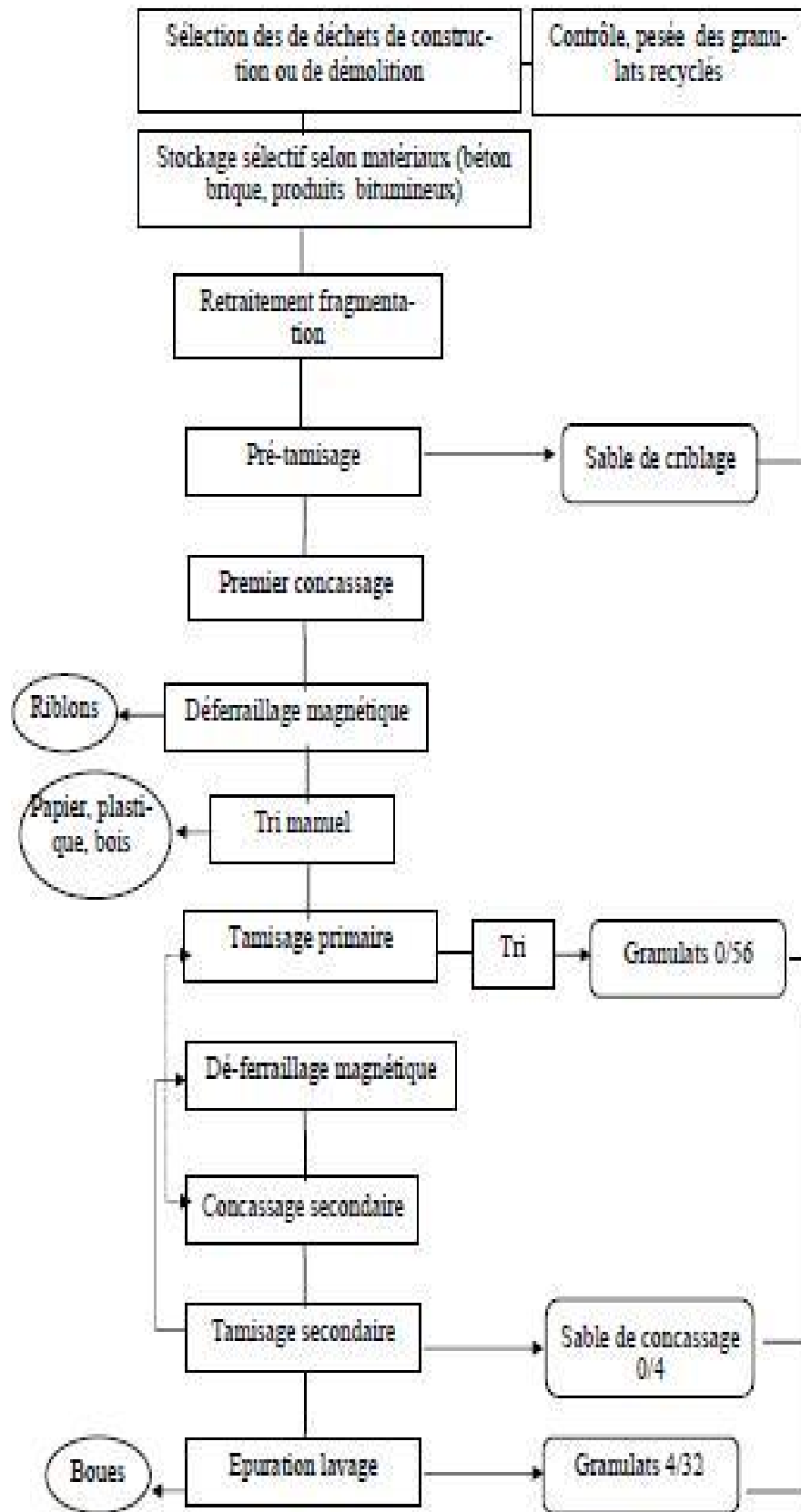


Figure II.1 Schéma de fonctionnement d'une centrale de recyclage/concassage [39]

Gangue de ciment ancien

Plusieurs chercheurs ont tenté de quantifier la gangue de ciment ancien se trouvant autour des granulats naturels primaires dans les granulats recyclés.

Différentes méthodes sont appliquées :

- ✓ Immersion des granulats dans une solution diluée (de différentes concentrations d'acide chlorhydrique HCl). La quantité de pâte de ciment est déterminée à partir de la perte de masse due à la dissolution du ciment pendant le test.

Le désavantage de cette méthode est que l'acide chlorhydrique peut attaquer également d'autres constituants des granulats recyclés et peut donner des pourcentages de la gangue de ciment surestimés.

- ✓ Couplage de la méthode par l'attaque acide à des techniques, de caractérisations physico-chimiques (diffraction des rayons X, analyses thermiques différentielle et gravimétrie, etc)
- ✓ Elaboration des bétons à base de granulats recyclés avec l'emploi d'un ciment coloré, On examine des tranches polies où la partie de ciment provenant des granulats recyclés est nettement distinguée de celle provenant de la matrice de ciment coloré. On détermine ainsi le mortier ancien attaché aux graviers primaires.

Le principal avantage de cette méthode est la possibilité de déterminer le pourcentage en volume du mortier ancien.

- ✓ Traitement d'images : Cette méthode est applicable seulement pour les gravillons et les fractions grossières du sable recyclé. [51]

Il ressort que la quantité de gangue de ciment (mortier) ancien dans les granulats recyclés dépend de nombreux facteurs :

- la **granulométrie** : plus la fraction est fine, plus cette quantité est importante.

- la qualité **du béton primaire**: le pourcentage du mortier qui reste attaché aux granulats naturels est d'autant plus **élevé** que le béton primaire est de forte résistance à la compression.

Contrairement à ce qu'on peut supposer, les travaux de Hansen et Narud ont révélé que le rapport E/C du béton primaire n'influe pratiquement pas sur le pourcentage de ciment (mortier) ancien [Hansen - 92, Kasai - 94]

- le **schéma technologique**: un concassage secondaire contribue à une réduction considérable de la quantité de mortier ancien [Morel - 93, Kasai - 94]

- le **type de concasseur** utilisé pour le recyclage : le concasseur à mâchoires élimine mieux la gangue de mortier ancien que le concasseur à percussion [Québaud - 96]. [51]

II.3.1.2 Caractéristiques morphologiques et physiques [51]

a- La Granulométrie et le module de finesse

En général, les granulats recyclés se caractérisent par un fuseau granulaire homogène et continu, mais les sables recyclés sont sensiblement plus grossiers que les sables naturels utilisés dans les bétons ordinaires [Hansen - 92, Morel - 93, De Vries - 93. Québaud - 96, Delwar - 97, Orsetti - 97]

Un autre aspect important de la granulométrie est la teneur en fines. Les fines présentes dans les granulats recyclés sont essentiellement constituées de ciment ancien et peuvent influencer aussi bien les caractéristiques des bétons frais (demande en eau, maniabilité, délais de la prise), que celles des bétons durcis (adhérence nouvelle pâte de ciment- granulat)

La propreté des sables caractérise la teneur en fines argileuses dans le pourcentage global en fines, car les fines argileuses peuvent rendre la mise en place du béton plus difficile et peuvent altérer l'adhérence des grains à la pâte de ciment.

b- Forme et état de surface

La forme des grains et leur état de surface ont une influence considérable sur l'ouvrabilité des bétons et leurs propriétés mécaniques.

c- Masses volumiques et porosité

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

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

Mesbah a déterminé, à l'aide d'un porosimètre à mercure, la porosité des différentes fractions du sable recyclé. La porosité de la fraction inférieure à 1 mm était de l'ordre de 14%, alors que celle de la fraction supérieure à 1 mm était de 11,5%. La porosité globale du sable recyclé a été évaluée à 13%. [70]

En fait, du point de vue du comportement des granulats dans le béton, la porosité totale joue un rôle secondaire. Le rôle primordial appartient à la répartition des tailles des pores et à leur interconnexion, ce qui se reflète directement sur le coefficient d'absorption d'eau des granulats.

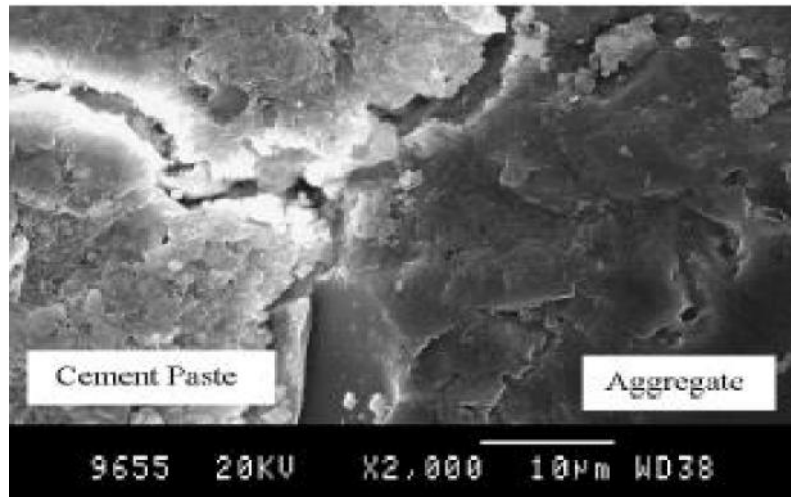
d- L'absorption d'eau par les granulats recyclés

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

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

Lors de la fabrication des granulats recyclés le **concassage** a deux effets:

- En créant des fissures, le concassage contribue à une augmentation de l'absorption d'eau.
- Les fissures dans la partie hydratée du ciment primaire est responsable de la forte absorption d'eau [Orsetti - 97]. Photo II.2



**Photo II.2 Interface granulat naturel / pâte de ciment
d'un granulat recyclé de béton [90]**

II .3.1.3 Domaines d'utilisation des granulats recyclés de béton

a- Les routes et le VRD (Voiries Réseaux Divers)

Les chaussées sont constituées en partie d'une couche d'assise (couche de fondation et couche de base). Elles sont surmontées éventuellement d'une couche de liaison pour l'amélioration des performances, puis d'une couche de roulement adaptée aux trafics (Classe du trafic définie par la moyenne journalière des poids lourds par voie de circulation).

Quel que soit le niveau, les granulats sont utilisés dans l'ensemble de ces couches. Ils doivent répondre à des critères de qualité liés à la solidité des ouvrages et à la sécurité. Ces exigences sont spécifiées dans des normes françaises (NF) et européennes (EN).

Les granulats de recyclage peuvent être utilisés dans les couches de forme et les couches d'assises, ainsi que sur les accotements des chaussées.

b- La production de béton

Actuellement, les emplois des bétons à base de granulats recyclés de béton ne sont pas encore normalisés dans la plupart des pays.

c- Les réseaux ferrés

Les voies ferrées requièrent de très grandes quantités de ces granulats pour la réalisation de structures des plates-formes, des chaussées, et de ballast des chemins de fer.

II.3.1.4 Incorporation de granulats de béton de démolition dans les bétons

Les granulats recyclés de béton sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante [Debieb et al, 2010] [Levy, 2004] tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre [Evangelista, 2010] [Gomez, 2002]. Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment) [Olorunsogo, 2002]. Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent. Dans cette méthode, on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton [Abbas et al, 2009]. [83]

En général, il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte le cahier des charges.

➤ Influence de la granulométrie et forme de gravillons

Des études expérimentales ont montré que la granulométrie et la taille maximale des granulats influent sur les proportions relatives des granulats, les quantités de liant et d'eau nécessaires, la maniabilité, la porosité, le retrait et la durabilité du béton. Toute variation de granulométrie influence sérieusement l'uniformité du béton d'une gâchée à l'autre. Les sables très fins sont souvent peu économiques, tandis que les sables et granulats très grossiers peuvent produire des mélanges raides et peu maniables. Selon [Mehta et Monteiro, 1993], les granulats ne souffrant ni d'une grande carence ni d'un excès de particules de diamètre donné et présentant une courbe granulométrique régulière donnent les meilleurs résultats. La variété dans la dimension des particules contribue à réduire le volume total des vides entre les granulats. [83] Ravindrarajah et son équipe a montré l'influence du choix du concasseur et des performances du béton ancien sur la régularité des courbes granulométriques [Ravindrarajah et al., 1985].

Weimann a montré que la défillerisation par voie humide permet quasiment de supprimer la contamination par des éléments indésirables (bois, métal, constituants autres que le béton,...). Ceux-ci restent inférieurs à 2%. Les sables obtenus ont également une teneur en matrice cimentaire plus faible que les sables élaborés à sec [Weimann et al., 2004].

Evangelista et de Brito ont montré que les granulats recyclés étaient plus anguleux et donc à l'origine d'une plus grande friction interne ce qui, en plus de l'absorption plus élevée, explique qu'à courbe et module de finesse égaux, la demande en eau du béton soit plus forte [Evangelista et al., 2010]. [79]

Noureddine a montré qu'un granulat comportant une forte proportion de particules plates et allongées se compacte difficilement et possède un indice des vides intergranulaires plus élevé qu'un granulat similaire constitué de particules plus arrondies. L'indice des vides du mélange granulaire est un paramètre important de formulation d'un béton car il influence plusieurs de ses propriétés dont notamment sa compacité, sa maniabilité et ses propriétés mécaniques. Il faut donc porter une attention particulière aux caractéristiques du mélange granulaire, car un mélange ayant un indice des vides élevé donnera un béton moins économique, moins maniable ou nécessitant une plus grande quantité de matières cimentaires pour satisfaire les exigences de performance (maniabilité, propriétés mécaniques, perméabilité, durabilité). [Noureddine, 1996]. [83]

En général, les granulats les plus désirables pour le béton sont ceux qui présentent des proportions élevées en particules cubiques (augmentation de la compacité du squelette granulaire) et rugueuses (augmentation de l'adhérence pâte-granulat).

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6 % [Hansen et Narud, 1983 cité dans Topçu et al., 2004].

La granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé.

Les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité est relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace.

Cette demande en eau efficace peut être traitée soit par un volume de pâte plus élevé (se traduisant par un supplément d'eau de 5 à 15% d'après la littérature [Hansen, 1992], soit par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants utilisés en réducteur d'eau, soit enfin par une combinaison de ces deux stratégies.

La demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés. Dans les cas où les granulats sur stock ne sont pas saturés en eau, une reprise d'eau des granulats dans le mélange intervient dans les heures qui suivent le malaxage.[79]

Influence du mortier attaché

Les granulats recyclés de béton diffèrent principalement des granulats naturels en ce qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. Ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés: densité plus faible, absorption d'eau plus élevée, teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées [Sánchez et al., 2004]. La teneur en mortier dépend du cycle de concassage du béton et est directement liée à la taille du granulat [Sánchez et al., 2004]. Aussi, certaines études ont été réalisées pour caractériser ce mortier [Yagishita et al., 1993 ; Abbas et al., 2007, 2009 ; Vasquez, 2002].

Il a également été constaté que les caractéristiques du mortier dépendaient des performances du béton d'origine [Padmini et al., 2009]. [79]

La masse du mortier d'un béton ancien qui recouvre la surface des gros granulats recyclés de béton et leur angularité influencent considérablement la consistance du nouveau béton, compte tenu de la porosité élevée de ces granulats, sa consistance (selon les pourcentages de substitution) demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui du béton naturel, cependant de nombreux chercheurs ont une ouvrabilité comparable du béton recyclé à celle du béton du béton naturel, dans le cas où seuls les gros granulats sont substitués. L'introduction de granulats fins recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité. Selon certains travaux [54], la

demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5% pour le béton à base de gros granulats recyclés et arrive à 15% pour le béton à base de gros et fins granulats recyclés.

Une augmentation de 21% en eau de gâchage est reportée pour un béton à gros et fins granulats recyclés dont l'absorption est de 25%. Cité [39]

Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et les granulats dans le béton à base de granulats recyclés a été confirmée par Hansen [54].

La présence du mortier réduit la résistance aux chocs, à l'usure et au gel [Québaud, 1996; Ravindrardjah et al., 1985 ; Sanchez et al., 2004]. Figure II.2

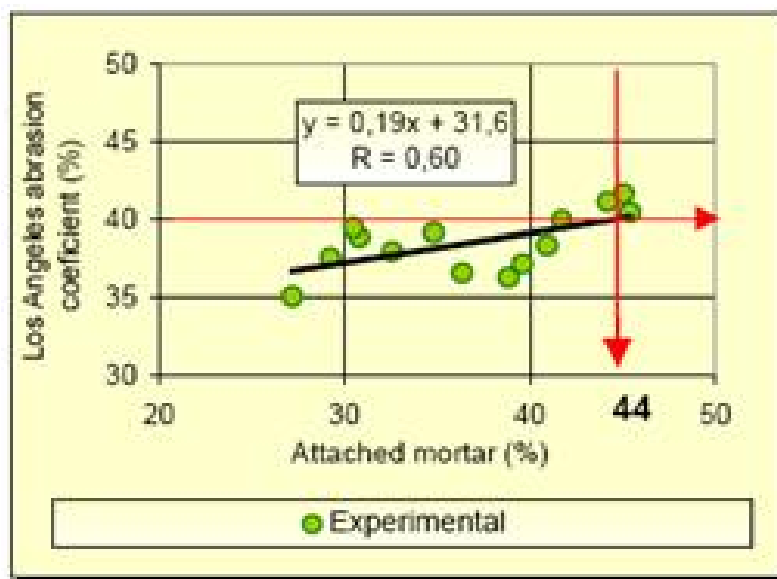


Figure II.2 Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles [Sánchez et al., 2004]

Des équipes de chercheurs [Mahmoud, 2005 ; Sanchez et al., 2004] ont montré la différence de solubilité des chlorures dans l'eau et dans l'acide pour différentes teneurs en mortier.

Sánchez de Juan et Alaejos Gutiérrez [Sánchez et al., 2004] ont établi une corrélation entre la teneur en sulfates et la quantité de mortier présent sur le granulat. [42]

➤ Influence de la masse volumique des granulats

Les masses volumiques des bétons recyclés sont plus basses que celles des bétons naturels [39], puisque les granulats de base sont plus légers et donc avoir des caractéristiques physiques et mécaniques différentes. Hansen a démontré aussi que la densité du béton à base

de granulats recyclés chute de 15% et le pourcentage d'air occlus augmente jusqu'à 0.6% par rapport aux bétons à base de granulats naturels elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 kg/m³ [Hansen et Narud, 1983, Gomez-Soberon, 2002, cités dans Topçu et al., 2004]. [79]

Les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels. Ils ont le plus souvent une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée, de nombreuses études ont confirmé ces résultats [Evangelista et al., 2004; Djerbi et al., 2010; Angulo et al., 2010; Sánchez et al., 2004; Mahmoud, 2005; Tam, 2005; DJE, 2011; Karthik, 2007; Katz, 2003; Kou et al., 2010]. [79]

Dans la figure II.3 Hansen estime que l'absorption d'eau des granulats recyclés est liée à leur densité.

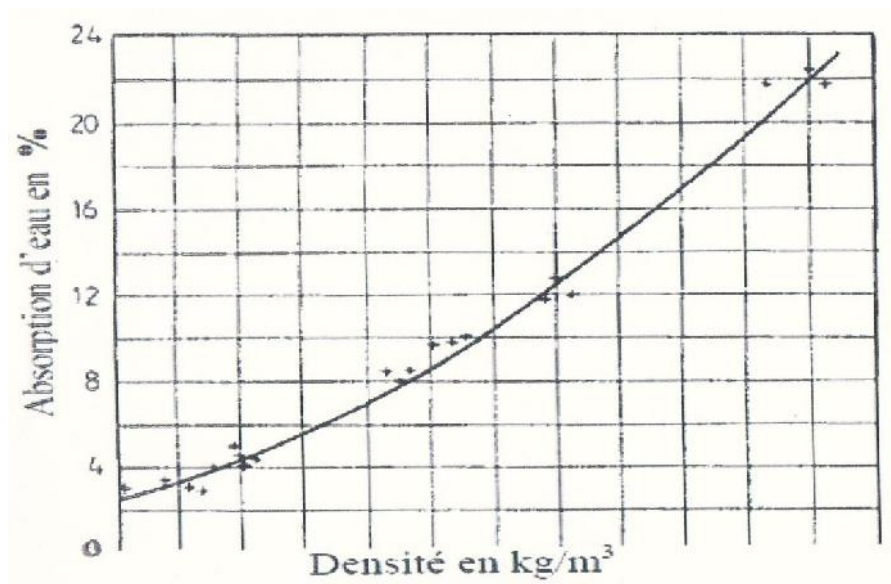


Figure II.3 Corrélation entre l'absorption d'eau et la densité des granulats recyclés [54]

➤ Influence des impuretés

La présence d'impuretés diverses dans le béton modifie la chimie de l'hydratation précoce, augmente le risque de perte rapide de maniabilité [Ravindrarajah et al., 1987]. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation en béton prêt à l'emploi [Kashino et Takahashi, 1988, cités par Hansen, 1992]. Les granulats recyclés présentent une source supplémentaire de chaux, de sulfates, de chlorures et d'alcalins ainsi que d'autres matières organiques ou inorganiques, qui peuvent

modifier l'environnement chimique interne du béton, en provoquant ainsi des réactions chimiques nuisibles vis-à-vis de la durabilité. Ces granulats ne peuvent pas donc être considérés comme inertes dans les bétons. [51]

➤ **Influence du rapport E/C et le taux de substitution**

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40% plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels.

La résistance à la compression dépend du taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et de sable inférieur à 30% [Chakradhara et al., 2011; Kou et al., 2009; Casuccio et al., 2008; González-F. et al, 2011; Evangelista et al., 2007]. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés [Gomez-Soberon, 2002] et une mauvaise interface granulats/liant [Xingand Zhou, 1998];

Angulo [Angulo et al., 2010] montre qu'une porosité des granulats inférieure à 17% affecte peu les résistances à la compression, quel que soit le rapport E/C;

Des résultats ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [Chakradhara et al., 2011; Kou et al., 2010; Yang et al., 2011; Evangelista et al., 2007]. [79]

II 3.1.5 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de béton de démolition

[Hansen;1992] a étudié la possibilité d'utiliser partiellement ou totalement les granulats de déchets de béton et de briques de démolition comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton hydraulique, l'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution (0, 25, 50, 70 et 100%) pour chaque type de granulat recyclé ainsi qu'une combinaison des deux types à proportions égales. Il conclut que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dépasse 30% et que cette diminution peut dépasser 10% de la résistance du béton témoin (100% agrégats naturels). Cette réduction de résistance est due principalement à l'effet du mortier de l'ancien béton inerte qui est attaché aux granulats provenant du béton concassé, et de la matière d'origine argileuse pour les granulats de brique concassé ce qui gêne le bon

déroulement de l'hydratation de ciment, les bétons préparés à base d'agrégats recyclés issus de la démolition présentent un rapport E/C élevé ce qui se traduit par une forte porosité et par conséquent une baisse de résistance. [54]

[Hallshow et Levacher ; 2000] ont fait une étude sur la valorisation des granulats issus de bétons de démolition dans la fabrication de nouveaux bétons, cette étude est basée sur l'introduction de sables recyclés dans le mortier et le gravier recyclé dans le béton; les résultats indiquent une chute de la résistance en compression de l'ordre de 11% pour les bétons de granulats recyclés. [52]

[Corinaldesi ; 2005] a étudié le comportement mécanique et les propriétés élastiques de bétons recyclés. Ces bétons ont été préparés avec deux fractions de granulats recyclés provenant d'une usine de recyclage dans lequel les décombres de la démolition sont collectés et traités convenablement. Plusieurs mélanges de béton ont été préparés en utilisant uniquement des granulats vierges (comme référence), Le taux de substitution est de 30% en granulats recyclés (gravier fin et grossier). Cinq différents rapports d'eau/ciment ont été adoptés comme suit: 0,40, 0,45, 0,50, 0,55 et 0,60. L'ouvrabilité du béton était de l'ordre de l'affaissement de 190-200 mm. Des essais de compression ont été effectués après 28 jours de cure à l'eau. En outre, un module d'élasticité du béton et le retrait de séchage ont été évalués. Les résultats obtenus ont montré que les structures en béton armé jusqu'à une classe de résistance C32/40 peuvent être fabriquées par le remplacement de 30% d'agrégat vierge avec granulats recyclés en béton. [34]

[Etxeberria ; 2007] Dans son étude, les gros granulats recyclés obtenus par le béton concassé ont été utilisés pour la production de béton. Quatre différents bétons de granulats recyclés ont été produits; faits avec 0%, 25%, 50% et 100% de graviers recyclés, respectivement. Les proportions de mélange des quatre bétons ont été conçues en vue d'atteindre les mêmes résistances à la compression. Les granulats recyclés ont été utilisés à l'état humide, mais pas saturé, L'influence du pourcentage de matériaux utilisés dans la production de béton (fait avec granulats recyclés) à l'égard de l'amélioration de sa résistance à la traction a été analysée. Le module d'élasticité est plus faible que celui des bétons traditionnels. [46]

[Evangelista;2007] a conclu que les Granulats fins recyclés sont considérés comme le dernier choix en matière de recyclage pour la production de béton. Dans la recherche expérimentale

menée, différents mélanges de béton (avec augmentation des taux de substitution des granulats naturels fins - sable - avec granulats recyclés fins de béton concassé) ont été préparés et testés. Les résultats ont ensuite été comparés avec ceux d'un béton de référence avec exactement la même composition et courbe granulométrique, mais sans granulats recyclés. Les principaux résultats de cette recherche pour l'absorption d'eau par immersion et la capillarité, la pénétration des chlorures, et la résistance à la carbonatation, ont été tirés. [47]

[Akash ; 2007] a examiné les différents aspects du problème de recyclage des déchets en tant que granulats de substitution en béton. Il a étudié les propriétés mécaniques des granulats recyclés, et l'effet de leur utilisation sur les propriétés du béton frais et durci. Il a également identifié certains des principaux obstacles à une utilisation plus répandue de béton de granulats recyclés, y compris le manque de sensibilisation, le manque de soutien du gouvernement, la non-existence de spécifications / codes pour réutiliser ces agrégats dans le béton. [3]

[Sanchez de juan ; 2009] les granulats de béton recyclés diffèrent principalement des granulats naturels parce qu'ils sont composés de deux matériaux différents: Agrégat naturel et la gangue de ciment. Il est bien connu que la teneur en mortier de ciment affecte d'autres propriétés des granulats recyclés: l'absorption est plus élevée, Los coefficient d'abrasion Angeles est plus faible, etc. L'objectif de cette étude a été d'obtenir des relations expérimentales entre le contenu du mortier adhérent et d'autres propriétés de granulats recyclés, couvrant un large éventail de différentes qualités de granulats

Dans sa recherche, il a été conclu que seuls les granulats recyclés avec le contenu de mortier moins de 44% pourraient être utilisés dans le béton de structure. Avec ce critère, les agrégats avec la densité spécifique supérieure à 2160 kg/m³, l'absorption d'eau inférieure à 8% et la perte à l'abrasion de Los Angeles de moins de 40%, sont obtenus.

Les résultats peuvent également être utiles pour les usines de recyclage, car ils peuvent ajuster les procédés de fabrication en utilisant les relations pour obtenir un agrégat avec des propriétés pré-sélectionnées en réduisant la teneur en mortier, par exemple, au moyen de plusieurs procédés de broyage

Les résultats montrent que les propriétés principales du béton sont défavorablement affectées par le contenu du mortier-adhérent à savoir la densité, l'absorption et le coefficient de Los

Angeles , les corrélations entre eux et la nature du mortier ont été discutées en détail par l'auteur [42]

[Domingo-Cabo ; 2009] a présenté les résultats de la recherche expérimentale du béton produit par le remplacement des granulats naturels avec granulats recyclés provenant de déchets de construction et de démolition. L'objectif principal de son travail était de déterminer le fluage et le retrait et les variations rencontrées dans le béton à base de granulats recyclés, fabriqué par le remplacement de la fraction principale de l'agrégat naturel avec un agrégat recyclé provenant de déchets de béton et en le comparant à un béton témoin. Les pourcentages de substitution étaient de 20%, 50% et 100%. Il a été possible de constater que l'évolution de la déformation par retrait et fluage est similaire à celle d'un béton classique, bien que les résultats après une période de 180 jours ont montré l'influence du pourcentage de substitution des granulats recyclés présents dans le mélange. Dans le cas où le taux de substitution arrive à 100% il y'a eu une augmentation des déformations par fluage de 51% et en retrait de 70% par rapport à celles subies par le béton témoin. [43]

[Berredjem, Arabi ; 2015] leur travail est une contribution expérimentale à l'étude de la durabilité des différentes compositions de bétons ordinaires (naturels/recyclés) avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). Et, pour se faire réaliser des caractérisations physico-chimiques et mécaniques, des granulats en particulier les recyclés et des bétons ont été menées. Les essais ont été réalisés sur une formulation de béton type : un dosage en ciment constant $C=400\text{kg/m}^3$, une même maniabilité du béton frais ($A_{ff} = 70\pm 20\text{mm}$) et une classe de béton cible C25/30. La procédure expérimentale consiste à comparer les résistances mécaniques à long terme, des bétons conservés dans trois types de solutions (eau du robinet, Eau déminéralisée et eau très salée), ainsi que les indicateurs de durabilité les plus déterminants pour ces bétons à savoir : la porosité, la perméabilité et la lixiviation au nitrate d'ammonium avec deux concentrations (faible et forte). [21]

II.3.2 Déchets de verre

II.3.2 .1 Composition du verre

Les oxydes formateurs (les vitrifiants)

) **La silice (dioxyde de silicium SiO_2)**

C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730 °C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99.5 % (les sables quartzeux).

) **L'anhydride borique (B₂O₃)**

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques: il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300 °C, il possède aussi les propriétés d'un fondant.

) **L'anhydride phosphorique (le phosphore P₂O₅)** employé dans le domaine de l'optique.

Les oxydes modificateurs

A/ Les fondants: (oxydes alcalins)

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge. Un même verre peut associer plusieurs fondants: soude et chaux, soude et plomb (cristal).

) **L'oxyde de sodium (la soude Na₂O)**: il entre dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = litron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.

) **L'oxyde de potassium (K₂O)**: Il entre dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO₃). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il favorise le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.

) **L'oxyde de magnésium (Mg O)**: Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium + magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre

flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

B/ Les stabilisants (oxydes alcalino-terreux)

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si-O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

-) **L'oxyde de calcium (CaO)**: se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification.

-) **L'oxyde de zinc (ZnO)**: Il augmente l'éclat et l'élasticité.

-) **L'oxyde de fer (Fe₂O₃)**: c'est un stabilisant et un colorant, souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO₂).

-) **L'oxyde de plomb (PbO)**: entre dans la composition du cristal, il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

Les colorants

Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse, cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en faible proportion du mélange (ex oxyde de cuivre pour du vert).

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland ou du sable dans les bétons. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons est devenue intéressante.

II.3.2.2 Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau, en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons, De même que la pouzzolanité, la réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres.

La bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs :

a- La taille des grains de verre

La taille des particules des granulats de verre a une influence sur l'expansion due à la réaction alcali silice. Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granulats réactifs. [Stanton; 1940] est le premier à avoir indiqué que la taille des particules des granulats réactifs affecte l'expansion des mortiers.

En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la réaction alcali silice. A savoir les travaux de [Shao et coll.; 2000], [Shi et coll., 2005] et [Shayan et coll.;2002, 2006]. Cependant, dans la plupart de ces travaux les auteurs ont travaillé en terme de finesse non pas en terme de taille des grains. De ce fait il a été difficile de déterminer la taille des grains de verre qui est susceptible de provoquer des gonflements.

Cependant, la plus grande campagne expérimentale a été faite par [Byars et coll., 2004] qui ont lancé un programme expérimental sur l'étude de l'effet de la taille des granulats de verre sur les gonflements des bétons. Ainsi, Ces auteurs concluent que l'expansion était proportionnelle à la taille des grains de verre. [57]

b- Teneur en verre

Les travaux de l'ensemble de ces auteurs: [Dyer et coll. ; 2001], [Polley et coll.; 1998], [Park et coll., 2004], [Lker et coll., 2004], [Kojima et de Shayan et coll.; 2004], [Ozkan et coll.;

2008] mesurent les variations des expansions des bétons en fonction de la teneur en verre. Cependant, cette tendance varie selon les auteurs, Le premier groupe affirme que l'expansion des bétons augmenterait avec leur teneur en verre, le second avance l'inverse, et enfin le dernier que les gonflements des bétons ne changerait pas en fonction de leur teneur en verre. En effet, Dyer et coll. ont travaillé avec trois différents pourcentages de remplacement de ciment par trois différentes couleurs de verre. Ces auteurs ont conclu que quelque soit la couleur du verre utilisé, les gonflements des bétons sont réduits avec la croissance de la teneur du verre dans les bétons. Même tendance pour les travaux de Polley et coll. et ceux d'ozkan et coll. [57]

c- La porosité et la réaction alcali-silice du verre

En plus d'utiliser des pouzzolanes telles que la fumée de silice, la cendre volante ou le metakaolin, pour réduire l'expansion provoquée par des granulats réactifs, Shayan et coll., Ozkan et coll., Byars et coll., collins et coll., ont constaté que l'utilisation de granulats poreux réduit ces expansions. Figures II.4,5

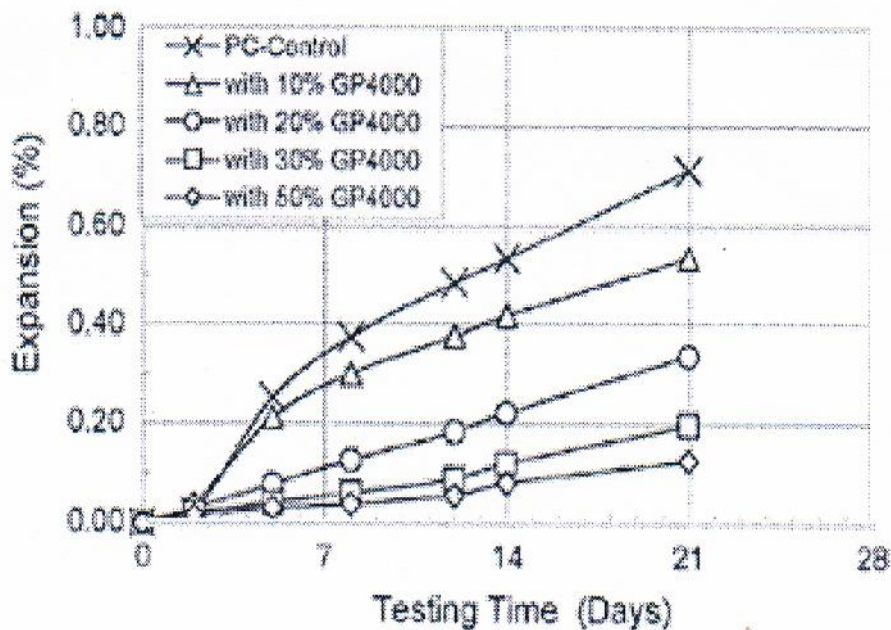


Figure II.4 Expansion de barres de mortiers confectionnées en remplaçant du ciment par du verre fin en présence de granulats poreux [87]

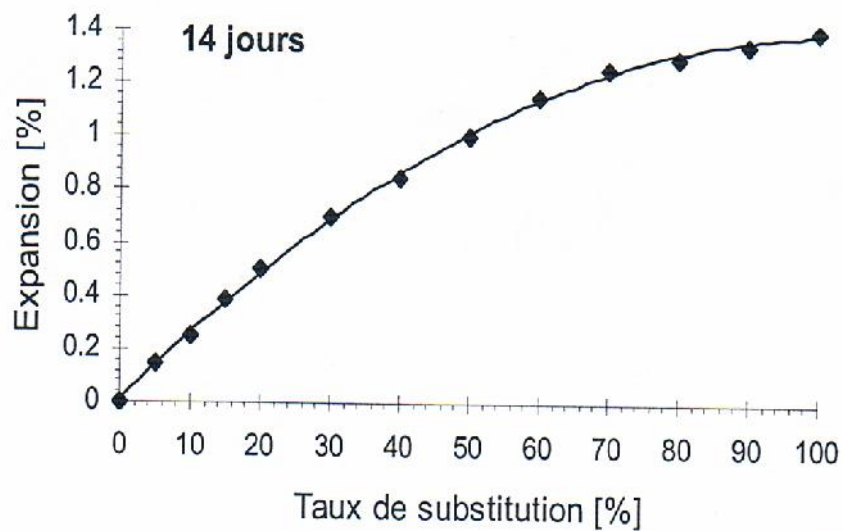


Figure II.5 Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre [JIN et coll., 2000] cité [57]

Collins et coll., expliquent ce phénomène par la structure poreuse des granulats qui sont capable de reprendre les pressions causées par les gels d'alcali réaction. De leur coté, Meyer et coll., ont conduit une série d'essais sur des mortiers avec ou sans adjuvants entraineurs d'air renfermant 10% à chaque fois de verre de différentes classes granulométriques.

Ces auteurs sont partis du principe que l'expansion n'est pas uniquement un produit d'un processus chimique mais aussi physico-mécanique. Leurs travaux ont pu démontrer que l'utilisation d'agents entraineurs d'air réduit de 50% l'expansion due à la réaction alcali-silice.

Figure II.6

Comme le montre la Figure II.7, en faisant varier le rapport E/C de 0.427 à 0.522 en passant par 0.470, Meyer et coll., ont pu montrer que la porosité engendrée par le supplément d'eau pouvait réduire les expansions due à la réaction alcali silice de mortiers confectionnes avec du verre.

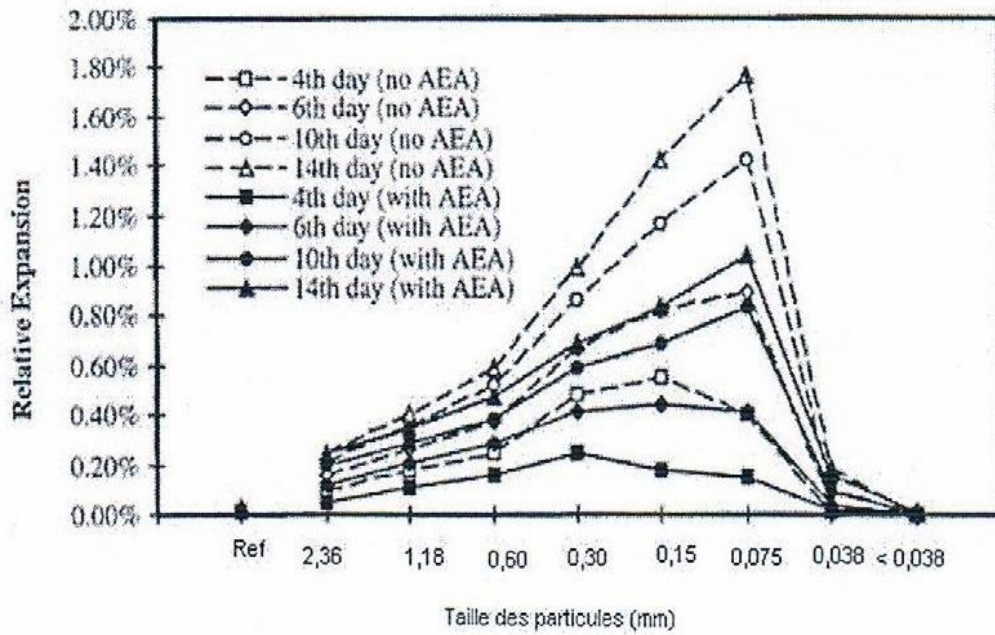


Figure II.6 Effet d'agent entraineur d'air sur la réaction alcali silice (10% de verre)
[MEYER et coll., 1997] cité [57]

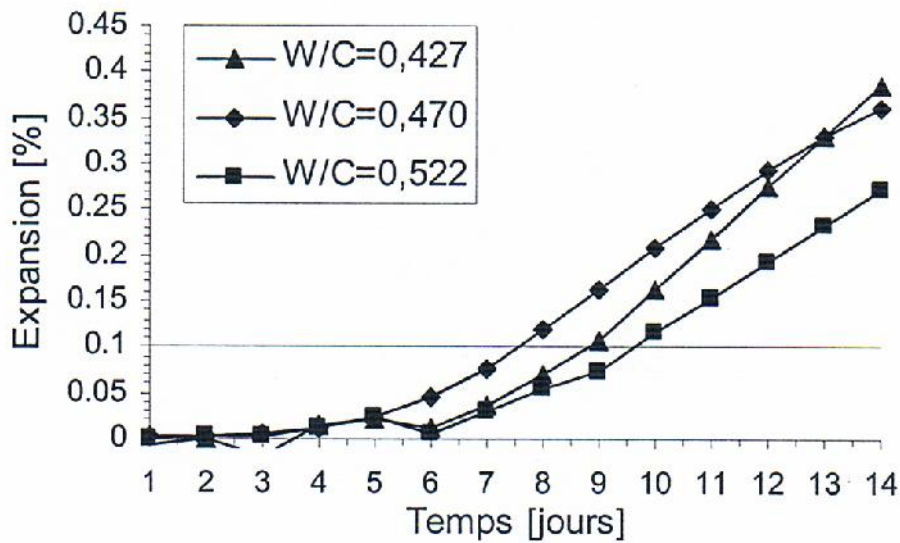


Figure II.7 Effet du rapport E/C sur l'expansion d'éprouvettes de mortiers (10% de verre)
[MEYER et coll., 1997] cité [57]

d- La couleur du verre et la réaction alcali-silice

La couleur du verre est obtenue en additionnant au cru certains oxydes. Ainsi, le Fe_2O_3 donne la couleur brune, le Cr_2O_3 la couleur verte, le CuO la couleur bleu, le MnO_2 la couleur rose, et le AgO la couleur jaune.

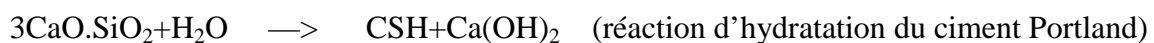
Ces différences de couleur affecteraient les expansions des bétons confectionnés avec du verre. En effet, JIN et coll., ont déduit que le verre vert entraînait des expansions des bétons négligeables devant celles provoquées par le verre blanc et par le verre brun. [57]

II.3.2.3 Réaction pouzzolanique du verre

La norme américaine ASTM C125-07 donne la définition suivante d'une pouzzolane naturelle: « *Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes*»

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des *températures ordinaires*, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{SiO}_2$), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit :



La réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium ou la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, contrairement à l'hydratation du clinker qui en libère.



Photo II.3 Réaction pouzzolanique [57]

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes: les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton a base de ciment ou sur des mortiers a base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par l'essai Chapelle, ATG, DRX.

La Figure II.8 rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin.

Les conclusions suivantes se dégagent nettement :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique.
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
3. Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc.
4. Pour des résistances optimales, il est plus intéressant de substituer le sable que le ciment par le verre.
5. Une température élevée joue un rôle important dans l'activation du verre.
6. Le verre, comparé à d'autres pouzzolanes notamment la cendre volante, développe rapidement son activité pouzzolanique.
7. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane en remplacement partiel du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. [57]

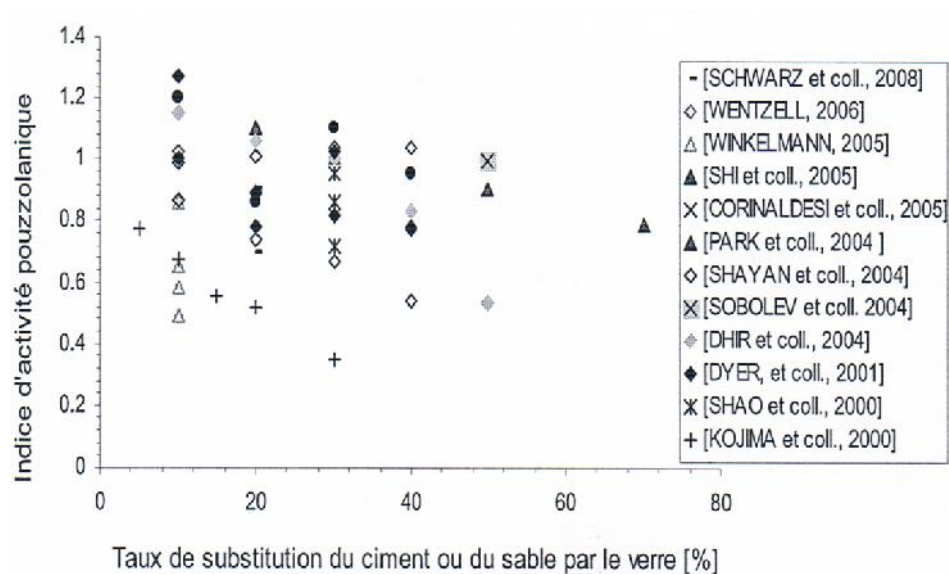


Figure II.8 Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes

a- La taille des grains de verre

Selon [Shao et coll., 2000], avec une taille des grains de verre de 38 μm , les indices d'activité des bétons confectionnés avec 30% de remplacement de ciment par ce verre dépassaient les 90% au jeune âge et les 108% à 90 jours.

Pour [Chen et coll.; 2006] une taille de 75 μm serait suffisante pour atteindre un bon indice d'activité pouzzolanique. D'autres auteurs parlent en terme de finesse, ainsi, pour [Shi et coll.; 2005], une finesse au moins égale à celle du ciment serait nécessaire et suffisante pour avoir de bonnes résistances mécaniques. Quand à [Shayan et coll.; 2002] il lui fallait travailler avec une finesse de 800 m^2/kg pour avoir un bon indice d'activité pouzzolanique à 90 jours. Néanmoins, avec 20% de remplacement de ciment par cette finesse de verre, au delà d'une année de cure, la résistance de ces bétons a pu égaler celle des mélanges confectionnés avec 10% de fumée de silice.

b- La teneur en verre des mélanges

Excepté [Batayneh et coll.; 2007] et [Nishikawa et coll.; 1995] dont les études ont montré que la résistance augmenterait avec la teneur des mélanges en verre, la plupart des travaux, malgré la variation des conditions de travail, s'accordent à dire que la résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.

c- La couleur du verre utilisé

Effectivement, différents auteurs ont pu montrer que la couleur du verre, autrement dit la composition chimique du verre, joue un rôle conséquent sur les propriétés mécaniques, notamment les résistances en compressions. à titre d'exemple les travaux de [Karamberi et coll.; 2005] tout comme les travaux de [Park et coll.; 2004] et ceux de [Sobolev et coll.; 2007].

Ces auteurs ont travaillé sur deux couleurs de verre: le verre vert et le verre brun.

Leurs résultats ont montré que le verre vert présentait les meilleures performances mécaniques. En plus des deux couleurs précédentes, Dyer et coll., [2001] ont utilisé du verre blanc. Ils ont pu montrer que le verre blanc possède les meilleures résistances mécaniques, suivi du verre vert puis du verre brun. Ces auteurs lient cette tendance à la composition chimique des verres.

d- La température de cure et l'activation du verre

Comme dans le cas des autres matériaux pouzzolaniques tels que la fumée de silice, la cendre volante et les laitiers, la température joue un rôle important dans l'activation du verre.

En effet, [Shi et coll.; 2005] ont étudié l'effet de ce paramètre sur l'activité pouzzolanique du verre et d'une cendre volante. Leurs résultats ont montré que l'activation du verre est très sensible à la température. En passant la cure de la température ambiante à 65°C, le gain en résistance en compression était de 80% contre 20% pour la cendre volante. La température de cure accélère l'activité pouzzolanique du verre et semble avoir plus d'influence sur la poudre de verre qu'elle ne l'a sur la cendre volante [Karamberi et coll., 2004]. [57]

II.3.2.4 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de déchets de verre

[Behim et Boucetta; 2009] leur travail était une contribution à la valorisation du verre à bouteille sous forme de poudre en remplacement du filler calcaire traditionnellement utilisé comme addition dans les bétons autoplçants (BAP). Les résultats obtenus montrent un comportement bénéfique de la poudre de verre sur les caractéristiques des bétons autoplçants aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci pour un dosage allant de 30 à 60 % par rapport à la masse du ciment. [14]

[Wang ; 2010] a fait une recherche expérimentale sur l'objectif de recycler des déchets de verre dans le BAP. Cette étude basée sur un rapport de E/ Liant variant de 0,28 à 0,36 et quatre types de sables remplacés par le verre. Le pourcentage de substitution étant de 0 à 30%. Il a constaté que le débit du béton autoplçant fabriqué avec le verre croit avec l'augmentation de remplacement du sable par le verre. [96]

[Liu ; 2011] a fait une recherche sur la possibilité d'utiliser les déchets de verre dans le béton autoplçant pour le remplacement partiel du ciment et de granulats fins. A partir les résultats: il a été constaté que pour produire un BAP avec des propriétés satisfaisantes à l'état frais, il faut introduire plus de 104 kg/m³ de poudre de verre remplaçant 10% de ciment et 10% de sable sans l'utilisation d'un agent de viscosité.

L'introduction de la poudre de verre augmente le rapport E/liant et réduit le dosage en superplastifiant. [69]

[Ling ; 2012] a évalué la performance des bétons autoplaçants contenant la poudre de verre après l'exposition à différentes températures élevées (300-800°C). [68]

[Al-Akhras ; 2012] a étudié l'utilisation potentielle de la poudre de verre pour améliorer les performances du béton soumis aux cycles du gel-dégel. Trois pourcentages ont été utilisés dans l'étude: 6%,12% et 18% en poids de ciment. Les autres paramètres expérimentaux qui ont été pris en considération dans l'étude sont les suivants: rapport eau sur ciment (0,4 et 0,6) et agrégat type (calcaire et tuf). Les prismes de béton ont été exposés à des cycles de gel-dégel. La rupture de prismes de béton a été évaluée. Les résultats de l'étude ont montré que :

Avec un rapport de $W/C = 0.4$, il a été montré une plus grande durabilité au gel-dégel

Le béton contenant agrégat de tuf a montré une plus grande résistance au gel-dégel que le béton contenant un agrégat de calcaire. [4]

[Zeroub; 2013] a étudié l'influence de l'ajout de la poudre de verre sur la durabilité des bétons, les essais sont effectués sur des bétons conçus avec un rapport $E/C = 0.3$ et conservés dans trois milieux différents (eau de robinet, eau de mer, eau séléniteuse). Le taux de substitution du ciment par la poudre de verre est de 30%, les résultats obtenus prouvent que la poudre de verre finement broyée a le potentiel d'améliorer la durabilité des bétons. [98]

[Berraih; 2013] a fait une étude sur l'utilisation des déchets de verre de bouteille comme substituant partiel au ciment dans le mortier, et donc à évaluer leurs effets sur les caractéristiques physico-mécaniques.

Les résultats de cette étude ont révélé qu'un dosage de 10% de poudre de verre substituée au ciment pourrait être optimal puisqu'il affiche des performances mécaniques comparables au mortier témoin à court et à long terme. [20]

II.3.3 Déchets de brique

II.3.3.1 Définition

Les briques sont l'un des plus anciens matériaux de la construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois avec additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle.

Il existe deux types de briques: brique en terre crue et brique en terre cuite

✓ **Briques en terre crue**

Les briques sont les produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, c'est un des plus anciens matériaux de construction.

La brique en terre crue Photo II.4 constitue un des matériaux de base pour la construction de murs et de voûtes. En principe, les briques sont fabriquées à base de terre (environ 75%), de paille (environ 20%) et d'eau (environ 5%). Le mélange est coulé dans des moules en bois, pour obtenir des briques de 40x20x10 Cm. Les briques sont séchées à l'air pendant plusieurs jours, avant de pouvoir être utilisées.



Photo II.4 Briques en terre crue

✓ **Briques en terre cuite**

Les briques en terre cuite Photo II.5 se décomposent de l'argile, des adjuvants naturels (sable, sciure de bois) et de l'eau. Les composants sont broyés jusqu'à l'obtention un mélange homogène. L'argile est façonnée puis séché et cuit à une température d'environ 1000°C, pour devenir ce qu'on appelle des briques de terre cuite.



Photo II.5 Briques en terre cuite

II.3.3.2 Principe de fabrication des briques

Le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

- L'extraction des matières premières (argiles et limons)
- La préparation de l'argile
- Le façonnage
- Le séchage
- La cuisson

) Extraction

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile. L'argile est extraite dans des argilières situées en zone d'extraction. Elle est présente dans le sous-sol et ses propriétés diffèrent en fonction de l'origine géologique.

) Préparation de l'argile

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.

- Broyage et malaxage

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile (ex : nodules de pyrite et inclusions de chaux) pouvant influencer négativement la structure du produit en terre cuite. Cette étape très importante s'effectue dans des broyeurs mécaniques. Si l'on utilise du schiste

« qui n'est rien d'autre qu'une argile pétrifiée » comme adjuvant, il faut le concasser et le moudre par étapes successives en une fine poudre qui sera gâchée à l'eau pour obtenir une pâte (argileuse) présentant la plasticité souhaitée. Enfin, l'argile contient également des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini, et qui ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique. A cette fin, l'argile est stockée quelque temps dans un lieu humide et sombre propice au développement de ces bactéries.

- **Dosage et mélange**

Les adjuvants peuvent influencer les propriétés des produits finis. Ainsi, l'ajout de pigments peut en modifier la couleur ; l'ajout de sciure de bois a une influence sur la porosité, ...

La préparation de la matière première s'accompagne également d'ajout d'eau ou de vapeur. L'ajout d'eau permet de garantir une mise en forme facile de l'argile, tandis que la vapeur augmente la plasticité de l'argile.

) **Façonnage**

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme :

Briques moulées main

La méthode de moulage la plus ancienne est le façonnage à la main des briques. Le mouleur prend une certaine quantité d'argile, la jette dans un moule en bois préalablement sablé pour éviter que la pâte n'adhère aux parois, presse convenablement la terre pour remplir le moule, arase l'excédent et retourne l'appareil pour démouler la brique crue ou «verte» (brique non cuite). Pour faciliter cette opération, l'argile doit être relativement ductile (et humide par conséquent), évitant ainsi au mouleur de devoir exercer un effort trop important. Ceci a pour conséquence que la brique «moulée main» présente une surface irrégulière, caractérisée par des plissures.

Dans l'industrie briqueterie moderne, hautement mécanisée, les briques « moulées main » ne le sont toutefois plus par la main de l'homme. Toutes les opérations sont restées identiques, mais ce sont des machines qui ont pris la relève. Après avoir servi au façonnage, les moules

sont nettoyés à l'eau et réutilisés. L'eau est réutilisée en circuit fermé. L'excès d'argile arasé lors du moulage est quant à lui, réintroduit dans la matière première.

Le sablage des moules avec du sable ou de la sciure est aujourd'hui aussi entièrement mécanisé. Si l'on remplace ce sablage des moules par un rinçage à l'eau, on obtient une brique non sablée qui a la couleur pure de la terre cuite.

Il arrive encore qu'une brique soit réellement moulée à la main mais seulement pour certains formats particuliers non compatibles avec la machine ou en cas d'utilisation d'argiles spéciales.

Briques pressées

Les briques moulées à la presse forment une catégorie à part. On introduit dans les moules de l'argile relativement sèche que l'on comprime vigoureusement pour lui donner la cohésion voulue. Ces produits présentent une surface grenue et une forme géométrique bien marquée.

Briques étirées

Les briques pour maçonnerie ordinaire sont presque exclusivement fabriquées par extrusion. Dans cette machine, la masse d'argile est extrudée sous forme d'une carotte continue à section rectangulaire. Ce «boudin» d'argile est alors coupé à intervalles réguliers. Chaque élément forme une brique qui présente quatre faces assez lisses suite au coulissement dans la filière, et deux faces de sectionnement plus grossières.

L'étireuse permet une production beaucoup plus rapide que n'importe quel autre procédé, et de plus, elle est parfaitement adaptée au façonnage de briques perforées. Ce mode de fabrication est également utilisé pour produire des briques de parement, mais dans ce cas, l'aspect des faces sera plus soigné.

) Séchage

Avant d'être cuites, les briques crues doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau - du moins en est - il ainsi pour la plupart des argiles. Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau. Le risque serait en effet de les voir se fendre ou éclater sous la dilatation de la vapeur dans la masse. D'autre part, la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation. Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où il se poursuit de manière régulière

et rapide (généralement de 2 à 4 jours). On utilise l'air chaud de la zone de refroidissement du four pour le séchage des briques. La température et le taux d'humidité sont contrôlés tout au long du processus de séchage, au moyen d'un système informatique réglé de façon très précise.

) **Cuisson**

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est là une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson; on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre «courbe de cuisson».

On peut modifier l'atmosphère du four. La cuisson en oxydation (avec apport d'oxygène) est la plus fréquente et produit la teinte «normale » qui est, le rouge puisque l'argile est généralement ferrugineuse. Dans une atmosphère réductrice (sans apport d'oxygène), on obtient des couleurs plus foncées. Une réduction partielle produit, quant à elle, des teintes fortement nuancées.

On utilise un four continu de type four tunnel. Dans celui-ci, le chargement de briques parcourt un tunnel rectiligne sur des wagonnets et passe successivement par les zones de «préchauffage», de «cuisson» et de «refroidissement».

Dans la zone de préchauffage, les briques sont portées progressivement à température. Cet échauffement se fait grâce aux fumées émanant de la zone de cuisson du four. L'humidité résiduelle des briques est ainsi éliminée. A partir d'une température comprise entre 450°C et 600°C, on ralentit la montée en température des briques. C'est autour de cette température que se produit le «point de quartz» : il s'agit de la température à laquelle la structure cristalline du quartz est modifiée. A cette étape de la cuisson, les briques sont très sensibles à la formation de fissures.

La cuisson des briques à proprement parler se fait environ à mi-parcours du four, à une température allant de 1000°C à 1200°C. Le frittage de l'argile se fait à cette température et se forme alors la structure définitive de la brique.

Enfin, une troisième et dernière phase consiste à refroidir les briques. Cette opération doit s'effectuer de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration. Figure II.9



Figure II.9 Schéma de la fabrication des Briques

II.3.3.3 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de déchets de brique

[Tavakoli et al; 1996] ont étudié l'effet de l'utilisation de briques d'argile comme du sable dans la préparation du béton avec le nano SiO₂. Ils ont montré qu'il y avait une augmentation d'absorption d'eau, ainsi l'utilisation du nano SiO₂ avec des déchets de brique améliore les propriétés de durabilité et de résistance du béton, ainsi que le béton de granulats de brique pilée à des propriétés thermiques améliorées. [92]

[Bourmatte; 2004] a étudié la possibilité d'utiliser des granulats recyclés de déchets de briques dans la composition des mortiers. Le taux de substitution en granulats recyclés est de (0, 25, 50, 75 et 100%). Les résultats indiquent que Plus le taux de substitution augmente plus la résistance en compression diminue, alors on peut utiliser ces granulats avec des taux limités dans le mortier. [28]

[Moriconi ; 2009] a traité l'utilisation de décombres de maçonnerie dans le mortier, soit en remplaçant le sable naturel ou comme substitution partielle du ciment; les résultats obtenus de la résistance en compression était plus faible en comparaison avec un mortier de référence.[72]

[Kanai, Debieb; 2011] ont étudié l'effet de remplacer partiellement le gravier et le sable naturel par le mélange de gros et fins granulats à base d'ancien béton et de briques cuites concassées pour des taux (25, 50, 75 et 100%). A partir des résultats, l'absorption d'eau des bétons recyclés réalisés est plus élevée que celle d'un béton témoin à base de 100% de granulats naturels. La pénétration d'eau des bétons réalisés, augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés et peut atteindre le double de celle du béton à base des granulats naturels. [62]

[Lahmadi, Zeghichi et Benghazi; 2012] la résistance en compression des bétons à base des granulats de briques grossiers (pour une substitution de 30% à 50%) est comparable à celle des bétons ordinaires, même une substitution totale n'affecte pas la résistance et le remplacement du squelette granulaire naturel (sable et gravier) par les déchets de briques est à éviter, une chute de résistance estimée à 50% est signalée. [65]

[M. Heikal ; 2013] a étudié l'influence de la substitution du ciment par les déchets de brique pilées et ont trouvé que plus on augmente la teneur en poudre de brique plus la résistance à la compression augmente et les contraintes de cisaillement augmentent aussi, ainsi que la microstructure de la poudre de brique ciment affiche un arrangement dense de microcristalline C-S-H et Ca(OH) qui améliore la résistance à la compression. [55]

[Abib ; 2013] a étudié l'influence de l'introduction de (5, 10, 15) % de déchets de brique pilée sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier. Les résultats montrent que la poudre de brique réduit la chaleur d'hydratation et un dosage de 5 % dans le mortier a une influence favorable sur la résistance en flexion et compression par rapport les autres dosages (10%, 15%). [1]

[Safi ; 2013] a étudié le développement de la résistance des bétons autoplacants contenant 10% de déchets de brique pilée à différentes températures (20°C et 60°C) pendant 18h. À partir des résultats, une augmentation de la fluidité et de la densité a été observée, ainsi les valeurs de résistance à la compression du mortier à 14j à 60°C sont proches de celles obtenues à 28j de durcissement à 20°C. Mais il faut tenir compte que les déchets de brique absorbent plus et ont une grande demande en eau ce qui influe négativement sur les propriétés des bétons autoplacants à l'état frais. [82]

[Ranjodh, kaushik ; 2013] ont étudié la substitution des granulats fins par la poudre de marbre et la poussière de brique à un pourcentage de 25% et 50%. Les résultats obtenus montrent que la poussière de brique peut être efficacement utilisée pour produire une bonne qualité du béton autoplacant (étalement et temps d'écoulement satisfaisants), ainsi avec un dosage de 25%, la poussière de brique donne une meilleure résistance à la compression. [81]

II.4 Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur l'état des connaissances relatives au comportement des bétons influencés par la substitution en granulats recyclés de

béton de démolition, déchets de verre et de brique. Mais pour bien comprendre ce comportement, une synthèse sur les caractéristiques de ces granulats, la microstructure, les différentes réactions chimiques, ainsi que les mécanismes d'adhérence pâte de ciment-granat était nécessaire.

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. L'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation; les dosages en superplastifiants et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Tous les programmes expérimentaux demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables pour une formulation scientifique des bétons ordinaires ou autoplaçants et des mortiers contenant ce genre de granulats ou à des logiciels.

Les données bibliographiques spécifiques concernant l'influence des granulats recyclés sur les propriétés physiques et ainsi sur les paramètres de durabilité, sont présentées et analysées.

Cette synthèse bibliographique a montré que de nombreux paramètres peuvent être considérés dans l'étude des bétons pour améliorer certaines de ces propriétés ou pour leur conférer des propriétés nouvelles. En effet, le comportement de ces bétons peut être distingué suivant deux paramètres principaux : le pourcentage de substitution en granulats recyclés et le dosage en ciment.

D'après notre étude bibliographique, il n'est pas aisé de dégager des règles générales d'emplois de granulats recyclés dans les bétons ou mortiers; cela vient de la disparité des objectifs des scientifiques, de ce que leur travail vise à caractériser, ou rechercher des propriétés particulières, de l'abondance des paramètres de composition, de matériaux locaux, de la mise en place, du mode de cure et d'essais.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche qui a pour objectif d'établir une base de données expérimentale d'utilisation des différentes composantes sous différents modes de

conservation et des paramètres de composition pouvant être exploités et complétés visant certaines propriétés des matériaux élaborés.

Nous envisageons dans cette recherche de travailler sur l'interaction des différents composants. Nous abordons le problème par analogie avec les très nombreuses études menées sur le même domaine d'étude.

CHAPITRE III:
MATERIAUX ET PROCEDURES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE III: MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1 Introduction

Ce chapitre décrit en détails tous les essais réalisés au cours de la présente recherche, les matériaux utilisés ainsi que les résultats de leur caractérisation en les comparant aux différentes valeurs imposées par les normes.

- Le programme expérimental utilisé dans l'étude des bétons ordinaires à base de granulats recyclés: on a fait varier le taux de substitution en granulats issus de béton de démolition: 0%, 25%, 50%, 100% pour confectionner les bétons BR0, BR25, BR50 et BR100 respectivement, aussi le dosage en ciment 250, 350 et 450 Kg/m³; Le taux de substitution en sable de déchets de verre 25% et 50% pour réaliser les bétons BRV25 et BRV50 en référence à un béton témoin B0 (sans sable recyclé), on a pu observer ensuite le comportement de ces bétons à l'état frais et durci.

- Concernant les bétons autoplacants: on a confectionné des bétons avec des taux de substitution en poudre de déchets de brique en remplacement des fillers calcaires de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% et en comparant leur comportement à celui d'un béton de référence.

- Pour le programme expérimental consacré à l'étude des mortiers à base de déchets de brique, on a fait varier le taux de substitution en sable de déchets de brique 0%, 25%, 50%, 75% et 100% pour confectionner les mortiers M0, M25, M50, M75 et M100.

On a abordé aussi dans ce chapitre, la composition des différents bétons en adoptant la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires et l'utilisation du logiciel Bétonlab pro pour la formulation des bétons autoplacants, avec présentation de tous les mélanges retenus dans cette étude. La formulation des mortiers à base de sable de déchets de brique a été effectuée en adoptant la formulation d'un mortier normal.

III.2 Matériaux de base utilisés

Les matériaux de base utilisés sont : les granulats de béton de démolition, les déchets de verre, et de brique, les ciments, les additions minérales, les fillers calcaires, les adjuvants, le sable normalisé et l'eau de gâchage; Les normes **NF P 18-101** et **NF P 18-541** définissent les caractéristiques des granulats, pouvant être utilisés pour la confection des bétons. Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire :

L'essai de détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des essais permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **NF P 18-553**.

La propreté de granulats peut être mesurée par deux méthodes :

- En utilisant les essais d'équivalent de sable **NF P 18-598** qui permettent donc de déterminer la quantité des éléments les plus fins contenus dans les granulats.
- Par l'essai au bleu de méthylène **NF P 18-592** qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans une large mesure des désordres et de non qualité dans les bétons.

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. De même que l'on distingue le volume apparent (c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides) et le volume absolu (sans tenir compte du volume des vides).

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

Lors de la fabrication du béton, le malaxage est la source de frottement intense entre les grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; Los Angeles **NF P 18-573**: l'essai consiste à mesurer la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm. Produits par la fragmentation du granulat testé et qui l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

- Résistance à l'usure ; essai Micro Deval **NF P 18-572**: l'essai consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottement mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

Les résultats de caractérisation des granulats utilisés et comparaison avec les valeurs des normes seront présentés dans ce qui suit :

III.2.1 Matériaux utilisés pour Bétons à base de granulats de béton de démolition

) *Granulats ordinaires*

Les analyses au laboratoire des caractéristiques physiques des granulats ordinaires donnent les résultats suivants :

Tableau III.1 Caractéristiques physiques des granulats ordinaires

Coéf. d'applatissage	Equivalent de sable	Densité apparente
Classe 3/8 : 14.47% 30%	65.3% 65%	Classe 0/3 : 1.61
Classe 8/15 : 15.69% 30%		Classe 3/8 : 1.40
Classe 15/25 : 11.82% 30%		Classe 8/15 : 1.30
		Classe 15/25 : 1.37

- Analyse granulométrique

Tableau III.2 Analyse granulométrique des granulats ordinaires

Analyse granulométrique des granulats utilisés					
Tamis	Module	Granulats ordinaires (%)			
		0/ 3	3/8	8/15	15/25
0,08	20	19			
0,16	23	24			
0,63	29	31	2		
1,25	32	42	2		
2,5	35	61	3	1	
4	37	84	16	1	
5	38	100	36	1	1
6,3	39	100	76	3	1
8	40		99	18	1
10	41		100	36	2
12,5	42		100	66	3
16	43			98	28
20	44			100	85
25	45				100

Module de finesse $M_f = 2.58$

La résistance mécanique de ces granulats est caractérisée par les deux coefficients Los Angeles LA et le Micro-deval MD :

Tableau III.3 Caractéristiques mécaniques des granulats ordinaires

Los-Angeles	Micro-Deval
Classe 8/15: 27% 40%	Classe 8/15 :32.32%
Classe 15/25: 26% 40%	

) Granulats de Béton de démolition

Pour les granulats recyclés, on a choisi des éprouvettes de laboratoire qui ont subi des tests destructifs, et dont on dispose des renseignements sur la composition de leurs bétons, la qualité des granulats et leurs caractéristiques.

Les granulats recyclés utilisés dans les études sont donc des granulats concassés de trois classes : sable 0/6, gravier 6/12 et 12/20.

La préparation et l'obtention des classes granulaires se fait par concassage, criblage et tamisage.

Les analyses au laboratoire donnent les résultats suivants :

Tableau III.4 Caractéristiques physiques des granulats recyclés (béton démoli)

Coéf. d'aplatissement	Equivalent de sable	Densité apparente
Classe 6/12 :11% 30%	95% 65%	Classe 0/6 :1.35
Classe 12/20 :14% 30%		Classe 6/12 :1.24
		Classe 12/20 :1.23

- Analyse granulométrique

Tableau III.5 Analyse granulométrique des granulats recyclés (béton démoli)

Analyse granulométrique des granulats utilisés				
Tamis	Module	Granulats recyclés (béton de démolition) (%)		
		0/6	6/12	12/20
0,08	20	0		
0,16	23	2		
0,63	29	7		
1,25	32	16		
2,5	35	23		
4	37	37		
5	38	66	0	
6,3	39	84	1	2
8	40	99	10	3
10	41	100	39	3
12,5	42		89	20
16	43		100	93
20	44			100
25	45			100

Module de finesse $M_f = 4.67$

Comme pour les granulats ordinaires, la résistance mécanique de ces granulats recyclés peut être caractérisée par les coefficients Los-Angeles et Micro-deval

Tableau III.6 Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés (Béton démoli)

Los-Angeles	Micro-Deval
Classe 6/12: 27% 40%	Classe 6/12 :31%
Classe 12/20: 25% 40%	

Les agrégats acceptables pour la production du béton doivent avoir un Coefficient LA 40% selon la norme française **NF P 18-573** ; La majorité des auteurs confirment avoir trouvé des coefficients Los-Angeles satisfaisants pour ces granulats recyclés.

J *Ciment*

Le ciment anhydre est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450°C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, suivant leur types, ils peuvent aussi contenir des constituants secondaires (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...). Le ciment se présente sous forme de grains ayant une grande dispersion de taille (le diamètre varie de 1 à 100 µm) et de forme, dont le diamètre moyen est d'environ 10 µm.

Le ciment utilisé pour l'étude de cette variété de bétons est le ciment de type CEM II/A 42,5 fabriqué à l'usine d'El-Hamma, région de Constantine.

Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de l'usine. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau III.7 Composition chimique du clinker

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	P.A.F
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

Tableau III.8 Propriétés physiques du ciment

Temps de prise		Expansion Le chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
début	Fin	à chaud	à froid		
50min	4h 06min	2,9mm	1,65mm	3891 Cm ² /g	26,91%

Tableau III.9 Composition minéralogique du clinker

Éléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri calcique	C ₃ S	56,60
Silicate bi calcique	C ₂ S	22,98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9,87
Alummino-ferrite tetracalcique	C ₄ AF	8,25

Tableau III.10 Résistances mécaniques du ciment (bars)

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

) *Eau de gâchage*

L'eau permet d'activer la réaction d'hydratation du ciment anhydre et donner une pâte cimentaire durcie. La quantité d'eau initiale est un paramètre de formulation qui conditionne les propriétés mécaniques (résistance, raideur...) et de transfert (porosité, perméabilité...). Ce paramètre est donné par le rapport massique de la quantité d'eau à celle du ciment, noté E/C. Ce rapport affecte également la saturation initiale du matériau, c'est-à-dire l'eau disponible dans le réseau poreux après hydratation.

L'eau utilisée est celle du Laboratoire **LTPE**, les résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée répondent aux prescriptions de la norme **NF P 18-303**, ceux-ci sont présentés dans le tableau III.11 :

Tableau III.11 Analyse chimique de l'eau de gâchage

Concentration en matières et sels (mg/l)		
Echantillons	Concentrations	Norme de spécifications NFP 18-303
Matière en suspension	Traces	/
Sels dissous	1470	/
Sulfates (SO₄)⁻²	413.56	Ls = 2000
Chlorures (Cl)	298.2	/
Calcium (Ca)⁺²	36	/
PH	7.9	Li = 4
Magnésium (Mg⁺²)	60	/
Bicarbonates (HCO₃)	27	/
Carbonates	3.5	/
Température (°C)	19	/

III.2.2 Matériaux utilisés pour Bétons à base de déchets de verre

) *Granulats ordinaires*

Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces granulats donnent les résultats suivants :

Tableau III.12 Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats ordinaires

Coéf. d'appâtissement (%)	Masse volumique réelle (t /m³)	Absorption d'eau (%)	Los-Angeles (%)
Classe 8/16 : 10 30%	Classe 0/2 : 2.644	Classe0/2 :1.721 5%	Classe8/16:22.77
Classe15/25 :8.60 30%	Classe 0/4 : 2.685	Classe0/4 :1.232 5%	40%
	Classe 8/16 : 2.688	Classe8/16 :0.58 5%	Classe15/25:22.83
	Classe15/25 : 2.651	Classe15/25 :0.55 5%	40%

-Analyse granulométrique

Tableau III.13 Analyse granulométrique des granulats ordinaires

Analyse granulométrique des granulats ordinaires utilisés						
Tamis	module	Granulats ordinaires (%)				
		0/ 2	0/4	s. corri	8/16	15/25
0,08	20	0.90	9.71	8.19		
0,16	23	1.57	13.04	11.07		
0.315	26	32.09	18.73	21.02		
0,63	29	96.26	30.20	41.55		
1,25	32		46.76	46.76		
2,5	35		70.59	70.59		
5	38		95.59	95.59	2.76	
8	40		99.80	99.80	10.14	0.78
10	41				24.39	1.12
12,5	42				56.05	2.48
16	43				91.37	44.83
20	44					87.60
25	45					

Module de finesse M_f (sable 0/2) = 1.299 correspond à un sable fin

Les passants à 0.08 12% (teneur en fines acceptable)

Module de finesse M_f (sable 0/4) = 2.749 correspond à un sable peu grossier, il nous faut une correction avec la méthode d'Abrams : on opte pour un sable avec un module de finesse = 2.5 alors, proportion du sable 1 : $(2.5 - 1.299)/(2.749 - 1.299) = 82.82\%$

Proportion du sable 2 : $(2.749 - 2.5)/(2.749 - 1.299) = 17.18\%$

) *Déchets de verre*

Pour notre étude, la préparation et l'obtention des classes granulaires des déchets de verre se fait avec un petit moulin traditionnel Photo III.1



Photo III.1 Sable de verre utilisé

Les analyses au laboratoire donnent les résultats suivants :

-Masse volumique absolue : 2.40 t/m³

-Masse volumique réelle : 2.38 t/m³

-Absorption d'eau : 0.27 % < 5%

- Analyse granulométrique

Tableau III.14 Analyse granulométrique des granulats recyclés (déchets de verre)

Analyse granulométrique des granulats utilisés			
	Tamis	Module	Granulats recyclés (déchets de verre) (%)
Analyse granulométrique	0,08	20	3.82
	0,16	23	6.47
	0,315	26	10
	0,63	29	16.78
	1,25	32	27.06
	2,5	35	50.20
	5	38	95.06
	8	40	99.88
	10	41	100

Les passants au tamis de 0.08 mm 12%, donc teneur en fines acceptable

Module de finesse $M_f = 1.10$

) *Ciment*

Le ciment utilisé pour l'étude des bétons à base de déchets de verre est le ciment de type CEM II/A 42,5 provenant de l'usine d'El-Hamma, région de Constantine, ces différentes caractéristiques sont présentées précédemment (celles du ciment utilisé pour la confection des bétons à base de granulats recyclés du béton de démolition)

) *Eau de gâchage*

L'eau utilisée est celle du Laboratoire **LTPE**, les résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée sont présentés plus haut dans le tableau III.11

III.2.3 Matériaux utilisés pour Bétons Autoplaçants à base de déchets de brique

) *Granulats ordinaires*

Les masses volumiques et l'équivalent de sable de ces granulats sont présentés dans le tableau III.15

**Tableau III.15 Masses volumiques et équivalent de sable
des granulats ordinaires**

	ES/ESV	Masse volumique Apparente (kg/m³)	Masse volumique Absolue (kg/m³)
Sable	58 %	1317.1	2700
Gravier (3/8)	/	1412,3	2306,122
Gravier (8/15)	/	1364,3	2500

Les masses volumiques (apparente et absolue) répondent aux spécifications de la norme **NF EN 12620** qui impose une masse volumique apparente comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et une masse volumique absolue comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³, le sable est propre.

Tableau III.16 Caractéristiques physiques des granulats ordinaires

	Bleu méthylène	Module de finesse	Pourcentage des fines
Sable	0.75	2.6	30%
Gravier (3/8)	/	/	11%
Gravier (8/15)	/	/	0.42%

Les résultats du tableau III.16 ont révélé que la teneur en fines est de 30% pour le sable et de 11% pour 3/8 avec un module de finesse de 2,6. À la vue de ces résultats, le sable est conforme aux exigences de la norme **NF P 18-541** qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2 selon les gisements et exige un Module optimum de 2,5.

-Analyse granulométrique

Les granulats sont d'origine naturelle concassée calcaire qui proviennent de la carrière de Siguss. De cette carrière nous avons pu obtenir trois classes granulaires délivrées suivantes: Sable 0/3, Gravillons 3/8, 8/15.

**Tableau III.17 Analyse granulométrique des granulats ordinaires
et Coefficient d'aplatissement**

Tamis		Granulats ordinaires (%)		
		0/3	3/8	8/15
Analyse granulométrique	0.063	23.53		
	0.080	25.19		
	0.125	28.83		
	0.250	36.62		
	0.315	41		
	0.5	49.42		
	1	61.19		
	2	88.4	36.77	
	3.15	96.77	/	
	4	98.29	65.2	2.85
	5	100	88.31	3.38
	6.3		99.88	5.98
	8		99.99	30.65
	10		100	57.51
	12.5			92.92
	14			99.91
	16			100
	20			
Coefficient d'aplatissement		/	17% 30%	20% 30%

Tableau III.18 Caractéristiques mécaniques des granulats ordinaires (gravillon 8/15)

	Los Angeles	Micro Deval
Gravier (8/15)	23% 40%	20%

D'après le tableau III.18:

Le gravier présente une bonne résistance à l'usure, sachant que la norme **NF P 18-572** exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 35 %.

Le gravier répond aux exigences de la norme **NF P 18-573** qui impose un coefficient Los Angeles inférieures à 40 %.

) *Déchets de brique*

Les déchets proviennent de la briqueterie de Timgad, Photo IV.2, Ils ont été concassés et broyées jusqu'à la fraction granulaire inférieure à 80µm au laboratoire des matériaux de l'Université Badji Mokhtar de Annaba. Leurs caractéristiques sont présentées dans les tableaux III.19, 20.

Tableau III.19 Composition chimique des déchets de brique broyés

Composant	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃
Teneur (%)	53.78	6.22	2.20	12.88	2.13	16.61	0.87	0.65

Tableau III.20 Caractéristiques des déchets de brique broyés

Caractéristiques	Forme	Couleur	Finesse	Dosage recommandé
Résultats	Poudre	Rouge brique	4000 Cm ² /g	10% à 50%

Selon la norme **ASTM C618**, un matériau est considéré comme pouzzolanique si :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$

$$53.78+6.22+16.61=76.61\% \quad 70\%$$

Donc on peut considérer que les déchets de briques broyés sont des matériaux **pouzzolaniques**.



Photo III.2 Déchets de briques utilisés dans les BAP

) *Ciment*

Le ciment utilisé pour confectionner les BAP sont de type CEM I/ 42,5 provenant de la TUNISIE.

Ses différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux III.21, 22:

Tableau III.21 Composition chimique du clinker

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mgo	SO ₃	CaOI	LSF	MS	MAF	PAF	RI
20.40	5.53	3.54	61.60	1.73	2.29	0.56	93.41	2.25	1.56	2.74	0.60

MAF : Module Alumine Ferrique : $MAF = Al_2O_3 / Fe_2O_3$;

MS : Module Silique : $MS = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$;

LSF : Facteur de Saturation en chaux : $LSF = CaO / (2.85 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3)$.

D'après les formules de bogue les teneurs sont comme suit :

$C_3S = 4.07 (CaO) - 7.6 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Fe_2O_3) - 2.85 (SO_3)$.

$C_2S = 2.87 (SiO_2) - 0.75 (C_3S)$.

$C_3A = 2.65 (Al_2O_3) - 1.69 (Fe_2O_3)$.

$C_4AF = 3.04 (Fe_2O_3)$.

Tableau III.22 Composition minéralogique du clinker

Elément	Abréviation	Teneur (%)	Les fourchettes de Spécifications
Silicate tri calcique	C_3S	46.92	$45.0 < C_3S < 79.7$
Silicate bi calcique	C_2S	23.35	$5.7 < C_2S < 29.8$
Aluminate tricalcique	C_3A	8.671	$1.1 < C_3A < 14.9$
Alummino - ferrite tetracalcique	C_4AF	10.761	$2.0 < C_4AF < 16.5$

D'après le tableau III.22, on remarque que le taux de C_3S est à la limite inférieure des fourchettes. Par contre, le C_2S présente un taux élevé ainsi que C_3A et C_4AF possèdent un taux moyen. La faible teneur en C_3S peut engendrer une diminution des propriétés mécaniques des BAP.

) *Fillers calcaires*

Les additions minérales utilisées dans notre étude sont des éléments qui représentent des dimensions inférieures à $80\mu m$: les fillers calcaires.

Les fillers calcaires, provenance ENG d'El Khroub, noté UF20, Photo III.3, dont les principales caractéristiques proviennent des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de l'ENG, les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux III. 23 et 24.

Tableau III.23 Composition chimique du filler calcaire

Composant	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Perte au feu	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	SO ₃	PH
Teneur (%)	0.06	0.02	0.01	43.8	0.09	99	0.01	9

Tableau III.24 Caractéristiques physiques des fillers

Fillers	Poids spécifique	Densité Apparente	Blancheur	Finesse	Humidité
UF20	2.7 kg/l	1.23	92%	2200 (Cm ² /g)	0.1%



Photo III.3 Filler calcaire utilisé dans les BAP

) Adjuvant (superplastifiant) EN 934-2

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés.

Le MasterGlenium 26 est un adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où la haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

Le MasterGlenium se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules

de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

L'excellent effet de dispersion du MasterGlenium 26 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30min avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le MasterGlenium 26 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton:

Augmente :

-) La résistance à la compression au jeune âge et à long terme
-) La résistance à la flexion au jeune âge et à long terme
-) Le module d'élasticité
-) La résistance à la carbonatation
-) L'imperméabilité
-) La résistance aux agressions atmosphériques
-) La qualité des parements et de la texture du béton

Diminue :

-) La vibration
-) Le retrait
-) Le risque de fissuration
-) Le fluage

Il se caractérise par :

Tableau III.25 Caractérisation de Glenium 26

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique à 25 °C	$1.08 \text{ g/c}^3 \pm 0.02$
PH	7 ± 1
Teneur en chlorures	0.01%
Teneur en Na₂O équivalent	2%

) *Eau de gâchage*

L'eau utilisée dans notre travail est l'eau qui alimente le laboratoire des travaux publics LTP EST de Constantine.

Les résultats de l'analyse chimique de cette eau sont présentés précédemment au tableau III.11

III.2.4 Matériaux utilisés pour Mortiers à base de déchets de brique

) *Déchets de briques*

Les déchets de briques subissent une opération qui consiste à fragmenter les plus gros blocs à l'aide d'un brise roche, l'opération de broyage proprement dite est réalisée avec un double concassage (deux concasseurs à mâchoires avec scalpage). Pour l'élaboration des produits finis, les matériaux issus du concassage secondaire sont criblés et concassés (concasseur giratoire), pour obtenir enfin les différentes classes granulaires.

Les analyses au laboratoire donnent les résultats présentés aux tableaux III.26, 27

Tableau III.26 Caractéristiques physiques et chimiques des déchets de brique

Masse volumique absolue	Equivalent de sable	Composition chimique
2.21 t/m ³	87.2% 65%	CaCO ₃ =8.81%

- Analyse granulométrique

Tableau III.27 Analyse granulométrique des granulats recyclés (déchets de brique)

Analyse granulométrique des granulats utilisés		
Tamis	module	Granulats recyclés (déchets de briques)
0,08	20	0
0,16	23	8
0,63	29	27
1,25	32	42
2,5	35	62
5	38	86
6,3	39	
8	40	
10	41	
12,5	42	
16	43	
20	44	
25	45	

Analyse granulométrique

Module de finesse $M_f = 2.75$

) *Sable normalisé*

Le sable utilisé pour l'étude des mortiers est un sable appelé « **sable normalisé CEN EN 196-1** », lui-même étant défini par rapport à « **un sable de référence CEN** », Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\ 350 \pm 5$ g.

sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure III.1

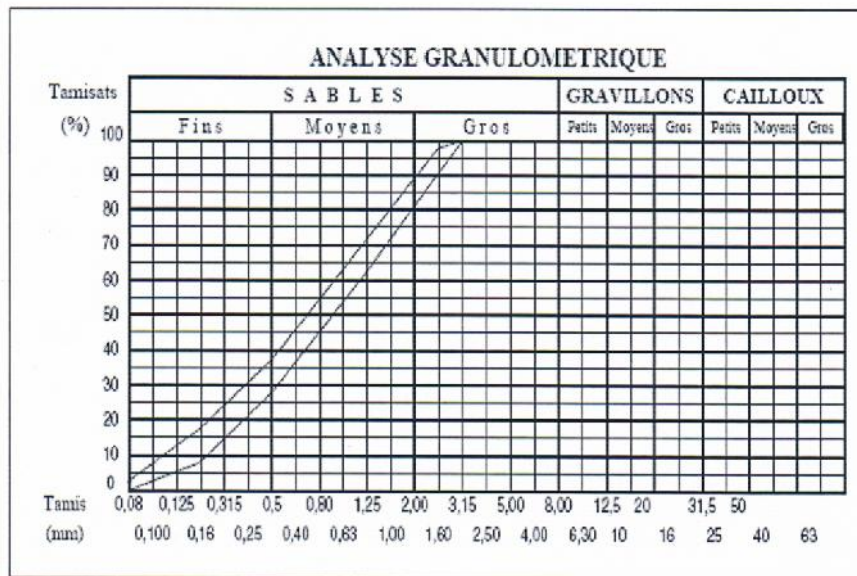


Figure III.1 Composition granulométrique du sable de référence CEN

) *Ciment*

Le ciment utilisé pour l'étude des mortiers est de type CEM II /A provenant de l'usine d'Ain lekbira, région de Sétif; Les différentes caractéristiques sont :

Tableau III.28 Composition chimique du clinker

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	P.A.F
22,12	5,19	3,20	58,79	1,40	1,28	0,22	0,39	0,00	0,00	2,78	2,41

Tableau III.29 Propriétés physiques du ciment

Temps de prise		Expansion Le chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
Début	Fin	à chaud	à froid		
2h46min	5h 24min	1mm		3307 Cm ² /g	26,00 %

Tableau III.30 Résistances mécaniques du ciment (bars)

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	179	352	498
Flexion	37	59	71

) *Eau de gâchage*

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais sur mortiers est celle de la cimenterie de Ain l'kebira région de Sétif, les résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée répondent aux prescriptions de la norme **NF P 18-303**, ceux-ci sont présentés dans le tableau III.31

Tableau III.31 Analyse chimique de l'eau de gâchage

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO ₃	NO ₃	PH
116	36	80	3	140	170	305	5	8,42

III.3 Composition des bétons et mélanges retenus

III.3.1 Composition des bétons ordinaires

Pour la composition des bétons à base de granulats de béton de démolition ou de déchets de verre, on a adopté la méthode « Dreux-Gorisse », qui a pour but de déterminer d'une façon simple et rapide une formule de composition du béton étudié.

III.3.1.1 Composition du béton BR0

On a les données suivantes :

- Dimension maximale des granulats $D = 25$ mm
- Granulats concassés de quatre classes : 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25

- Module de finesse $M_f = 2.58$
- Plasticité : béton plastique
- Serrage : vibration courante
- Affaissement A en Cm : 6 à 9
- Nombre de chocs : 15 à 25
- Dosage en ciment 350 Kg/m^3
- Terme correcteur $K = +2$

Les pourcentages pondéraux du mélange sont présentés au Tableau III.32

Tableau III.32 Pourcentages pondéraux du mélange (granulats ordinaires)

Tamis(mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
Mélange(%)	100	94.7	77.44	54.82	49.6	46.21	41.38	37.82	35.6	28.99	20.99	14.46	6.46

Les pourcentages des différentes classes de granulats sont: (0/3: 34%, 3/8: 9%, 8/15: 16% et 15/25: 42%).

III.3.1.2 Composition du béton BR100

On a les données suivantes :

- Dimension maximale des granulats $D = 20 \text{ mm}$
- Granulats concassés de trois classes : 0/6, 6/12 et 12/20
- Module de finesse $M_f = 4.67$
- Plasticité : béton plastique
- Serrage : vibration courante
- Affaissement A en Cm : 6 à 9
- Nombre de chocs : 15 à 25
- Dosage en ciment 350 Kg/m^3
- Terme correcteur $K = +2$

Les pourcentages pondéraux du mélange sont présentés au tableau III.33

Tableau III.33 Pourcentages pondéraux du mélange (granulats de Béton de démolition)

Tamis(mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
Mélange(%)	100	97.76	71.98	55.54	48.7	39.5	30.36	17.02	10.52	7.36	3.22	0.92	0

Les pourcentages des différentes classes de granulats sont: (0/6: 46%, 6/12: 22% et 12/20: 32%).

III.3.1.3 Composition du béton BRV

On a les données suivantes :

- Dimension maximale des granulats $D = 20$ mm
- Granulats ordinaires concassés de classes : 0/2, 0/4, 8/16 et 15/25
- Plasticité : béton plastique
- Serrage : vibration courante
- Affaissement A en Cm : 9
- Nombre de chocs : 15 à 25
- Dosage en ciment 350 Kg/m³
- Terme correcteur $K = +2$

Module de finesse $M_f(0/2)=1.29$; $M_f(0/4)=2.74$

Les pourcentages pondéraux du mélange sont présentés au tableau III.34

Tableau III.34 Pourcentages pondéraux du mélange

Tamis(mm)	20	16	12.5	10	8	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
Mélange(%)	97.07	86.24	64.77	52.48	46.91	42.15.36	30.35	20.11	17.86	9.03	4.76	3.53

Les pourcentages des différentes classes de granulats sont: (0/2: 7.34%, 0/4: 35.61%, 8/16 : 38%, 15/25: 19%).

➤ **La substitution de verre**

La proportion du verre dans la formule est liée au pourcentage de sable, on a:

Les pourcentages 0/4 → 82.82%

0/2 → 17.18%

Alors pour la **substitution de 25%** :

100% → poids total du sable = 31.83 Kg

25% → x=7.957 Kg : poids du verre

) La quantité à substituer de celle du sable 0/4: 6.59 Kg

) La quantité à substituer de celle du sable 0/2: 1.36 Kg

Pour la **substitution de 50%** :

100% → poids total du sable = 31.83 Kg

50% → x = 15.91 Kg : poids du verre

) La quantité à substituer de celle du sable 0/4: 13.18 Kg

) La quantité à substituer de celle du sable 0/2: 2.73 Kg

III.3.2 Mélanges retenus

Les différentes formulations de ces bétons sont représentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau III.35 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR0)

Matériaux Béton (Kg)	0/3	3/8	8/15	15/25	Ciment	Eau (L)
Béton BR0 (dosage 250Kg/m³)	10.84	3.086	5.552	14.80	4.50	5
Béton BR0 (dosage 350Kg/m³)	10.37	2.952	5.310	14.15	6.30	6.5
Béton BR0 (dosage 450Kg/m³)	9.905	2.819	5.071	13.51	8.10	6.5

Tableau III.36 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR25)

Matériaux Béton (Kg)	0/3	3/8	8/15	15/25	0/6	6/12	12/20	Ciment	Eau (L)
Béton BR25 (dosage 250Kg/m ³)	8.13	2.31	4.16	11.10	3.83	1.85	2.71	4.50	6
Béton BR25 (dosage 350Kg/m ³)	7.78	2.21	3.98	10.61	2.56	1.77	2.59	6.30	7
Béton BR25 (dosage 450Kg/m ³)	7.43	2.21	3.80	10.13	3.50	1.69	2.47	8.10	7

Tableau III.37 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR50)

Matériaux Béton (Kg)	0/3	3/8	8/15	15/25	0/6	6/12	12/20	Ciment	Eau (L)
Béton BR50 (dosage 250Kg/m ³)	5.42	1.54	2.77	7.39	7.67	3.71	5.42	4.50	5
Béton BR50 (dosage 350Kg/m ³)	5.18	1.47	2.65	7.07	1.10	3.55	5.18	6.30	5.5
Béton BR50 (dosage 450Kg/m ³)	4.95	1.40	2.53	6.75	1.10	3.55	5.18	8.10	6

Tableau III.38 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes (Béton BR100)

Matériaux Béton (Kg)	12/20	6/12	0/6	Ciment	Eau (L)
Béton BR100 (dosage 250Kg/m ³)	10.847	7.427	15.346	4.5	7
Béton BR100 (dosage 350Kg/m ³)	10.375	7.105	14.680	6.3	6.5
Béton BR100 (dosage 450Kg/m ³)	9.907	6.784	14.016	8.10	7

**Tableau III.39 Composition des mélanges pour confection des éprouvettes
(Bétons BO, BRV25 et BRV50)**

Matériaux Béton (Kg)	0/4	0/2	8/16	15/25	Ciment	Eau (L)	Verre0/8
Béton BO	26.37	5.47	28.46	14.23	14	7.54	/
Béton BRV25	19.77	4.11	28.46	14.23	14	7.54	7.96
Béton BRV50	13.18	2.73	28.46	14.23	14	7.54	15.91

III.4 Essais de caractérisation des bétons ordinaires

III.4.1 Essais sur béton frais

Air occlus

La mesure de l'air occlus a été effectuée selon la norme **NF P 18-353** au moyen d'un aéromètre, Photo III.4 On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois, on fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet, le deuxième est ouvert, quand l'eau commencera à sortir de ce dernier on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%,

On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Photo III.4 Dispositif de mesure de l'air occlus

Densité

On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre remplie par le mélange avant la mesure de l'air occlus, si les poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P_0 , la densité du mélange frais est tel que : ($V = 7$ litres, volume de la chambre inférieure)

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Ouvrabilité

L'essai est effectué au cône d'Abrams, conformément à la norme **NF P 18-451**, c'est l'essai de mesure de consistance le plus employé; on remplit en trois couches, piquées chacune de 20 coups de pique, un moule tronconique en tôle ($D=20\text{Cm}$, $d=10\text{Cm}$, $h=30\text{Cm}$), le moule est retiré lentement et la mesure est réalisée, la valeur de l'affaissement est exprimé en Cm .

III.4.2 Essais sur béton durci

Essai de compression

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 16Cm et de hauteur 32Cm qui ont été conservées après démoulage jusqu'aux échéances déterminées.

La presse utilisée, Photo III.5 est d'une capacité maximale de 2000KN , asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme **NF P 18-406**.



Photo III.5 Dispositif de l'essai de compression

Essai de traction par flexion

Pour l'étude de la résistance à la traction par flexion, voir dispositif de la Photo III.6, on a utilisé des éprouvettes prismatiques de dimension 7x7x28Cm selon la norme **NF P 18-407** qui ont subi le même mode de conservation que les éprouvettes cylindriques.



Photo III.6 Dispositif de l'essai de traction par flexion

III.5 Concept des bétons autoplaçants

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou

en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre.

Un BAP doit également avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais, ces propriétés se caractérisent principalement par :

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en L)
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces trois caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + addition + eau + air) élevé, l'utilisation de superplastifiants et un volume de granulats faible.

En effet, les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. La quantité de granulats est donc limitée. De plus, le D_{max} des granulats est compris entre 10 et 20 mm. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente, en effet, lorsque le D_{max} augmente. La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (E/C rarement supérieur à 0,55). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants. [2]

Le ciment est généralement un ciment portland ou de haut fourneau.

A celui-ci sont mélangés soit des cendres volantes, soit du filler calcaire. Le choix des additions et de leur teneur respective doit se faire en fonction des exigences de résistance à la compression et de durabilité telles qu'imposées par les normes.

Dans certains cas, des agents de viscosité sont utilisés. Il s'agit généralement de dérivés celluloses, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant et la quantité d'eau. Il faut néanmoins noter que les résistances aux jeunes âges peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions ou un fort dosage en superplastifiant.

En ce qui concerne la mise en place des bétons autoplaçants, celle-ci peut se faire comme pour les bétons ordinaires par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte ou d'un tube plongeur. Ce dernier permet d'éviter la chute du béton frais dans les coffrages.

Les bétons autoplaçants peuvent également être mis en place par le bas du coffrage à l'aide de manchettes d'injection. Le risque de formation de vides d'air est ainsi diminué. Quelle que soit la méthode retenue pour mettre en place le béton, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages afin d'éviter le risque de voir se manifester de la ségrégation dynamique. Ainsi, il y a lieu de répartir les tubes plongeurs ou les manchettes d'injection à un espacement maximum de 7 mètres.

Il est recommandé d'être particulièrement vigilant en matière de protection du béton frais contre la dessiccation. Les BAP sont, en effet, des bétons vulnérables vis-à-vis des effets du retrait plastique. [2]

La cure du béton frais doit donc avoir lieu immédiatement après sa mise en œuvre.

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- des densités de ferrailage importantes
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

Les avantages d'un tel béton sont les suivants:

- ❖ Pour la mise en œuvre :
- Diminution du temps de coulée

- Suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages
- Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes »
- Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles
- Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération

❖ Sur la qualité du béton :

- Parfait remplissage des éléments fortement ferraillés
- Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) ;
- Obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

❖ Concernant la conception :

- possibilité d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton
- Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage

Le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées. En effet, les données de la littérature concernant les pressions exercées par les BAP sont parfois contradictoires mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Deuxième inconvénient, comme c'est un béton très fluide, le temps de séchage est plus élevé que pour un béton ordinaire.

Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre, de l'usure moindre des coffrages et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant: sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité (vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage). La

caractérisation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique des essais spécifiques.

❖ Propriétés du BAP à l'état durci

La Résistance à la Compression est souvent le seul paramètre mesuré et est le plus courant dans le monde du béton. Par conséquent, les normes internationales pour le calcul des structures en béton expriment de nombreuses autres propriétés mécaniques dont la résistance à la traction et le module d'élasticité en fonction de ce paramètre. C'est également le cas de la norme NBN EN 1992 (Eurocode 2) qui reprend la classification du béton uniquement sur la base de la résistance à la compression de la norme européenne NBN EN 206-1.

Diverses études comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours, Figure III.2. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

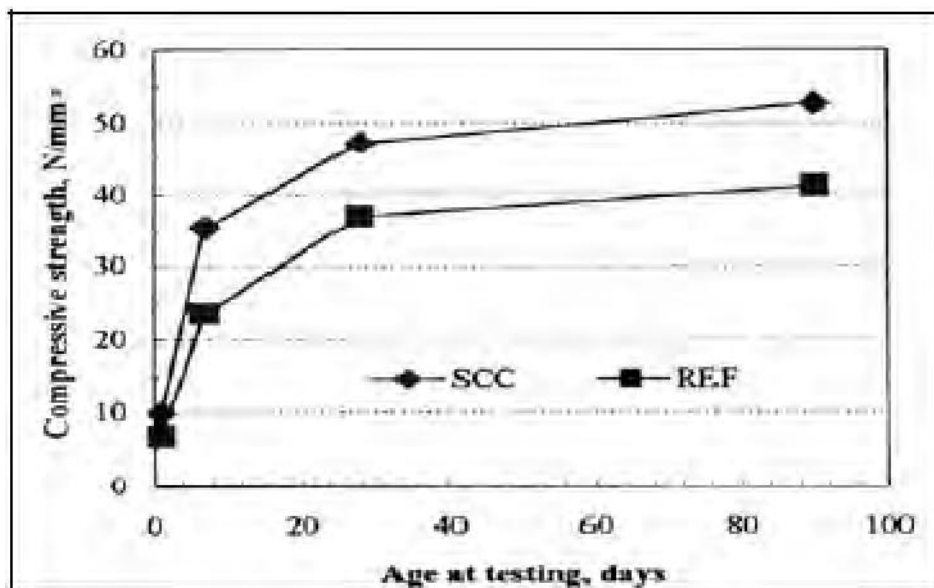


Figure III.2 Evolution de la Résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [Gibbs 99] [53]

Pour Petersson, cette Résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante. De plus, les superplastifiants et les agents de viscosité ont des répercussions sur la résistance mécanique des bétons autoplaçants. Selon Felekoglu et al., l'agent de viscosité diminue la

résistance aux jeunes âges. Par contre, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune âge.

Mais, à long terme, la résistance en compression des BAP est, soit inférieure à celle des BV ce qui est attribué aux quantités importantes de fluidifiant et à la présence du filler calcaire, soit égale à celle des BV.

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. ont montré que le volume de pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte. De même, Pineaud constate que le volume de pâte a une faible influence sur la résistance en compression. Parallèlement au volume de pâte, le rapport E/C est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. Pineaud montre que l'influence du rapport E/C est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV. [53] Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al. montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, Pineaud observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/C (Résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice).

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

Pour certains auteurs, la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures. [53]

❖ Déformations instantanées et différées

Les propriétés de déformation du béton (fluage, retrait) sont fonction des caractéristiques de chaque phase et de leur proportion. Des études expérimentales et théoriques ont montré qu'en prenant un même jeu de constituants et une même composition de la pâte liante, les déformations du béton augmentent lorsque le volume de pâte augmente. Celles des BAP devraient donc être en moyenne plus grandes que celles des bétons vibrés. A la lecture de la littérature, il apparaît que cette augmentation des déformations, bien que réelle, n'est cependant pas aussi marquée que celle prévue par les modèles de calcul. D'une part la diversité des formulations et en particulier des additions minérales utilisées conduit à une diversité de comportements. D'autre part, les expériences mettent en évidence une contribution non négligeable des additions minérales, mêmes celles non pouzzolaniques, aux propriétés du béton durci. Ainsi, des performances mécaniques significativement supérieures à celles de la classe visée peuvent amoindrir la déformabilité et compenser l'effet du volume de pâte. [2]

Les données sur le retrait total, et donc sur le retrait de séchage, sont très partagées: d'un côté, le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et Béton ordinaire [Persson 99]; de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP [Leemann 11]. Figure III.3

Le retrait de séchage est une fonction croissante du rapport E/C, parce que la diffusivité, qui contrôle les transferts d'humidité, augmente avec la porosité. Sur la plage [0,35 - 0,5], l'effet du rapport E/C est assez faible [Bissonnette 99]. Au-delà de 0.6, l'effet est plus marqué.

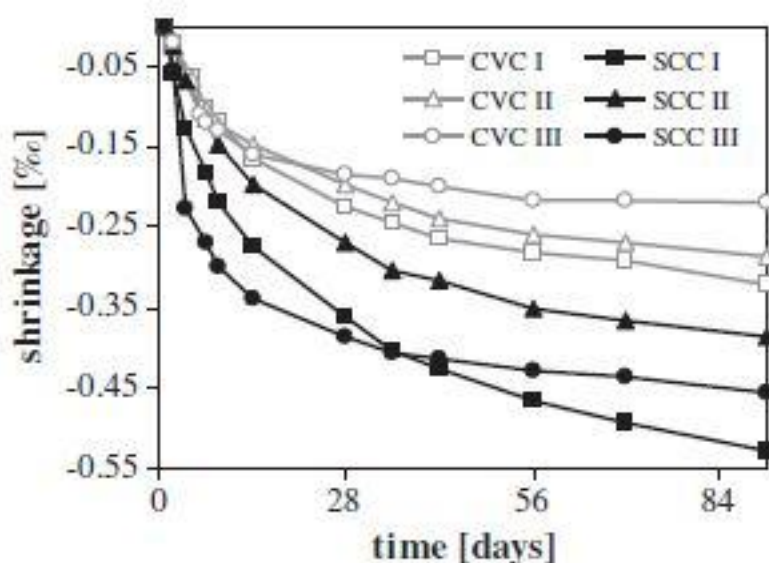


Figure III.3 Retrait des BAP et des BV [Leemann 11] [27]

Pour certains, les entraîneurs d'air n'ont pas d'effet sur le retrait, ce qui est a priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau.

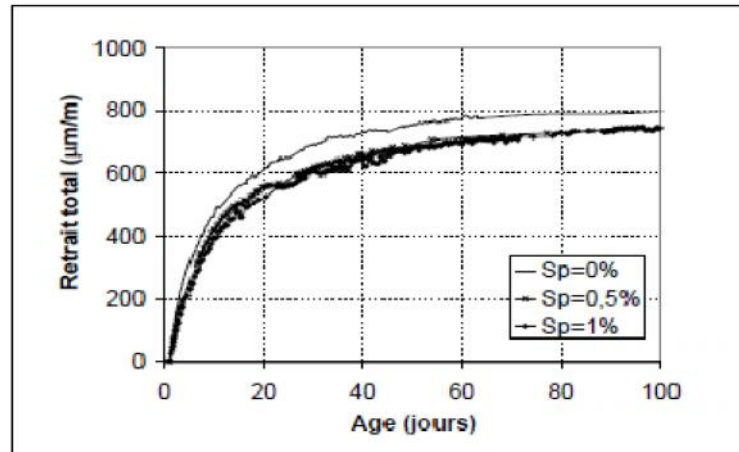


Figure III.4 Effet du dosage en superplastifiant sur le retrait total [Turcry 04] [27]

Le retrait total est sensiblement le même pour les mortiers contenant de l'adjuvant; il est environ 10% plus grand pour le mortier sans adjuvant, figure III.4, On peut d'abord suspecter le superplastifiant d'être un produit tensio-actif et donc de diminuer la pression capillaire. Mais, dans cette hypothèse, son effet ne doit pas être très important, puisqu'entre 0,5 et 1% le retrait n'évolue pas [Turcry 04]. [27]

❖ Durabilité des bétons autoplaçants

La durabilité des bétons est l'aptitude du matériau à résister aux mécanismes de détériorations auxquels il peut être exposé. Une structure en béton doit conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction structurelle tout au long de sa durée de vie utile et spécifiée. Les agressions physiques ou chimiques peuvent être d'origine interne ou externe.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour alcali-réaction).

La durabilité d'un béton autoplaçant vis-à-vis des agressions externes et internes est régie par des mécanismes similaires à ceux connus pour les béton ordinaires.

➤ **Alcali réaction**

Le schéma décisionnel de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali réaction est dépendant du caractère autoplaçant ou non des bétons dans lesquels les granulats seront utilisés.

Par ailleurs, le test de performance béton est applicable pour tous les bétons indépendamment de leur rhéologie. La seule précision à apporter concerne le bilan en alcalins actifs des formulations. En effet, les bétons autoplaçants peuvent renfermer des agents de cohésion qui ne sont pas normalisés à ce jour. Les alcalins totaux des adjuvants classiques des bétons ordinaires sont comptabilisés en tant qu'alcalins actifs. Sans connaissance précise de ce type de produits, il faudrait intégrer les alcalins aux des agents de cohésion.

➤ **Corrosion des armatures : pénétration des ions chlorure et carbonatation**

Les seuils en chlorure et les épaisseurs d'enrobage définis par les normes pour un environnement donné n'ont pas de raison d'être modifiés. Le béton autoplaçant est formulé à partir des mêmes constituants que les bétons ordinaires (ciment, additions, granulats et adjuvants). La présence éventuelle d'agents de cohésion exempts de chlorure n'a pas d'influence directe sur les processus de pénétration des chlorures. Il en est de même pour le gaz carbonique.

Les bétons autoplaçants ont un volume de pâte plus important que les bétons ordinaires et une rhéologie spécifique différente des bétons fluides classiques. La différence peut concerner la porosité interconnectée des bétons autoplaçants en raison du volume de pâte plus important. Toutefois, des études effectuées sur l'influence du mode de cure sur la durabilité des bétons autoplaçants a montré que les coefficients de diffusion des ions chlorure des bétons autoplaçants sont du même ordre de grandeur que les coefficients des bétons ordinaires de même rapport Eau/liant équivalent.

Les cinétiques de carbonatation en conditions accélérées sont similaires.

➤ **Réactions sulfatiques**

Attaques sulfatiques exogènes

La durabilité des bétons ordinaires vis-à-vis d'attaques sulfatiques exogènes est régie par le choix du liant (ciment avec additions de type laitier de haut fourneau, cendres volantes ou

fumées de silice : barrière chimique) et la porosité du béton (barrière physique) liée au rapport Eau/ Liant équivalent. Il en est de même pour le béton autoplaçant.

Réaction sulfatique interne

Les facteurs concomitants nécessaires à la formation de l'ettringite différée dans les bétons ordinaires sont les suivants :

- L'échauffement caractérisé par la température ($>65^{\circ}\text{C}$)
- La teneur en alcalins
- La teneur en sulfates
- La teneur en aluminat tricalcique
- L'humidité relative élevée et dans une moindre mesure,
- La nature des granulats

Ces facteurs sont valables aussi bien pour un béton autoplaçant que pour un traditionnel. La présence d'adjuvants spécifiques aux bétons autoplaçants ne joue pas un rôle direct dans ce processus.

➤ Agressions chimiques

Comme pour les propriétés de transfert vis-à-vis du gaz carbonique et la pénétration des ions chlorure, la résistance des bétons autoplaçants aux agressions diverses (telles que milieux acides aqueux ou gaz, sels d'acides faibles, etc.) est contrôlée par la nature du liant (ciments composés) et la porosité interconnectée du béton liée au rapport E/Liant équivalent. [2]

❖ Perte de masse

L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante, inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant au séchage de celui-ci. [Rozière 07] a étudié l'évolution de la perte en poids en fonction du temps des bétons vibrés et des bétons autoplaçants, les deux bétons suivent la même cinétique de séchage. Le BAP est plus susceptible à la perte de masse. Figure III.5

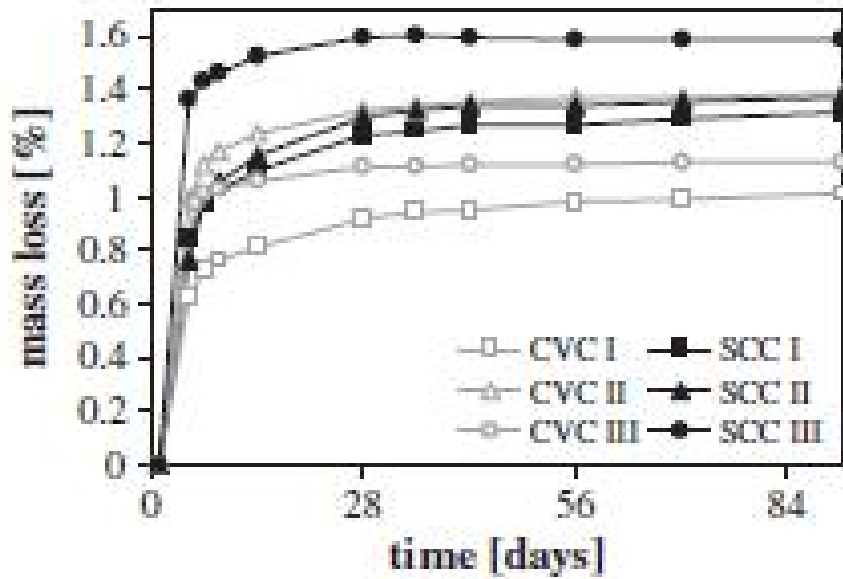


Figure III.5 Perte de masse en fonction du temps [Rozière 07]

➤ Autres propriétés

Le rapport entre la résistance en traction et la résistance en compression des BAP est à priori peu différent de celui des bétons ordinaires. Toutefois, il est conseillé lorsque la résistance en traction présente une importance particulière pour application donnée, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation.

L'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des bétons ordinaires.

Dans certaines configurations (nappes supérieures de pièces épaisses), la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis du ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains bétons ordinaires et peut améliorer l'enrobage des armatures .

Les parements obtenus avec les BAP sont potentiellement meilleurs qu'avec les bétons ordinaires en particulier pour ce qui concerne les défauts liés à l'étanchéité des coffrages et à la vibration. L'obtention de teintes plus homogènes est possible. Par contre, les BAP peuvent présenter des phénomènes de bullage liés à leur résistance à la ségrégation. Pour limiter ce bullage, il convient d'optimiser les méthodes de mise en œuvre et d'utiliser des fluidités élevées dans les limites de stabilité acceptables. [2]

III.6 Formulation du béton autoplaçant

La composition des bétons retenus a été étudiée et optimisée selon la méthode LCPC française (BETONLAB pro) et la méthode empirique (chinoise).

) La méthode de formulation LCPC française (BETONLAB pro)

Cette approche française a été développée dans un laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Sedran et De Larrard (1999) ont utilisé un modèle « suspension solide » pour prédire la teneur en vide entre l'agrégat (la compacité) visant à optimiser le squelette granulaire minimisant ainsi que les besoins en eau pour le BAP.

Le concept « viscosité de référence relative » est utilisé pour évaluer l'état de l'emballage des matériaux constitutifs et à obtenir une optimisation de distribution des granulats.

Cette méthode a permis de réduire les essais de béton. Toutefois, il a fallu un certain nombre d'essais préliminaires.

) Méthode empirique (méthode chinoise)

Après avoir sélectionné les matériaux qualifiés, en faisant quelques essais avec des ajustements, afin d'obtenir une bonne fluidité et une bonne résistance à la ségrégation suivant les exigences.

Premièrement : détermination du volume des granulats requis, en plus de la pâte. A ce stade quelques essais sur la fluidité et d'autres propriétés seront nécessaires. La quantité des fines et le dosage en superplastifiant ainsi que la détermination de la quantité d'eau sont des facteurs principaux influençant sur les essais d'étalement, V-funnel....

Cette méthode introduit des paramètres importants, en prenant en considération la nature des fines et leurs teneurs en eau absorbée (la finesse) par exemple le rapport E/L.

Dans les granulats l'incorporation du facteur PF reste liée avec le degré de compacité, la forme et la nature des agrégats.

Mais cette formulation ne tenant pas compte de la classe des granulats et donnant une quantité plus élevée d'eau, d'où une nécessité de modification sur cette application. En tenant compte

de la moyenne des résultats, obtenus par plusieurs auteurs issus de la littérature des classes 3/8, 8/15 plus précisément en Algérie.

J Comparaison entre la formule chinoise et bétonlab

Avant de choisir la formulation finale on a fait une petite comparaison entre les deux méthodes pour avoir une meilleure formulation et réussir un BAP à base des fines recyclées de déchets de briques et qu'elle est la plus compatible avec les codes et les normes.

On remarque dans le tableau III.40 qu'il y a une différence entre les deux formulations d'un côté économique et dans la consommation de quantité d'eau et superplastifiant et d'après cette comparaison on a conclu que la formulation de bétonlab est plus économique que la formulation chinoise.

Après la comparaison économique on a fait une autre comparaison entre les deux formulations à l'état frais pour confirmer à quel point l'une des deux formulations est compatible avec notre travail.

Tableau III.40 Quantité des constituants de base des deux compositions

Constituants	Formulation bétonlab pro	Formulation chinoise
Ciment (Kg/m³)	400	409.9
Filler calcaire (Kg/m³)	120	134.995
Sable (Kg/m³)	804.8	810.1128
Gravier (3/8) (Kg/m³)	161.3	603.5663
Gravier (8/15) (Kg/m³)	648.8	166.0865
Superplastifiant (Kg/m³)	9.5	9.2494
Eau (Kg/m³)	203.2	219.9152

Tableau III.41 Comportement des deux compositions à l'état frais

Essais	Approche bétonlab pro	Approche chinoise
Etalement (Cm)	73	71.5
T₅₀ (s)	2	2.02
j-ring (%)	0.15	0.6
Dj (cm)	71.5	71
V-funnel (s)	10.73	16.8
Boîte en L (%)	0.91	0.94
Stabilité au tamis (%)	15.4	18.94
Air Occlus (%)	1.9	2.1
Densité (kg/m³)	2.34	2.55

D'après les essais à l'état frais et la confrontation avec les normes et les recommandations requises des BAP, on a confirmé qu'il y a beaucoup d'avantage de l'approche bétonlab par rapport à l'approche chinoise et pour cette raison on a adopté pour notre étude la formulation de bétonlab pro.

) *Formulation retenue*

Tableau III.42 Composition des BAP

Composition (kg/m ³)	Désignation des BAP					
	BAP témoin	BAP FB (10%)	BAP FB (20%)	BAP FB (30%)	BAP FB (40%)	BAP FB (50%)
Ciment CEM I/42.5	400	400	400	400	400	400
Sable 0/3	829.45	829.45	829.45	829.45	829.45	829.45
Gravillon 3/8	316.075	316.075	316.075	316.075	316.075	316.075
Gravillon 8/15	494.375	494.375	494.375	494.375	494.375	494.375
Fillers calcaire	100	90	80	70	60	50
Poudre de brique	/	10	20	30	40	50
Eau	200	200	200	200	200	200
SP	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5

III.7 Confection des mélanges et conservation des éprouvettes

Pour la confection des gâchées, nous avons utilisé plusieurs équipements et fournitures courants afin d'avoir un composant bien homogène.

L'utilisation du malaxeur voir Photo III.7 est impérative dans le béton. Un malaxeur à axe vertical et mouvement circulaire de capacité 180 litres.



Photo III.7 Malaxeur utilisé

La fabrication se déroule comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur.
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers (3/8 et 8/15), le sable avec un temps de 30 sec.
- Introduction du ciment et les additions (FC et FB) avec de temps de 30 sec.
- Malaxage puis introduction de l'eau et adjuvant.

La figure III.6 résume les étapes de conception pour un mélange donné.

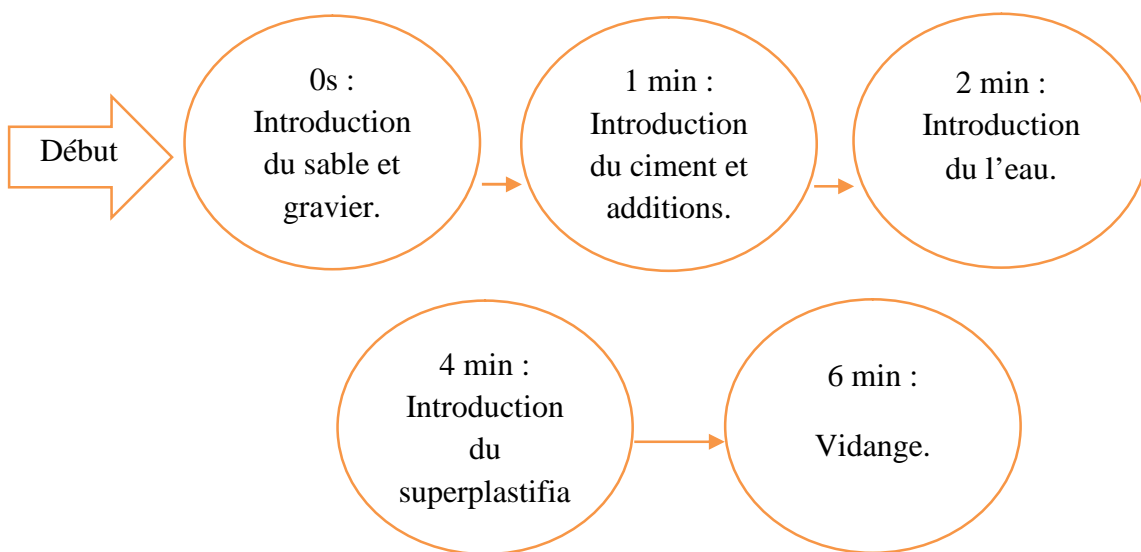


Figure III.6 Etapes de fabrication de BAP

Le type d'éprouvettes utilisées (cubiques et prismatiques), Photo III.8, Conformément et respectivement aux normes NF P 18-406, NF P18-407.

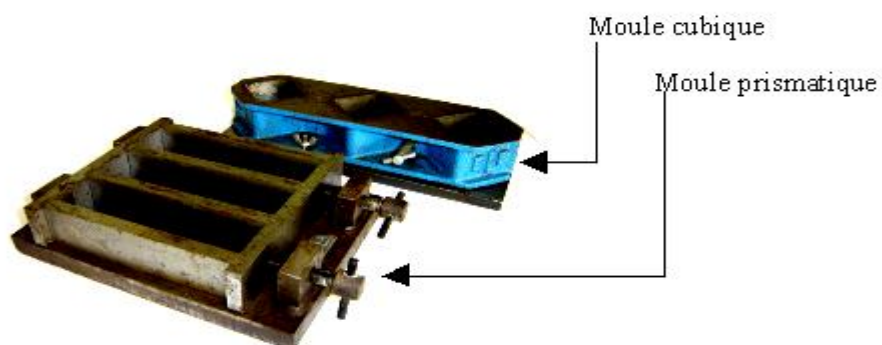


Photo III.8 Moules cubiques et prismatiques

Après vidange de béton on remplit les moules. Les BAP sont capables de s'écouler sous leur propre poids, donc l'absence de vibration, La finition de la surface est effectuée à l'aide d'une règle biseautée.

Il y a plusieurs formes de corps d'épreuve ont été coulées pour chacune des compositions :

- Pour la résistance mécanique en traction/flexion : prismes 7x7x28 Cm.
- Pour la résistance mécanique en compression : cubiques 7x7x7 Cm.
- Pour les variations dimensionnelles et pondérales (retrait et perte en poids): prismes 7x7x28 Cm munis de plots.

Après le coulage, les échantillons sont couverts avec un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau.

Toutes les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après la fabrication. Elles ont ensuite été immergées dans l'eau est à l'air ambiant du laboratoire jusqu'au moment des essais d'écrasement qui s'effectuent à 2, 7 et 28 jours.

III.8 Essais de caractérisation des bétons autoplaçants

III.8.1 Essais de caractérisation du BAP à l'état frais

Les essais qui ont été réalisés sur BAP à l'état frais dans cette étude sont: Essai d'étalement ou slump flow, essai de V funnel, essai de la boîte en L, essai de stabilité au tamis, la densité.

) La fluidité (déformabilité)

La fluidité caractérise la capacité de béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant, Elle est abordée dans cette partie pour un écoulement sans obstacle.

) Essai d'étalement « slump test »

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) selon la norme **NF P 18-451**, on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement présenté à la Photo III.9, Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie.

La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

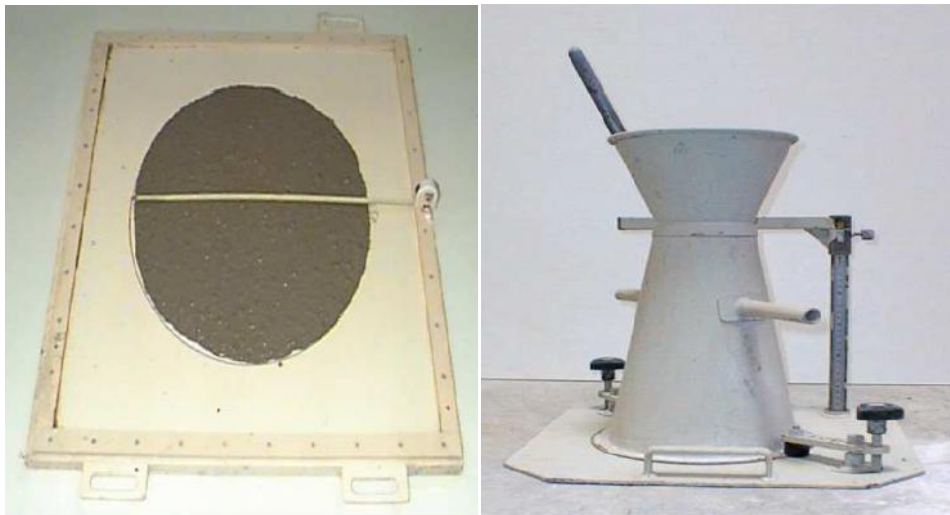


Photo III.9 Cône d'Abrams pour la détermination de l'étalement

Différentes classes d'étalement ont été définies: [24]

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm

Le BAP de classe d'étalement SF1 est destiné à la réalisation d'éléments non ou très faiblement armés, celui de la classe SF3 est dédié aux ouvrages fortement ferrailés.

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présentée en grande quantité sur les bords de la galette.
- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement.
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône.

- Une forme bombée de la galette traduit un effet de voûte, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulateur expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

Vitesse d'écoulement

Lorsque l'on effectue un essai d'étalement, on peut mesurer le temps T50, à partir du moment où on soulève le cône, pour que la galette de béton atteigne un diamètre de 500 mm. Pour un même étalement final, plus le béton sera visqueux, plus il mettra du temps à s'affaisser et plus la valeur T50 sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité de béton. Pour les BAP cette valeur est généralement comprise entre 3 et 5 secondes.



Photo III.10 Etalement pour T50

) Essai d'entonnoir (V-funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir **EN12350-9** est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la Photo III.11, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du BAP. [24]

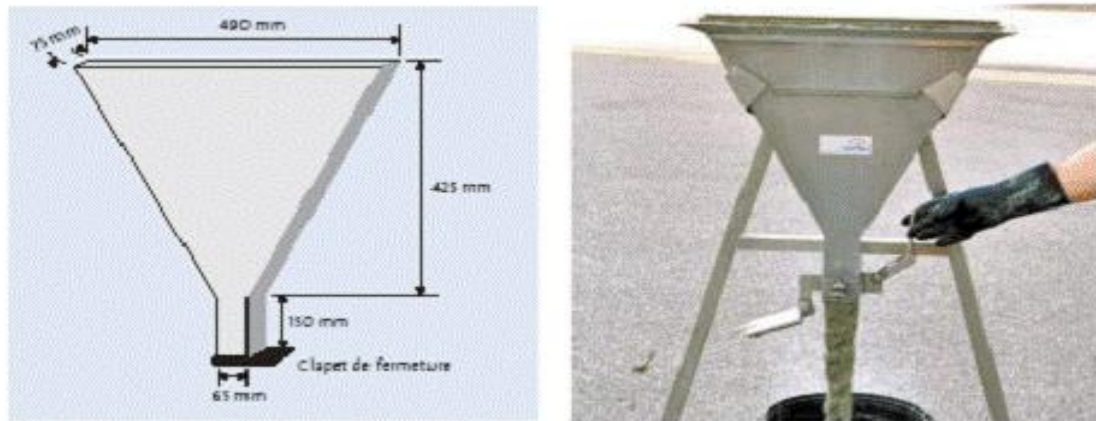


Photo III.11 Essai d'entonnoir

Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP.

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton à travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature \varnothing 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre.

Le béton autoplaçant satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

) Essai de boîte en L (Ségrégation dynamique)

Essai de la capacité d'écoulement des bétons à travers des armatures (capacité de remplissage).

La procédure d'essai dans la boîte en L présentée à la Photo III.12 est la suivante: la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature \varnothing 14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte.

On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini. [2]



Photo III.12 La boîte en L

) *Essai de Stabilité au tamis (Ségrégation statique)*

L'essai de la stabilité au tamis **EN 12350-11** permet de qualifier les bétons autoplacants vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litres du béton juste après le malaxage dans un seau, puis couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 4.8 ± 0.2 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient Figure III.7, Après 2 mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis. On peut considérer qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable.

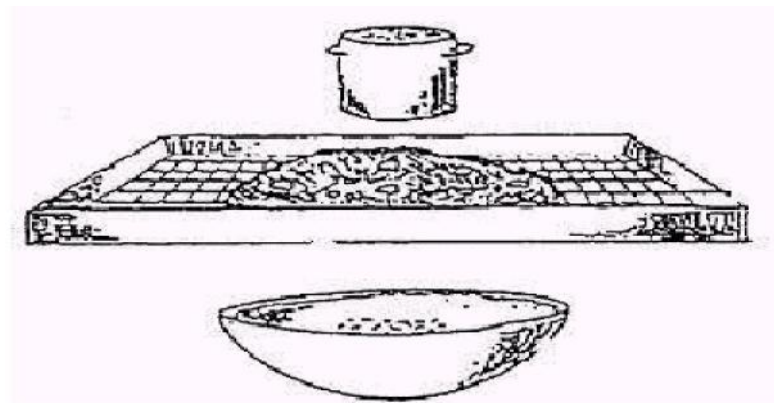


Figure III.7 Essai de stabilité au tamis

Critères d'acceptabilité

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon suivante :

- 0% < % laitance < 15 % : **stabilité satisfaisante**
- 15% < % laitance < 30 % : **stabilité critique** : essai de ségrégation à réaliser in situ
- % laitance >30% : **stabilité très mauvaise** : ségrégation systématique, béton inutilisable.

) Essais complémentaires sur BAP frais

Mesure de la densité

On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre remplie par le mélange avant la mesure de l'air occlus, si le poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P0, la densité du mélange frais est tel que : (V = 7 litres, volume de la chambre inférieure).

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Récapitulatif des essais :

Tableau III.43 Essais et Valeurs recommandées caractérisant les BAP

Essai	Description de l'essai	Classe	Recommandation
Étalement au cône d'Abrams	L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement, dont le diamètre D donne une indication sur la mobilité du béton dans un milieu non confiné.	SF ₁	550-650 mm
		SF ₂	660-750 mm
		SF ₃	760-850 mm
Écoulement au V-funnel	L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.	VF ₁	t < 8s
		VF ₂	9s < t < 25s

Boîte en L	Lors de l'essai, la partie verticale de la boîte en «L» est remplie de béton puis la porte s'ouvre permettant l'écoulement à travers trois armatures. Le taux de remplissage final H2/H1 renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.	H ₂ /H ₁	80%
		T ₂₀	1,5 s
		T ₄₀	3,5 s
Stabilité au tamis GTM	Il consiste à déposer 4.8 kg de béton sur un tamis de maille 5 mm. Après deux minutes de tamisage, nous pesons la quantité de mortier (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage de laitance P par rapport à la masse initiale donne l'indice de ségrégation.	0% P 15%	
		15% P 30%	
		P 30%	

III.8.2 Essais de Caractérisation du BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplacants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

) *Essai de compression*

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques 7x7 x7 Cm conformément aux prescriptions de la norme **NF P18-406**, qui ont été conservées après démoulage dans un milieu à 20°C et 95 ± 5% d'humidité relative jusqu'aux échéances déterminées (7 jours, 28 jours).

Ce test fournit la force de compression N qui génère la rupture de l'échantillon. La contrainte de compression à la rupture en Pa est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.

) *Essai de traction par flexion*

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages, Figure III.8, Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont prismatiques de dimensions 7x7x28 Cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante :

$$R_t = \frac{M_f \cdot a}{2I} \quad \text{Et} \quad M_f = \frac{F \cdot L}{4}$$

Où : M_f est le moment de flexion, F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion et a le côté du prisme.

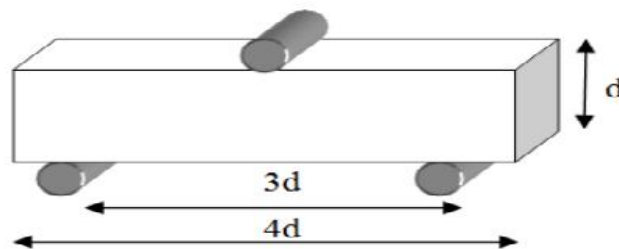


Figure III.8 Mesure de la résistance à la traction par flexion des 7x7x28 Cm

) *Déformations différées*

Retrait libre

Pour chaque béton, les mesures de retrait sont effectuées longitudinalement sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 Cm munies de plots à leurs extrémités Photo III.13



Photo III.13 Plots de retrait

Les éprouvettes sont conservées à l'air, (échange hydrique libre), la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et humidité de $50\% \pm 5$.

Les mesures de variation dimensionnelles commencent après les décoffrages et sont effectuées ensuite avec une périodicité qui augmente avec le temps à l'aide d'un retractomètre à comparateur digital (précision $\pm 0,02$ mm) Photo III.14



Photo III.14 Retractoromètre

) *Absorption capillaire*

L'objectif de cet essai est de suivre la masse d'eau absorbée par les BAP au cours du temps pour mettre en évidence d'éventuelle différence de porosité ouverte dans nos bétons. Cet essai a été effectué sur des échantillons cubiques 10x10x10 Cm conservés pendant 28 jours à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $95 \pm 5\%$ d'humidité relative, Photo III.15

A l'issue de cette période de cure, les échantillons sont prélevés puis placés dans une étuve à $60 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masses (variation de masse entre deux pesées espacées de 24h inférieure à 0,1%). Une fois cette opération réalisée, la face latérale des échantillons est recouverte de papier aluminium autocollant afin d'éviter tout échange hydrique radial.

L'essai d'absorption capillaire est lancé après cette dernière précaution. Pour cela, les éprouvettes testées sont initialement pesées (M_0) en kg puis immergées dans l'eau sur une hauteur de 1.5 cm. Aux échéances données et après avoir épongé chaque échantillon, l'évolution de la masse est suivie par pesée (M_i).



Photo III.15 Essais d'absorption capillaire

III.9 Essais sur mortiers

Pour l'étude des mortiers à base de déchets de brique, la formulation a été effectuée en adoptant la formulation d'un mortier normal, ce mortier est réalisé conformément à la norme **EN 196-1**;

Ces constituants sont gâchés dans les proportions suivantes :

450g±2±g de ciment

1350g±5g de sable normalisé

225g±1g d'eau

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50

Pour les essais réalisés sur mortiers, on a utilisé des éprouvettes de forme prismatique de dimensions 4x4x16 Cm, les essais de caractérisation à l'état durci des mortiers consistent en des mesures de résistance à la compression et à la traction aux échéances : 2,7 et 28 jours.

III.10 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, les matériaux utilisés dans l'étude des bétons et des mortiers, les résultats des essais de caractérisation de ces matériaux ont été exposés, d'après ces résultats, on a pu tirer les observations suivantes :

Deux particularités distinguent les granulats recyclés de béton de démolition des granulats naturels : la gangue de ciment de l'ancien mortier attachée aux granulats primaires et la présence d'impuretés.

Les granulats recyclés de béton de démolition sont de surface rugueuse, de forme anguleuse, de granulométrie grossière, de faible densité, de forte porosité et donc d'absorption d'eau élevée et de faibles résistances mécaniques.

Les granulats recyclés de béton de démolition présentent une source supplémentaire de chlorures, de chaux, d'alcalins ainsi que d'autres matières susceptibles de modifier la structure du béton et influencer sa durabilité.

Pour le sable de déchets de verre, on a constaté une diminution de la masse volumique réelle de 10.50% par rapport à celle des sables ordinaires.

Les granulats recyclés de déchets de verre sont plus légers que les granulats ordinaires.

On a remarqué aussi une diminution très importante de l'absorption d'eau de sable de déchets de verre qui est de 77.59% par rapport au sable naturel.

Les déchets de brique utilisés dans les BAP présentent une grande finesse, à peu près le double à celle des fillers calcaires, d'après sa composition minéralogique et selon la norme **ASTM C618** nous pouvons conclure que ces déchets ont des propriétés pouzzolaniques. Cette grande finesse ($4000 \text{ Cm}^2/\text{g}$) peut augmenter la demande en eau et par conséquent causer des problèmes à l'état frais (fluidité). Par contre, cette propriété pouzzolanique peut contribuer à l'amélioration de la résistance à la compression ainsi qu'à la traction.

Les sables de déchets de brique utilisés dans les mortiers sont généralement moins absorbants et plus denses que les sables ordinaires.

La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée, ce qui va contribuer à avoir des mortiers de moyenne qualité de maniabilité.

CHAPITRE IV:
ANALYSE DES RESULTATS
ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction

La thématique des bétons classiques/autoplaçants et des mortiers à base de granulats recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie expérimentale présente les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie de ces bétons à l'état frais et la caractérisation de ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci en mettant l'accent sur les problèmes liés à la microstructure et de façon à répondre à la problématique liée à leur mise en œuvre et leurs propriétés spécifiques, avec des matières premières algériennes et dans un contexte de développement durable.

IV.2 Béton à base de granulats recyclés de béton

IV.2.1 Ouvrabilité

La demande en eau est définie comme étant le dosage en eau efficace nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée, Les mélanges de béton sont préparés avec un affaissement imposé (entre 6 et 8 cm) fourchette des bétons plastiques ce qui est plus répandu dans les chantiers de coulage de béton.

Les résultats de l'influence du taux de substitution sur la demande en eau des bétons confectionnés pour une maniabilité constante sont présentés dans les courbes de la figure IV.1

On remarque que la demande en eau des bétons étudiés augmente avec le dosage en ciment

La demande en eau maximale est de 7 L atteinte dans les bétons dont les dosages en ciment sont 350 et 450 kg/m³ pour le béton BR25 et de dosage 250 et 450 Kg/m³ pour le béton BR100.

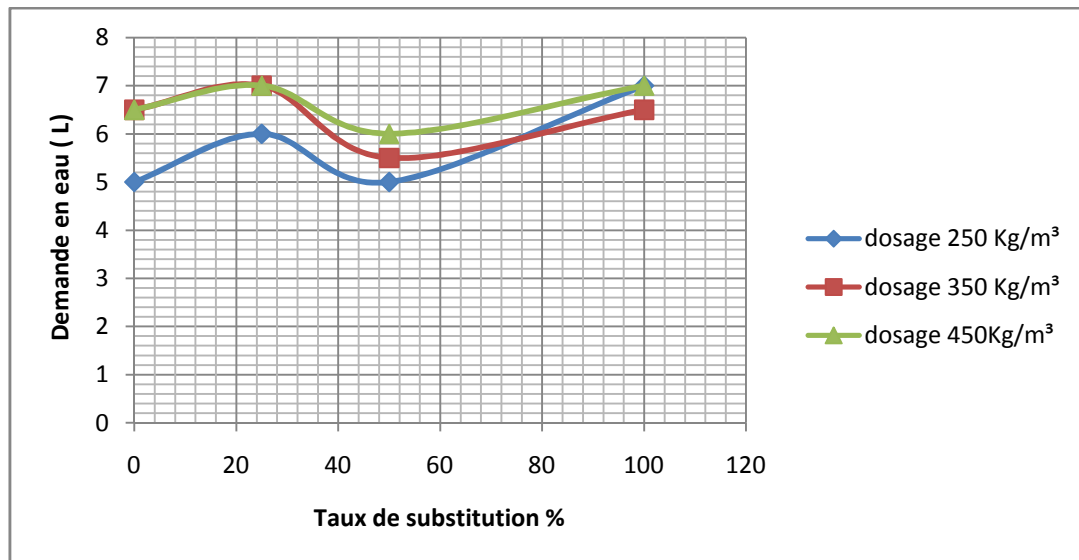


Figure IV.1 Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton

La demande en eau de tous les bétons étudiés augmente avec le taux de substitution en granulats recyclés, par conséquent une augmentation du rapport Eau/Ciment est inévitable. [51], L'absorption d'eau des granulats recyclés de béton est pratiquement inévitable et affecte le comportement rhéologique du béton frais ainsi que sa résistance au gel-dégel, Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats, Pour s'affranchir de celle-là, une quantité d'eau supplémentaire est indispensable pour conserver une ouvrabilité plastique similaire. L'absorption est la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats recyclés ainsi les sables recyclés sont caractérisés par une structure anguleuse et, par conséquence, une surface spécifique plus développée. [21]

Lors de la confection des bétons à base de granulats recyclés de béton, on a remarqué une certaine difficulté de mise en œuvre par rapport à celle des bétons ordinaires probablement due à l'absorption d'eau élevée de ces granulats, une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et ces granulats a été confirmée par Hansen. [54]

Si l'on substitue des granulats naturels par des granulats recyclés, on constate une perte de maniabilité [Topçu et al., 2004]. Cependant, la formulation est généralement mise au point avec un objectif de consistance initiale (exprimée sous forme d'affaissement au cône). Tout l'éventail des valeurs d'affaissement est à priori envisageable avec des matériaux recyclés, avec des dosages en eau plus forts que pour les bétons ordinaires. Par contre, les possibles phénomènes d'absorption d'eau différée par les granulats (dont l'essentiel se produit dans les

15 premières minutes de la vie du béton) et l'utilisation d'adjuvants, en présence d'impuretés diverses modifiant la chimie de l'hydratation précoce, augmentent le risque de perte rapide de maniabilité [Ravindrarajah et al., 1987]. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation en béton prêt-à-l'emploi [Kashino et Takahashi, 1988]. Enfin, dans les cas où l'on utilise des superplastifiants, il faut s'attendre à des valeurs de viscosité plastique plus élevées que dans les bétons ordinaires, sauf si les mélanges contiennent beaucoup de fines. Cependant, les références manquent en la matière. Cité [79]

IV.2.2 Air occlus

La variation de l'air occlus des bétons en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton est présentée dans la figure IV.2

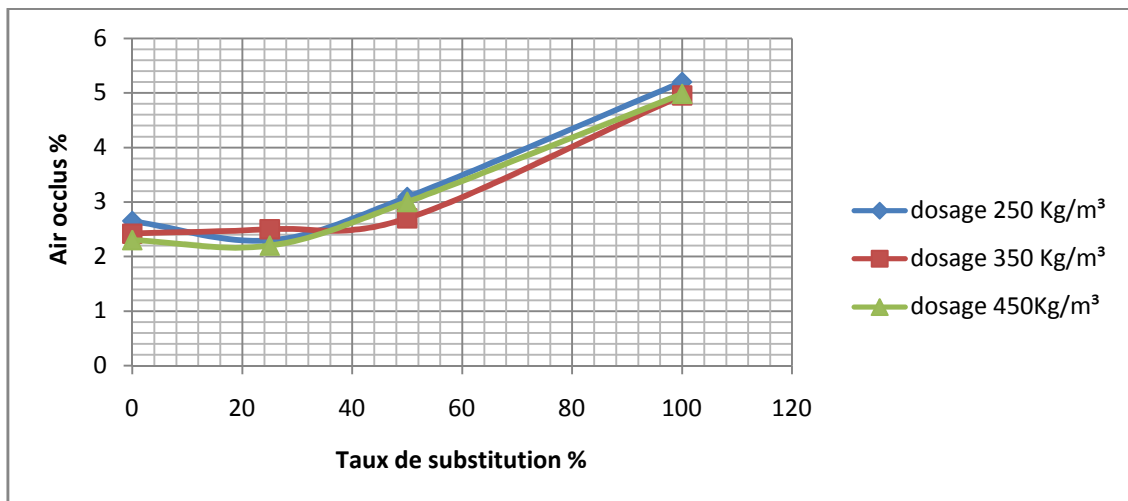


Figure IV.2 Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton

La figure IV.2 montre que l'air occlus augmente avec le taux de substitution, il atteint sa valeur maximale qui est de 5,20 % pour un béton qui contient 100% de granulats recyclés. Le BR100 est un béton poreux.

Le pourcentage de l'air occlus diminue avec l'augmentation du dosage en ciment, Les particules fines du ciment remplissent les vides disponibles entre les particules du béton réduisant ainsi l'air emprisonné dans ces vides.

La forme et la rugosité des granulats recyclés peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne,

certain auteurs trouvent des teneurs en air occlus plus importantes dans les bétons de granulats recyclés. [79]

V.2.3 Densité

La variation de la densité des bétons en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton est présentée dans la figure IV.3

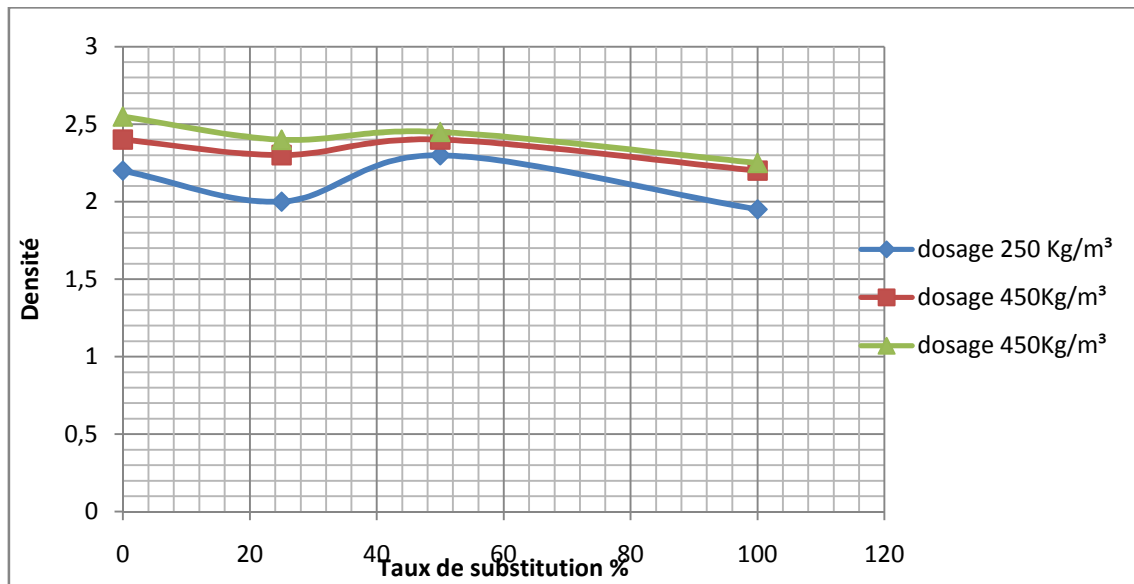


Figure IV.3 Variation de la densité du béton frais en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton

Les courbes montrent que les densités sont décroissantes avec le taux de substitution en granulats recyclés (béton de démolition).

Cette décroissance s'explique logiquement à cause de la porosité plus élevée et des impuretés légères présentes dans ces granulats, en plus de la faible densité de la gangue de ciment. [51]

On peut remarquer aussi que les densités des bétons à base de ces granulats sont plus faibles que celles des bétons à base de granulats naturels.

Ces résultats montrent que le béton recyclé est moins compact que le béton naturel, donc ses propriétés mécaniques sont influencées négativement, une bonne vibration s'impose pour avoir un béton comparable au béton de référence.

La densité des bétons augmente avec l'augmentation des dosages en ciment, Les particules fines du ciment remplissent les vides disponibles entre les particules du béton augmentant

ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice.

IV.2.4 Résistance à la compression

Les résultats de l'essai de compression sur éprouvettes en béton à base de granulats recyclés (béton démolé) sont présentés dans la Figure IV.4

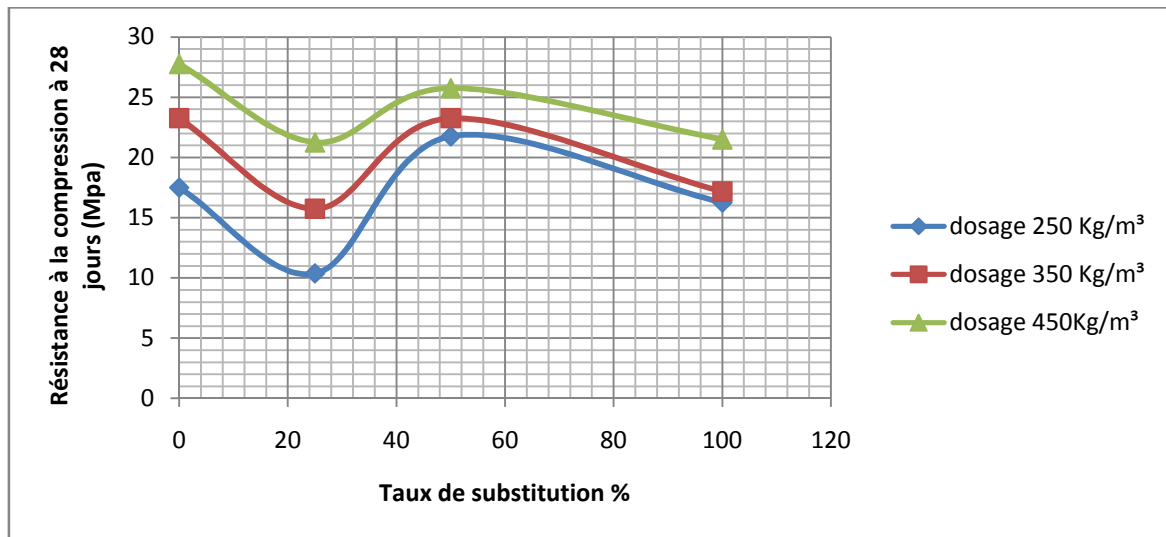


Figure IV.4 Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les trois dosages à 28j

La résistance à la compression des bétons diminue lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente, on peut l'accroître en augmentant le dosage en ciment.

En effet, il a été montré que le rapport Eau/ciment est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton, ainsi que la qualité du béton parent [33].

L'adhérence entre le mortier et le gros granulat influence considérablement la résistance à la compression, ce qui traduit la diminution de la résistance du béton à base de granulats recyclés. [51]

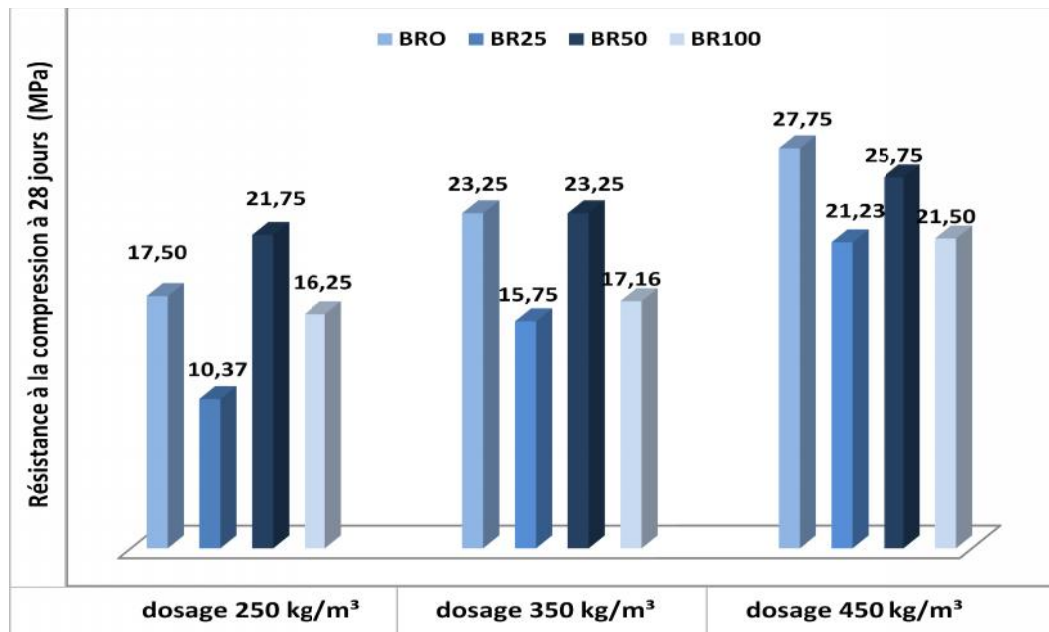


Figure IV.5 Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés de béton

A partir de la figure IV.5 on peut conclure que :

A un dosage de 450Kg/m³, la résistance maximale est atteinte au béton BR0

Les pourcentages de perte de résistance par rapport au béton témoin:

A un dosage de 250Kg/m³: BR25: 40.74% ; BR100: 7.14% ; BR50 présente un gain de résistance de 24%.

A un dosage de 350Kg/m³: BR25: 31.91% ; BR50 aucune perte ; BR100: 26.19%

A un dosage de 450Kg/m³: BR25: 23.49% ; BR50: 7% ; BR100: 22.52%

IV.2.5 Résistance à la traction

Les courbes de la figure IV.6 présentent les efforts appliqués à l'essai de traction par flexion sur les éprouvettes de béton en fonction du taux de substitution en granulats recyclés pour les trois dosages considérés dans cette étude:

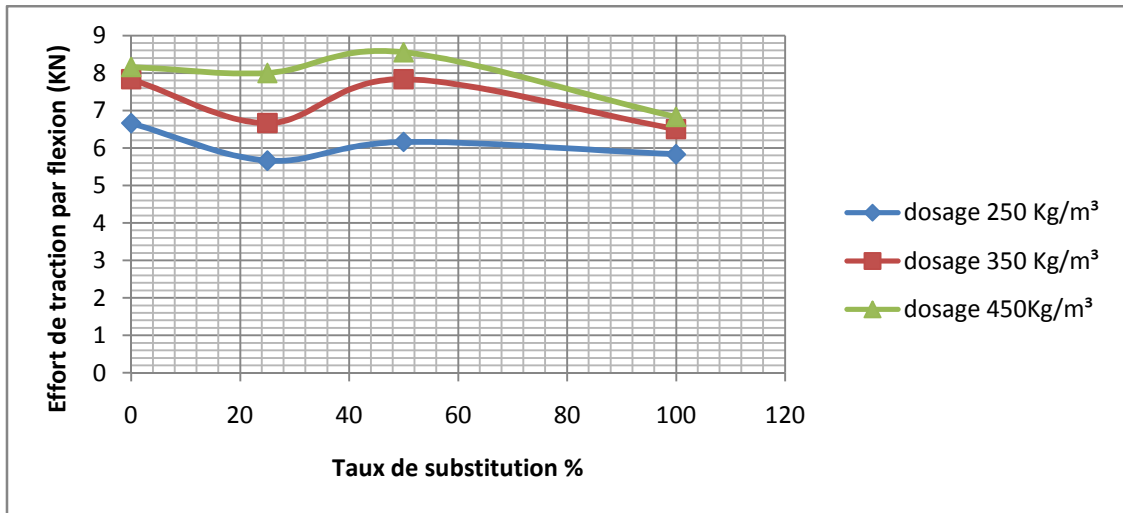


Figure IV.6 Effort de traction appliqué sur le béton à base de granulats recyclés de béton pour les trois dosages à 28j

Il est à constater que les valeurs minimales de la résistance à la traction sont obtenues dans le béton BR100 et que l'effort maximal de rupture appliqué dans cet essai est de 8.55 KN obtenu dans le béton BR50 donc il présente la meilleure résistance.

La résistance à la traction augmente avec le dosage en ciment dans tous les bétons étudiés.

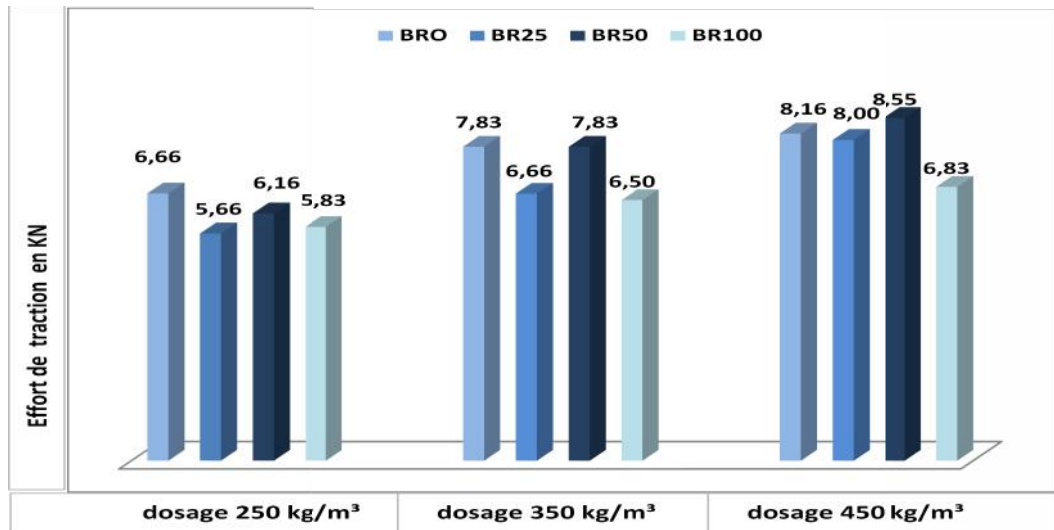


Figure IV.7 Influence du taux de substitution sur la résistance à la Traction des bétons à base de granulats recyclés de béton pour les trois dosages

Les pourcentages de perte de résistance par rapport au béton témoin: Figure IV.7

A un dosage de 250Kg/m³: BR25: 15% ; BR50:7.50% ; BR100: 12.46%

A un dosage de 350Kg/m³: BR25: 14.94% ; BR100: 16.98% ; pour BR50 : pas de perte de résistance à la traction.

A un dosage de 450Kg/m³: BR25: 1.96% ; BR100: 16.29% ; BR50 représente un gain de 4%.

La résistance à la traction de tous les bétons est moyennement similaire, les pourcentages de perte de résistance restent admissibles, cette perte est due à la présence de la gangue de ciment. Les essais de flexion conduits par [Casuccio, 2008] [33], montrent que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels. Les mécanismes de rupture semble dépendre de la nature du béton de démolition [Etxeberria, 2007 ; Casuccio, 2008]. [46] [33]

Certains auteurs ont noté des baisses de résistance à la traction de 20 à 40%, c'est le cas de Zaharieva [51], d'autres comme Tavakoli [92] ont remarqué des hausses, d'autres comme Hansen [54] n'a pas mis en évidence de différence significative.

En plus de la faible qualité des granulats recyclés de béton, et les microfissures que comportent ces granulats, la diminution de résistance à la traction est généralement due à l'augmentation de la pâte de ciment, et à la forme (plus angulaire et moins cubique) de ces granulats [Ravindrardjah]. Cité [39]

IV.3 Béton à base de déchets de verre

IV.3.1 Résistance à la compression

La résistance en compression a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques en béton. Ces valeurs en fonction du taux de remplacement avec du sable de déchets de verre est représentée dans la figure IV.8

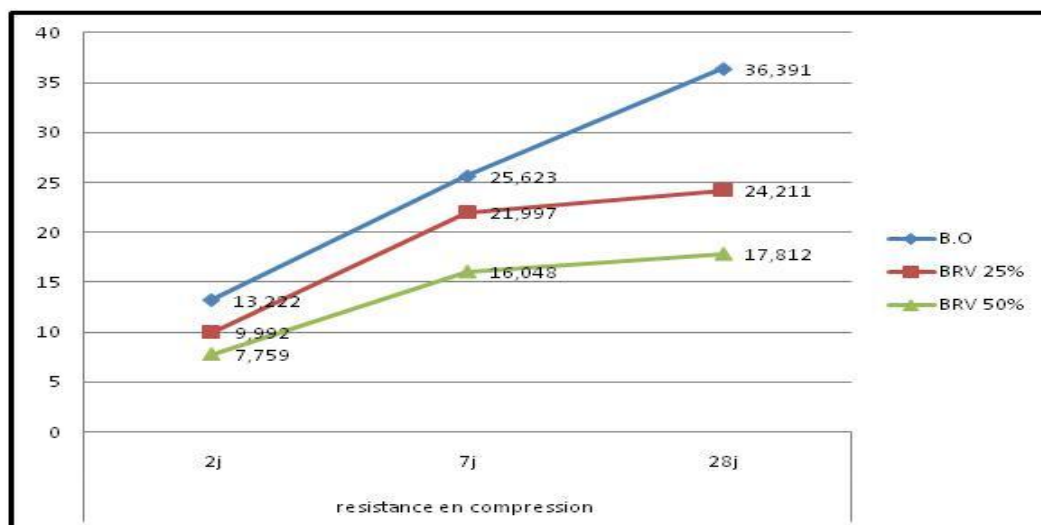


Figure IV.8 Résistance à la compression du béton à base de déchets de verre en MPa

On remarque que plus le taux de substitution en verre augmente plus la résistance diminue,

Le verre dans le béton peut conduire, en fonction de la taille des particules, à deux types de comportement aux conséquences complètement antagonistes : la réaction alcali-silice (RAS) entraînant des gonflements du béton, et la réaction pouzzolanique, améliorant les caractéristiques mécaniques et la durabilité du matériau. Ainsi, l'utilisation de granulats siliceux dans le béton entraîne une réaction alcali silicate (RAS). Un gel expansif se forme à l'interface granulat mortier et entraîne par création de microfissures une fragilisation du matériau. [83]

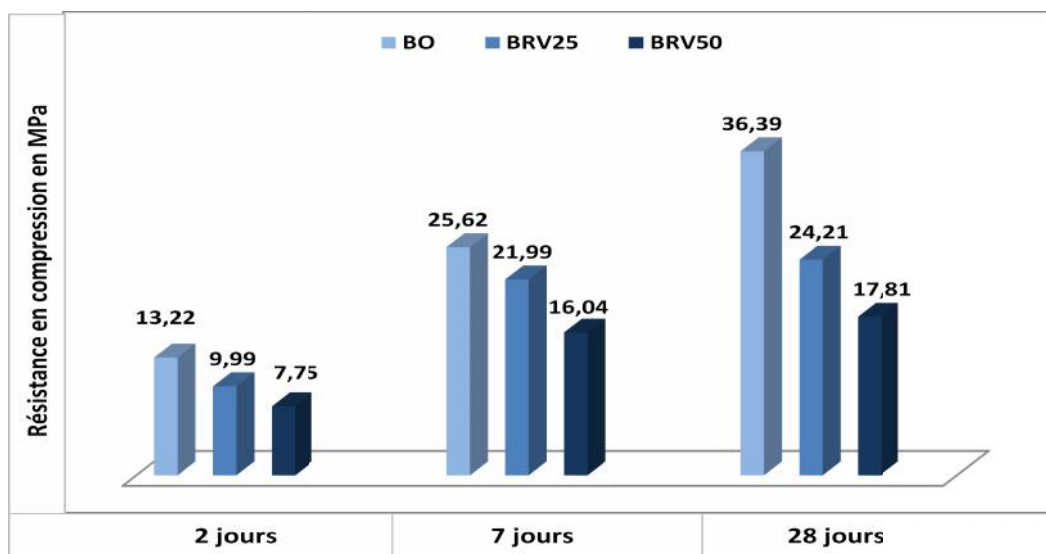


Figure IV.9 Développement de la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps

Dans cette partie, l'étude de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps a été effectuée sur les bétons à base de sable de déchets de verre ainsi que sur le béton témoin afin de suivre le développement de la résistance à long terme.

D'après la figure IV.9, on constate que l'évolution de la résistance suivant l'âge des bétons à base de déchets de verre recyclés se comporte d'une manière analogue que celle du béton conventionnel, cela nous laisse conclure que le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les bétons recyclés se déroule normalement et suit une augmentation avec l'âge.

Pour les bétons à 25% de sable de déchets de verre, la perte de résistance à la compression reste pratiquement stable au jeune âge et à 28 jours, elle est de l'ordre de 24%.

Pour les bétons à 50% de sable de déchets de verre la perte de résistance à la compression commence par 41% à jeune âge et arrive à l'ordre de 51% à 28 jours.

La couleur du verre est un indicateur du taux de silice. [Topçu et al., 2008] analyse la composition du verre en fonction de la couleur (vert, marron et blanc par ordre de contenu en oxyde de silice croissant), et montre que le mortier à base de verre vert induit le moins de RAS. La résistance observée diminue avec le taux de remplacement.

En effet, [Topçu et al., 2004; 2008] montre que la résistance en compression en fonction du taux de remplacement décroît linéairement (pour les pourcentages de remplacement testés), l'expansion étant croissante en fonction de l'âge et du taux de remplacement (quelque soit l'âge du béton pour un taux donné). L'adhésion incomplète du verre à la pâte de ciment est aussi une cause de cette décroissance de la résistance.

[Batayneh et coll.;2007] et [Nishikawa et coll.;1995] ont travaillé avec des substitutions de sable non celle de ciment. Leurs résultats montrent que ce remplacement est bénéfique pour les bétons étant donné le gain de résistance obtenu. Toutefois, ils proposent une étude plus approfondie concernant la réaction alcali-silice et la durabilité de ces bétons, vu la quantité d'alcalins présente dans le verre. [Shayan et coll.; 2002] ont montré que la substitution de 30% de sable par du verre fin donnait de meilleures résistances que des mélanges témoins sans verre. [57]

IV.3.2 Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction des bétons à base de déchets de verre sont présentés dans la figure IV.10:

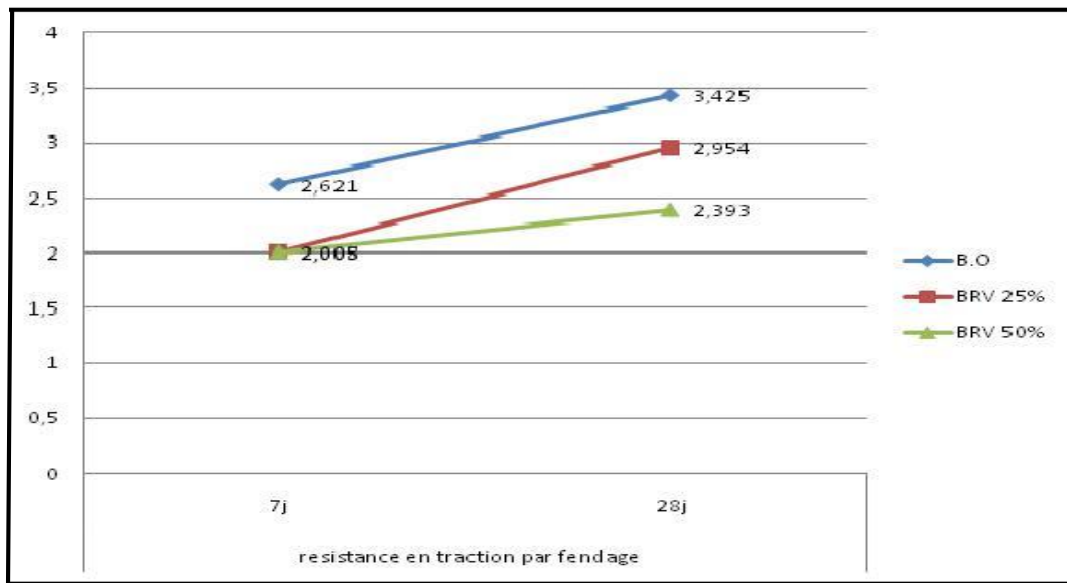


Figure IV.10 Résistance à la traction du béton à base de déchets de verre à en MPa

Cette figure montre que plus le taux de substitution augmente plus la résistance diminue, cela est plus remarquable à 28j, cette diminution peut être liée selon [Tung et al., 2011] et [Kou et al., 2009] à la faible adhérence au niveau de l'interface agrégats (granulats) mortier (matrice cimentaire).

Cette baisse pourrait s'expliquer aussi par l'augmentation du volume occupé par les granulats recyclés. Cette augmentation de volume induit la création de zone de contact entre les granulats de nature différente. Il s'agit ici d'un contact entre un élément raide (granulats naturels) et un élément moins raide (verre).

La zone de contact des granulats constitue une zone de faiblesse à travers laquelle se propage la fissure d'une part et d'autre part les zones de rigidité plus faible constituent aussi des zones de faiblesse. [83]

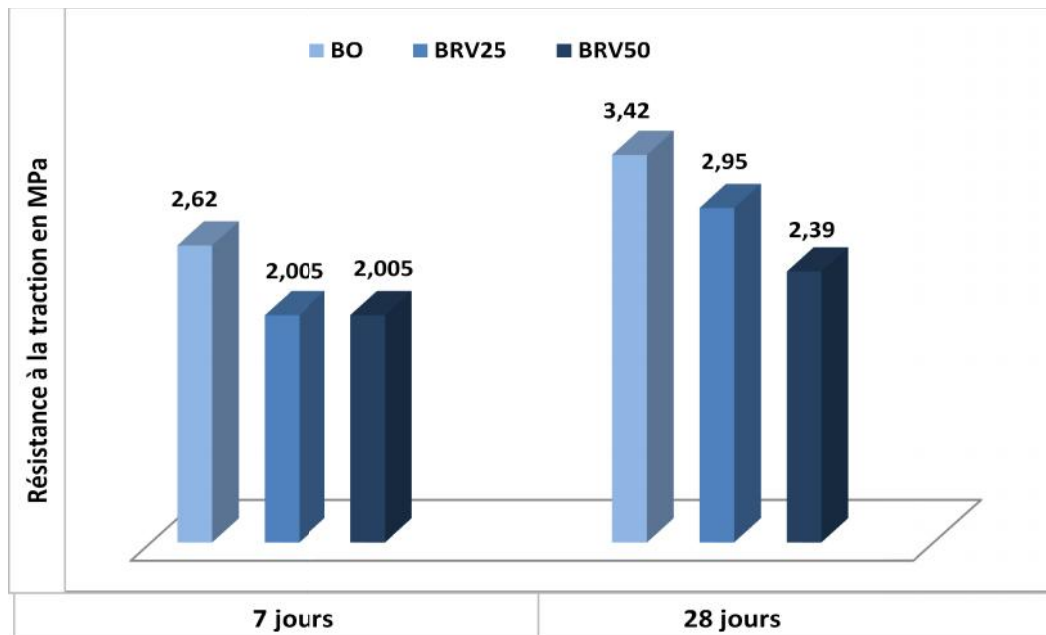


Figure IV.11 Développement de la résistance à la traction des bétons à base de déchets de verre en fonction du temps

Pour les bétons à 25% de sable de déchets de verre la perte de résistance à la traction commence par 23% à 7 jours et arrive à l'ordre de 13% à 28 jours.

Pour les bétons à 50% d'agrégats de déchets de verre la perte de cette résistance reste la même à 7 jours et arrive à l'ordre de 30% à 28 jours.

Finalement pour les bétons dont le taux de substitution du sable naturel par le sable recyclé de déchets de verre ne dépassant pas le taux optimal 25%, la perte de résistance à long terme reste acceptable (inférieure à 25%), alors on pourra conclure que l'écart de la perte de résistance à la traction des bétons à base des sables recyclés marquée à jeune âge reste stable ou s'élève légèrement au cours du temps (à 28 jours), ce qui présente un avantage pour ce type de béton.

IV.4 Béton autoplaçant à base des déchets de briques

On présente les résultats de la caractérisation des mélanges dans le but de générer un ensemble d'information suffisamment riche pour permettre de relier la composition des bétons avec leurs performances.

Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L et stabilité au tamis, V funnel et la densité.

Les essais ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC. De plus, pour les essais d'étalement au cône, le temps d'écoulement intermédiaire a été mesuré. Pour cet essai, il s'agit de déterminer le temps nécessaire pour atteindre un diamètre d'étalement de 50 cm, noté T50. Les propriétés à l'état frais de chacune des compositions sont les suivants :

IV.4.1 Etalement

Les résultats d'essai d'étalement pour les BAP sont présentés dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 Résultats de l'essai de l'étalement des BAP

Béton	BAP Réf	BAP FB 10%	BAP FB 20%	BAP FB 30%	BAP FB 40%	BAP FB 50%
Etalement (cm)	68	68.25	72.75	71.1	73	48
T₅ (s)	5	4.21	3.40	4.72	3.24	/

La figure IV.12 présente l'étalement et T50 des différents BAP

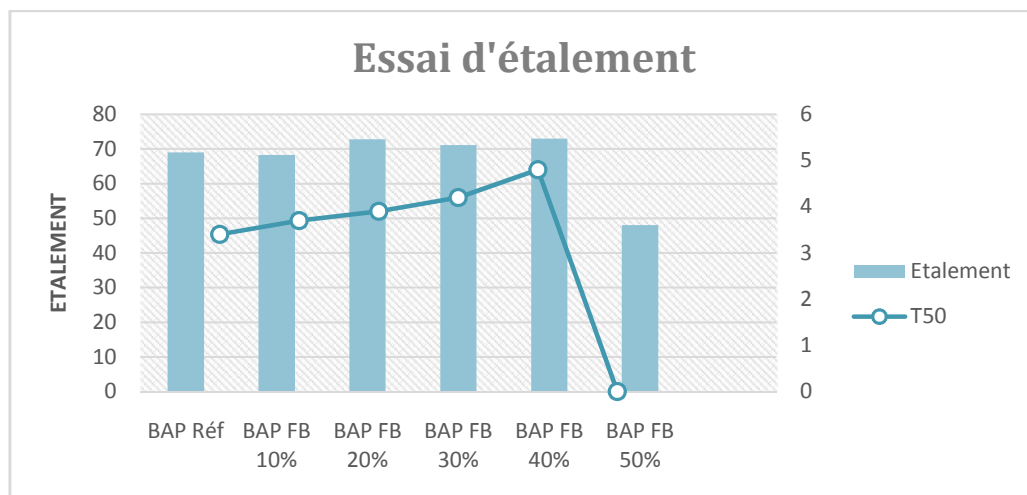


Figure IV.12 Etalement des BAP avec différents dosages avec T50

D'après le tableau IV.1, On remarque que l'augmentation du taux de substitution du filler calcaire par la poudre de brique conduit à une augmentation de la déformabilité du BAP à l'état frais dans un milieu non confiné ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement, cependant toutes les valeurs obtenues sont à l'intérieur de la fourchette ciblée 60÷80cm, donc les BAP sont de classe d'étalement SF2 pour la réalisation des éléments ferrillés(ouvrage courant), sauf au-delà de 50% le béton n'est pas qualifié d'autoplaçant à cause de sa grande demande en eau.

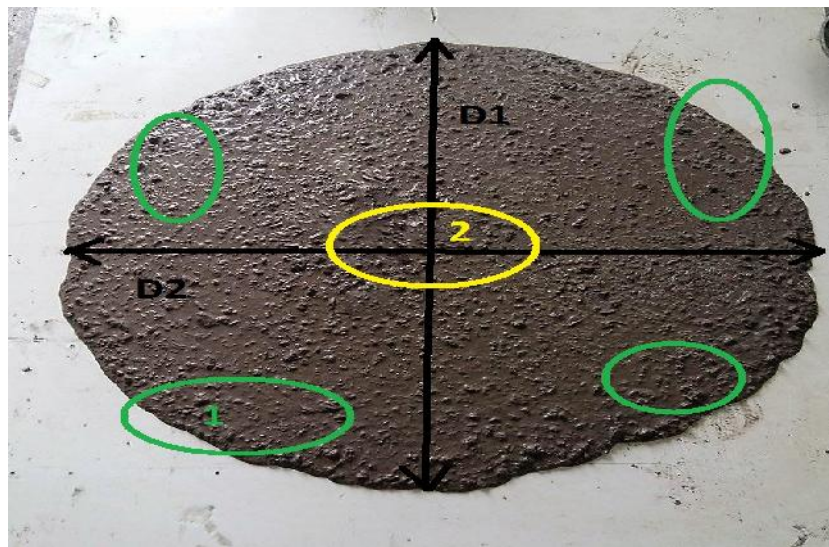


Photo IV.1 Analyse de la galette à l'essai de l'étalement

A partir de la photo IV.1, on peut constater aussi que l'étalement a présenté une distribution homogène des granulats, donc pas de phénomène de ségrégation et que l'auréole de laitance au périphérique de la galette était absente ou très faible.

La grande finesse de la poudre de brique contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie ce qui se traduit par l'augmentation du frottement intergranulaire, mais elle provoque une élévation du rapport E/C.

IV.4.2 Boite en L

Les résultats de l'essai de ségrégation dynamique sont présentés dans la figure IV.13

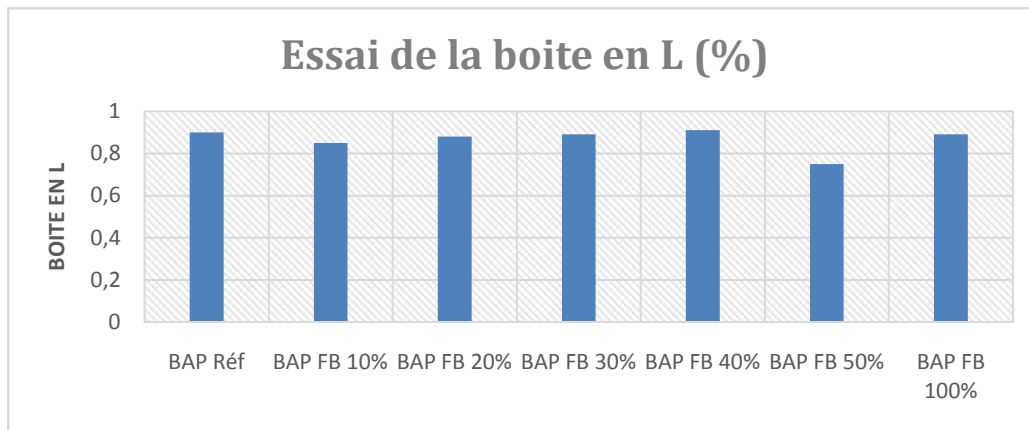


Figure IV.13 Résultats de l'essai de la boîte en L

La variation du taux de remplissage des BAP confectionnés à base de différents teneurs en poudre de brique est illustrée dans la figure IV.13, on constate que tous les BAP présentent des taux de remplissage supérieurs à 0.8, qui s'inscrivent dans le domaine des BAP [AFGC]. Le mélange avec 50% de poudre de brique, présente un risque de blocage, ce qui est justifié par sa grande viscosité.

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l'introduction de la poudre de brique (jusqu'à 40%) dans les BAP affecte positivement le taux de remplissage, ce qui permet d'augmenter la capacité de passage et de remplissage, et d'éviter par conséquent le blocage du BAP au voisinage des armatures.

IV.4.3 Stabilité au tamis

La figure IV.14 présente les résultats de l'essai de ségrégation statique effectué :

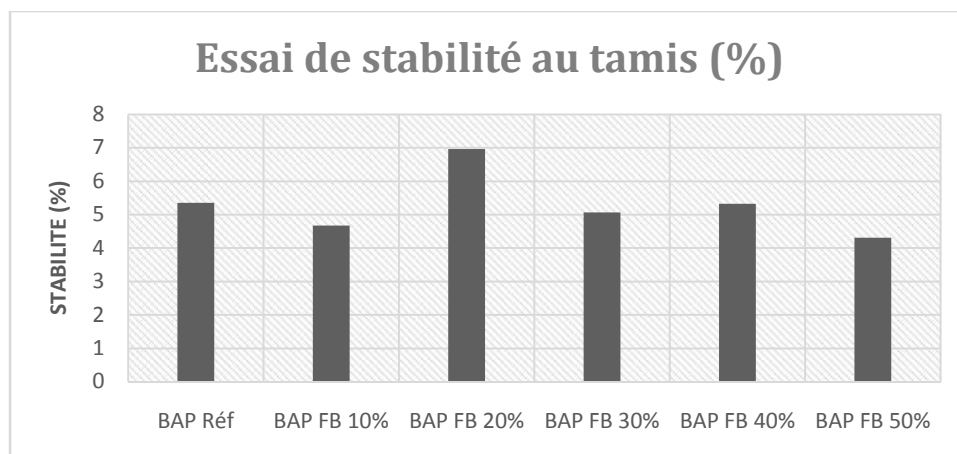


Figure IV. 14 Résultats de l'essai de la stabilité au tamis

D'après les résultats présentés dans la figure IV.14, on peut observer que tous les BAP (20%, 30%, 40%) ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.

On tient toutefois à signaler que pour le BAP 10% de poudre de brique, dont la laitance $P = 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite importante. Lorsque la stabilité au tamis est inférieure à 5%, il y a lieu d'accorder plus d'attention quant à l'écoulement des bétons dans les éléments fortement ferraillés.

La faible valeur du taux de ségrégation du mélange (50% de poudre de brique) est due à sa grande viscosité.

IV.4.4 Essai de l'entonnoir

La figure IV.15 présente les résultats obtenus de cet essai :

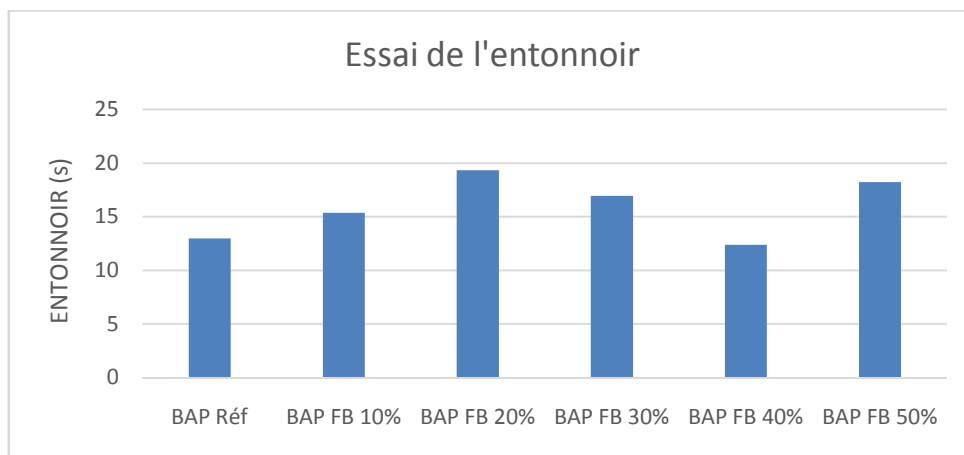


Figure IV.15 Résultats de l'essai de l'entonnoir

Les résultats obtenus montrent que les temps d'écoulement mesurés par l'entonnoir étaient respectivement compris entre 9 et 25 sec. et se rapprochent des valeurs couramment rencontrées (dans les fourchettes de la norme AFGC).

On remarque que le BAP FB de 40% présente une grande aptitude au remplissage en cas de forte densité de ferrailage ou de forme géométrique complexe.

IV.4.5 Densité

Les résultats de la densité des différents dosages sont résumés dans la figure IV.16

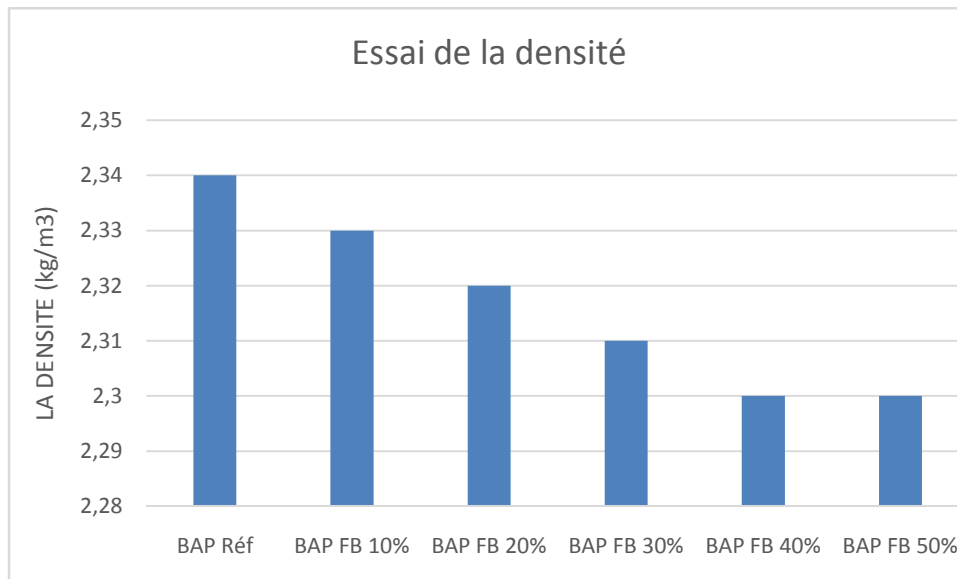


Figure IV.16 Densité des BAP

D'après les résultats obtenus, on remarque une diminution de la densité avec l'augmentation de la teneur en poudre de brique.

BILAN

Suite aux résultats obtenus dans cette partie, il est à conclure que :

-)] A l'exception de BAP de 50% FB, Les valeurs d'étalement obtenues (66.2÷69cm) sont dans la plage cible 60÷80cm ainsi que les valeurs du temps d'écoulement sont acceptables, tous les mélanges ont de bonnes capacités de remplissage et passage à travers des milieux ferraillés et ne présentent aucune tendance de ségrégation ni de ressuage.
-)] Les mélanges avec (20%, 30% et 40%) de poudre de brique ont marqué une augmentation d'étalement de (5.43%, 3.04% et 5.79%) respectivement sauf BAP FB 10% qui a présenté une perte de 1.08% par rapport au BAP réf.
-)] Les BAP ne gardent pas le même ordre de classement dans tous les essais, par exemple : BAP FB 20% a donné la plus grande valeur à l'essai de stabilité au tamis et l'entonnoir par contre dans l'essai de la boîte en L, le plus grand taux de remplissage a été marqué par BAP FB 30%.
-)] Les caractéristiques à l'état frais pour les BAP (10%, 20%, 30% et 40%) sont satisfaisantes, donc on peut qualifier un béton autoplaçant avec ces dosages.

) Dans l'essai de la densité, tous les mélanges contenant la poudre de brique ont une densité inférieure à celle obtenue par BAP réf. La densité varie en fonction du dosage en poudre de brique: plus ce dernier augmente plus la densité diminue, mais la différence reste très petite et dans l'intervalle de (2.34 à 2.3 t/m³).

IV.4.6 Résistance à la compression

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cubiques 7x7x7 Cm. Les résistances sont mesurées en MPa à 3, 7 et 28 jours et représentées dans la figure IV.17

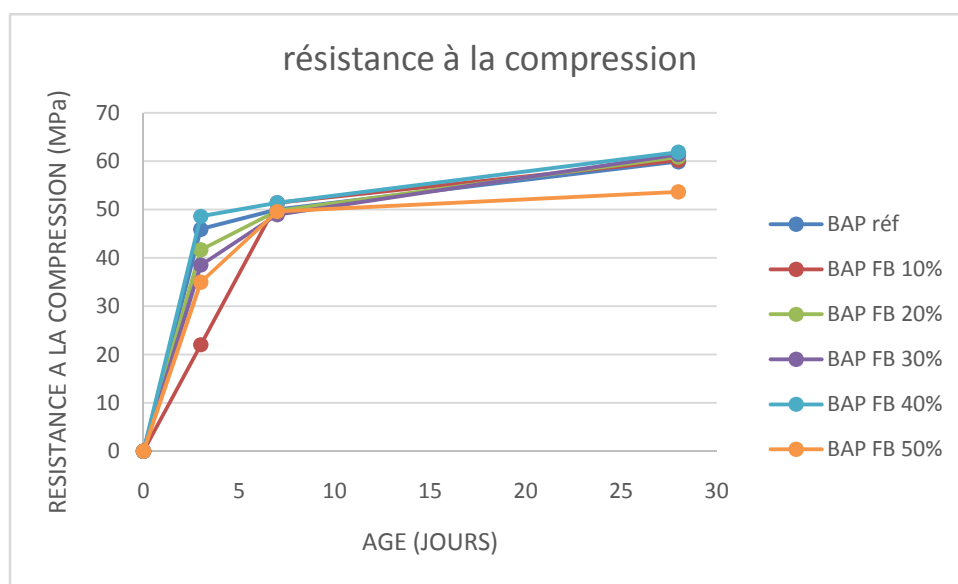


Figure IV.17 Résistances à la compression des BAP

On remarque que la cinétique de l'évolution de la résistance des différents mélanges est similaire. On décompose les graphes en deux parties :

A l'âge 7j, on remarque que le BAP de référence présente une bonne résistance à la compression par contre BAP FB 10% donne la plus faible valeur, cependant à l'âge 28j, c'est l'inverse, une amélioration de la résistance a été observée concernant les mélanges contenant FB grâce à sa propriété pouzzolanique.

Les mélanges BAP FB 10%, BAP FB 20%, BAP FB30% et BAP FB 40% présentent une augmentation de la résistance de (0.53%, 1.65%, 2.45% et 3.22%) respectivement par rapport au BAP de référence.

Nos résultats sont en cohérence avec ceux de Heikal [55] qui a trouvé que plus on augmente la teneur en poudre de brique plus la résistance à la compression augmente, par contre ils sont contradictoires avec ceux de Abib [1] qui a montré que 5% de la poudre de brique est un dosage optimal et plus on augmente le dosage plus la résistance diminue.

IV.4.7 Résistance à la traction par flexion

L'essai de la traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 Cm, en utilisant un dispositif de flexion 3 points. Les résultats obtenus figurent dans la figure IV.18

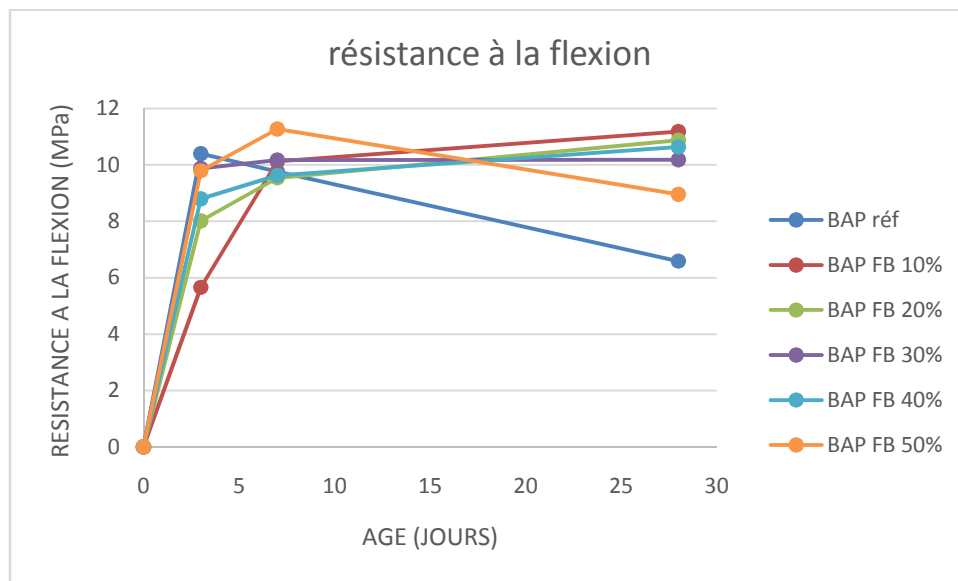


Figure IV.18 Résistance à la traction par flexion des BAP

D'après cette figure, on remarque que le BAP de référence a donné une résistance à la flexion supérieure à celles obtenues par les BAP contenant la poudre de brique au jeune âge, mais une chute de résistance a été observée à 7j et à 28j de (6.44% et 48.25%) respectivement, et accompagnant d'une augmentation de la résistance pour les mélanges contenant la poudre de brique de (44.07%, 15.93%, 2.94% et 8.61%) à 7j et de (8.94%, 12.31%, 0.06% et 9.49%) à 28j respectivement pour les BAP (FB 10%, FB 20%, FB 30% et FB 40%) justifiée toujours par la réaction pouzzolanique des déchets de briques broyés.

➤ *Corrélation entre les résistances mécaniques*

La figure IV.19 présente la corrélation des résistances en compression et en traction par flexion :

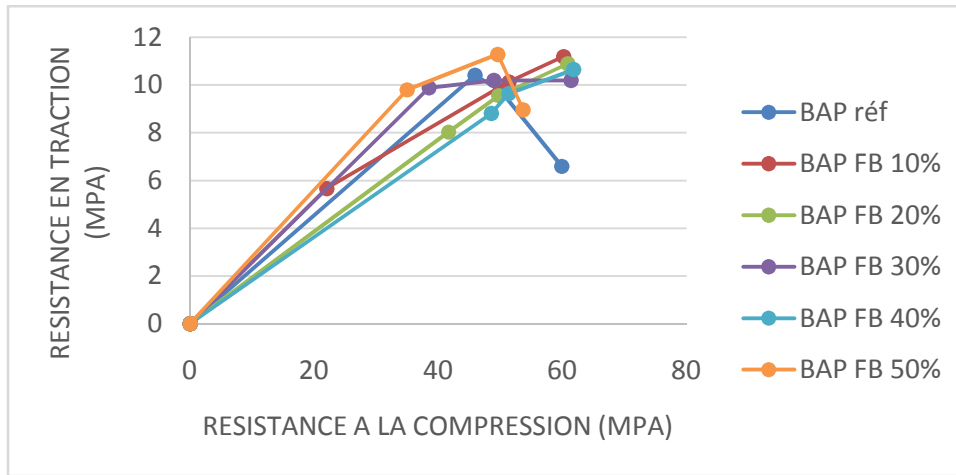


Figure IV.19 Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction par flexion

On constate que l'augmentation de la résistance à la compression est proportionnelle avec celle de la traction par flexion.

➤ **Confrontation des résultats de corrélation entre les résistances à la compression et à la traction avec le BAEL**

La figure IV.20 présente la confrontation des résultats de corrélation avec le BAEL.

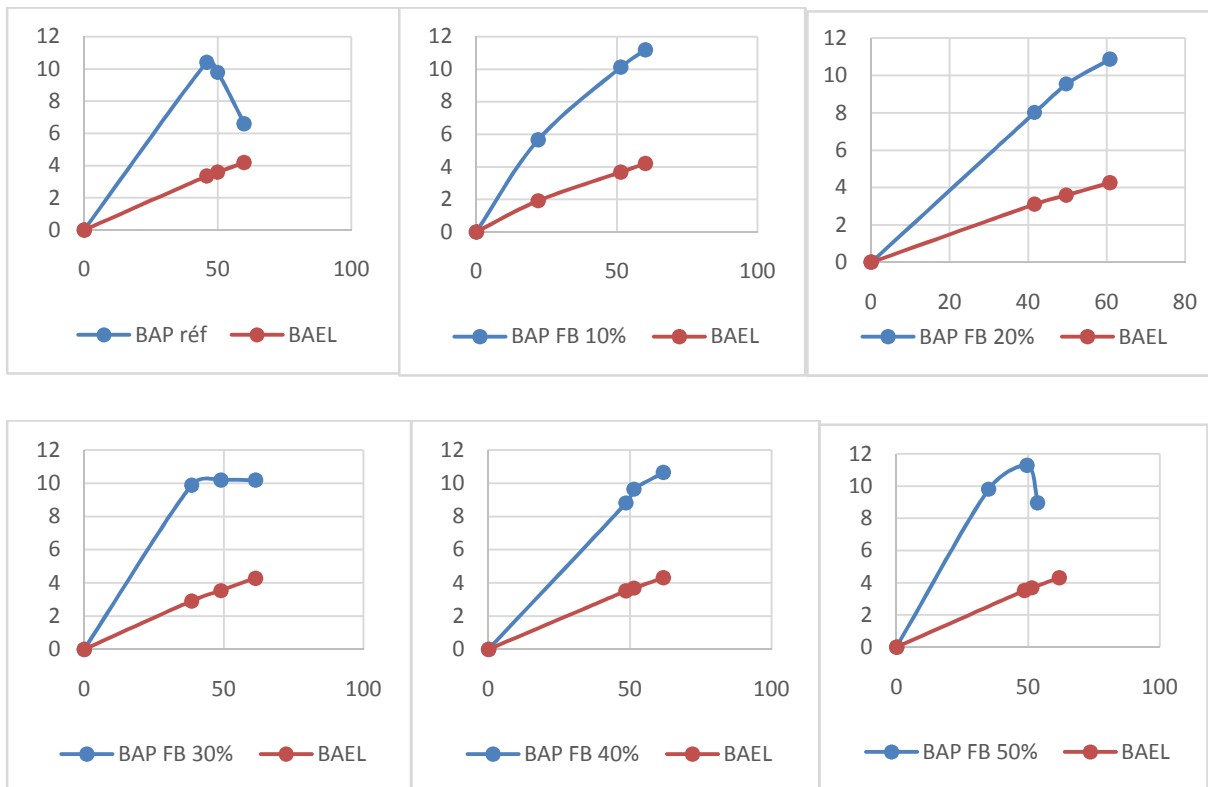


Figure IV.20 Confrontation des résultats de corrélation avec le BAEL

D'après la figure IV.20, en comparant nos résultats à ceux du BAEL: on constate qu'au même niveau de résistance à la compression, toutes les résistances à la traction déterminées suivant le BAEL sont inférieures à celles estimées par nos résultats pour tous les mélanges. On constate que les modèles reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sous estiment la résistance à la traction des BAP.

IV.4.8 Absorption capillaire

L'influence du taux de substitution des déchets de brique broyés sur l'absorption d'eau par capillarité des différents BAP est présentée sur la figure IV.21

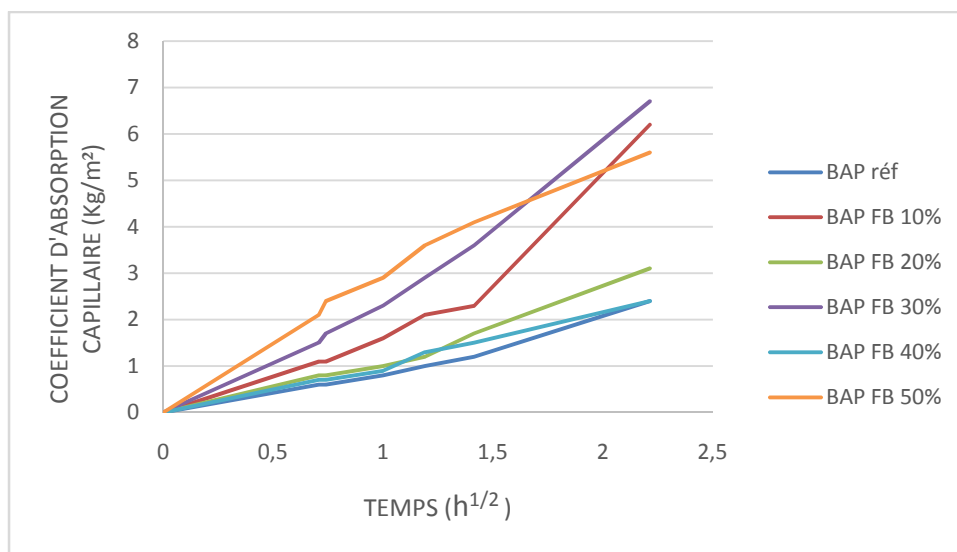


Figure IV.21 Influence du taux de substitution en déchets de brique sur l'absorption d'eau par capillarité des BAP

Les valeurs montrent une augmentation de l'absorption dans le temps, et ce pour tous les mélanges. On remarque que le BAP réf est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit, alors que le coefficient d'absorption des autres mélanges est plus grand.

IV.4.9 Variations pondérales et dimensionnelles

Les mesures de retrait et de perte en masse sont effectuées longitudinalement sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 Cm, munies de plots à leurs extrémités. La lecture sur le retractomètre est en (mm).

➤ *Etude de la variation pondérale*

La Figure IV.22 montre l'évolution de la perte en poids des BAP dans le temps.

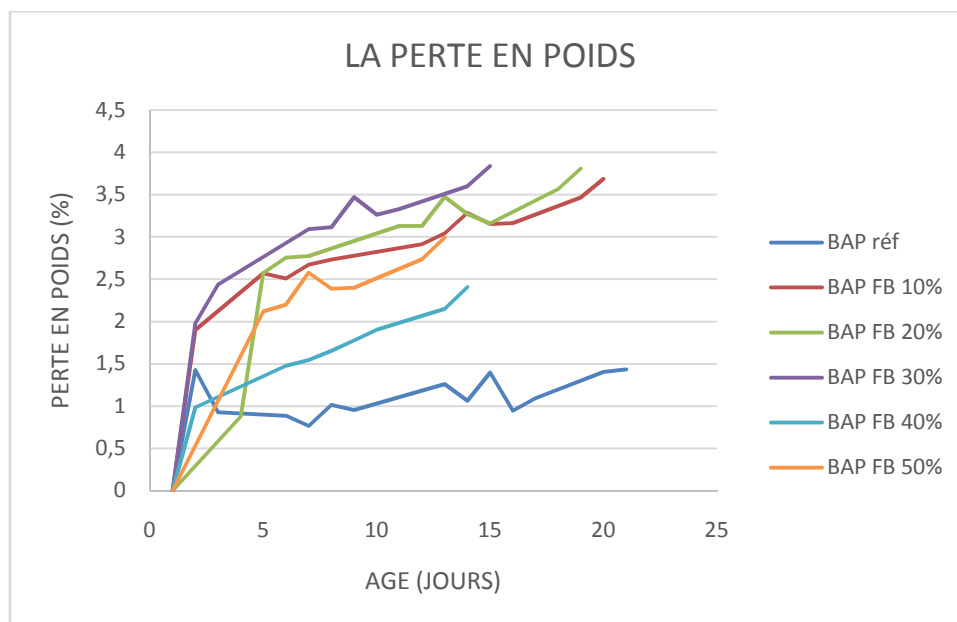


Figure IV.22 Evolution de la perte en poids des BAP

Les différents résultats obtenus indiquent clairement que la cinétique de la variation de la perte en poids croît rapidement dans les premiers jours, après, on observe une diminution de la cinétique.

On remarque que la perte en poids du BAP réf est la plus faible par rapport aux BAP avec poudre de brique, cela pourrait s'expliquer par la capacité d'absorption de la poudre de brique broyée.

➤ *Etude de la variation dimensionnelle (Retrait)*

La figure IV.23 montre l'évolution du retrait totale pour les différents mélanges.

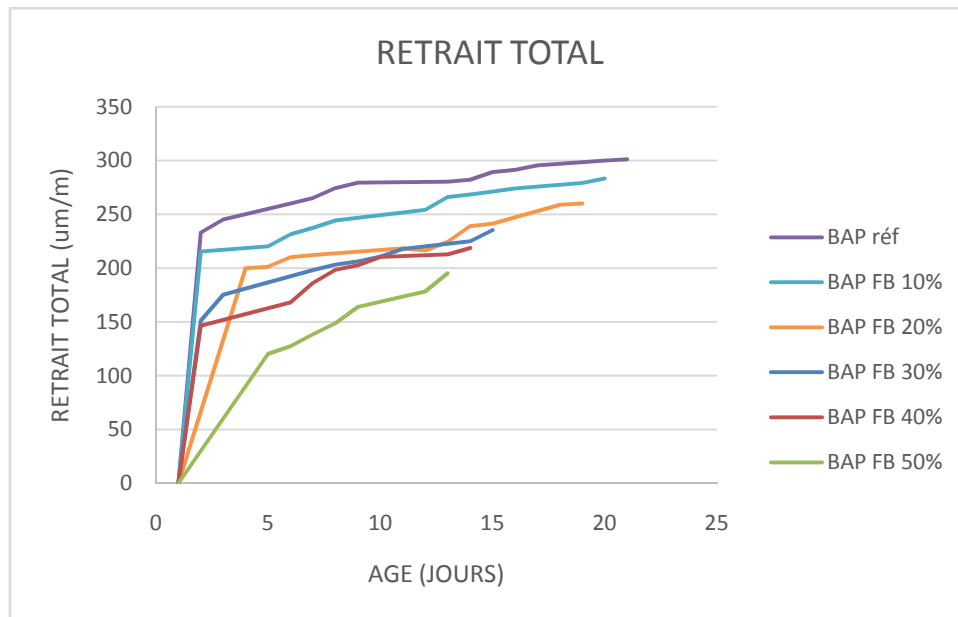


Figure IV.23 Evolution de la déformation du retrait totale des différents mélanges

La déformation du retrait est rapide et importante du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur. A l'air libre du point de vue quantitatif, le BAP réf est plus sensible au retrait (152.3 um/m que les BAP contenant FB) et plus on augmente le dosage en poudre de brique plus le retrait diminue.

On récapitule que les principaux paramètres influençant le retrait sont : l'hydratation du ciment, la qualité des fines et l'humidité relative du milieu de conservation.

IV.5 Mortier à base de sable de déchets de brique

IV.5.1 Résistance à la compression

Des essais mécaniques de compression, permettant de connaître l'évolution des Résistances dans le temps des mortiers à base de sable de déchets de brique, ont été réalisés sur des demi-éprouvettes obtenues par rupture des 4x4x16 Cm lors des essais de flexion.

L'ensemble des valeurs de la résistance à la compression sont regroupées dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 Résistance à la Compression des mortiers à base de déchets de brique

Résistance Mortier	Rc (MPa) 2 jours	Rc (MPa) 7 jours	Rc (MPa) 28 jours
M0	19.8	35.05	46.55
M25	20.05	34.50	44.70
M50	14.15	23.30	30.25
M75	4.15	5.60	8.85
M100	3.55	6.20	6.85

Sur la figure IV.24 les résistances à la compression des différents mortiers sont illustrées en fonction des taux de substitution en sable de déchets de briques aux échéances: 2,7 et 28 jours

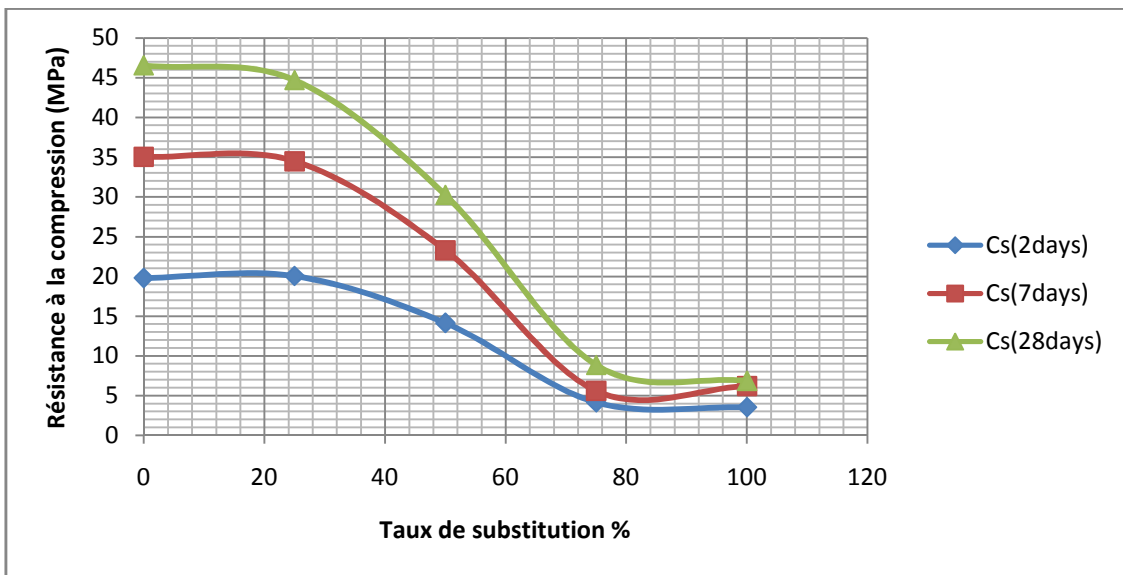


Figure IV.24 Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression des mortiers

Un mortier à base de déchets de brique M25 présente les meilleures résistances à la compression (identiques à celles du mortier normal)

On peut observer qu'au bout de 28 jours, la résistance à la compression du mortier est considérable avec un taux de substitution en sable de déchets de briques de 25%.

Avec un taux de substitution de 100%, la résistance à la compression chute d'une façon considérable, cela peut être attribué à la faible adhérence entre la pâte de ciment et les grains de sable de déchets de brique et à la résistance et la dureté des particules de sable.

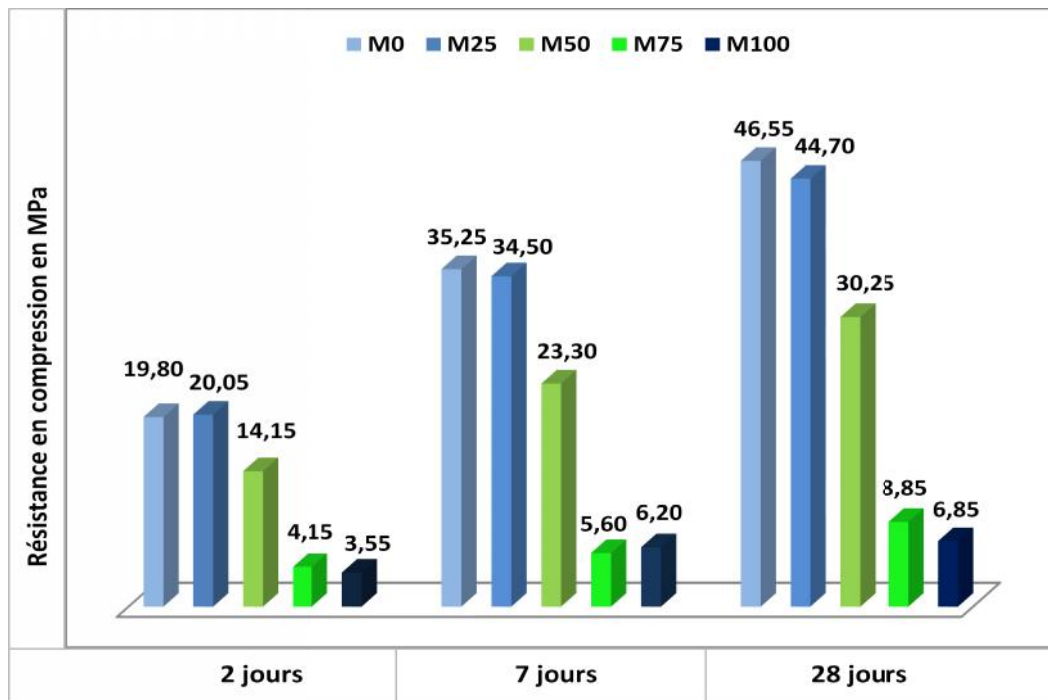


Figure IV.25 Evolution de la résistance à la compression des mortiers à base de déchets de brique

D'après la figure IV.25 On remarque que les résistances à la compression des différents mortiers augmentent dans le temps, ce qui signifie que le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les mortiers recyclés se déroule normalement et suit une augmentation avec l'âge.

Les résistances à la compression des mortiers diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en sable de déchets de brique, cette diminution est de l'ordre de :

A 2 jours, M50 : 28% ; M75 : 79% ; M100 : 82%, M25 présente un gain de 1%.

A 7 jours, M25 : 2% ; M50 : 33% ; M75 : 84% ; M100 : 73%.

A 28 jours, M25 : 3% ; M50 : 35% ; M75 : 80% ; M100 : 85%.

IV.5.2 Résistance à la traction

Les valeurs de la résistance à la traction sont regroupées dans le tableau IV.3

Tableau IV.3 Résistance à la Traction des mortiers à base de déchets de brique

Résistance Mortier	Rt (MPa) 2 jours	Rt (MPa) 7 jours	Rt (MPa) 28 jours
M0	3.64	5.99	7.70
M25	3.60	5.29	6.43
M50	2.47	3.78	4.98
M75	0.85	1.50	1.65
M100	0.85	1.43	1.83

La variation des résistances à la traction par flexion en fonction des taux de substitution en sable de déchets de brique est représentée sur la figure IV.26

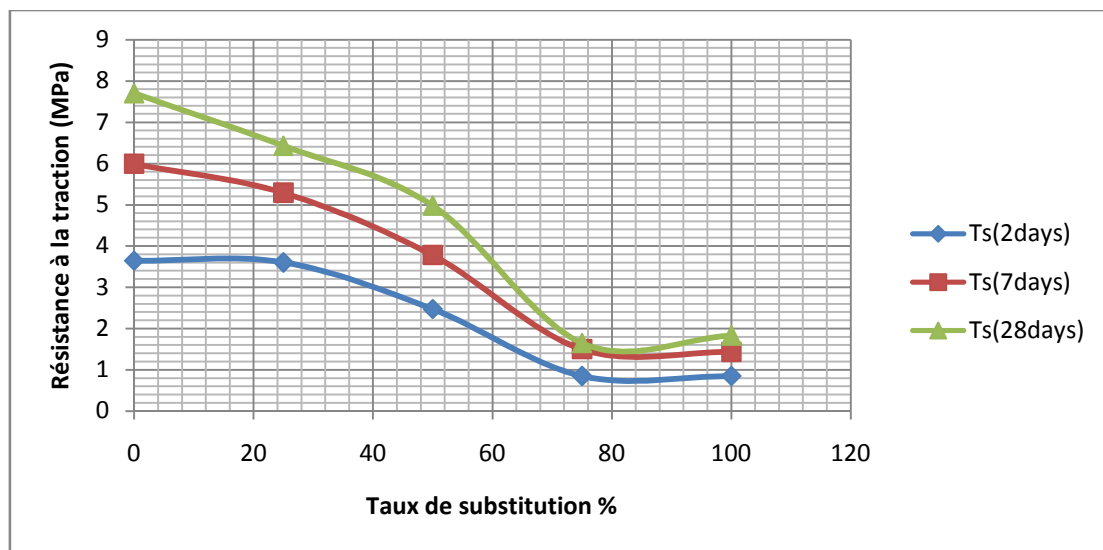
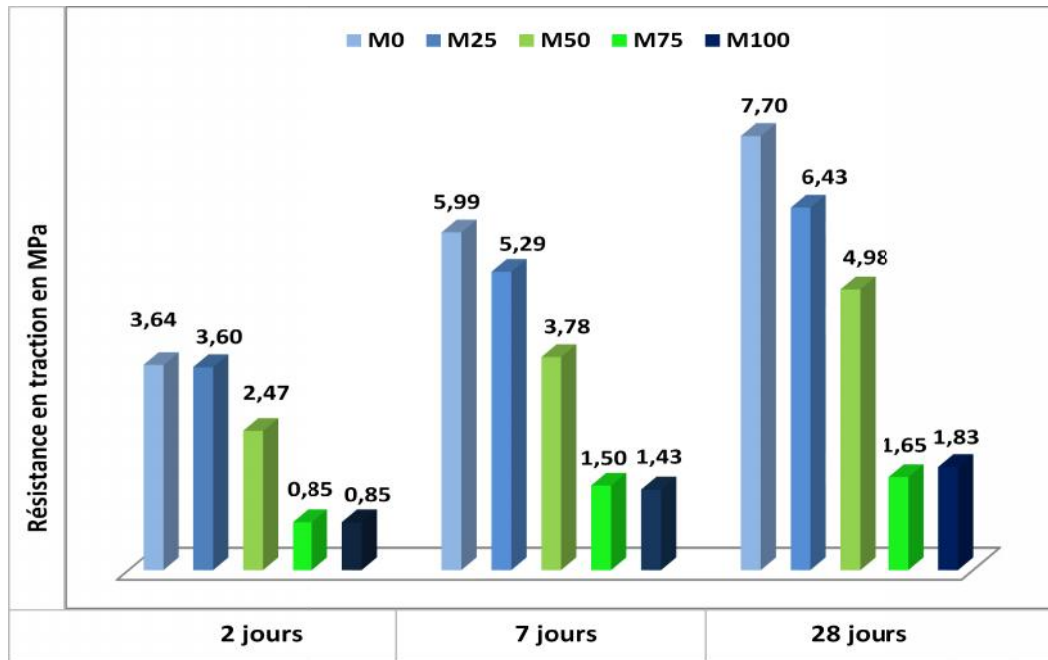


Figure IV.26 Influence du taux de substitution sur la résistance
à la traction des mortiers

La résistance à la traction est inversement proportionnelle au taux de substitution en sable de déchets de brique.



**Figure IV.27 Evolution de la résistance en Traction des mortiers
à base de déchets de briques**

D'après la figure IV.27, on peut remarquer d'une façon générale que les résistances à la traction des mortiers diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en sable de déchets de briques, cette diminution est de l'ordre de :

A 2 jours, M25: 1%; M50: 32%; M75 et M100: 76%.

A 7 jours, M25: 11%; M50: 36%; M75: 74% et M100: 81%.

A 28 jours, M25: 16%; M50: 35%; M75: 78% et M100: 75%.

IV.6 CONCLUSION

Cette étude expérimentale a pu toucher une bonne variété de compositions différentes de bétons classiques, autoplaçants et mortiers.

Nos résultats sur le comportement des bétons incluant les granulats recyclés s'accordent en général avec les données expérimentales présentées dans la littérature à l'exception de quelques travaux antérieurs.

Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence que les bétons de granulats recyclés de béton présentent des performances systématiquement inférieures à celles des bétons ordinaires.

L'influence du taux de substitution en granulats recyclés (béton démolé) et du dosage en ciment sur le comportement du béton à l'état frais et durci a été étudiée :

Un béton à base de granulats recyclés BR50 présente les meilleures performances (identiques à celles du béton à base de granulats ordinaires) : une bonne densité, une demande en eau acceptable et une résistance considérable.

La variation des dosages est un paramètre très influant sur les caractéristiques des bétons à l'état frais et durci, les résistances sont proportionnelles aux dosages en ciment.

La Résistance à la compression du béton à base de déchets de verre à 2 j a diminué par rapport à celle du béton témoin de 41.3% pour un taux de substitution de 50% et de 24.4% pour un taux de substitution de 25%.

Le pourcentage de diminution de la résistance à 7 jours est de 37.4% pour un taux de substitution de 50% et de 23.5% pour un taux de 25%.

A 28 jours, la résistance à la compression des bétons à base de déchets de verre diminue avec 51.1% pour un taux de substitution de 50% et de 34.5% pour un taux de substitution de 25%

Quant à la Résistance à la traction par flexion du béton à base de déchets de verre à 7 j décroît avec 23,4% pour un taux de substitution de 50%, et avec 23.5% pour un taux de substitution de 25% (pratiquement inchangée)

A 28 jours, la résistance à la traction par flexion diminue avec 31,1 % pour un taux de substitution de 50% et avec 13,8% pour un taux de substitution de 25%.

L'influence de la substitution des fillers calcaires par les fines recyclées de déchets de brique sur le comportement du BAP à l'état frais et durci a été étudiée :

Les dosages de (10%, 20%, 30%, 40%) de poudre de brique ont permis de formuler des bétons dont l'ouvrabilité est conforme à celle du BAP et dans la plage (60÷80cm) et présentent une bonne capacité de remplissage et de passage à travers des milieux ferraillés.

Les mélanges sont homogènes et ne présentent aucune tendance de ségrégation ni de ressuage.

A l'exception de BAP 50, tous les mélanges sont qualifiés d'autoplaçants à l'état frais.

A l'état durci, les BAP présentent une bonne résistance à la compression (61 MPa) et à la traction par flexion (11 MPa) à 28 jours.

Les BAP contenant la poudre de brique ont un coefficient d'absorption et une perte en poids plus grands que ceux du BAP réf.

Les BAP avec poudre de brique sont moins sensibles au retrait par rapport au BAP réf. Plus le dosage en FB augmente plus le retrait diminue.

L'étude de la faisabilité de l'utilisation du sable de déchets de brique dans les mortiers a été réalisée en faisant varier le taux de substitution : (0%, 25%, 50%, 75%, 100%).

L'influence du taux de substitution sur le comportement du mortier à l'état durci a été étudiée :

Le mortier M25 présente de bonnes performances par rapport à un mortier à base de granulats ordinaires M0

La variation du taux de substitution en sable de déchets de brique est retrouvée comme étant un paramètre très influant sur les caractéristiques des mortiers à l'état durci, les résistances sont inversement proportionnelles aux taux de substitution.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Le recyclage des granulats présente un intérêt particulier car leur valorisation permet de résoudre le manque de granulats naturels, de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes et de réduire les déchets mis en décharge.

En Algérie, chaque année, une quantité importante de déchets de construction ou de démolition est générée mais rarement recyclée.

La valorisation de ces nouveaux matériaux sous forme de granulats dans les bétons hydrauliques est actuellement freinée par le fait que les granulats recyclés sont souvent considérés comme « granulats hors normes » et on les suspecte ainsi d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité de ces bétons.

Afin d'évaluer les risques potentiels pour ces bétons, nous avons d'abord caractérisé ce type de granulats, à l'aide d'une part d'une revue bibliographique et d'autre part d'une étude expérimentale :

➤ **Granulats recyclés de béton de démolition**

Notre recherche bibliographique nous a permis de dégager que parmi les paramètres les plus influant sur les propriétés que ce soit à l'état frais ou durci des bétons, on retrouve les taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés et les dosages en ciment.

Toutefois, deux particularités distinguent les granulats recyclés du béton de démolition des granulats naturels: la gangue de la pâte de ciment ancien attaché aux granulats primaires et la présence d'impuretés. Elles peuvent influencer aussi bien le comportement du béton frais, que celui du béton durci à court et à long terme.

La forte porosité ouverte et l'absorption d'eau élevée des granulats recyclés de béton de démolition entraînent des rapports E/C importants, ce qui représente un premier facteur défavorable pour la durabilité.

Les essais effectués sur les bétons incluant des granulats recyclés de démolition ont permis de constater qu'en général, leur comportement ne diffère pas beaucoup de celui des bétons classiques: ils obéissent aux mêmes lois et dépendent des mêmes facteurs (rapport E/C, compacité, conditions de cure et de durcissement, âge, séchage, etc...)

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires.

La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée.

La variabilité des propriétés du vieux béton, qui influe sur celles du nouveau, constitue un grand problème de recyclage du béton. On peut en partie l'éviter en ajustant les dosages en ciment. Néanmoins, la réduction du rapport E/C des bétons recyclés n'est pas toujours favorable.

➤ **Granulats recyclés de déchets de verre**

L'utilisation du verre dans les bétons est possible mais nécessite certaines précautions d'emploi vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Ce phénomène provoque des désordres qui conduisent au gonflement et à la fissuration du béton. Cet aspect n'a pas été l'objet de notre étude, nous nous sommes intéressés à l'influence du sable de verre sur la résistance à la compression.

Aussi, l'augmentation de la proportion de verre dans le béton se fait avec la chute de résistance en compression. Ce qui serait lié au défaut d'adhérence entre la matrice du béton et les granulats de verre.

➤ **Granulats recyclés de déchets de briques**

Pour l'étude des BAP, on a pu soulever les résultats suivants :

La valorisation des déchets de brique en terre cuite dans la formulation des bétons autoplaçants a un effet positif sur le comportement des bétons jusqu'à un certain pourcentage de remplacement.

Les dosages de (10%, 20%, 30%, 40%) de poudre de brique ont permis de formuler des bétons dont l'ouvrabilité est conforme à celle du BAP et dans la plage cible (60÷80cm) et présentent une bonne capacité de remplissage et de passage à travers des milieux ferraillés. Les mélanges sont homogènes et ne présentent aucune tendance de ségrégation ni de ressuage.

A l'exception de BAP FB 50%, tous les mélanges sont qualifiés d'autoplaçants à l'état frais.

A l'état durci, les BAP présentent une bonne résistance à la compression (61 MPa) et à la traction par flexion (11 MPa) à 28 jours.

Les BAP contenant la poudre de brique ont un coefficient d'absorption et une perte en poids plus importants que ceux du BAP de référence.

Les BAP avec poudre de brique sont moins sensibles au retrait par rapport au BAP de référence, Plus le dosage en poudre de brique augmente plus le retrait diminue.

Le remplacement d'une partie du liant équivalent (fillers calcaires) par la poudre de déchets de brique broyés conduit à une augmentation de résistance de compression à long terme.

Un taux de substitution de 50% de déchet de brique ne qualifie pas un béton autoplaçant, mais il présente une bonne résistance à la compression (> 50 MAP) et à la flexion (> 8 MPA).

Le mortier fabriqué avec du sable provenant de déchets de brique, présente généralement de moyennes qualités de maniabilité, Les résistances mécaniques varient selon les taux de substitution sachant que Les sables à base de déchets de brique sont généralement moins absorbants et plus denses que les sables ordinaires. Les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du taux de substitution.

Un taux de substitution de 25% de sable de déchets de brique donne un mortier dont les résistances sont similaires à celles du mortier conventionnel.

➤ **Perspectives**

En perspective de ce travail, il est important de compléter cette étude par :

- La variation des paramètres de formulation tels que les matériaux constitutifs et étudier leur influence sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons.
- L'étude de la durabilité de ces bétons.
- L'étude des caractéristiques microscopiques des bétons.

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [1] **Abib Z., Abib H G., Kharchi F.**, Effect of Clay Fines on the Behavior of Self-Compacting Concrete, Engineering « scientific research », Vol. 5, P. 213-218, 2013.
- [2] **AFGC** Association Française de Génie Civil, « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », Documents scientifiques et techniques, janvier 2008.
- [3] **Akash, Rao, Kumar N. Jha., Sudhir Misra**, Use of Aggregates from Recycled Construction and Demolition Waste in Concrete, Resources, Conservation and Recycling, Vol.50 (1), P. 71–81, 2007.
- [4] **AL-akhras N.**, Performance of glass concrete subjected to Freeze than cycling, Open construction and building technology journal, Vol. 6, P. 392-397, 2012.
- [5] **Amouri Ch.**, Contribution à l'étude de l'influence de différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires, Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, 2009.
- [6] **Anagnostopoulos N., Sideris K., Georgiadis A.**, Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures, Materials and Structures, Vol. 42, P. 1393–1405, 2009.
- [7] **Arabi N., Berredjem L.**, Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons, Déchets - Revue francophone d'écologie industrielle N° 60, 2011.
- [8] **Assié S.**, Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004.
- [9] **Badreddine AB.**, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 25 juin 2004.
- [10] **Bakhtiyari S., Allahverdi A., Rais-Ghasemi M., Zarrabi B., Parhizkar T.**, Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures - Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste, ThermochimicaActa, Vol. 514, P.74–81, 2011.
- [11] **Barcelo L.**, Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge, Thèse de Doctorat, LMT-ENS de Cachan, Octobre 2001.

[12] **Baron J., Olivier J.P.**, Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », Editions Eyrolles, 1999.

[13] **Batayneh M., Marie I., Asi I.**, Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, Vol. 27, p. 1870-1876, 2007.

[14] **Behim M., Boucetta A.**, Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre), 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran, 2009.

[15] **Behim, T. A. Boucetta**, Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants, Déchets Sciences et Techniques - N°65 - Novembre 2013.

[16] **Belaidi A. S. E., Azzouz I., Kadri E., Kenai S.**, Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete, Construction and building materials Vol. 31, P. 251-257, 2012.

[17] **Belaribi O.**, Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et pouzzolane, Thèse de Doctorat, Université Cergy-pontoise et l'université de Mostaganem, 2015.

[18] **Benhoua M.**, Valorisation des granulats de demolition dans un béton autoplaçant, Communication Science & technology Vol. 17, July 2016.

[19] **Berra M., Mangialardit T., Palini A.E.**, Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates, Materials and Structures, Vol. 38, p. 373-380, 2005.

[20] **Berraih M., Ayed MM., KHelafi H.**, Effet des déchets de bouteille de verre sur les caractéristiques mécaniques des mortiers, Séminaire international BATIDDEV d'Oran, ENSET d'Oran 2013.

[21] **Berredjem L., Arabi N.**, Les matériaux de démolition, une source de granulats pour béton: formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés. Conference: SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran, Vol. 2, 2009.

[22] **Berredjem L., Arabi N., Molez L.**, Contribution à l'étude des indicateurs de durabilité des bétons à base de granulats recyclés, actes du 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.

[23] **Berredjem L., Arabi N., Molez L., Jauberthie R.**, Propriétés mécaniques et durabilité des bétons à base des graviers et sables recyclés issus de béton de démolition, actes de la conférence internationale francophone NoMaD à Douai, Novembre 2015.

[24] **Bethmont S.** Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP), Etude expérimentale des interactions granulaires, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ENPC, 2005.

[25] **Binici H., Shah T., Aksogan O., Kaplan H.,** Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208 (1-3), p. 299-308, 2008.

[26] **Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A., Yahia A.,** Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, *Afrique Science* 04(1), 2008.

[27] **Boukni B.,** Contribution expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2012.

[28] **Bourmatte N.,** Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2004.

[29] **Bouziani T., Benmounah A., Bederina M., Lamara M.,** Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete, *The Open construction and building technology journal*, Vol. 5, P. 25-29, 2011.

[30] **Braymand S.,** Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons, *Actes du Colloque Matériaux*, Nantes, 2010.

[31] **Braymand S., Grandgeorge J.D.,** Mise au point d'une méthode expérimentale de mesure de la conductivité thermique: application aux bétons de granulats recyclés, *Actes du Colloque Matériaux*, Nantes, 2010.

[32] **Brunetaud X.,** Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Paris, 2005

[33] **Casuccio, M., Torrijos MC., al.,** Failure mechanism of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 22(7), p. 1500-1506, 2008.

[34] **Corinaldesi V., Gnappi G., Moriconi G., Montenero A.,** Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars, *Waste Management*, Vol. 25, p. 197-201, 2005.

[35] **Corinaldesi V., Moriconi G., Tarun RN.,** Characterisation of marbre powder for its use in mortar and concrete, *Construction and building materials*, Vol. 24, P. 113-117, 2010.

[36] **Corinaldesi V., Moriconi G.,** The role of industrial by-products in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, P. 3181–3186, 2011.

[37] **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.**, Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, n° 2, p. 264-277, 2006.

[38] **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials, *Cement and Concrete Research*, Vol.35 n°4, p. 719-730, 2005.

[39] **Debied F.**, Performance et durabilité des bétons à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates, Thèse de Doctorat, Université Houari Boumediene, 2007.

[40] **Debied F., kenai S.**, Les performances du béton recyclé à base de gros et fin granulats de brique concassée, proceeding du 1^{er} colloque national de génie civil, *Matériaux de construction*, Université de Mostaganem, 2000.

[41] **Debieb F., Courard L., Kenai S., Degeimbre R.**, Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32 (6), p. 421-426, 2010.

[42] **De Juan M.S., Gutiérrez P.A.**, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2), p. 872-877, 2009.

[43] **Domingo C., Lazaro C., al.**, Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 23(7), P. 2545-2553, 2009.

[44] **Douara T.H., Benhoua M., Nezerghi B.**, Caractérisatiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels, Actes du 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries ENSET Oran, 2009.

[45] **El Hilali A.**, Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): influence des fines calcaires et des fines végétales, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Décembre 2009.

[46] **Etxeberria M., Vazquez A., Mari A., Barra M.**, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled concrete, *Cement and concrete research*, Vol. 37, p.735-742, 2007.

[47] **Evangelista L., J. de Brito.**, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29(5), P.397-401, 2007.

[48] **Ghemmadi Z.**, Contribution à l'étude de l'influence des additions calcaires (fillers) sur le comportement des matrices cimentaires, Thèse de Doctorat en science, Université de Constantine, 2004.

[49] Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés.

- [50] **Habhoub H.**, Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques: déchets de Marbre, Thèse de Doctorat, Université de Skikda, 2008.
- [51] **Hadjieva Zaharieva R.**, Durabilité des bétons à base de granulats recyclés, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 1998.
- [52] **Hallshow H., Levacher D., Quench J-L., Bennabi A., Bouvet F.**, Valorisation des agrégats issus du béton de démolition dans la fabrication de nouveaux bétons, Déchets-sciences et techniques, N°19-3 ème trimestre, 2000.
- [53] **Hanaa F.**, Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Décembre 2009.
- [54] **Hansen T. C.**, Recycling of demolished concrete and masonry , RILEM Report, London Chapman & Hall, E & FN Spon, 1992.
- [55] **Heikel M., Zohdy KM., Abdelkreem M.**, Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks, Construction and Building Materials Vol. 38, P. 101–109, 2013.
- [56] **Hermine H.**, Caractérisation expérimentale et numérique du béton autoplaçant « utilisation des déchets de construction », Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Juin 2016.
- [57] **Idir R.**, Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, 2009.
- [58] **Kallak F.S.**, Use of crushed bricks as coarse aggregate in concrete, Tikrit Journal of Eng. Sciences, Vol.16 No.3, P. 64-69, 2009.
- [59] **Kamal MM., Safan MA., Etman ZA., Eldaboly E A.**, Evaluating the Prolonged Properties of Fresh Self-Compacting Concrete Incorporating Recycled Aggregates, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol .3 No.2, June 2013.
- [60] **Karamberi A., Moutsatsou A.**, Participation of coloured glass cullet in cementitious materials, Cement and Concrete Composites, Vol.27, p.319–327, 2005.
- [61] **Katz A.**, Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and concrete research, Vol.33 (5), p. 703-711, 2003.

- [62] **Kenai S., Debieb F.**, Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés, *Materials and Structures*, Vol. 44, P. 815–824, 2011.
- [63] **Khelifa M.R.**, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, Université de Constantine et Université d'Orléans, 20 juin 2009.
- [64] **Kumar D.S., Rajeev C.**, Development of self-compacting concrete by use of Portland pozzolana cement, hydrated lime and silica fume, *ISCA Journal of Engineering Sciences* Vol. 1(1), P. 35-39, 2012.
- [65] **Lahmadi, Zeghichi et a., Benghazi A.** Lahmadi, L. Zeghichi, Z Benghazi, L'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton, *ACMA 2012 09-12 Mai, 2012 Fès, Maroc*.
- [66] **Lawrence P., Cyr. M., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars : effect of type-amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 n° 6, p.1092-1105, 2005.
- [67] **Lawrence P., Cyr M., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.33 n°12, p. 1939-1947, 2005.
- [68] **LingT-C., Poon C-S., Kou S-C.**, Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of Self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34 P. 265-272 , 2012.
- [69] **Liu M.**, Incorporating ground glass in Self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, P. 919–925, 2011.
- [70] **Mesbah H-A.**, Amélioration du comportement des mortiers à base de Granulats recyclés par adjonction des fibres, Thèse de Doctorat, université d'Artois, juin 1997.
- [71] **Messan A.**, Contribution à l'étude du comportement au t. jeune âge des structures minces en mortier, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, 2006.
- [72] **Moriconi G., Corinaldesi V.**, Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 n°8, p. 2869–2876, 2009.
- [73] **Oikonomou N.D.**, Recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27 (2), p. 315-318, 2005.
- [74] **Özkan Ö., Yuksel I.**, Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 n° 6, p. 1288-1298, 2008.

[75] **Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S.**, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2), p. 829-836, 2009.

[76] **Park C.K., Noh M.H., Park T.H.**, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research* Vol. 35 p. 842-849, 2004.

[77] **Park S.B., LEE B.C., KIM J H.**, Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* Vol. 34 n° 12, p. 2181–2189, 2004.

[78] **Park S.B., LEE, B.C.**, Studies on expansion properties in mortar containing, waste glass and fibers, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 n°8 p.1145-1152, 2004.

[79] Projet de R&D - PN RECYBETON (RECYclage complet des BETONs), 2011.

[80] **Quebaud M.**, Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats, Université d'Artois, juin 1996.

[81] **Randjodh S., Rohin Kaushik Er., Gurniwaz Singh Er.**, Study of Self Compacting Concrete Using Brick Dust and Marble Powder, *Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 3, Issue 3, p.1283-1286, 2013.

[82] **Safi B., Ghernouti Y., Rabehi B., Aboutaleb D.**, Effect of the Heat Curing on Strength Development of Self-compacting Mortars Containing Calcined Silt of Dams and Ground Brick Waste, *Materials Research*, Vol. 16(5), P. 1058-1064, 2013.

[83] **Serifou M.**, Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation, Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny et l'Université de Bordeaux 1, Décembre 2013.

[84] **Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D.**, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 n° 1, p. 91-100, 2000.

[85] **Shayan A., Xu A.**, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 n°1, p.81-89, 2004.

[86] **Shi C., Wu Y., Riefler C., Wang H.**, Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, Vol.35 n° 5, p. 987- 993, 2005.

[87] **Shi C., Wu Y., Shao Y., Riefler C.**, Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder, *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*, p.789-95, 2004.

- [88] **Smaoui N., Berube M.A., Fournier B., Bissonette B., Durand B.**, Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 n°2, p. 203-12, 2005.
- [89] **Sobolev K., Turker P., Soboleva S., Iscioglu G.**, Utilization of waste glass in Eco-cement: Strength properties and microstructural observations, *Waste Management*, Vol. 27, p. 971-976, 2007.
- [90] **Tam V.W.Y., Wang K., Tam C.M.**, Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152 (2), p. 703-714, 2008.
- [91] **Tambelli C, E., Schneider, J. F., Hasparyk, N. P. et Monteiro P. J. M.** Study of the structure of alkali-silica reaction gel by high-resolution NMR spectroscopy, *Journal of non-crystalline solids*, Vol. 352 n°32, p. 3429-3436, 2006.
- [92] **Tavakoli M.**, Strength of recycled aggregate concrete made using filed demolished concrete as aggregate. *ACI Materials Journal*, Vol. 93(2), P. 182-190, 1996.
- [93] **Tavakoli D., Heidari A., Pilehrood S.H.**, Properties of concrete made with waste clay brick as sand incorporating nano SiO₂, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 7(12), P. 1899-1905, 2014.
- [94] **Topçu I.B., Bilir T., Uygunoglu T.**, Effect of waste marble dust content as filler on properties self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* Vol. 23, P. 1947–1953, 2009.
- [95] **Vinh-An L.** Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, janvier 2014.
- [96] **Wang H-Y., Huang W.L.**, A study on the properties of fresh Self-consolidating glass concrete (SCGS), *Construction and Building Materials* Vol. 24, P. 619-624, 2010.
- [97] **Yun-Xing S., and al.**, A study on the effect of the fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, p. 1381-1387, 2006.
- [98] **Zeroub H., Chaid R., Mansour MS.**, Influence de la poudre de verre sur la durabilité des bétons, proceeding du Séminaire international BATIDEV, ENSET d’Oran, 2013.