



Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation

Mamery Serifou

► To cite this version:

Mamery Serifou. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I; Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 2013. Français. NNT : 2013BOR15230 . tel-00962148

HAL Id: tel-00962148

<https://theses.hal.science/tel-00962148>

Submitted on 20 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THEME

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITE FELIX HOUPHOUET BOIGNY ET DE
L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

Spécialité : GENIE CIVIL

Option : Géomatériaux

Présenté et soutenue par SERIFOU MAMERY

Le 23 DECEMBRE 2013

Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation

JURY

M. AKA Kouame	Président	Pr, Université Félix Houphouët Boigny
M. YOTTE Sylvie	Directeur de thèse	Pr, Université de Limoges
M. SBARTAI Zoubir-Mehdi	Co-directeur	MdC, Université de Bordeaux
M. AÏT-MOKHTAR Karim	Rapporteur	Pr, Université de la Rochelle
M. KOUAKOU Amedée	Rapporteur	DG, du LBTP

A la mémoire de mon aîné SERIFOU Soumaïla

à ma mère, mon père
à ma tendre et très chère DIOMANDE Madjeneba et
à ma fille SERIFOU Mariam Soufiya

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'Université FELIX Houphouët Boigny en Côte d'Ivoire et l'Université Bordeaux 1 en France.

Durant ma thèse, j'ai bénéficié d'un financement européen du projet DURATINET (Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network : <http://www.duratinet.org/>) que je remercie vivement. Egalement merci à Cemex Aquitaine pour son soutien

Je tiens à remercier...

Mes deux Directeurs de thèse:

BOFFOUE Moro Olivier (Maître de conférences à l'université Félix Houphouët Boigny) pour m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse, pour la confiance qu'il a manifestée à mon égard et pour m'avoir soutenue et toujours encouragé. Il m'a guidé et m'a permis de progresser tout au long de ces années où nous avons travaillé ensemble. Il a par sa présence au quotidien à nos côtés au laboratoire, su nous motiver au travail.

YOTTE Sylvie (Professeur à l'université de Limoges) Je lui exprime en toute sincérité ma gratitude pour sa disponibilité, sa confiance, sa gentillesse et surtout sa patience. Une année de travaille sous pression et très riche en connaissance. Je ne suis pas prêt d'oublier les idées et les nombreux conseils d'ordre scientifique et personnel que vous m'avez donné.

A tous les deux, je souhaite simplement que mon travail ait justifié votre confiance.

Mes deux co-Directeurs de thèse:

EMERUWA Edjikémé (Maître de conférences à l'université Félix Houphouët Boigny), Responsable de l'Equipe Géomatériaux de m'avoir accepté au sein de son équipe, qui m'a initiée à la recherche. Pour lui j'exprime une reconnaissance à plusieurs niveaux. Au plan académique, pour sa direction scientifique, ses conseils, sa confiance et son encouragement pour ce travail. Au plan extra académique, je suis particulièrement reconnaissant au rôle de « père » qu'il a toujours joué pour moi surtout pendant mes moments difficiles.

SBARTAÏ Mehdi (Maître de conférences à l'université Bordeaux 1) pour son esprit curieux, ses questions pertinentes et sa rigueur scientifique qui ont contribué à mener à bien ce travail. Très chers encadreurs, la richesse de vos apports qui ont été d'un précieux concours ainsi que votre disponibilité méritent également ici une mention.

KOUAKOU Honoré (Maître assistant à l'université Félix Houphouët Boigny) pour avoir été toujours disponible quand je criais au secours. Je le remercie pour son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence m'a transmis sa passion pour ce sujet.

KOUADIO Koffi Clément (Assistant à l'université Félix Houphouët Boigny) pour sa rigueur et sa gentillesse.

ASSANDE Alexandre (Assistant à l'université Félix Houphouët Boigny) pour ses nombreux conseils.

Tous les enseignants de l'UFR-STRM, Pr **BIEMI Jean**, Pr **AKA Kouamé**, Pr **SORO Nagnin**, Dr **AGHUI N'guessan**, Pr **POTHIN Kabran** (Reposez en paix Professeur), Pr **COULIBALY Yacouba** ...pour leur contribution à la réalisation de cette thèse.

Tous les enseignants et personnels de I2M-GCE et l'IUT, Pr **DENIS B.** responsable de l'équipe I2M-GCE, Mme **BOUCHERA, Charlotte, Regis** (technicien à l'IUT) pour m'avoir expliqué le fonctionnement des appareils du laboratoire et son aide pour la réalisation de certains essais, **Géneviève** pour tes délicieuses crêpe entre midi et deux et sans oublié tes mots de réconfort.

Mes collègues de bureau: **Thibaut** (à qui je confiais tous mes soucis), **Olivier, Nicolas, Ahmed, Fara, Tan, Mohamed, Saliha** et **Elodie** pour l'ambiance décontractée qui a régné dans le bureau. Grâce à eux, le travail au bureau a toujours été agréable.

Je manifeste également ma reconnaissance au dévouement de l'équipe Géomatériaux. Sans elle, cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Pr **EMERUWA**, merci pour la seconde famille.

Mes collègues de l'équipe Géomatériaux: **SOULEYMANE, AMOAH, ANDO, JOLISSAINT, DJOMO, IBRAHIM, BRICE** et **KONAN**; je vous dis merci de m'avoir aidé dans toutes les manipulations. Merci aussi pour la complicité et la bonne ambiance au sein de l'équipe.

Ma famille et en particulier **mes parents** pour leur soutien quotidien et indéfectible. Qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de ma gratitude.

Une mention spéciale à ma cousine **Fatoumata**, mes oncles **N'gordo** et **Mathias** et **FADIGA Adama** pour m'avoir soutenus et accompagnés dans cette aventure.

Mes frères: **Soiliho, Mamadou, Mamery** et mes quatre sœurs **Fanta, Manta, Noumousso** et **Massé**.

Mes amis de toujours **Adama Idrissa, Issaka, Kélétigui, Aboulaye, Wonnan Eugène, Able** et **Jolissaint**.

Et bien sûr, je ne peux terminer sans REMERCIER **Madjeneba**, mon adorable épouse, qui a su supporter mon stress, m'épauler et me remonter le moral avec une patience infinie pendant ces années où je fus la plupart du temps absent de la maison. Tu as été mon moteur et tu restes mon inépuisable source de force, celle qui me fera toujours aller de l'avant.

RESUME

L'élimination de certains déchets est un enjeu important en Côte d'Ivoire. Une des solutions proposée est d'envisager l'utilisation de ces déchets comme granulats dans les bétons. Les travaux présentés dans ce document portent sur l'incorporation de quatre différents déchets.

La première étude porte sur un béton confectionné avec trois types de déchets : du verre concassé, du ciment durci concassé et des pneus découpés. Elle a été réalisée en deux phases. Dans la première ces déchets ont été incorporés à du béton pour remplacer 100% des graviers (substitution totale). Dans la seconde une substitution (massique) partielle de gravier a été réalisée dans les proportions suivantes 5, 10, 15, 20, 25 et 30 %, la matrice mortier et le rapport eau-ciment restant identiques. Après une maturation de 28 jours leurs résistances en compression ont été déterminées. Ces résultats montrent que les bétons de recyclât ont une résistance inférieure à celui des bétons de concassé de gravier. Toutefois, la résistance mécanique baisse avec l'augmentation de la substitution. Une loi donnant la résistance en fonction du taux de recyclât a été établie. De plus, la spécificité des granulats de caoutchouc (résistance à la fissuration) est remarquée.

Par ailleurs, les résistances des bétons de recyclât ont permis d'établir une loi donnant la résistance en fonction des caractéristiques des agrégats et de leur fraction volumique. Une modélisation analytique a été proposée pour prédire la résistance des bétons en fonction de la taille et du volume des granulats recyclés.

Les granulats issus du concassage des bétons frais (retour de toupie) utilisés comme substituant des granulats naturels a été menée pour évaluer leur potentiel. Un plan d'expériences statistique à deux variables (% de recyclât dans le sable et % de recyclât dans le gravier) a été utilisé pour réduire le nombre de mesures. Les proportions de remplacement utilisées sont : 0%, 50% et 100%. Les propriétés mécaniques ont été déterminées par différentes méthodes destructives (résistance à la compression et à la traction) et non destructives (ondes ultrasonores pour évaluer l'élasticité du matériau). De même, les propriétés physiques telles que la porosité accessible à l'eau, la masse volumique ont été mesurées. Ces résultats montrent une bonne corrélation entre le pourcentage de remplacement et les propriétés physiques et mécaniques de ce béton.

Mots clés : Béton, résistance, verre, pneu, ciment durci, retour de toupie, granulats recyclés, propriétés, ressources naturelles.

ABSTRACT

Waste management is an important issue for Côte d'Ivoire. Among many possibilities, recycling wastes as aggregates for concrete is a solution that deserves to be evaluated. In this study four recycled aggregates are tested: crushed glass, tire cut rubber, hardened cement and fresh concrete waste. Their properties are compared to those of natural aggregates.

A first study is realized in Côte d'Ivoire on glass, rubber and hardened cement. Concrete is realized and tested in compression (cylindrical 16x32 specimens). A mix with an increasing quantity of coarse aggregates is tested for each recycled material (20 %, 25 %, 30 % and 50 % in mass of fine and coarse aggregates). It is shown that the strength decreases with the replacement rate and that the decrease depends on the replacing material. The materials ranged in the following increasing order: rubber, glass, hardened cement and natural aggregates. A power law is established which gives the compressive strength as function of the mix and the materials characteristics. Analytical modeling was proposed for predicting the strength with respect to recycled aggregates size and volume.

Another experiment is also made on glass and rubber, where partial replacement in increasing percentage is tested. Natural aggregates are partially replaced in the mix with the ranges of 5, 10, 20, 25 and 30 % by rubber and glass. The compressive strength is determined and a decrease is observed for the two materials. In the case of rubber a high decrease is observed with the replacement. In the case of glass a decrease occurs between 0 and 5 % replacement then the strength remains constant with the replacement rate.

The third experiment is made with partial replacement of fresh recycled concrete (excess of ready-mixed concrete from concrete mixing plant which is hardened and then crushed). A plan of experiments is made which allows a polynomial law to be drawn giving the strength as a function of the recycled proportion. Other properties (Young modulus, P wave velocity, porosity, density, etc) have been determined and their relation with replacement rate computed.

Keywords: Concrete, strength, glass, rubber, hardened cement, fresh concrete waste, recycled aggregates, properties, natural resources

Table de matières

Remerciements	4
RESUME.....	6
ABSTRACT	7
Table de matières	8
Liste des tableaux	14
Table des figures	16
Liste des abréviations	18
INTRODUCTION.....	20
OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ETUDE	22
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	23
Introduction	23
1 Intérêt du recyclage dans le génie civil	24
2 Utilisation des recyclâts	25
3 Différents recyclâts	28
3.1 Laitiers	28
3.1.1 Laitier de haut fourneau	28
3.1.2 Laitier d'acier	28
3.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques.....	28
3.2.1 Mâchefer.....	29
3.2.2 Scories	29
3.2.3 Cendres volantes	30
3.3 Déchets divers.....	30
3.3.1 Verre de récupération	30
3.3.2 Pneus usagers	31
3.3.3 Ciment durci	31
3.3.4 Résidus d'incinérateurs	31

3.3.5	Boues rouges	32
3.4	Les granulats recyclés.....	32
3.4.1	Granulats recyclés issus de déchets de démolition.....	32
3.4.2	Granulats de déchets de production de l'industrie du béton	33
3.4.3	Sables de fonderies.....	33
3.5	Conclusion	34
4	Granulats dans le béton.....	34
4.1	Environnement normatif.....	34
4.2	Aspect technique.....	35
5	Formulation.....	35
5.1	Incorporation de granulats recyclés dans les bétons.....	36
5.2	Influence de la granulométrie	37
5.3	Influence de la forme des granulats	37
5.4	Généralités sur la formulation des bétons.....	38
5.5	Méthodes de formulation traditionnelles	38
5.6	Méthodes de formulation novatrices	40
5.7	Méthodes de formulation numériques	41
6	Recyclage des verres.....	43
6.1	Introduction	43
6.2	Caractéristique physique et mécanique du verre	43
6.2.1	Origine du verre	45
6.2.2	Surface spécifique	45
6.2.3	Masse volumique.....	46
6.2.4	Morphologie des grains	46
6.2.5	Porosité et absorption d'eau du verre à vitre concassé.....	47
6.3	Inconvénients et avantages	47
6.3.1	Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique	48

6.4	Le verre dans les bétons.....	51
6.4.1	Influence de la taille des grains de verre sur la réaction alcali-silice	52
6.4.2	Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice	53
6.4.3	Influence de la taille des grains de verre sur la réaction pouzzolanique	55
6.4.4	Influence de la teneur en verre des mélanges sur la réaction pouzzolanique	55
6.5	Conclusion	55
7	Recyclage des pneus	56
7.1	Origine des pneus	57
7.2	Granulats.....	57
7.3	Propriétés des granulats	59
7.4	Performance des bétons	61
7.4.1	Résistance à la compression	61
7.4.2	Résistance à la traction	63
7.4.3	Module d'élasticité	65
7.5	Conclusion	66
8	Recyclage des déchets de l'industrie du béton.....	67
8.1	Introduction	67
8.2	Bilan des déchets de production de l'industrie du béton	67
8.3	Caractéristiques des rebuts de fabrication de l'industrie du béton	68
8.4	Inconvénients.....	69
8.5	Performance des bétons	70
8.6	Conclusion	70
9	Conclusion	71
	Chapitre 2: Caractérisation des matériaux constituant les bétons	73
2	Introduction.....	73
2.1	Ciment	73
2.1.1	Ciment CEMII 32,5 R	73

2.1.2	Ciment CEM II 32,5 R	73
2.2	Sable	74
2.2.1	Granulométrie.....	74
2.2.2	Module de finesse des sables	75
2.2.3	Equivalent de sable.....	76
2.2.4	Masse volumique et Absorption.....	76
2.3	Discussion : Modèle de Weibul.....	76
2.4	Graviers	78
2.4.1	Granulométrie.....	78
2.4.2	Masse volumique et absorption.....	79
2.4.3	Caractéristique mécanique	80
2.5	Discussion : Modèle de Weibul.....	81
2.6	Conclusion du chapitre	83
Chapitre 3 : Influence du type et de la quantité de granulats recyclés sur les performances du béton		84
3	Introduction.....	84
3.1	Fabrication des bétons	84
3.2	Résultats et discussions sur la résistance mécanique.....	85
3.2.1	Influence du taux volumique.....	88
3.3	Influence de la taille des grains	89
3.4	Proposition d'une loi donnant la résistance	91
3.5	Conclusion partielle	96
3.6	Influence de l'association granulats naturels-recyclâts sur les performances mécaniques du béton : Cas du verre et pneu	96
3.6.1	Expérience	96
3.6.2	Résistance à la compression du béton de granulats associés	97
3.6.3	Conséquence du type de recyclâts de substitution	99
3.7	Application	102

3.8	Conclusion générale du chapitre.....	105
Chapitre 4: Valorisation des granulats issus des bétons frais de retour de toupies.....		107
Introduction		107
4	Plan expérimental.....	108
4.1	Matériaux.....	108
4.1.1	Granulats	108
4.1.2	Ciment	109
4.2	Plan d'expérience	110
4.2.1	Méthodologie	110
4.2.3	Composition des bétons	111
4.3	Gâchage et malaxage	112
4.4	Eprouvette : fabrication, conservation et tests.....	113
4.5	Résultats.....	113
4.5.1	Comportement à l'état frais.....	113
4.6	Propriétés mécaniques	114
4.6.1	Résistance à la compression.....	114
4.6.2	Résistance à la traction par flexion et fendage.....	117
4.6.3	Module d'élasticité dynamique	117
4.7	Propriétés physiques	118
4.7.1	Porosité.....	118
4.7.2	Absorption.....	120
4.7.3	Densité.....	122
4.8	Conclusion du chapitre	123
CONCLUSION GENERALE		125
PERSPECTIVES.....		128
Bibliographie		129
Annexes.....		153

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Classification des graves de recyclage	26
Tableau 1.2: Diamètre critique selon différents auteurs	44
Tableau 1.3: Les surfaces spécifiques des différentes fractions granulaires de verre	45
Tableau 1.4: Densités des différentes classes granulaires	46
Tableau 1.5: Masse volumique absolue et absorption d'eau du verre.....	47
Tableau 1.6: Chute relative de résistance en compression des bétons de broyat de pneu en fonction du taux de remplacement. L'indice (1) est mis pour un taux volumique et (2) pour un taux massique.	56
Tableau 1.7: Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc,.....	60
Tableau 1.8: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D),	63
Tableau 1.9: Taux de rebut moyen et tonnages de rebuts et déchets pour différents secteurs de l'industrie du béton.....	68
Tableau 1.10: Caractéristiques des granulats issus des rebuts de fabrication de blocs et pavés en béton	69
Tableau 2.1: Composition chimique et propriété physique.....	73
Tableau 2.2: Composition chimique (valeurs moyenne en %)	74
Tableau 2.3: L'équivalent de sable	76
Tableau 2.4: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation	78
Tableau 2.5: Masses volumiques des granulats	79
Tableau 2.6: Caractéristiques mécaniques moyennes généralement admises des granulats....	81
Tableau 2.7: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation	83
Tableau 3.1: Composition des mélanges.....	84
Tableau 3.2: Détails des résultats des résistances à l'essai de compression des différents bétons	86
Tableau 3.3: Résistances moyennes en compression, écarts types et coefficient de variation	87
Tableau 3.4: Pentes de la résistance normée en fonction du pourcentage de granulats (%-1).	89
Tableau 3.5: Coefficients de corrélation entre la résistance ou le coefficient de variation et les caractéristiques des granulats	89
Tableau 3.4: Valeurs caractéristiques des granulats.....	92
Tableau 3.5: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire	102
Tableau 3.6: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire	103
Tableau 3.7: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire	104

Tableau 3.8: Composition de mélange de la substitution partielle	97
Tableau 3.9: Valeurs résistance en compression et densité.....	98
Tableau 4.2: Composition chimique (valeurs moyenne en %)	109
Tableau 4.3: Plan d'expériences.....	111
Tableau 4.4: Compositions des différents bétons ('R' = recyclé, 'N' = non recyclé, la première lettre concerne le pourcentage de sable et la seconde celle du gravier, B signifie béton).....	112

Table des figures

Figure 1.1: Grains de verre.....	47
Figure 1.2: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice	49
Figure 1.3: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différentes couleurs.....	53
Figure 1.4: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre	53
Figure 1.5: Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre	54
Figure 1.6: Granulats en caoutchouc de classe (0/4) mm utilisés	58
Figure 1.7: Courbes granulométriques du sable et du G.C de classe (0/4) mm	58
Figure 1.8: Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C.,	61
Figure 1.9: Influence du dosage en G.C sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4 mm remplacé par des G.C 0-4 mm),.....	62
Figure 1.10: Influence de l'adjonction de G.C sur la résistance en compression,	62
Figure 1.11: Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage,	64
Figure 1.12: Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice.	65
Figure 1.13: Influence des G.C. sur le module d'élasticité.	66
Figure 2.1: Courbe granulométrique des sable.....	74
Figure 2.2: Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton	75
Figure 2.3 : Régression permettant de retrouver les paramètres λ et k	77
Figure 2.4 : Courbes granulométriques des granulats concassés et roulés.....	79
Figure 2.5 : Régression permettant de trouver les paramètres	82
Figure 3.3. Modèle de variation de la résistance en fonction de la fraction volumique	91
Figure 3.4: Comparaison entre le modèle de Weibull et les données expérimentales pour la granulométrie de la grave naturelle	93
Figure 3.5: Variation de F avec le logarithme du paramètre d'échelle λ	93
Figure 3.6: Variation de F avec le logarithme du facteur de forme k	94
Figure 3.7: Variation de F avec la densité relative ($1-dg/ds$) du granulat recyclé par rapport au sable.....	94
Figure 3.9: Résistance du Béton de verre en fonction de la proportion	100

Figure 3.10: Résistance du Béton de pneu en fonction de la proportion	100
Figure 4.1: Courbe de l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés	109
Figure 4.4: Relation entre résistance mécanique et le pourcentage total des granulats recyclés	116
Figure 4.5: Relation entre résistance à la compression et le pourcentage total de granulats recyclés.....	116
Figure 4.6: Résistance à la traction en fonction du pourcentage des granulats recyclés (mesurée par flexion et fendage).....	117
Figure 4.7: Module d'élasticité dynamique en fonction du pourcentage des granulats recyclés.	118
Figure 4.8: Porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés...	119
Figure 4.9: Surface de réponse de la porosité en fonction du pourcentage de sable et gravier recyclés.....	120
Figure 4.10: Absorption des bétons en fonction du temps	121
Figure 4.11: Absorption des bétons en fonction du pourcentage de remplacement à 28 jours de maturation.....	122
Figure 4.12: Densité des bétons en fonction du pourcentage de remplacement	123

Liste des abréviations

AFNOR: Association Française de Normalisation

BAP: Béton Autoplaçant

BC: Bouteille concassé

BNN: Béton de granulats fins et grossiers Naturels

BNR: Béton de granulats fins Naturels et grossiers Recyclés

BPU: Béton de Pneu Usagé

BRN: Béton de granulats fins Recyclés et granulats grossiers Naturels

BRR: Béton de granulats fins et grossiers recyclés

CD: Ciment Durci

CSH: Silicate de Calcium Hydraté

ES: Equivalent de Sable

FAE: Four à Arc Electrique

FP: Four Proche

FOP: Four à Oxygène Pur

GC: Granulats Concassés

GC: Granulats de Caoutchouc

GDCBFNB: Guide des Déchets de Chantier de Bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment

GN: Granulats Naturels

GR: Granulats recyclés

GR: Granulats Roulés

HF: Haut Fourneau

IDRRIM: Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

I2M-GCE: Institut Mécanique et d'Ingénierie – Génie Civil et Environnement

IUT: Institut Universitaire de Technologie

LA: Los Angeles

MF: Module de Finesse

PD: Pneu Découpé

PVA: Polymère Acétate de Vinyle

PVC: Polychlorure de Vinyle

PUNR: Pneus Usagés Non Réutilisables

PUR: Pneus Usagés Réutilisables

RAS: Réaction Alkali Silice

RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

RT: Retour de Toupie

UFR STRM: Unité de Formation et de recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières

UNPG: Union Nationale des Producteurs de Granulats

SNG : Sable Naturel de Gironde

SNL : Sable Naturel Lagunaire

SR : Sable Recyclé

INTRODUCTION

Le béton est composé de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour modifier ses propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics. Pour améliorer sa résistance, des chercheurs ont, successivement mis au point des nouveaux bétons comme les bétons à hautes performances (BHP) (**Béton, 2009**), les bétons à très hautes performances (BTHP) (**Oodoc, 2009**) et les bétons à poudres réactives (BRP) (**Rdereel, 2009**). De même dans l'amélioration de la maniabilité des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 ont mis au point des bétons fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes).

Cette pression sur la ressource béton occasionne une exploitation intensive des carrières de granulats (concassées de roche) qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux (destruction de la faune et flore, pollution de la nappe souterraine) dans un pays comme la France. Pour y remédier le gouvernement Français a durci les conditions d'ouverture de nouvelles carrières et a voté des lois de plus en plus drastiques pour la protection de l'environnement. Celles-ci imposent de chercher une nouvelle source d'approvisionnement en granulats. Pour éviter aussi la création de décharge sauvage de déchets de l'industrie du béton (retour de toupie), ses derniers et les déchets non biodégradables sont sollicités pour cette nouvelle source.

Par ailleurs dans les pays en développement bien que l'épuisement de ressource naturel de granulats ne se pose pas actuellement, l'accumulation de déchets non biodégradables (pneus usagés, bouteilles et ciment durci) constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Cette accumulation est liée à l'explosion démographique des pays en voie de développement accompagnée d'une urbanisation incontrôlée qui favorisent une production importante de déchets (pneus usagés, bouteilles, bidons, récipients divers retenant de l'eau stagnante) qui représentent aussi un danger sanitaire. Ils constituent un habitat privilégié des insectes (ex : moustiques, etc.) et occasionne un nombre toujours croissant de personnes exposées à la maladie (ex : le paludisme, etc.). Ainsi, ces déchets (ciment durci, pneu usagé, bouteille, etc.) bouchent les canaux d'évacuation provoquant la remontée des eaux sales dans les tuyaux d'évacuation à la surface, les odeurs nauséabondes, l'insalubrité, inondations et la destruction de certaines installations.

Ces déchets ont fait l'objet de travaux utilisant par exemple le caoutchouc comme granulat dans le béton (**Serifou, 2008; Benazzouk et al., 2004**). Certains travaux ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité (**Eldin & Senouci, 1993; Topçu, 1995 ; Benazzouk et al., 2003; ST-France, 2007**). D'autres travaux sur la durabilité de ces composites en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel ont montré également l'intérêt du caoutchouc (**Benazzouk et al., 2002**).

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose à la planète entière.

Ainsi, avec l'ambition du gouvernement Ivoirien de faire de la Côte d'Ivoire un pays émergeant à l'horizon 2020. Cette émergence ne peut se faire sans le développement des infrastructures d'où une exploitation abusive des granulats naturels. En prévision de l'épuisement de ces gisements donc à la pérennisation de cette ressource naturelle et à l'assainissement du cadre de vie et de l'environnement, l'incorporation des déchets non biodégradable (ciment durci, bouteille, pneu usagé et retour de toupie) a été envisagée. De plus, cette valorisation offrira dans un futur proche un débouché économique intéressant pour les entreprises fabricant ces produits. Cette approche qui participe au processus de développement durable fait partie des thématiques de recherche en cours de développement de deux Laboratoires: Le laboratoire de Géomatériaux et Technologie de l'Habitat de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'université de FELIX Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire) et l'Institut Mécanique et d'Ingénierie – département Génie Civil environnemental (I2M-GCE) de l'université de Bordeaux (France).

OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ETUDE

L'objectif du travail proposé est de trouver un substitut au granulat naturel (roche concassée) à travers l'incorporation de déchets non biodégradables (ex : granulats de caoutchouc (G.C), concassé de verre (C.V), concassé ciment durci (C.D) et concassé de retour de toupie (R.T) dans le béton afin de pérenniser et préserver les ressources naturelles dans le cadre de l'assainissement de l'environnement et du cadre de vie. Pour cela, on va étudier l'influence des granulats recyclés sur les propriétés d'un béton cimentaire afin d'en proposer une application.

Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographie regroupant le recyclage des pneus usagés, des verres et des déchets de l'industrie du béton. Le ciment durci n'étant pas une ressource commune pour des raisons économique (il est inutile de générer un déchet aussi cher quand cela peut être évité), nous n'avons pas trouvé de travaux relatifs à ce granulat artificiel.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux utilisés dans notre étude pour confectionner des bétons recyclés.

Une étude complète des caractéristiques des granulats recyclés est présentée. Nous verrons également une modélisation de la granulométrie de ces granulats qui sera utilisée par la suite pour modéliser la relation en résistance à la compression et dimensions ainsi que le volume des granulats recyclés.

L'influence du type et la quantité de granulats sur les propriétés des bétons recyclés à l'état durci sera présentée dans le troisième chapitre. Les réponses des composites en compression simple seront présentées dans ce chapitre. Dans ce même chapitre sera aussi présentée l'influence du taux de substitution du pneu et du verre. Il s'agit d'analyser le remplacement partiel du gravier naturel par le pneu et aussi par le verre.

Dans le dernier chapitre, une valorisation des granulats issus des bétons frais de retour de toupie sur le béton sera mise en évidence. Ce chapitre s'attachera à l'influence du retour de toupie considéré comme un ensemble sable plus granulat et aussi à l'influence du taux de substitution de ce granulat. La compression, la traction par flexion et fendage, ainsi que la porosité et les propriétés d'élasticités seront présentées dans ce chapitre.

Nous terminerons par les conclusions et les perspectives de notre étude.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Introduction

L'accroissement de la population sur la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants entraînent une augmentation de la production des biens de consommation, engendrant parallèlement un flux de déchets de plus en plus important. L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à nos sociétés de consommation car ces derniers polluent l'environnement et occasionnellement créent des dégâts dans les milieux vivants. Par ailleurs, cette activité débordante de production, consomme des ressources naturelles et de l'énergie et met donc en danger l'économie de certains pays. En effet, la réduction des réserves exploitables de granulats naturels et la prévision d'une diminution de la production de ces granulats ont pour conséquence la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton.

Depuis des années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de rebuts de fabrication de produits en béton et de déchets divers ne sont pas ou très peu utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil.

Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Notre objectif, dans ce premier chapitre, est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les granulats qui ont fait l'objet de recherche comme substitut de granulats naturels. Cette synthèse met en avant l'origine de ces granulats et aussi présente les performances des bétons confectionnés avec ces granulats recyclés.

1 Intérêt du recyclage dans le génie civil

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats (**GDCBFNB, 1994**). Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes (**GDCBFNB, 1994**). En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes (**UNPG, 2001**).

Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 (**UNPG, 2001**), le granulat recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels.

Selon (**Charlot, 1993**) en France, les déchets de démolition sont issus des friches industrielles (40 %), des logements (35 %) et des travaux publics (25 %). Ces déchets sont composés de 50 % de maçonnerie, 30 % de béton, 5 % de bitume et 15 % de matériaux autres (bois, métal, papier, plastique, etc.).

Par exemple, la Belgique produit annuelle environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus (**bruxellesenvironnement.be, 2012**). La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- granulats naturels environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58 %), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes;
- granulats marins environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5 %);
- granulats artificiels environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25 %);
- sables/graves environ 11 millions de tonnes par an (+/- 14,75 %);
- granulats recyclés 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5 %).

Recycler des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet:

- une économie de la ressource naturelle ;
- une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;

- la réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant **(Thai et al., 2009)** ;
- la récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

2 Utilisation des recyclâts

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

Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, l'étude bibliographique réalisée **(Raphaël, 2003)** montre que les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels. Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués des gravillons de bétons recyclés. Ces phénomènes sont encore accrus en présence d'une fraction sable de bétons concassés (0/4 mm). Ces inconvénients sont plus ou moins compensés par l'ajout de 10 à 15 % de ciment supplémentaire et d'un fluidifiant. De plus, les granulats recyclés dont la granulométrie est comprise entre 20 et 63 mm sont destinés aux terrassements ou aux chaussées. Pour la stabilisation de plates-formes et consolidation de sol les matériaux de recyclage de granularité 20/60 et 30/80 sont recommandés **(IDRRIM, 2011)**. Le tableau 1.1 présente les caractéristiques des granulats utilisés dans les travaux routes.

Tableau 1.1: Classification des graves de recyclage [IDR, 11]

Description	Matériaux pour remblais et couches de forme		Granulats pour assises de chaussées		
	NF P 11-300		NF EN 13242 – NF EN 13285 XP P 18 - 545		
Dénomination	GR0	GR1	GR2	GR3	GR4
Granularité maximale (mm)	0/150	0/80	0/31,5	0/20	0/20
Code NF EN 13285 (hors caractéristiques intrinsèques)			GNT 2	GNT 3	GNT 3
Caractéristiques de fabrication des gravillons					
Code de fabrication selon la XP P 18-545			Code IV	Code III	Code III
Caractéristiques de fabrication des sables et des graves					
Code de fabrication selon la XP P 18-545			Code c	Code b	Code b
Propreté VBS		≤ 0,2			
Caractéristiques intrinsèques					
LA		≤ 45	≤ 45	≤ 40	≤ 35
MDE		≤ 45	≤ 45	≤ 35	≤ 30
LA + MDE			≤ 80	≤ 65	≤ 55
Autres caractéristiques					
Sulfates solubles dans l’eau NF EN 1744 – 1 art. 10,2	SS _{0,7} [SSb]				
Identification des origines des matériaux selon NF EN 933 - 11			Rcug 70 X1 FL 5		

Les graves de recyclage GR0 et GR1 sont utilisées en terrassement, ce qui est donné par la norme **NF P 11 – 300**.

Dans le domaine du génie civil, les pneus usagés sont utilisés entiers ou découpés pour constituer des parements ou renforcer les remblais allégés (techniques PNEUSOL, PNEURESIL).

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. Cette poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes antifissures à usage routier ou de membranes antivibrations destinées aux plates – formes ferroviaires. Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage est réduit et le processus de vieillissement ralenti.

D'après les travaux des auteurs comme (**Sglavo et al., 2000 ; Gupta et al., 2001 ; Brunori et al., 05 ; Li et al., 06**), les boues rouges sont utilisées dans les domaines suivants:

- construction des routes à cause de leur solidité et de leur durabilité ;
- production du ciment à cause de leur résistance au gel et leur bas prix ;
- fertilisation des sols grâce à leur teneur élevée en potassium et en phosphate ;
- extraction des oxydes de fer, de scandium, de plomb et de titan;
- fabrication de céramique;
- neutralisation des eaux des mines et des sites contaminés.

De plus, la poudre de verre comme ajout cimentaire peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton (**Micronisation du verre, 2012**). Cette initiative novatrice pour la récupération et le recyclage du verre en Amérique du Nord a plusieurs avantages. En plus d'offrir un débouché au recyclage du verre, elle améliore la qualité du béton de construction. Les intérêts ne sont pas seulement de nature environnementale puisque les propriétés de ce produit lui permettent de remplacer les ajouts cimentaire classiques en améliorant les performances des bétons.

3 Différents recyclâts

3.1 Laitiers

3.1.1 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 comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant (**Ramachandran, 1981**). Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. 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.

3.1.2 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 de 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.

3.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits (**Ramachandran, 1981**). 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.

3.2.1 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. Etant 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.

A 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 ».

3.2.2 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 pour la fabrication de blocs de béton **(Ramachandran, 1981)**.

Les quatre catégories des scories **(Kharoune et al., 2006)** désignées selon leur procédé de fabrication sont : les scories FOP (Four à Oxygène Pur), les scories FAE (Four à Arc Electrique), les scories HF (Haut Fourneau) et les scories FP (Four Proche). L'utilisation des scories dans le but de séquestrer le CO₂ est importante si on considère qu'il se produit actuellement 14 millions de tonnes (Mt) au Canada, 21 Mt aux Etats Unis et 350 Mt de scories dans le monde dont 190 Mt de type HF **(Proctor et al., 2000)**.

3.2.3 Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées (**Ramachandran, 1981**). 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.

Les cendres volantes de classe F contiennent moins de 10 % de CaO et sont utilisées pour la fertilisation des sols. Les cendres de classe C contiennent plus de 10 % de CaO et elles sont plus communément utilisées pour la fabrication du béton (**Montes et al., 2009**). D'après (**Bouzoubaa et Fournier, 2003**), la production des cendres volantes s'élevait à 4800000 tonnes à travers le Canada en 2001 dont 450000 tonnes ont été utilisées pour la fabrication du ciment.

En Europe et selon les années, de 2 à 3 Mt de cendres volantes, sur une production totale de 43 Mt sont utilisée dans la construction de routes (**Shkelzen, 2010**).

3.3 Déchets divers

3.3.1 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. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier (**Saadani, 2006**). Il est utilisé sous deux formes principalement : 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. Ces différents points seront détaillés plus loin puisque un des recyclâts utilisés dans l'étude est un recyclât de verre.

3.3.2 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 macrofissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait. Néanmoins, la résistance en compression est très faible ce qui limite aussi les applications. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité **(Bonnet et al., 2004)**. Ce matériau constitue un des produits étudiés et sera donc abordé plus en détail plus loin.

3.3.3 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 **(Serifou, 2008)**. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production. Une cimenterie est très énergivore et productrice de gaz à effet de serre très néfaste pour l'environnement. Il est donc très important de ne pas gaspiller ce produit.

3.3.4 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 **(Ramachandran, 1981)**

3.3.5 Boues rouges

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Ces résidus selon **(Doye et Duchesne, 2003)** ont un pH supérieur à 12 et sont produits à un taux de 2 t/t d'aluminium commercialisé **(Vachon et al., 1994)**. Les boues rouges sont stockées soit au fond des océans (France, Allemagne), soit près des usines comme au Canada **(Vachon et al., 1994)**.

La production des boues rouges en 2006 s'est chiffrée à 90 Mt dans le monde dont, 3 Mt au Canada et on prévoit une augmentation de production de 60 % par décennie **(Kharoune et al., 2006)**. Les grandes alumineries peuvent en générer jusqu'à 675 000 tonnes par année **(Doye et Duccesne, 2003)**. 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.

3.4 Les granulats recyclés

3.4.1 Granulats recyclés issus de 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 **(Cimpelli et Lefort, 1996)**:

- 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.

Les régions françaises productrices de granulats recyclés sont l'Île de France (qui produit 52 % des granulats recyclés français), la région Nord-Pas-de-Calais (avec la reconversion des friches industrielles), dans une moindre mesure l'Alsace, et depuis 1994 la région Rhône-Alpes **(GDCBFNB, 1994)**.

3.4.2 Granulats de 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; ce types de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 1 % de la masse de béton produite selon les secteurs concernés **(Raphaël, 2003)**.
- 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 ; ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 3 % selon les secteurs et selon les conditions imposées par tri **(Raphaël, 2003)**.

Lorsqu'ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets (emballages, chiffon, etc), ces morceaux et débris de béton durcis et propres sont considérés comme des déchets inertes. Ils sont le plus souvent acceptés gratuitement par des entreprises de travaux publics pour constituer des remblais ou par des entreprises de traitement de déchets de chantier. Toutefois, pour certains secteurs de l'industrie du béton (planchers, ossatures, murs, assainissement), les produits défectueux fortement armés ou précontraints et volumineux posent des problèmes d'enlèvement.

3.4.3 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 (ex: résines phénoliques). Ce sable peut être recyclé mais le nombre réutilisations de celui-ci est limité **(Maillard, 1997)**.

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 ».

3.5 Conclusion

Le béton est un matériau qui est souvent perçu comme un lieu potentiel pour les déchets, en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclées. On y recycle les céramiques **(Paulo, 2009)**, les pneus **(Li et al., 2004; Segre et Joekes, 2002)**, les verres **(Tung et al., 2011; Kou et Poon, 2009, Topçu et al, 2008)**, mais aussi les déchets issus des démolitions briques **(Debieb et Kenai, 2008; Khatib, 2005; Poon et Chan, 2006; Khaloo, 1994; Hansen, 1992)** et bétons concassés **(Gomez, 2002; Tu, 2006; Kou, 2011)**.

On peut décider d'ajouter des agrégats recyclés ou bien d'introduire d'autres matériaux. En construction, on peut ajouter au béton classique des agrégats recyclés issus de démolition **(Rahal, 2005)**, des résines de polyester insaturées issues du recyclage de déchets plastiques **(Rebeiz, 1996)** des agrégats de béton recyclés renforcés de tubes d'acier **(Yang, 2006)**, des agrégats de béton avec briques d'argile réduites en poudre **(Poon, 2006)**, ou encore de la poudre de verre recyclé **(Terro, 2006)**. Dans les techniques routières, on peut ajouter des produits tels que la poudrette de caoutchouc, le polyéthylène issu de déchets de câbles électriques, du bitume provenant des chaussées **(Huang, 2005)**, ou bien le P.V.C (polychlorure de vinyle) issu de déchets de bouteilles plastiques **(Babilotte, 1998)**.

Outre l'avantage environnemental, la proximité est également une condition indispensable de la compétitivité des granulats recyclés. Pour développer l'incorporation de granulats recyclés dans la fabrication des bétons pour la construction, il reste à démontrer scientifiquement que ces matériaux ont les qualités techniques requises. Des études sont menées actuellement en ce sens. Et elles consistent à l'élaboration et à la caractérisation des bétons de ces granulats recyclés. Pour cette synthèse, l'intérêt est porté sur les granulats de ciment durci, verre, pneu usagé et de déchet de l'industrie du béton.

4 Granulats dans le béton

4.1 Environnement normatif

L'utilisation des déchets minéraux de chantier recyclé dans la construction est régit par un ensemble de normes et de recommandations professionnelles assurant d'une part une mise en œuvre correcte des produits et d'autre part la garantie de qualité des matériaux **(Vd, 2011)**.

Pour ce faire, les granulats recyclés et artificiels sont soumis aux mêmes exigences que les granulats naturels. Des caractéristiques et des exigences additionnelles peuvent cependant être spécifiées au cas par cas dans des documents contractuels spécifiques. Par exemple les

granulats recyclés du bâtiment peuvent faire l'objet d'une mesure contractuelle de leur teneur en sulfate soluble dans l'eau selon la norme P 18-581. Ainsi, l'arrêté interministériel du 27 juin 2003 rend obligatoire, en France, à partir du 1^{er} juin 2004, le respect des normes suivantes:

- NF EN 13139 "Granulats pour mortiers"
- NF EN 12620 "Granulats pour bétons hydrauliques"
- NF EN 13055-1 "Granulats légers pour bétons, mortiers et coulis"

Ces normes spécifient les caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats qui sont utilisés dans la fabrication du mortier ou du béton et même des coulis, entrant dans la construction des bâtiments, des routes et des ouvrages de génie civil. L'amendement de juin 2008 précise les teneurs en constituants des granulats recyclés (chlorures, sulfates solubles dans l'eau). Il aborde en outre la question de la réaction alcali silice (**RAS**), que nous détaillerons plus loin, avec les granulats recyclés et leur effet possible sur le temps de prise.

4.2 Aspect technique

Les normes et les spécifications techniques qui déterminent les possibilités d'utilisation des granulats de recyclage sont les mêmes que pour les granulats naturels :

- norme P 18-101, en ce qui concerne les granulats pour chaussées,
- norme P18-541, en ce qui concerne les granulats pour bétons.

Deux essais principaux permettent d'évaluer la qualité des granulats:

- l'essai Los Angeles, qui mesure la résistance à la fragmentation,
- l'essai Micro-Deval en présence d'eau, qui mesure la résistance à l'usure.

Il est nécessaire de disposer d'un guide technique permettant d'encadrer l'utilisation des granulats recyclés selon la destination des bétons produits avec ces granulats. Il faudra également considérer le cadre normatif des nouveaux ciments ou matériaux hydrauliques dérivés des matériaux recyclés.

5 Formulation

Le béton est un mélange de constituants de base dont on dissocie:

- **la partie liante du béton (solide)**: Elle assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant. Elle se compose de ciment, d'eau et éventuellement

d'additions minérales (filler calcaire, filler siliceux, laitier de haut fourneau, fumée de silice, cendres volantes, métakaolin...);

- **le squelette (solide)**: Cette phase constituée de granulats, généralement inertes, occupe la majorité du volume. Elle participe aux propriétés générales du matériau à l'état frais et durci;
- **la partie liquide**: Elle englobe l'eau et l'adjuvant. L'eau entre dans la réaction chimique avec le liant pour former les hydrates, mais est toujours largement excédentaire par rapport aux besoins de l'hydratation du ciment afin d'assurer une certaine rhéologie à l'état frais. Ces excédents introduisent une porosité résiduelle dans le matériau qui dégrade l'ensemble des propriétés (durabilité, résistance, etc). Les adjuvants améliorent les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci. Selon **(norme NF EN 934-2)**, un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5 % des éléments fins. Il existe 11 familles d'adjuvants (entraîneur d'air, superplastifiant, retardateur de prise, etc);
- **l'air (gazeux)**: Le béton renferme toujours une certaine quantité d'air, appelé air occlus, car des bulles d'air sont piégées lors du malaxage. Cette quantité d'air, qui varie de 1 à 2,5 % en absence de produit entraîneur d'air et peut atteindre 4 à 8 % en présence d'entraîneur d'air, influe sur les performances mécaniques du matériau durci **(Franck, 2007)**.

L'étude de la formulation a pour but de sélectionner les constituants du béton et de choisir leur proportion dans le but de répondre à un cahier des charges. Le cahier des charges minimum, imposé concerne la résistance, la maniabilité et la durabilité.

5.1 Incorporation de granulats recyclés dans les bétons

Les granulats recyclés 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, rapport

E/C, etc) (**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**).

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.

5.2 Influence de la granulométrie

La dimension d'un élément granulaire est donnée par l'ouverture de la maille carrée d'un tamis, exprimée en millimètres, à travers laquelle il passe facilement. La granulométrie est caractérisée par la distribution dimensionnelle des éléments. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage dans laquelle on détermine la quantité de matériaux utilisés entre chacun des tamis d'une série.

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 pompabilité, 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.

5.3 Influence de la forme des granulats

(**Noureddine, 1996**) 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). 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-granat).

5.4 Généralités sur la formulation des bétons

La diversité des bétons actuels (Béton AutoPlaçant BAP (**Assié, 2004, El Barak, 2005**), Béton Haute Performance BHP (**Gramont-Garnier 1992**), Béton Ultra Haute Performance BUHP, bétons avec granulats de caoutchouc (**Garros, 2007**), bétons fibrés, etc), aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation unique. Généralement, la base de la formulation est orientée par les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Il faut donc raisonner par catégorie de béton même si certains principes peuvent être retenus.

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes de compacité optimale. Mais au préalable, il est nécessaire de faire un historique des différentes méthodes de formulation afin de comprendre les procédés actuels.

5.5 Méthodes de formulation traditionnelles

Historiquement, les principes régissant les concepts de formulation commencent à se rationaliser à la fin du XIX^{ème} siècle (**Franck, 2007**). En 1892, Féret (**Féret, 1892**) auquel on attribue les premières recherches, travaille sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Au travers de l'équation I-1, Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique e/c.

$$f_c = k_{Féret} \left(\frac{1}{1+(e+V)/c} \right) \quad \text{Eq.I-1.}$$

Où $k_{Féret}$ coefficient de Féret relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier

En 1907, Fuller et Thompson (**Fuller, 1907**) basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se

situé dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension) (équation I-2). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{Fuller\ Thompson} = 100 \times \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq.I-2}$$

Où $P_{Fuller\ Thompson}$ porosité du mélange granulaire selon Fuller Thompson

En 1918, Abrams (**Abrams, 1923**) définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants (équation I-3) et fait intervenir au travers de K_{Abrams} ($K_{Féret}$ amélioré) la nature et la forme des granulats.

$$f_c = K_{Abrams} \frac{1}{7,5 \left(\frac{E}{1,5C} \right)} \quad \text{Eq.I-3}$$

Où K_{Abrams} coefficient d'Abrams relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier

En 1925, Bolomey (**Bolomey, 1925**) propose une courbe granulaire continue de référence incluant le ciment (équation I-4).

$$P_{Bolomey} = A_{Bolomey} + (100 - A_{Bolomey}) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq.I-4}$$

Où $P_{Bolomey}$ porosité du mélange granulaire selon Bolomey

La différence avec l'équation de Fuller et Thompson, intervient au travers de $A_{Bolomey}$ qui dépend de la forme des granulats ainsi que de la consistance du béton. La résistance en compression par Bolomey établie selon l'équation I-5, est une variante de la loi de Féret.

$$f_c = K_{Bolomey} \left(\frac{C}{E+V} - 0,5 \right) \quad \text{Eq.I-5}$$

Où $K_{Bolomey}$ coefficient de Bolomey relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier

En 1937, Caquot (**Caquot, 1937**) généralise sa recherche de compacité maximale à un nombre infini de classes granulaires à partir de la courbe de l'indice des vides d'un mélange de deux granulats de tailles différentes. Il définit expérimentalement une relation en prenant comme principe que le volume des vides dépend essentiellement des diamètres d et D (équation I-6). Il obtient donc une granulométrie infinie. Mais, en réalité, les dimensions des grains sont bornées ce qui entraîne une correction sur la proportion des plus petits et des plus gros granulats. De plus, il introduit l'effet de paroi engendré par les granulats de grosses dimensions.

$$V = V_0 \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq.I-6}$$

Où V : volume des vides du mélange granulaire borné par d et D ; V_0 : constante définie expérimentalement selon Caquot. D et d sont respectivement le diamètre du plus gros et du plus petit granulat.

En 1942 et en 1952, Faury (**Faury, 1944**) et Joisel (**Joisel, 1952**) s'inspirent des travaux de Caquot et y apportent des modifications. Le premier prolonge l'étendue granulaire jusqu'à $6,5\mu m$, en y incorporant le ciment, et prend aussi en compte l'effet de paroi. Joisel donne une droite de référence (avec une échelle complexe) prenant en compte le ciment, l'eau, les vides, la taille des grains et la compacité des classes granulaires.

En 1970, Dreux et Gorisse (**Dreux, 1995**) mettent en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon une courbe granulaire de référence (2 segments de droite dans un diagramme semi logarithmique). Contrairement à Faury, le ciment ne fait pas partie de la courbe de référence du mélange, sa quantité massique C étant déterminée séparément. Il s'agit d'une méthode complète dans le sens où elle prend en compte un grand nombre de paramètres (équation I-7): la géométrie de la pièce à couler, le type et le dosage du ciment, la finesse, la forme, la qualité et les dimensions de granulats, la consistance et la résistance du béton, etc.

$$f_{c28} = G_{Dreux} \times \sigma_{c28} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad \text{Eq.I-7}$$

Où G_{Dreux} représente le coefficient granulaire de Dreux et σ_{c28} est la classe vraie du ciment relatif à Dreux

En 1976, Baron et Lesage (**Baron, 1976**) proposent une technique d'optimisation du squelette granulaire selon le principe liant un temps d'écoulement minimum déterminé au maniabilimètre LCL selon (**Norme NF P18-452**) avec une quantité optimale de granulat pour des proportions de ciment et d'eau fixées.

5.6 Méthodes de formulation novatrices

En 1996, Baron et Olivier (**Baron, 1996**) développent une méthode de formulation dérivée de celle de Dreux-Gorisse avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Cette méthode permet d'englober un grand nombre de paramètres déjà cités avec, en plus, la prise en compte de l'adjuvantation et l'incorporation d'additions minérales.

En parallèle à des méthodes basées sur des critères de performances mécaniques ou de consistance à l'état frais, de nouveaux paramètres sont visés. La durabilité du matériau dans son environnement de service est un critère essentiel. En 2004, l'AFGC (**AFGC, 2004**) propose une méthodologie pour la mise en œuvre d'une démarche performantielle, globale et

prédictive de la durabilité des structures en béton, basée sur la notion d'indicateur de durabilité. Cette approche combine des mesures en laboratoire et des codes de calcul (modèle).

En marge de ces méthodes réelles de formulation, des approches d'optimisation sont utilisées. En 2004, l'approche dite du Mortier de Béton Equivalent (MBE) voit le jour dans le projet CALIBRE (**Calibé, 2004**). Le principe de la méthode repose sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton à celle du mortier qui le compose (**Schartzentruber, 2000**). La méthode MBE demande à identifier la composition granulométrique des sables et des granulats, à calculer la surface de chaque tranche granulaire, et à conserver les fractions fines (en général le sable initial) de manière à reconstituer un mortier équivalent qui aura la même surface granulaire totale que celle du béton initial. Cette méthode permet de pouvoir tester efficacement à l'état frais certains couples de constituants (ciment/adjuvant).

Les Plans d'Expériences (PdE) sont bien adaptés à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres (**Aïtcin, 1994; Louvet, 1996**). Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton peut s'imposer à la formulation lorsque l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences. Les éléments indispensables à cette démarche sont:

- la planification des essais et la qualité de l'expérience ;
- la maîtrise de l'outil mathématique (régressions linéaires multiples) ;
- l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

5.7 Méthodes de formulation numériques

Des méthodes de formulation novatrices utilisant des modèles numériques émergent: René LCPC, BétonLab et BétonLab Pro2...

Les premières théories traitant d'une compacité maximale des mélanges granulaires (**Féret, 1892, Caquot, 1937**) ne prennent pas en compte explicitement les interactions des grains et de leurs tailles entre eux. De Larrard (**de Larrard, 2000**) au travers du modèle d'empilement compressible fait intervenir des notions nouvelles comme le serrage, l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

Historiquement, le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) est le résultat de plusieurs années de recherche au LCPC. Le MEC est une évolution du Modèle de Suspension Solide (MSS) lui-même dérivé du Modèle Linéaire de Compacité (MDC). Le MDC (**Stovall, 1986**)

décrit des surfaces d'isocompacité mais l'existence de limites de performance dans les zones de mélange optimum apparaissent lors de la validation expérimentale. Le MSS (**de Larrard, 2000**) est un modèle lié à la notion de viscosité d'un mélange sec mais il n'est pas validé par des séries expérimentales de vérifications. Finalement, le MEC est développé (**de Larrard, 2000**) avec les équations revues du MSS. La notion d'indice de serrage fournie au système est introduite.

Le logiciel BétonLab Pro2 est basé sur le MEC. Son intérêt réside dans sa configuration entrée/sortie. En effet, les paramètres d'entrée sont des caractéristiques qualifiant les constituants de base (ciments, granulats, adjuvants, etc) qui peuvent être mesurées en laboratoire, obtenues auprès des fournisseurs ou dans la littérature. Par ailleurs, le logiciel utilise des modèles analytiques relativement sophistiqués sur une interface de type tableur pour présenter les résultats. En aval, les valeurs de sortie sont associées à certaines caractéristiques du béton. A titre d'exemple, les équations I-8 à I-11 présentent le modèle relatif à la résistance mécanique:

$$f_c(j) = \frac{P \times f_{cm}(j)}{q \times f_{cm} + 1} \quad \text{Eq.I-8}$$

$$EMP = D_{Max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Eq.I-9}$$

$$c_{eq}(28j) = c \times \left[1 + 1,1 \left(1 - \exp \left\{ \frac{\varepsilon K_{p,i}(28j) \times P z_i}{c} \right\} \right) + 0,17 t_{c3A} \left(1 - \exp \left\{ -79 \frac{\varepsilon f_{ij}}{t_{c3A} \times C} \right\} \right) \right] \quad \text{Eq.I-10}$$

$$f_{cm}(28j) = 13,4 \times R_{c28} \left[d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \times \frac{\varepsilon S_{pi} \times f_{ij}}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{w+a}{c_{eq}} \right)^{-2,85} \right] \times EMP^{-0,13} \quad \text{Eq.I-11}$$

La liste des symboles se trouve en annexe 1.

D'autres caractéristiques du béton, moins accessible par des méthodes plus traditionnelles, peuvent être obtenues par cette méthode d'optimisation. Ce sont:

- les propriétés rhéologiques du mélange à l'état frais ;
- les propriétés physiques du mélange ;
- les propriétés mécaniques du matériau à l'état durci ;
- les propriétés de déformations différées dans le temps.

Les différentes méthodes trouvent leurs intérêts dans un traitement des données en amont en laboratoire (caractéristiques des constituants) par rapport à des essais de calage faits sur site.

Bien sûr, tous les résultats obtenus théoriquement doivent être confirmés par des gâchées réelles pour vérifier l'exactitude des méthodes utilisées. Après la phase de validation, la formule ainsi obtenue peut être adaptée au site de production avec les jeux de constituants étudiés en laboratoire. De plus, le béton et ses constituants doivent malgré tout répondre à des

critères normatifs et aux certifications, gage de qualité des produits finis. Toutefois, pour ce projet de thèse nous avons utilisé la méthode de formulation du béton Dreux-Gorisse (**Dreux, 1998**). Car, cette formulation ne prend pas en compte l'ajout d'adjuvant.

6 Recyclage des verres

6.1 Introduction

Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables tels que les bouteilles non réutilisables (verre) devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

Ainsi, nous allons aborder la caractérisation des verres, les inconvénients de l'utilisation de ces verres (deux réactions : mécanismes et facteurs affectant ces deux réactions) et dresser l'état des connaissances sur le verre dans les bétons.

6.2 Caractéristique physique et mécanique du verre

La résistance du béton contenant le verre est particulièrement faible lorsqu'un ciment à teneur alcaline élevée est utilisé (**Saadani, 2006**). Une dilatation élevée est produite lorsque le verre est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation d'un béton contenant du gravier est de 0,018 %, alors que celle d'un béton contenant du verre est d'environ 0,3 % (**Saadani, 2006**). Aussi, 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. Le verre étant principalement composé de silice, le recyclage du verre dans le béton soulève ce problème. Si le verre est réduit en poudre il peut réagir avec la portlandite et former de nouveaux CSH ce qui est positif. Différents auteurs ont cherché la taille critique de granulat de verre au delà de laquelle la réaction Alkali

silicate se produisait (RAS). Le tableau 1.2 donne les diamètres critiques pour différents auteurs. Ce diamètre situe le matériau entraînant peu de RAS dans les sables et les fines.

Tableau 1.2: Diamètre critique selon différents auteurs

Diamètre en mm	Auteur
De 0,9 et 1mm	Rachida et al, 2010
De 0,6 à 1,18mm	Jin et al, 2000
De 0,15 à 0,30 mm	Yamada et al, 2005
0,038 mm	Meyer et al, 1996
0,6 mm	Lee et al, 2011

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 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.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 525 kg/m^3 par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C . Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours **(Ramachandran, 1981)**. Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulat pour béton

6.2.1 Origine du verre

Le verre utilisé dans la réalisation du béton est de plusieurs origines. Le travail de **(Rachida, 2009)** a porté sur des verres de nature sodo-calcique mixte. Ce verre provient du groupe « Unical » qui récupère le verre à travers divers systèmes de collecte sélective au Québec. Il est fourni sous forme de débris de dimension d'environ 5cm, partiellement débarrassé de ses impuretés. Dans le but d'évaluer les proportions des différentes couleurs dans le verre de l'étude, un échantillonnage de 30 kg a été trié manuellement. Cet échantillon est constitué de différentes couleurs : incolore, brun, vert et d'un pourcentage infime de bleu. Le matériau (verre) est introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 20 kg et broyé jusqu'à l'obtention des granulométries désirées.

6.2.2 Surface spécifique

La surface spécifique est une mesure appliquée aux solides granulaires ou particulières. C'est la surface par unité de masse. La mesure est importante parce que de nombreux processus physiques et chimiques se déroulent à la surface des solides. En fonction de la surface spécifique, on présente différentes classes granulaires dans le tableau 1.3 :

Tableau 1.3: Les surfaces spécifiques des différentes fractions granulaires de verre [Rachida, 2009]

Classe granulaires	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Surface spécifique [m ² /kg] calculée	0,6	1,3	2,6	6	10	20	-	-	-
Surface spécifique [m ² /kg] corrigée	1,1	2,2	4,5	11	18	35	-	-	-
Surface Blaine [m ² /kg]	-	-	-	-	-	-	200	350	540

A l'exception des classes C6-C7 et C8 dont les surfaces spécifiques ont pu être déterminées par la méthode Blaine, celles des autres classes ont été calculées à l'aide de l'équation 12.

$$S = \frac{6}{\rho} \times \frac{1}{d_m} \quad (\text{Equation 12})$$

Avec : S : la surface spécifique [m²/kg]

ρ : masse volumique du verre [kg/m³]

d_m : diamètre moyen de la classe granulométrique [m]

Pour adapter cette formule à des particules non sphériques, **(Rachida, 2009)** a introduit un coefficient k communément admis dans la littérature comme étant égal à 1,75 **(Herdan,**

1960). Ainsi, une correction a été apportée aux valeurs des surfaces spécifiques théoriques et son rassemblée dans le tableau 1.2.

Ainsi, la surface spécifique pourrait être un indicateur de réaction alcali-silice ou pouzzolanique selon qu'elle est petite ou très grande. Elle est petite lorsque la taille des granulats est grande (favorisant la réaction alcali-silice) et grande lorsque la taille des granulats est très petite (favorisant la réaction pouzzolanique).

6.2.3 Masse volumique

Les masses volumiques ont été mesurées par pesée hydrostatique et, dans les cas où la mesure était possible, par pycnomètre à hélium. Le tableau 1.4 rassemble les densités de l'ensemble des classes granulaires.

Tableau 1.4: Densités des différentes classes granulaires [Rachida, 2009]

Classe granulaires	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pycnomètre à hélium	-	-	-	-	-	-	2,45	2,45	2,45
Pesée hydrostatique	2,42	2,40	2,41	2,41	2,41	2,47	2,43	2,42	2,48

6.2.4 Morphologie des grains

Les clichés faits au microscope électronique à balayage en mode électron secondaire (Figure 1. a) font apparaître des similitudes de morphologie, dues au broyage, entre les grains de verre et ceux de la CALSiFrit: forme des grains très différente de celles de la cendre volante et de la fumée de silice qui sont principalement sphériques (**Rachida, 2009**).

Le temps de broyage modifie la morphologie des granulats de verre. En effet, plus les particules sont broyées plus elles perdent leur forme allongée et deviennent arrondies, à faciès sans arêtes (Figure 1.1. b et c) (**Rachida, 2009**).

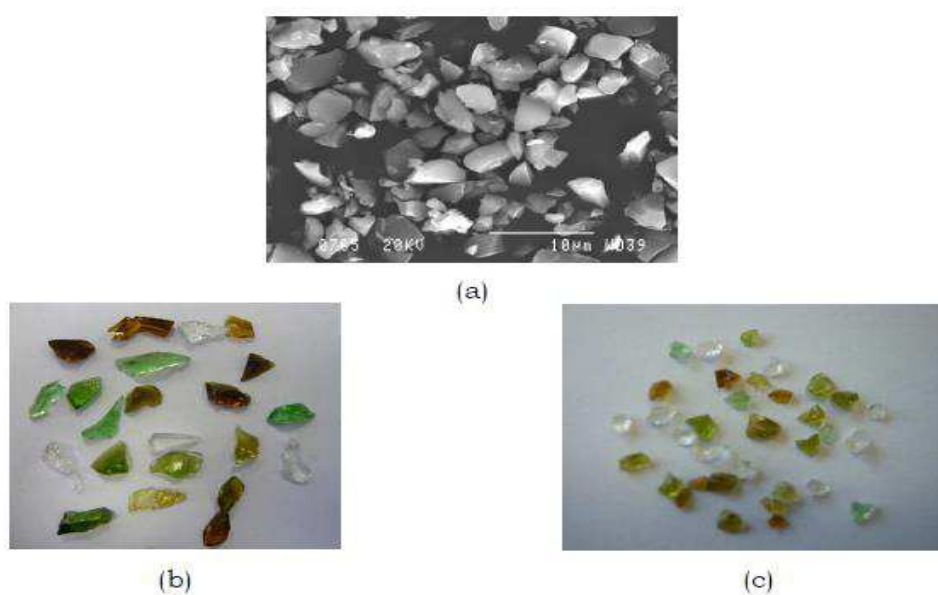


Figure 1.1: Grains de verre

Vue au microscope électronique à balayage d'une poudre de verre (classe C8)

Grains de classe C0

Grains de classe C1

6.2.5 Porosité et absorption d'eau du verre à vitre concassé

Les valeurs de ces caractéristiques physiques, déterminées suivant la procédure européenne normalisée NF EN 1097-6 (indice de classement P 18-650-6) sont indiquées dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5: Masse volumique absolue et absorption d'eau du verre [Moi, 05]

Granulat	Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)	Absorption d'eau (%)
Verre (V)	2,310	0,03	1,34

6.3 Inconvénients et avantages

L'utilisation des verres dans une matrice cimentaire entraîne la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique.

6.3.1 Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés : silices, alcalin, calcium et hydroxydes et produisent toutes deux des gels amorphes.

D'une part, les granulats contenant de la silice amorphe peuvent réagir avec les alcalins du ciment dans la solution interstitielle des pores du béton, quand celui-ci est exposé à des conditions d'humidité (**Stanton, 1940**). Le produit de réaction est un gel silico-alcalin qui peut entraîner des expansions et des fissures dans le béton (la réaction alcali-silice). D'autre part, dans les mêmes conditions, les mêmes matériaux finement broyés peuvent réagir avec la chaux libre du ciment, formant ainsi des hydrates ayant des propriétés liantes (réaction pouzzolanique) (**Massazza, 1976 ; Sersale, 1980**). La réaction pouzzolanique permet d'améliorer les propriétés du béton, notamment le durcissement et la durabilité. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle représente l'un des meilleurs moyens de réduire les expansions du béton contenant des granulats alcali-réactifs.

Pour les deux réactions, les matériaux sont plus réactifs quand leur cristallinité est faible (**Massazza et al., 1980; Fookes et al., 1981**).

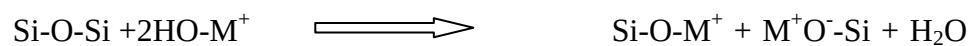
6.3.1.1 La réaction alcali-silice

➤ Mécanisme de la réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines d'années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives. Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle (**Poo, 1992**) :



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situés plus profondément a lieu ensuite :



(Réaction 2)

Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, selon (**Poo, 1992**) l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit (Figure 1.2) :

- 1- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- 2- Migration des ions OH^- , Na^+ et K^+ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.

- 3- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- 4- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- 5- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydraté alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- 6- Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- 7- Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.
- 8- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

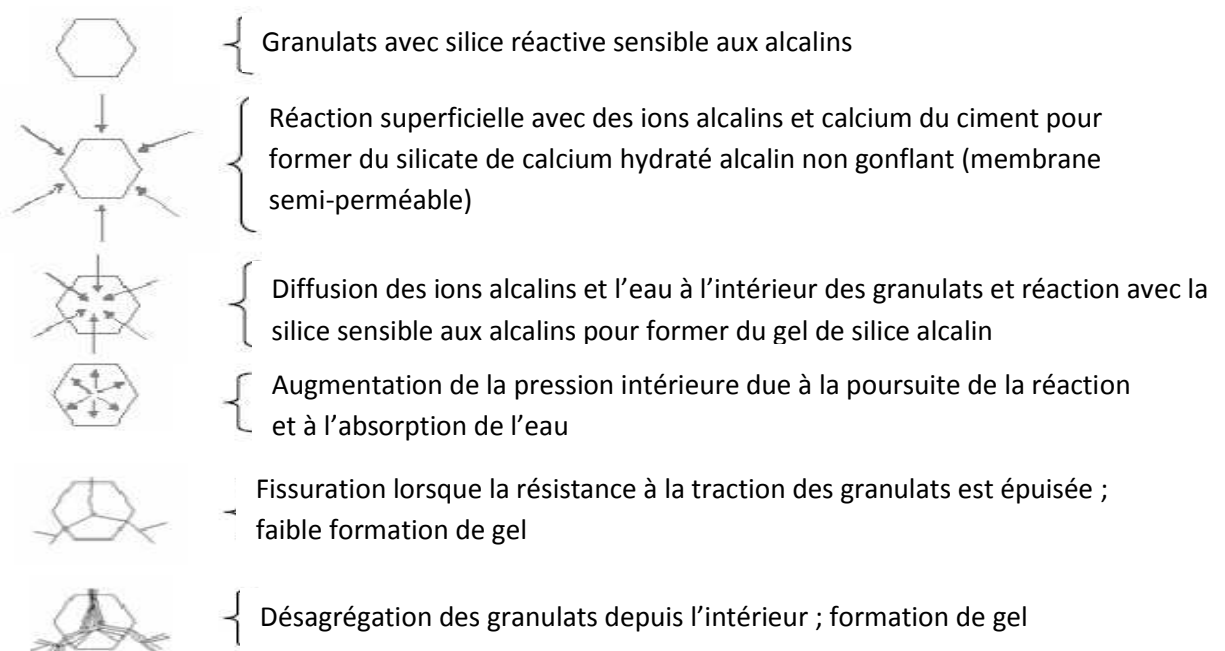


Figure 1.2: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [Sprung et Sylla, 1998]

La présence de gels d'alcalin-réaction étant associée, dans le béton, à l'existence d'une fissuration anarchique et évolutive, on leur accorde volontiers des propriétés gonflantes. Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements.

➤ Facteurs affectant la réaction alcali-silice

Des travaux antérieurs ont permis de montrer que différents paramètres affectent la réaction alcali-silice :

- La taille des granulats réactifs a un impact important sur les gonflements entraînés par la réaction alcali-silice (**Vivian, 1951; Dia et al., 1974**).

Cependant la taille des granulats qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de la nature des granulats réactifs. Pour certains types de granulats comme les siliceux du nord de l'Allemagne (silex), l'expansion va de pair avec la taille (**Sprung, 1975**). Pour d'autres granulats, comme le verre de quartz, les gonflements les plus importants sont obtenus avec les granulats d'opale (**Diamond et al., 1974**).

- Beaucoup d'études ont montré qu'il existe une teneur "pessimum" des granulats réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale. Selon (**Woolf, 1952**), c'est le pessimum du rapport "granulats réactifs/alcalins" dans le béton qui est d'une importance critique.

Plus tard, Glasser et Kataoka (**1981**) ont montré que c'est principalement un certain rapport molaire " SiO_2 /alcalins" qui est le facteur essentiel dans l'expansion du béton.

- Comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température (**Guomundsson et Ageirsson, 1975; Broet et al., 1978**). Cependant l'effet de cette dernière est purement cinétique et peut être traduit par une loi d'Arrhenius (**Larive, 1998**).
- L'eau est un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espèces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative $> 80 \%$ est nécessaire (**Olafsson, 1986; Kurihara et al., 1989**), un rapport eau/ciment de 0,4 provoquerait aussi des expansions selon (**Vivian, 1950; Hobbs, 1980**).
- La teneur en alcalins équivalents est une donnée importante vis-à-vis des gonflements : plus la teneur initiale en alcalins est forte plus important est le gonflement obtenu (**Sibbick et al., 1992; Guedon et al., 2000**).

L'utilisation d'un ciment à basse teneur en alcalins ($< 0,6 \%$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) est recommandé pour éviter ou réduire l'expansion. Cependant, bien que cela soit rare, on observe des expansions importantes des bétons faits à base de ciments à très basse teneurs en alcalins (**Davis, 1951 ; Woolf, 1952**). (**Hobbs, 1984**) recommande de limiter la quantité d'alcalins dans la composition des bétons à 3 kg/m^3 .

Des inhibiteurs chimiques comme les sels lithium (**Maccoy et al., 1951**) sont également utilisés pour contrer cette réaction, probablement en arrêtant la dissolution de la silice (**Iler,**

1979). Le nitrate de lithium présente le plus d'avantages (**Stokes et al., 1997; Malvar et al., 2002**), notamment car il ne possède pas l'inconvénient, en cas de sous dosage, d'augmenter l'expansion ce qui est par contre le cas de LiOH et Li₂CO₃.

Selon (**Vivian, 1950**), l'utilisation de quantités appropriées de base, comme le NaOH, peut également réduire l'expansion. Le gel d'alcali-silice produit dans ce cas-ci serait trop liquide pour provoquer des pressions internes. Notons toutefois que l'utilisation de quantités inappropriées de NaOH peut également augmenter l'expansion (**Longuet et al., 1973**).

D'après certains auteurs (**Maccoy et al., 1951 ; Jensen et al., 1984**), les agents entraîneurs d'air sont également indiqués pour réduire l'expansion du béton en créant des espaces libres pour les gels.

Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolaniques (15-30 % du poids de ciment) ou l'utilisation des ciments de laitiers. Toutefois, des quantités inadéquates peuvent avoir l'effet contraire et entraîner des expansions (**Stanton, 1948**). De plus, rajouter du ciment n'est pas l'objectif recherché si l'on est préoccupé d'économie d'énergie.

6.3.1.2 La réaction pouzzolanique

➤ Facteur affectant la réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciments (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité (**Massazza, 1976**). L'addition de petites quantités de bases tel NaOH (**Metso et al., 1979**) ou une température élevée (**Massazza et al., 1980**) s'avèrent de bons accélérateurs de la réaction pouzzolanique. La teneur en chaux, le rapport eau/ciment du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique (**Fournier et al., 1978**).

6.4 Le verre dans les bétons

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciable de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement partiel du ciment Portland dans les bétons (**Rachida, 2009**). Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les

bétons ont gonflé et fissuré. **(Pike et al., 1960; Schmidt et al., 1963; Pattengil et al., 1973)**. Depuis, l'idée a été en partie abandonnée.

Le sujet est redevenu d'actualité depuis un certain nombre d'années. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables décideurs et ceux-ci ont encouragé de nouvelles études **(Shao et al., 2000; Kojima et al., 2000; Bazan et al., 2000; Dyer et al., 2001; Meyer et al., 1999; Byars et al., 2004; Park, 2004; Karamberi et al., 2004; Shi et al., 2004, 2005; Shayan et al., 2002-2004-2006; Schwarz et al., 2008...)**.

6.4.1 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction alcali-silice

La taille des particules des granulats de verre a une influence sur l'expansion due à la réaction alcali-silice (RAS). Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granulats réactifs. En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la RAS. Nous pouvons citer les travaux de **(Shao et al., 2000)**, **(Shi et al., 2005)** et **(Shayan et al., 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. Pour certains auteurs 150 μm est la limite supérieure pour laquelle les bétons ne risquent pas d'être atteints de la RAS **(Meyer et al., 1999)**. **(Byars et al., 2004)** ont travaillé sur différentes classes granulaires de verre de 35 μm à 12 mm et ils ont conclu que l'expansion était proportionnelle à la taille des grains de verre.

Comme nous l'ont montré les paragraphes précédents, l'expansion associée à la réaction alcali-silice serait relative à la taille des granulats. Cependant, pour certains auteurs il existerait une taille de granulat pour laquelle l'expansion produite est maximale, cette taille est appelée "pessimum". La bibliographie concernant cet effet pessimum n'est pas abondante. Nous pouvons notamment citer les travaux de **(Jin et al., 2000)** et les travaux de **(Xie et al., 2003)** qui ont mis évidence l'effet pessimum sur des familles de granulats de taille comprise entre 0,150 et 4,75 mm. D'après ces auteurs ce pessimum se situerait entre 1,18 et 2,36 mm. Quand à **(Yamada et al., 2005)**, ce pessimum serait de 0,6 mm ou même de 0,25 mm.

Cependant, ce pessimum ne dépend pas uniquement de la taille des granulats mais aussi de la couleur et du type de verre utilisé. **(Jin et al., 2000)**, **(Bazant et al., 2000)** et **(Yamada et al., 2005)** ont travaillé sur trois différentes couleurs de verre et ont montré que celles-ci gouvernent la taille du pessimum. En effet, il passe de 600 μm pour le verre brun et blanc à 1,18 mm pour le verre vert (Figure 3). Pareillement, la taille du pessimum est modifiée par

l'hydratation avancée des bétons. En effet, **(Meyer et al., 1997)** ont mis en évidence cet effet où la taille du pessimum passait de 300 μm à 75 μm entre 4 et 14 jours (Figure 1.4).

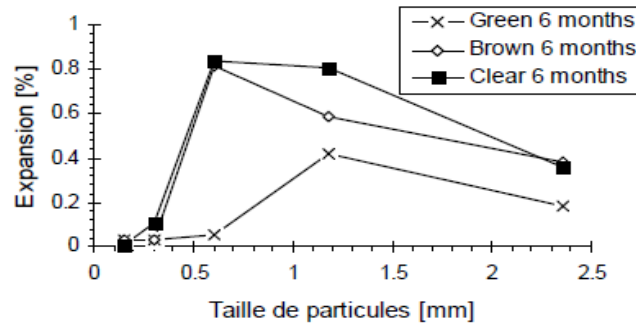


Figure 1.3: Expansion des échantillons de mortiers avec des verres différentes couleurs [Yam et al., 05]

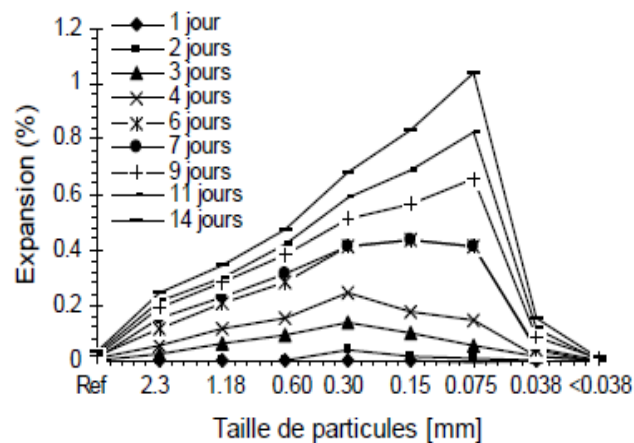


Figure 1.4: Expansion dans le temps d'échantillons de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre [Mey et al., 97]

6.4.2 Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice

Différents études ont traité également ce point: nous pouvons citer les travaux de **(Dyer et al., 2001)**; **(Polley et al., 1998)**; **(Park et al., 2004)**; **(Lker et al., 2004)**; **(Kojima et al., 2000)**; **(Jin et al., 1999-2000)**; **(Shi et al., 2004)**, et de **(Shayan et al., 2004)**; **(Özkan et al., 2008)**.

Les travaux de l'ensemble de ces auteurs mesurent les variations des expansions des bétons en fonction de la teneur en verre. Cependant, cette tendance varie selon les auteurs, et nous pouvons les cataloguer en trois groupes. Le premier qui 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. Ces oppositions s'expliquent vraisemblablement dans les conditions de déroulement des travaux.

En effet, **(Dyer et al., 2001)** 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 (figure 5). Même tendance pour les travaux de **(Polley et al., 1998)** et ceux de **(Özkan et al., 2008)**. Les auteurs expliquent ce phénomène par le verre qui devait réagir avec la chaux pour former des silicates de calcium hydratés avec de faibles rapport C/S qui retiennent les alcalins.

(Park et al., 2004) ainsi que **(Jin et al., 2000)** et **(Shayan et al., 2004)**, leurs travaux ont montré que plus il y avait de verre dans les mélanges, plus importante était l'expansion, donc pas de pessimum. De leur côté, **[Iker et al., 2004]** ont pu remarquer les variations dimensionnelles des mortiers étaient indépendantes du taux de présence du verre. Comme déjà mentionné, la divergence dans les conclusions vient fort probablement des conditions expérimentales. En effet, le premier groupe a utilisé du verre comme remplacement du ciment en présence de granulats inertes ou réactif, quant au second groupe, il a utilisé le verre comme granulats.

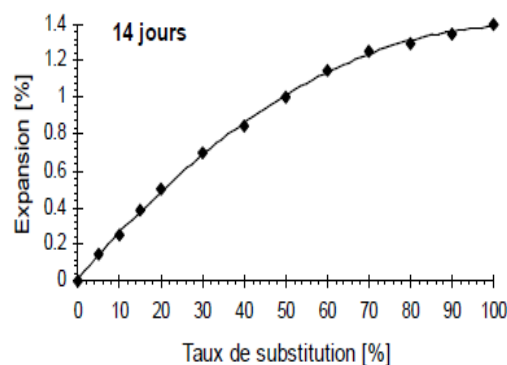


Figure 1.5: Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre [Jin et al., 00]

6.4.3 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction pouzzolanique

Selon **(Shao et al., 2000)**, avec une taille des grains de verre de $38\ \mu\text{m}$, les indices d'activité des bétons confectionnés avec 30 % de remplacement de ciment par ce verre dépassaient les 90 % à jeune âge et les 108 % à 90 jours. Pour **(Chen et al., 2006)** une taille de $75\ \mu\text{m}$ serait suffisante pour atteindre un bon indice d'activité pouzzolanique. D'autres auteurs avancent l'importance de la finesse, ainsi, pour **(Shi et al., 2005)**, une finesse au moins égale à celle du ciment serait nécessaire et suffisante pour avoir de bonnes résistance mécaniques. Quand à **(Shayan et al., 2002)** il a travaillé avec une finesse de $800\ \text{m}^2/\text{kg}$ 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.

6.4.4 Influence de la teneur en verre des mélanges sur la réaction pouzzolanique

Excepté **(Batayneh et al., 2007)** et **(Nishikawa et al., 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 **(Kojima et al., 2000; Park et al., 2004; Shao et al., 2000; Shayan et al., 2002 et 2004; Dyer et al., 2001; Correia et al., 2009; Schwarz et al., 2008; Sobolev et al., 2007)**. La divergence entre les conclusions des deux groupes doit fort probablement venir du fait que dans le cas du premier groupe, le premier auteur **(Batayneh et al., 2007)** a travaillé sur des pâtes et le second **(Nishikawa et al., 1995)** a fait une substitution de sable au lieu de ciment.

6.5 Conclusion

Cette étude montre que l'utilisation du verre dans les bétons est possible. Nous avons vu aussi que la taille des grains influence la performance du béton. Son incorporation sous forme de fine améliore les résistances en compression des bétons et sous forme de granulats entraîne des gonflements liés à la réaction alcali-silice.

Aussi, l'influence de la taille des verres dans les bétons dépend de plusieurs paramètres :

- type du verre (composition chimique du verre) ;
- teneur du mélange en verre ;
- utilisation du verre en remplacement de ciment ou de sable.

7 Recyclage des pneus

(Anh, 2010), montre que les pneus en caoutchouc représentent 60 % de la production industrielle en caoutchouc dans les pays développés d'où la nécessité de valoriser les pneus usagés. Selon Siddique et Naik dans leur bibliographie, l'utilisation de broyat de pneu conduit à une résistance de compression décroissante avec le taux de remplacement pouvant aller jusqu'à 95% pour un taux de 100%. Différentes raisons expliquent cette décroissance : le mortier n'adhère pas au pneu puisque le broyat repousse l'eau, le broyat entraîne de l'air qui reste à l'interface mortier/broyat, la différence de module d'Young du mortier et du caoutchouc entraîne une initiation de la fissuration à l'interface. L'ouvrabilité et la ductilité sont améliorées par rapport à un béton ordinaire de référence. Le tableau 1.6 résume les taux de perte de résistance en compression mesurés par différents auteurs par rapport à un béton de référence.

Tableau 1.6: Chute relative de résistance en compression des bétons de broyat de pneu en fonction du taux de remplacement. L'indice (1) est mis pour un taux volumique et (2) pour un taux massique.

Taux de remplacement		5%	Autre taux	100%
Auteur				
Batayneh et al ⁽¹⁾			52 % (pour 40%)	90 %
Khaloo et al ⁽¹⁾			99,95 (pour 50%)	99,98%
Li et al ⁽¹⁾			De 40% à 43% (pour 15%)	
Bravo et de Brito ⁽¹⁾	14%		45% (pour 15%)	
Fattuhi et Clark ⁽²⁾			69% (pour 12%)	
Ganijian et al ⁽²⁾	-4%		21% (pour 10%)	
Toutanji ⁽¹⁾			57% (pour 50%)	76%

Selon (Val et al, 2011), l'ajout de particules de caoutchouc réduit à la fois l'unité de poids du matériel et la conductivité thermique. Différents types de pneus ont été employé comme substitut partiel des granulats naturels dans le béton. Il s'agit des pneus usés obtenues par simple broyage, sans plus de purifications incluant ainsi les fibres d'acier et du textile dans leur composition (Eld et Sen, 1993) et (Khat et Bayo, 1999). (Eld et Sen, 1993) ont utilisé les poudrettes de caoutchouc obtenus par procédé cryogénique. Les caoutchoucs des pneus

broyés traités avec une solution d'hydroxyde de sodium pour parvenir à une meilleure adhérence avec la pâte de ciment ont fait l'objet du travail de **(Seg et Joe, 2000)**, la ferraille des pneus en caoutchouc utilisée par **(Fat et Cla, 1996)** et la bande de roulement des pneus par **(Top, 1995)**, etc. Toutefois, quelle que soit la nature différente, la taille et la composition des caoutchoucs des pneus usagés, une baisse significative de la résistance à la compression du béton avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc dans le mélange était toujours détectée.

7.1 Origine des pneus

Les Pneus Usagés de la filière de recyclage des pneumatiques usagés en France proviennent du démontage des pneumatiques sur les points de vente, les distributeurs ou les garagistes. Ils sont ensuite collectés, puis triés par des collecteurs qui revendent les Pneus Usagés Réutilisables (P.U.R) aux sociétés de rechapage ou sur le marché de l'occasion. Une partie des Pneus Usagés Non Réutilisables (P.U.N.R) est envoyée en cimenterie, en centrales thermiques, en site de broyage et de fabrication de poudrette ou en application de Travaux Publics **(Ho, 2010)**.

Actuellement, une nouvelle application de la poudrette concerne le sol équestre à base de granulats de pneus usagés. Ce revêtement de nouvelle génération est composé d'une couche à base de granulats liés par une résine, recouverte d'une couche de granulats libres.

Aussi une autre application en génie civil consiste à utiliser des pneus usagés entiers dans des applications géotechniques (Pneusol). Plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits en France et dans d'autres pays comme l'Algérie, les Etats-Unis, la Jordanie ou le Brésil, etc., dans différents domaines du Génie Civil (remblai léger, mur de soutènement, protection de pente et de berges, etc.) **(Ho, 2010)**.

Le pneu n'étant plus considéré comme un simple déchet mais plutôt comme un matériau ayant un fort potentiel de valorisation, la recherche de filières d'élimination, de réutilisation ou de nouvelles voies de valorisation est devenue ainsi un enjeu majeur dans plusieurs pays

7.2 Granulats

Les granulats en caoutchouc (G.C) utilisés par **(Garros, 2007)** lors de ces travaux sont des broyages de pneus usagés et utilisés en remplacement volumique partiel du sable. Ces granulats dont la dimension du plus gros grain est la même que celle du sable, soit 4 mm. La photographie de la figure 1.6 montre les G.C utilisés dans ce travail.



Figure 1.6: Granulats en caoutchouc de classe (0/4) mm utilisés [Ho, 10]

Leur courbe granulométrique est présentée à la figure 1.7 et celle du sable est rappelée sur la même figure pour faciliter la comparaison des deux distributions granulaires. Il est visible que les G.C ont une répartition granulaire légèrement différente de celle du sable. On notera aussi que les G.C, en comparaison du sable, ont une teneur en fine moins importante. Ce qui va jouer un rôle important vis-à-vis de l'affaissement et de la teneur en air occlus à l'état frais. Enfin, signalons que la densité des G.C est de 1,2 et donc très inférieure à celle des granulats naturels (sable) qui est de 2,67 et leur coefficient d'absorption d'eau est négligeable (**Ho, 2010**).

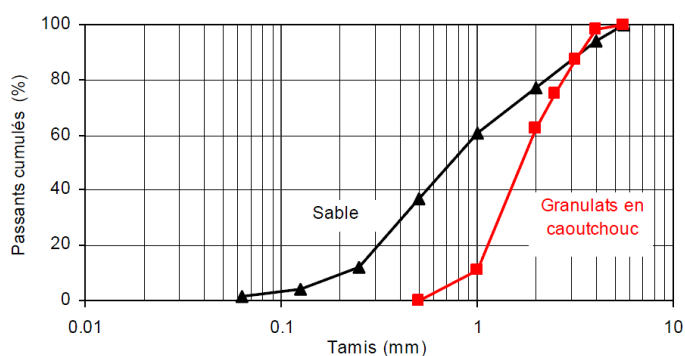


Figure 1.7: Courbes granulométriques du sable et du G.C de classe (0/4) mm [Ho, 10]

7.3 Propriétés des granulats

➤ Traitement de la surface des G.C.

De nombreux chercheurs pensent que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et pâte de ciment est une des raisons de la chute de résistance du béton incorporant ces granulats. Sous la charge extérieure, les premières microfissures apparaissent dans la zone de transition entre les G.C. et la pâte de ciment, une zone dont la résistance est beaucoup plus faible que celle des autres phases solides du composite. De la coalescence de ces microfissures, il résulte une macrofissure qui cause la rupture du béton. Pour cette raison, certains auteurs étudient les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux (le caoutchouc et la pâte de ciment) qui sont très différents. Cependant, leurs résultats obtenus à ce jour sont peu convaincants. Par exemple, **(Segre et Joeke, 2000)** utilisent une solution alcaline (NaOH) pour traiter la surface de granulat en caoutchouc dans le but d'améliorer sa capacité d'attirer et de retenir l'eau. Les observations au microscope électrique ont permis de montrer une meilleure adhérence entre la pâte de ciment et les G.C. traités à la soude. **(Xi et al., 2004)** tentent d'améliorer l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment en utilisant deux adjuvants: le polymère acétate de vinyle (PVA) et le silane. Les résultats montrent que les adjuvants PVA et silane augmentent effectivement la résistance en compression du béton de caoutchouc et parmi eux, l'effet du PVA est plus favorable que celui du silane. Ces auteurs préconisent donc l'utilisation d'adjuvant convenable pour traiter la surface des particules de caoutchouc et améliorer ainsi la performance du béton incorporant des G.C. pour les applications en génie civil.

On doit cependant relever que **(Albano et al., 2005)**, qui ont aussi traité les G.C. avec une solution de NaOH et ont utilisé du silane A-174 comme adjuvant, n'ont pu confirmer les résultats des autres auteurs. En effet ils ont constaté que ces mesures n'avaient pas d'influence visible sur les résistances en compression et en traction et ils en concluent qu'elles n'ont pas d'effet sur l'adhérence entre le granulat en caoutchouc et la matrice cimentaire.

➤ Perméabilité

Pour certains auteurs, dont les résultats sont présentés dans le tableau 1.7, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de G.C. alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu. Cette conclusion de **(Benazzouk, 2004)** peut être rapprochée des observations de **(Kerasley et Wainwright, 2001)** qui, en étudiant des bétons mousses incorporant de cendres volantes, ont

aussi constaté que malgré une porosité élevée, le réseau des pores plus discontinu entraîne une perméabilité à l'air nettement plus faible.

Tableau 1.7: Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc, [Ben, 04]

Volume du G.C. (%)	Coefficient de perméabilité à l'air, K (10^{-17} m^2)		
	CRAC		ERAC
0		12,56	
10	10,25	-	9,85
20	4,38	-	2,95
30	3,24	-	2,23
40	2,36	-	1,74

Toujours au sujet de la perméabilité au gaz et comme le montre la figure 1.8, (**Garros, 2007**) qui a travaillé sur les propriétés des BAP incorporant des G.C. en arrive à une conclusion opposée à celle de Benazzouk et al.: la perméabilité à l'oxygène du BAP augmente avec le taux d'incorporation en G.C. Pour justifier cette évolution, Garros mentionne deux hypothèses. Le premier élément est l'augmentation de la porosité avec la présence des G.C., le deuxième élément, qui à y regarder de près est inclus dans le premier, est l'auréole de transition plus étendue et de qualité médiocre conjuguée avec un défaut d'adhérence du granulat en caoutchouc à la matrice cimentaire. De plus, à même taux d'incorporation, ce travail montre qu'avec des granulats en caoutchouc de plus petites dimensions (0-4 mm dit BAPX-4) cette perméabilité est plus élevée que celle enregistrée avec des grains de caoutchouc plus gros (4-10 mm dit BAPX-10).

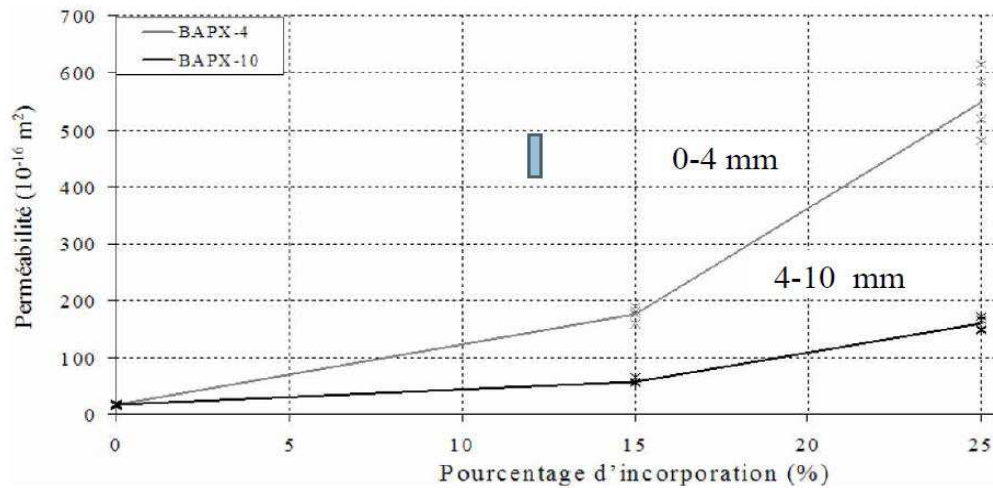


Figure 1.8: Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C., [Gar, 10]

7.4 Performance des bétons

7.4.1 Résistance à la compression

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis est la résistance en compression à un âge donné. Dans les matériaux cimentaires, dont une partie des granulats naturels est remplacée par des G.C de nature, de forme, de densité et en général de propriétés physiques différentes de celles des granulats naturels, de toute évidence il est attendu que ces propriétés du caoutchouc vont influencer la résistance en compression des composites obtenus. Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des G.C ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par Garros (**Garros, 2007**) a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C sur ce paramètre dans le cas de Béton Auto-Plaçant (BAP). Ses résultats illustrés par la Figure 1.9 ont confirmé que la présence de G.C est préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86 % de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25 %.

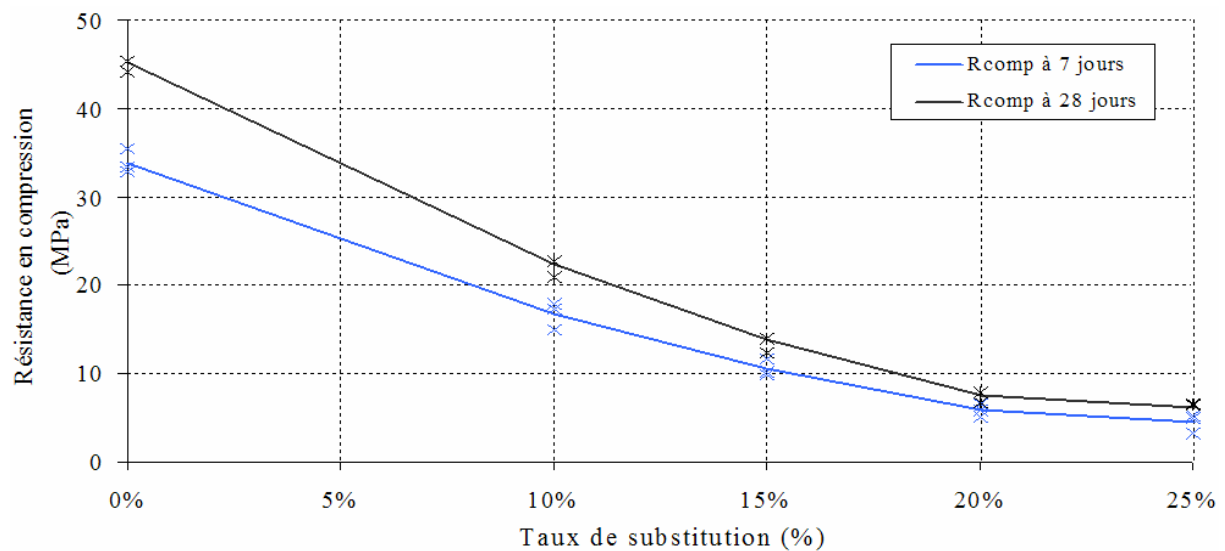


Figure 1.9: Influence du dosage en G.C sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4 mm remplacé par des G.C 0-4 mm), [Gar, 07].

Eldin et Senouci (1993) ont montré une chute d'environ 85 % de la résistance en compression et de 65 % lorsqu'on substitue totalement le gravier et le sable respectivement par des G.C de granulométrie équivalente. Khatib et al. (1999) ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90 % entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60 % de GC. A partir de cette étude, dont les résultats sont illustrés à la Figure 1.10, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20 % du volume total de la phase granulaire.

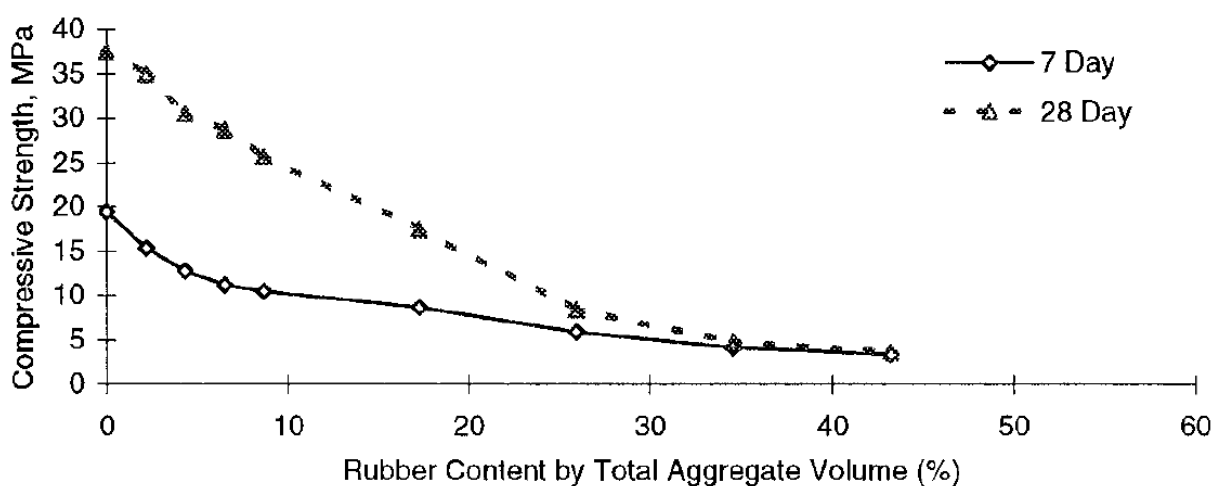


Figure 1.10: Influence de l'adjonction de G.C sur la résistance en compression, [Kha, 99]

7.4.2 Résistance à la traction

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est faible mais on a parfois besoin de la connaître. Elle est généralement indirectement déterminée par le biais d'essais de traction par flexion ou de traction par fendage dit essai brésilien. Quant à l'essai de traction directe, il est certainement le plus noble en la matière, mais il demeure délicat à réaliser car il nécessite le collage de têtes de traction parfaitement centrées et doit être réalisé sans effort de flexion parasite.

Kaloush et al. (2005) ont montré que l'augmentation du contenu en G.C dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques de diamètre (D) 102 mm perpendiculairement à la génératrice par tranche d'épaisseur (E) comprise entre 22 et 26 mm. Leurs résultats sont récapitulés dans le Tableau 1.8. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de G.C : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des G.C est plus ductile.

Biel et Lee (1996) ont rapporté que le type de ciment affecte la résistance en traction du béton incorporant des G.C. Ils ont utilisé deux types de ciment: ciment portland et ciment magnésium oxychlorure. Leurs résultats montrent que des éprouvettes de béton à base de ciment Portland avec 25 % de G.C (du volume total) se sont maintenues à 20 % de la résistance du béton de référence. Tandis que pour le cas du béton à base de ciment d'oxychlorure de magnésium avec le même taux de G.C, les éprouvettes gardent 34 % de la résistance du béton de référence.

Tableau 1.8: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D), [Kal, 05].

Masse G.C (Kg/m ³)	Epaisseur E (mm)	Diamètre D (mm)	Résistance en traction (MPa)	Déformation à la rupture (%)
0	22	102	2,1	0,31
119	20	102	1,1	0,67
178	24	102	0,9	0,43
237	26	102	0,6	0,54

Dans l'étude de Güneyisi et al. (2004), les auteurs observent une tendance à la baisse de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, à même

taux d'adjonction de G.C, la chute de la résistance en traction s'avère moins importante par rapport à celle observée en compression.

La variation de la résistance en traction (mesurée par le biais d'essais de fendage) en fonction du taux d'adjonction des G.C est illustrée par la Figure 1.11.

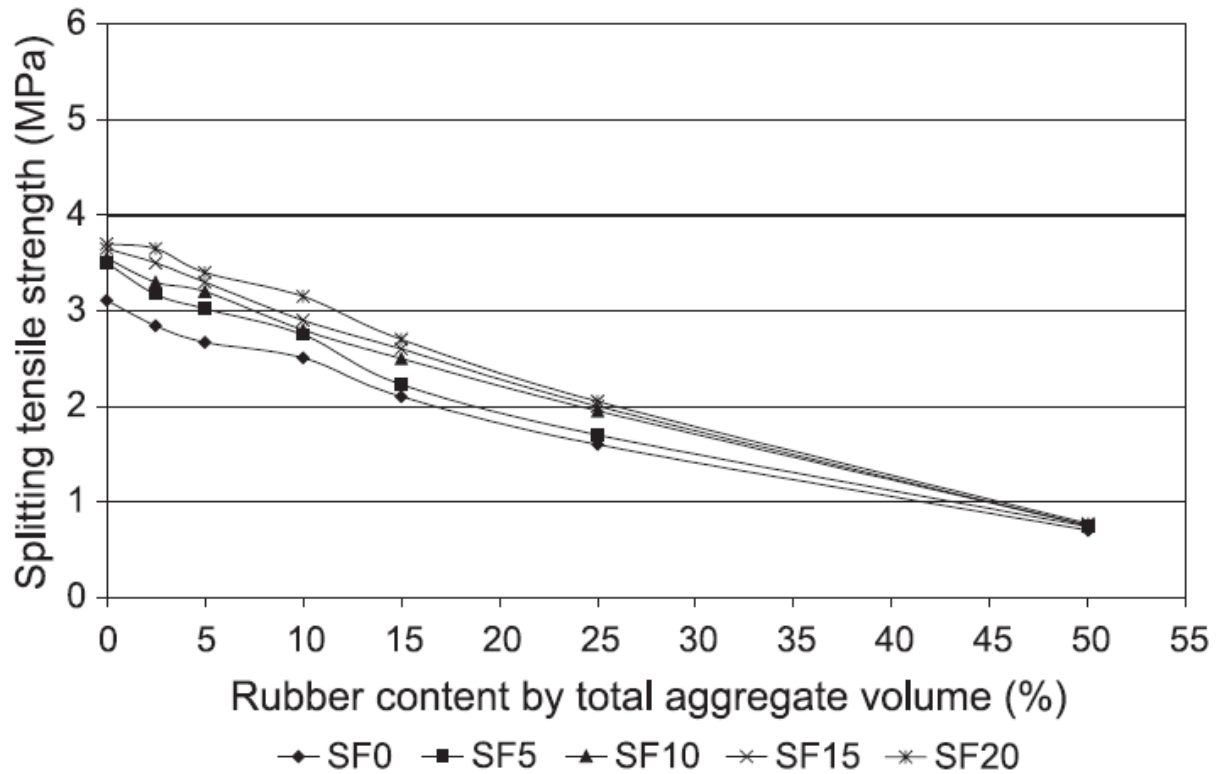


Figure 1.11: Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage, [Gün, 04]

Papakonstantinou et Tobolski (2006) ont étudié les effets combinés du renfort par des fibres métalliques obtenues par broyage de pneus usagés et des résidus de caoutchouc qui restent adhérents à ces fibres. Les G.C ont une géométrie très variable et dans le cas présent, leur longueur varie de 20 à 60 mm pour un diamètre compris entre 0,3 et 1,3 mm. La dimension maximale des grains de caoutchouc était de l'ordre de 12,5 mm. Dans cet ensemble fibres métallique – caoutchouc, la première phase représentait approximativement 30 % du volume. Ce mélange a été introduit dans un béton avec des taux de 0 à 8 % du volume de matériau. Les auteurs ont alors constaté une variation de la résistance en traction par fendage de 2,82 à 2,47 MPa, respectivement.

7.4.3 Module d'élasticité

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de G.C induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

L'effet défavorable de l'incorporation de G.C sur le module d'élasticité a été présenté par Güneyisi et al. (2004) dont les résultats illustrés par la Figure 1.12 montrent une baisse de 83 % du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc.

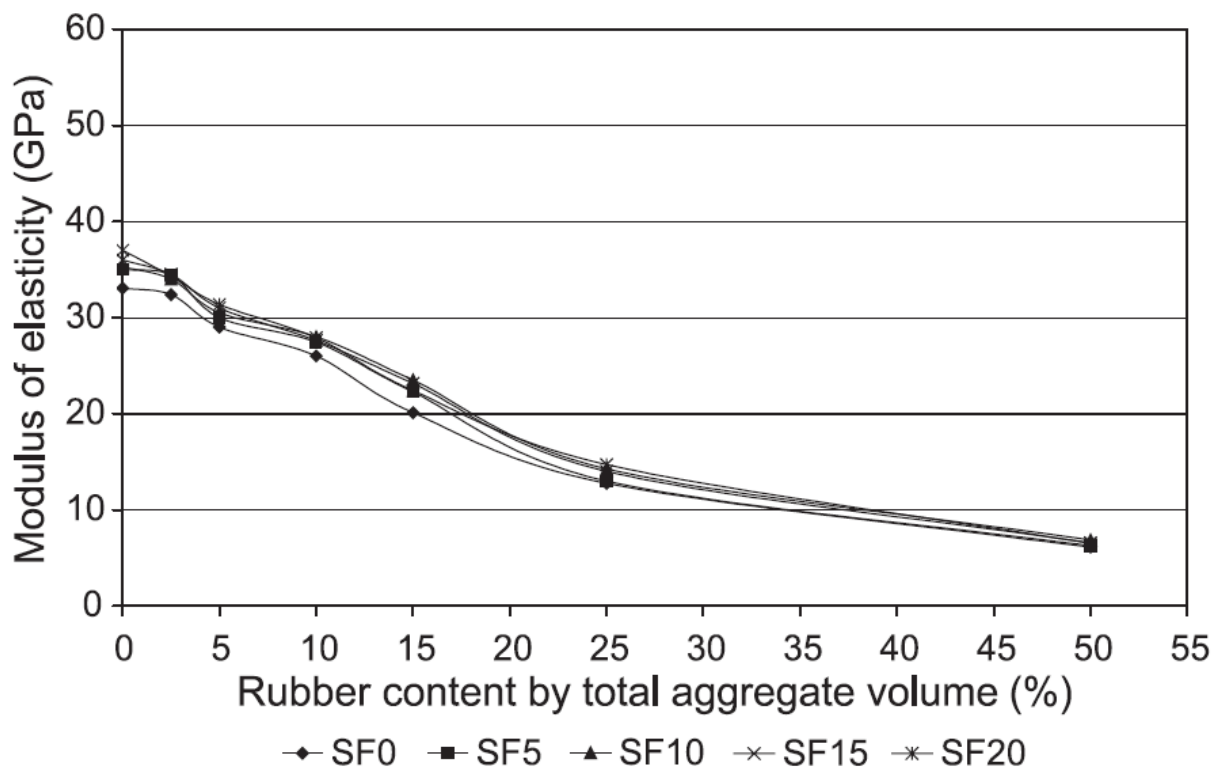


Figure 1.12: Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice, [Gün, 04].

Dans une étude de Ganjian et al. (2009), les gros granulats naturels sont remplacés dans des proportions de 5, 7,5 et 10 % par des granulats en caoutchouc dont la dimension maximale est de 25 mm. Les auteurs montrent à la Figure 1.13 une réduction de 30 % du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10 % de G.C.

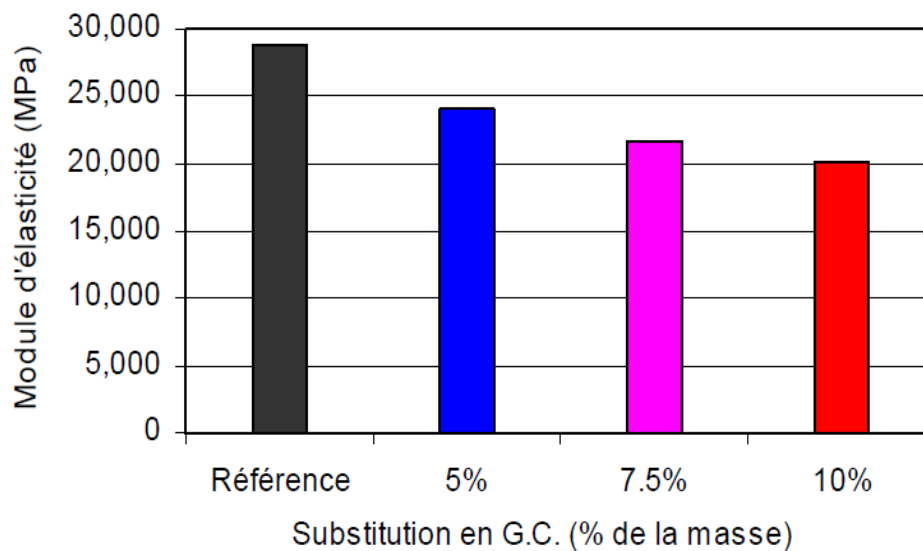


Figure 1.13: Influence des G.C. sur le module d'élasticité, [Gan, 09].

7.5 Conclusion

Nous avons passé en revue la problématique des pneumatiques usagés non réutilisables, ainsi que de leur valorisation, en tant que granulats dans les matériaux à base cimentaire. A travers la littérature, nous nous sommes rendu compte que l'adjonction de granulats en caoutchouc aux bétons peut constituer une solution pour concevoir un composite cimentaire offrant de meilleures performances comme une augmentation de la ductilité, l'élasticité et les propriétés acoustiques et thermiques. Malgré la chute des résistances mécaniques (en compression et en traction), ce composite offre une grande capacité de déformation avant la localisation de la fissuration, un atout vis-à-vis de la fissuration due aux variations dimensionnelles de retrait, la principale pathologie limitant l'utilisation du matériau dans les applications à grande surface.

8 Recyclage des déchets de l'industrie du béton

8.1 Introduction

Plusieurs expériences de recyclage de granulats de déchets de production de béton dans l'industrie du béton en France, en Belgique, en Allemagne et en Suisse ont pu être recensées et analysées (**Bresson, 1999**). Cela concerne les secteurs des planchers et ossatures, de l'assainissement (tuyaux regards), des blocs, des entrevous et des tuiles. Dans la plupart des cas, les déchets de béton sont accumulés et stockés sur le terrain de l'usine pour être traités épisodiquement par une installation mobile de concassage-criblage. Ces installations, exploitées par des entreprises spécialisées, sont établies pendant quelques semaines à proximité du stock et traitent des quantités de déchets pouvant atteindre 10 000 tonnes en une vingtaine de jours. Dans certains cas, en particulier lorsque la proximité de l'usine et de l'installation de traitement le permet, les déchets sont évacués et traités dans des installations fixes de concassage/criblage. Il s'agit alors de carrières de granulats naturels ou d'installations fixes de traitement de matériaux. Malgré le développement récent de ces installations, leur nombre reste limité (environ 30 en France, dont une vingtaine en Île-de-France et en région Rhône Alpes) et elles sont souvent éloignées des usines de production, ce qui entraîne des coûts de transport excessifs. La troisième filière pour le traitement et le recyclage des déchets de production en béton, qui consiste à employer des petites installations simple et fixes dans les usines, a fait l'objet de quelques réalisations et expérimentations. Elle s'applique à des productions de blocs et entrevous, dont les déchets de dimensions limitées (maximum 0,6 x 0,2 x 0,2 m) sont facilement réduits en granulats avec des broyeurs de petite capacité.

8.2 Bilan des déchets de production de l'industrie du béton

Selon les types de produits fabriqués et les volumes de production, qui peuvent varier de 10 000 à 30 000 tonnes/an pour les plus petites usines, jusqu'à 100 000 à 200 000 tonnes/an pour les plus grosses usines, les volumes annuels de déchets et de rebuts se situent entre 100 tonnes et 3000 tonnes par usine en France. Le tableau 1.9 résume les déchets de béton produits par six secteurs de l'industrie du béton.

Tableau 1.9: Taux de rebut moyen et tonnages de rebuts et déchets pour différents secteurs de l'industrie du béton (année 2001)[Rap, 03]

Secteurs de l'industrie du béton	Production vendue en 2001 (millions de tonnes)	Taux de rebuts et déchets moyens en %	Quantité de rebuts et déchets (milliers de tonnes)
Blocs et entrevous	16,1	1,2	193
Bordures, pavés, dalles de voirie, carreaux	3,7	4	148
Assainissement, tuyaux regards, produits pour épuration	3,1	1,5	47
Planchers et ossatures: poutrelles, prédalles, poutres, poteaux	3,1	2,2	68
Eléments de murs, escaliers, conduits, grands produits de génie civil	1,4	1,5	21
Produits divers: mobilier urbain, clôtures...	1,8	1,5	27
TOTAL	29,2	1,8	504

8.3 Caractéristiques des rebuts de fabrication de l'industrie du béton

Dans le tableau 1.10 figurent les principales caractéristiques d'un granulat obtenu à partir du concassage de pavés et de blocs en béton. Ces résultats ont été obtenus à partir de rebuts d'une usine donnée et ne sont donc pas représentatifs de l'ensemble des rebuts de l'industrie du béton.

Tableau 1.10: Caractéristiques des granulats issus des rebuts de fabrication de blocs et pavés en béton [Rap, 03]

Granulométrie du granulat	0/15
Origine des rebuts	Pavés, blocs
Type de concasseur	Bi-marteaux articulés
Propriétés physiques	
Masse volumique réelle (tonnes/m ³)	2,3
Absorption d'eau (%)	6
Module de finesse (fraction sable)	4,1
Coefficient d'aplatissement (%)	3
Teneur en fines (% < 80 µm)	4,3
Equivalent de sable (PS en %)	87
Propriétés mécaniques	
Los Angeles	38
Propriétés chimiques	
Teneur en soufre total (%)	0,2
Teneur en sulfates (%)	0,3
Teneur en chlorures (%)	0,003
Teneur en ciment (%)	13

On constate que les granulats de rebuts de fabrication ont des caractéristiques physiques proches de celles des granulats de déchets de démolition. Leur masse volumique réelle est plus faible et leur absorption d'eau beaucoup plus forte que celle des granulats alluvionnaires. En ce qui concerne la propriété, équivalent de sable des granulats de rebuts de fabrication, il est très proche de celui des granulats alluvionnaires.

Concernant les propriétés mécaniques, on constate comme pour les déchets de démolition une résistance à la fragmentation par chocs plus faible que celle des granulats alluvionnaires.

8.4 Inconvénients

Les granulats issus de déchets de bétons concassés sont considérés comme « granulats hors normes ». On les suspecte d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité des bétons (Wirquin et al., 2000; Tu et al., 2006). Celle-ci se trouve compromise à cause d'une forte absorption d'eau par ces granulats recyclés. Ceci est lié à une forte porosité en raison de la

présence de l'ancien mortier collé aux granulats de démolition et surtout si leur granularité est fine (**Juan et Gutiérrez, 2009**). Cependant, il existe une similitude entre le granulat recyclé de démolition et le granulat issu de déchets de l'industrie du béton. Cette similitude est la présence de l'ancien mortier collé à la surface des granulats recyclés. Aussi, l'ancien mortier collé aux granulats constitue le maillon faible et donne une nuisance supplémentaire en produisant plus de fines dans le squelette granulaire (**Rangaraju et Edlinski, 2008**).

8.5 Performance des bétons

Une étude récente réalisée au CERIB sur le recyclage de granulats de béton a montré que les déchets de béton de l'industrie du béton peuvent être utilisés sans problème à raison de 5 à 10 % en remplacement des granulats naturels dans les gâchées de béton (**Bresson, 1999**).

Les résistances mécaniques des bétons réalisés avec des ajouts limités de granulats recyclés de déchets de béton (10 % pour les sables et 30 % pour les gravillons) peuvent être équivalentes à celles des bétons de granulats naturels (**Raphaël, 2003**).

(**Kou et al., 2012**) ont travaillé sur les déchets de bétons frais après les avoir concassés et utilisé les particules grossières comme granulats pour le nouveau béton recyclé. Ils ont étudié la résistance en compression, la force de traction au fendage, le module élastique et le retrait au séchage. Ils constatent que la résistance à la compression baisse avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés. Selon ces mêmes auteurs, la résistance à la traction par fendage n'est pas trop affectée. Par contre le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la teneur, tendance semblable à celle de la résistance à la compression. Ils soulignent que pour un rapport E/C de 0,35, les valeurs de retrait ne sont pas sensibles à la teneur des granulats recyclés jusqu'à ce que la proportion de recyclât atteigne 30 %. Pour un E/C = 0,50, les valeurs du retrait sont élevées et la plupart des retraits ont eu lieu au cours des 7 premiers jours, puis diminue.

8.6 Conclusion

Un petit nombre d'expériences concernant l'emploi des déchets de l'industrie du béton dans les produits en béton ont été recensées. Celles-ci s'avèrent toutes concluantes.

Toutefois, des études approfondies sur les propriétés de béton contenant ces déchets sous forme d'agrégat fin ou grossier sont nécessaires pour comprendre leur impact sur les propriétés du nouveau béton à base de recyclâts.

9 Conclusion

Les données extraites de la synthèse bibliographique démontrent la faisabilité technique de substituer, moyennant quelques précautions, les granulats naturels (alluvionnaires et concassés) par les granulats recyclés (rebuts de production de l'industrie du béton et des déchets industriels) lors de la fabrication de nouveau béton.

Les spécificités des granulats recyclés ont été identifiées:

- la principale préoccupation pour l'utilisation de déchets de granulats de verre dans le béton est la réaction alcali-silice qui provoque l'expansion et la fissuration du béton;
- les fines de granulats (verre) peuvent dans une majorité de cas réduire l'expansion due à la réaction alcali-silice dans le béton;
- ces fines réduisent ou annulent les chutes de résistance dues au développement de la réaction alcali-silice;
- la réduction ou la disparition de l'expansion semble être due à la création de gel **(Moisson, 2005)** ;
- l'adjonction de granulats en caoutchouc aux bétons peut constituer une solution pour concevoir un composite cimentaire offrant de meilleures performances: malgré la chute des résistances mécaniques (en compression et en traction), ce composite offre une grande capacité de déformation avant la localisation de la fissuration;
- les applications sur terre-plein de ce composite (dallages et chaussées en béton) sont privilégiées ;
- les granulats de rebuts de fabrication de l'industrie du béton ont des propriétés physiques, mécaniques et chimiques proches de celles des granulats de démolition;
- les bétons réalisés avec des ajouts limités de ce type de granulat présentent des résistances mécaniques comparables à celles des bétons de granulats naturels;
- la fabrication de béton réalisé avec des ajouts de rebuts de production de l'industrie du béton (10 % pour les sables et 30 % pour les gravillons) permet l'obtention de résistances mécaniques sensiblement équivalentes à celles des bétons de granulats naturels;

A la vue de ces résultats et des mesures réglementaires et de préconisation en matière d'exploitation des carrières de granulats naturels, vraisemblablement, les granulats recyclés seront utilisés de manière croissante dans l'industrie du béton moyennant certaines précautions pour certains d'entre eux, comme l'a montré la présente étude.

Ainsi, sur la base de cette analyse bibliographique, il nous est apparu intéressant de chercher dans la suite de ce travail à affiner notre compréhension du comportement mécanique des

bétons de granulats recyclés. Pour cela, un travail expérimental est mené autour de l'impact des différents paramètres physiques et mécaniques des granulats (analyse granulométrique, volume, densité, etc.) et de leur influence sur les résistances des bétons, en relation avec le type de granulats recyclés.

Chapitre 2: Caractérisation des matériaux constituant les bétons

2 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et discuter les résultats obtenus à la suite de la caractérisation des matériaux afin de mettre en évidence les propriétés essentielles et utiles qui ont motivé leur utilisation dans cette étude.

2.1 Ciment

Les propriétés physiques et chimiques des ciments CEMII 32,5 R et CEMII 32,5 R sont indiquées dans les tableaux ci-dessous.

2.1.1 Ciment CEMII 32,5 R

Il s'agit d'un ciment de fabrication locale CEMII B 32,5 R de marque «Bélier», provenant de la société SOCIMAT (Côte d'Ivoire). Sa surface spécifique est de $3199 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour une densité de 2,935. Il répond à la norme ivoirienne NI 05.06.004.

Le tableau 2.1 présente les compositions chimiques et les propriétés physiques du ciment 32,5.

Tableau 2.1: Composition chimique et propriété physique

Composition chimique									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	MnO
53,08%	23,30%	5,76%	3,80%	5,03%	2,09%	1,50%	1,7%	0,19%	0,16%
Propriété physique									
Surface	Diamètre								
spécifique	Densité								
(cm2/g)		(µm)							
3199	2,935	16,4							

2.1.2 Ciment CEM II 32,5 R

Le ciment Portland utilisé est un CEMII/32,5 R CE NF Calcia Bussac sac de 35 kg. Il répond à la norme française NF P 15-317. La composition chimique du ciment est résumée dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Composition chimique (valeurs moyenne en %)

65 % < Clinker < 94			
%	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S
%	8,9	74,8	3,7
Eléments	SO ₃	S ⁻	Na ₂ O
%	2,7	-	0,17

2.2 Sable

Ce sont des granulats dont la taille est comprise entre 0 et 5 mm. Ces granulats ont été soumis à différentes analyses physiques dont les résultats sont présentés dans le paragraphe ci-dessous.

2.2.1 Granulométrie

La réalisation de la courbe granulométrique est faite de la façon classique avec des tamis suivant la norme **EN 933-2**. Les prises d'essai sont 400 g et 1000 g respectivement pour le sable lagunaire (SNL) et les sables des rivières girondines (SNG) et recyclé (SR).

Les résultats de différentes analyses granulométriques effectués sur les sables sont illustrés par la figure 2.1.

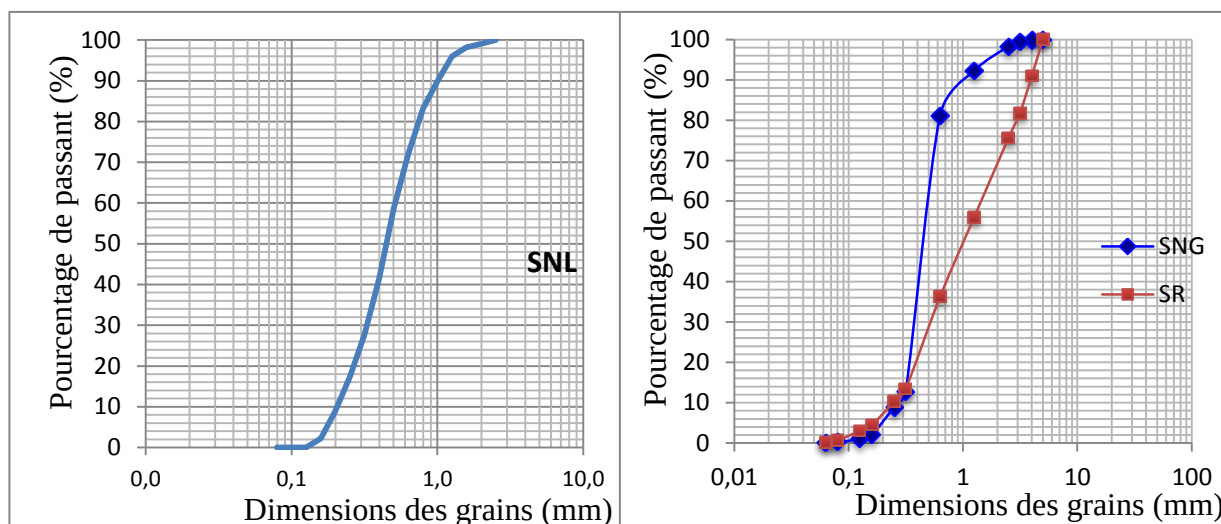


Figure 2.1: Courbe granulométrique des sables

D'après ces différentes courbes le SNL et le SNG et le SR sont respectivement de classe granulaire 0/2, 0/5 et 0/5. Le diamètre de 50 % des grains de ces différents sables sont 0,5

mm, 0,5 mm et 1 mm respectivement pour les sables SNL, SNG et SR. Le sable recyclé est donc plus grossier que les deux sables naturels.

2.2.2 Module de finesse des sables

Les valeurs obtenues du calcul du module de finesse de ces différents sables sont 2; 2,23 et 3,2 respectivement pour le SNL, SNG et SR. Le sable SR est plus grossier que les sables naturels et le SNG est aussi plus grossier que le SNL. Cela confirme bien les résultats précédents. D'autre part, ces résultats montrent que plus le module de finesse est élevé, plus le sable est grossier. Selon le fuseau de la granularité des sables, un bon sable à béton doit avoir un module de finesse comprise entre 2,2 et 2,8 (Fig. 2.2). Selon **Dreux et Gorisse (1969)** le bon sable à béton doit avoir un module de finesse qui se situe aux environs de la valeur 2,5. A part le sable de la rivière Gironde, le sable de lagune et le sable recyclé sont situés en dehors de cet intervalle. De plus, la valeur du module de finesse de SNG est éloignée de celle proposée par Dreux et Gorisse. Cependant, ces différents sables peuvent être utilisés pour la réalisation de béton car leur module de finesse les situe parmi les sables admissibles pour béton selon le fuseau granulaire.

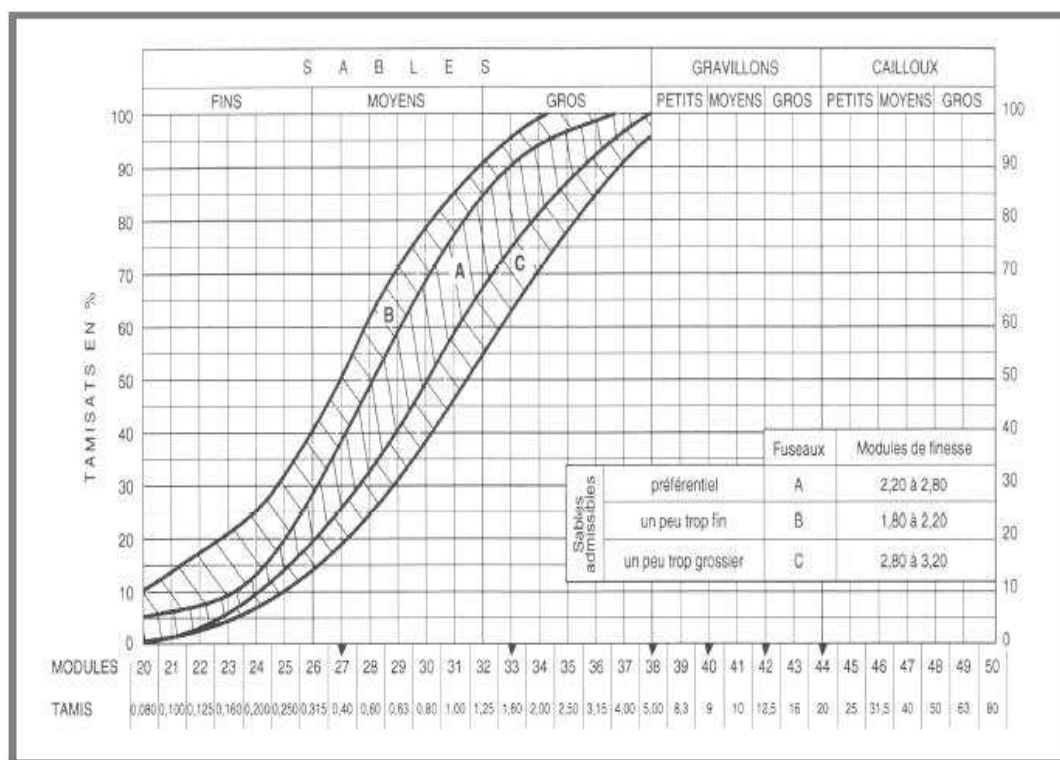


Figure 2.2: Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton

2.2.3 Equivalent de sable

Cet essai effectué selon la norme NF EN 18-598, a été déterminé uniquement sur le sable lagunaire car seule ce sable vérifiait les conditions spécifiées par la norme : classe 0/2. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3: L'équivalent de sable

Hauteur totale H1 (cm)	Hauteur du sable H2 (cm)	ES (%) = (H2x 100)/H1	ES (%)
10,5	7,5	71,4	73
10,3	7,6	73,7	
10,3	7,7	74,7	

Ce résultat montre que notre sable a une ES d'ordre 73 %, valeur qui se situe dans l'intervalle [70; 85] recommandé par Dreux (**Dreux, 1964**).

2.2.4 Masse volumique et Absorption

La masse volumique et l'absorption des sables ont été mesurées conformément aux normes NF P 18-555 et NF P 18-554. Les résultats obtenues sur les sables naturels Lagunaire (SNL) et de Gironde (SNG) puis du sables recyclés sont respectivement pour la masse volumique 2,62; 2,65 et 2,4 et l'absorption est respectivement de 1,7; 1,6 et 13 %.

Le sable recyclé a une masse volumique relativement inférieure et une absorption très supérieure à celle des sables naturels. Cela s'explique par le fait que le sable recyclé est formé essentiellement d'ancien mortier qui aurait une porosité élevée. Au contraire, les sables naturels sont constitués de minéraux issus de l'altération des roches. Les sables naturels pour des classes granulaires différentes (0/2 et 0/5) ont une masse volumique et une absorption presque identique.

2.3 Discussion : Modèle de Weibul

Les sables sont en général utilisés pour la réalisation de béton et de mortier. Or la qualité d'un béton est étroitement liée à sa compacité qui dépend elle-même de la distribution de la fraction sableuse. Ainsi, plusieurs modèles sont proposés pour examiner la répartition des grains dans une matière. Parmi ces modèles, celui de Weibul permet un ajustement des

courbes d'analyses granulométriques à partir de deux paramètres qui sont λ et k . La méthodologie de ce modèle est exposée en annexe 3.

Une application de ce modèle au sable SNL a permis d'obtenir la figure 2.3. Cette figure montre que l'ajustement obtenu peut être séparé en 2 parties distinctes caractérisées par différentes portions de droite : la portion de droite de pente 3,782 et celle de pente 1,339. Elles correspondent respectivement à la fraction fine de sable de diamètres comprise entre 0 et 0,32 mm, et la fraction grossière de sable de diamètres compris entre 0,32 et 2 mm pour le SNL.

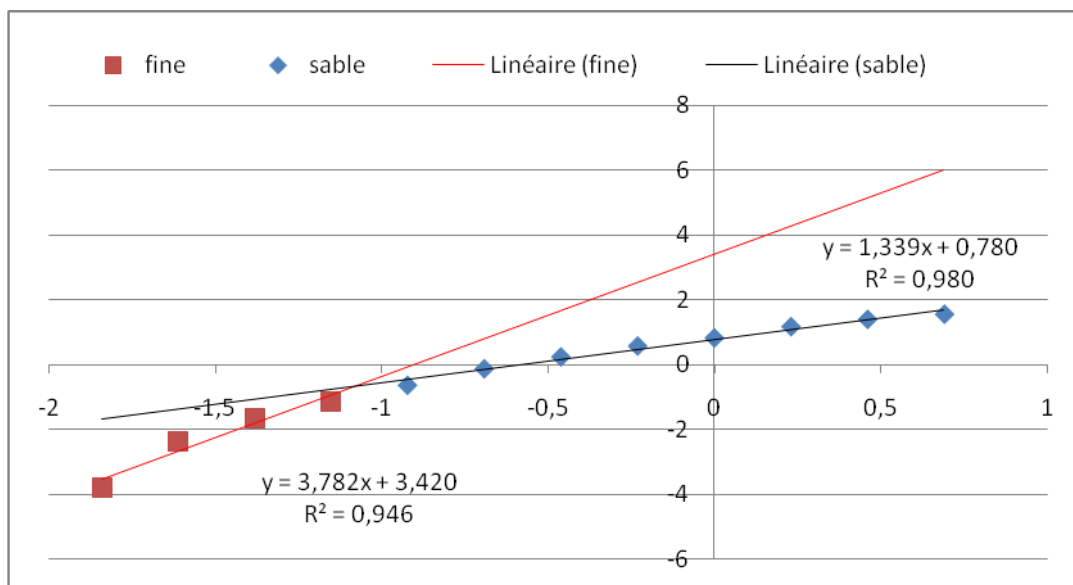


Figure 2.3 : Régression permettant de retrouver les paramètres λ et k

L'extension de ce modèle aux SNG et SR permet aussi de les séparer en deux fractions : les fines et les grossières. Les diamètres des différentes fractions et les paramètres de distributions des différents sables sont résumés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation

Paramètre Sables	Fine				Grossière			
	Diamètre (d) de la fraction (mm)	k	λ	R^2	Diamètre (d) de la fraction (mm)	k	λ	R^2
SNL	0<d<0,32	3,78	0,90	0,97	0,32<d<2	1,34	0,58	0,99
SNG	0<d<0,32	2,28	1,06	0,99	0,32<d<5	0,75	0,39	0,99
SR	0<d<0,25	6,57	1,22	1,00	0,25<d<5	3,61	2,33	0,99

A travers le tableau on observe une corrélation proche de 1, ce qui montre la fiabilité de cette analyse et la bonne distribution des grains.

2.4 Graviers

Ce sont des granulats dont la taille est comprise entre 5 et 80 mm. Il s'agit ici des granulats naturels comme les concassés de granite (graves) et les graviers naturels de la gironde (GNG) et des granulats recyclés comme le ciment durci, les pneus usagés, les verres et les graviers recyclés de retour de toupie (GR). Ces granulats ont été soumis à différentes analyses physiques dont les résultats sont présentés dans le paragraphe ci-dessous.

2.4.1 Granulométrie

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 2.4. Les courbes des graves et du ciment durci ont été réalisées sur 3 échantillons de 5000 g chacun, par tamisage manuel. Les courbes du verre ont été réalisées sur un échantillon unique de masse 1677 g. Celle du pneu a été réalisée à la main: on mesure la dimension médiane du granulat parallélépipédique et de la masse de chacun d'eux. En effet, du fait des armatures du pneu il était très difficile de tamiser les granulats. La courbe a été réalisée à partir des mesures sur 116 échantillons pour une masse totale de 863 g. Cela explique que la courbe soit aussi bruitée. Les courbes des graviers naturels de gironde et graviers recyclés de retour de toupie ont été réalisées sur trois échantillons de 2000 g chacun.

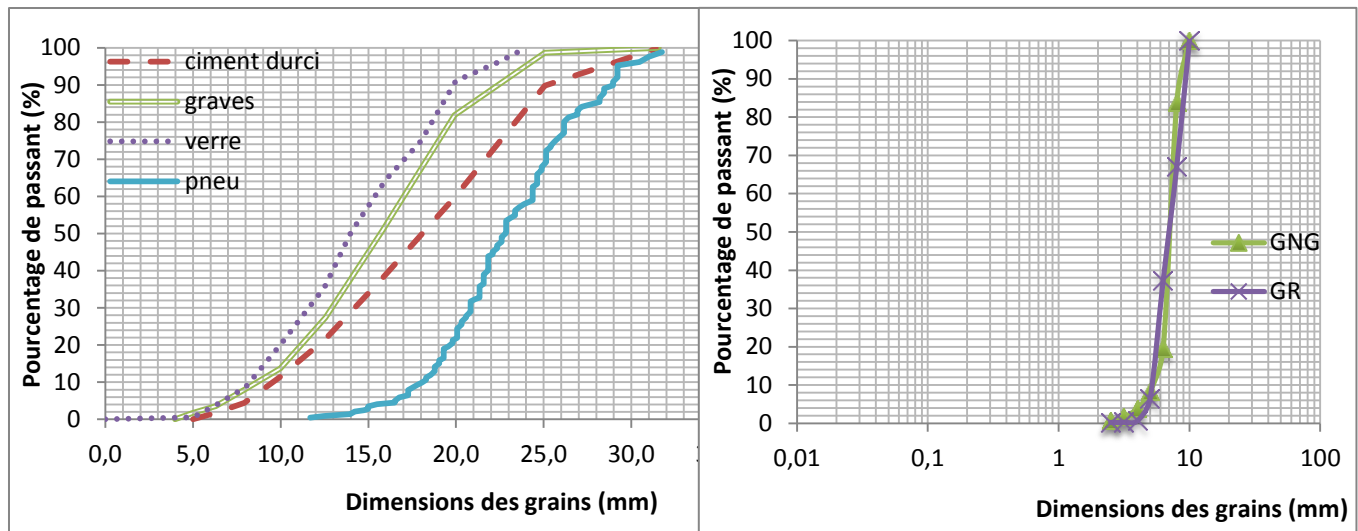


Figure 2.4 : Courbes granulométriques des granulats concassés et roulés

D'après ces courbes, les classes granulaires sont respectivement de 8/25 pour le ciment durci, les graves et le verre et 16/28 pour le pneu, puis 5/10 pour le GNG et le GR.

2.4.2 Masse volumique et absorption

Les résultats de masse volumique et d'absorption obtenue sur le ciment durci, les graves, les pneus, le verre, le GNG et le GR sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5: Masses volumiques des granulats

Type	Nom	Masse volumique (g/cm ³)	Coefficient d'absorption (%)
Naturel	Concassé de granite	2,6	0,36
	Gravier roulé	2,61	1,5
Recyclé	Concassé ciment durci	2,1	2,3
	Concassé verre	2,5	-
	Pneus usagés découpés	1,8	-
	Gravier	2,45	4,33

Les graves et GNG présentent une masse volumique semblable. Le concassé de granite a un coefficient d'absorption de 0,36 %, tandis que le gravier roulé a 1,5 %. Cette différence peut

être liée à la taille des granulats. La courbe granulométrique laisse entrevoir que les graviers roulé de gironde (GNG) sont plus fin que les concassés de granite d'Attinguié (graves).

De plus, les valeurs de la masse volumique et du coefficient d'absorption du ciment durci sont respectivement $2,1 \text{ g/cm}^3$ et 2,3 %. La faible densité et sa grande absorption pourrait être liées à son réseau de pores, mis en évidence par **(Thai, 2009)** dans ses travaux de recherches.

Aussi, le verre a une masse volumique inférieure à celle des graves et du GNG. Son coefficient d'absorption n'a pas été déterminé à cause de la nature du granulat. Le pneu est le granulat recyclé qui présente la plus faible masse volumique qui est de $1,8 \text{ g/cm}^3$. Le coefficient d'absorption n'a pu être mesuré à cause de la taille des granulats de pneu et de l'équipement disponible.

On note également une forte absorption d'eau des granulats recyclés (GR) et une densité réduite par rapport aux granulats naturels (graves et GNG). La faible densité et la forte absorption des agrégats recyclés peuvent être principalement attribuées à des résidus de mortier adhérent au gravier initial. L'absorption d'eau des granulats de déchets est beaucoup plus importante que celle des granulats alluvionnaires. Elle constitue la différence la plus importante entre ces deux types de granulats. Cette grande absorption d'eau des recyclés est due à la présence d'ancien mortier très poreux. La densité des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels. Ce constat a été fait par **(Frédéric, 2000)** et qui lit cette baisse de densité à la pâte de ciment collé à la surface des grains qui contient un pourcentage élevé de vide occlus (souvent autour de 10 %).

2.4.3 Caractéristique mécanique

L'analyse des caractéristiques mécaniques des granulats a porté sur le Los Angeles (L.A), le module de Young et la résistance en compression. Les valeurs de Los Angeles ont été déterminées expérimentalement sur les graves et le ciment durci. Par contre, le module de Young et la résistance en compression sont des valeurs non mesurées expérimentalement mais issu de la bibliographie. Toutes ces caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6: Caractéristiques mécaniques moyennes généralement admises des granulats

Granulat	Module d'Young (GPa)	Résistance compression (MPa)	Los Angeles (%)
Naturel	60	200	19
Ciment durci	50	60	22
Verre	69	1000	-
Pneu usagé	1	100	-

Nos échantillons (graves et ciment durci) ont respectivement 19 et 22 % comme coefficient Los Angeles. C'est des valeurs inférieures à 35, valeur recommandée pour les bétons de génie civil (**Gorisse, 1966**). Plus le L.A est faible, plus le matériau est dur donc le concassé de granite est plus dur que le ciment durci. Cela est confirmé par la valeur du module d'Young et la résistance en compression des deux granulats. Le module de Young du verre de même que sa résistance en compression sont plus élevé que ceux du GN et CD. En outre, les 3 premiers types de granulats ont généralement un comportement élastique fragile. Le dernier est visco-élasto plastique, la résistance à la rupture du béton sera donc plus fortement dépendante de la vitesse de chargement d'une part, et d'autre part, la plasticité du caoutchouc retardera la localisation d'une macrofissure dans le béton.

2.5 Discussion : Modèle de Weibul

Ce modèle a été appliqué aux granulats. Ainsi, l'ajustement des courbes granulométriques au modèle Weibul, nous donne les différentes droites de régression (Fig. 2.6) et les paramètres de distribution ainsi que les coefficients de corrélation (R^2).

Les diamètres, les paramètres de distributions et les coefficients de corrélations des différents granulats sont résumés dans le tableau 2.7.

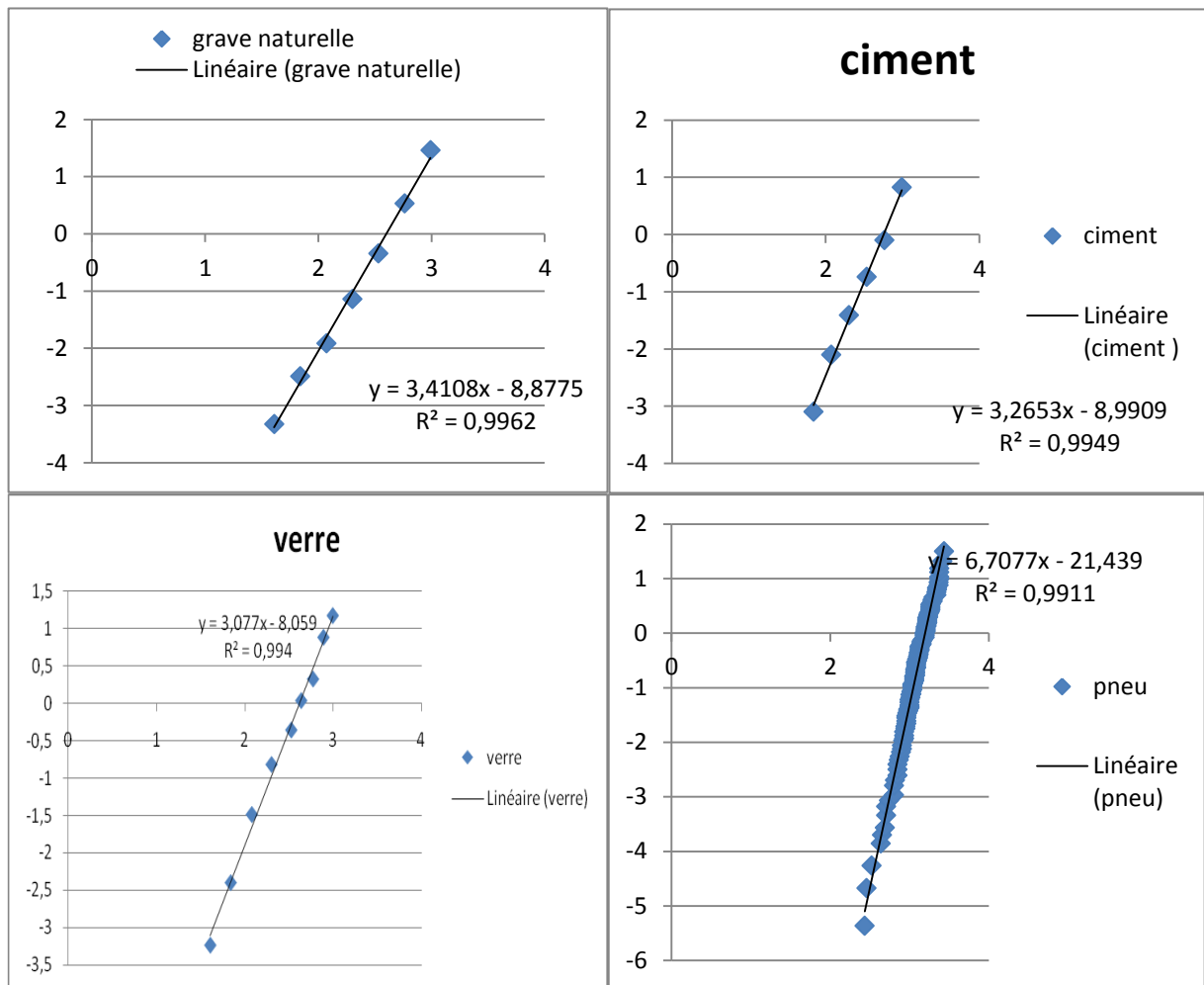


Figure 2.5 : Régression permettant de trouver les paramètres

L'alignement des points sur une droite et une bonne corrélation confirme ainsi la fiabilité de cette analyse aussi la bonne distribution des grains, idéale pour une meilleure compacité du béton.

Tableau 2.7: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation

Paramètre Granulats	Grossière			
	Diamètre (d) de la fraction (mm)	k	λ	R^2
Graves	8<d<25	3,41	-2,60	0,998
Ciment durci	8<d<25	3,26	-2,75	0,997
Verre	8<d<25	4,00	15,59	0,99
Pneu	16<d<28	6,71	-3,20	0,996

2.6 Conclusion du chapitre

En conclusion sur la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons, il ressort que les sables et les granulats étudiés présentent des caractéristiques qui en font des matériaux pouvant entrer dans la formulation d'un béton. Toutes ces caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.9 (en annexe 9) En effet, la détermination du coefficient d'absorption renseigne sur la porosité interne du matériau granulaire qui est préjudiciable pour le béton. Un coefficient d'absorption élevé influence la performance de l'ouvrage final. De plus, le Los Angeles et l'équivalent de sable renseignent respectivement sur la dureté des granulats et la propreté du sable. Et, le modèle de Weibul montre un alignement des points sur une droite et une bonne corrélation qui confirme une meilleure distribution des grains, idéale pour une meilleure compacité du béton.

Par ailleurs, pour une étude plus complète des différents paramètres pourraient influencer un béton réalisé avec ces sables et granulats, des caractéristiques complémentaires ont été déterminés (distribution des tailles issue de la granulométrie) et sont présentés dans le tableau 2.8 (en annexe 9)

Chapitre 3 : Influence du type et de la quantité de granulats recyclés sur les performances du béton

3 Introduction

L'élimination de certains déchets est un enjeu important en Côte d'Ivoire. Une possibilité est d'utiliser ces déchets comme granulats dans les bétons. Cette étude porte sur trois types de déchets: verre concassé, ciment durci concassé et pneus découpés. Ces déchets ont été incorporés à du béton pour remplacer 100% des graviers. La matrice mortier reste identique et seul le pourcentage de recyclât change. Une comparaison des résistances permet d'établir une loi donnant la résistance en fonction des caractéristiques et de la fraction volumique d'agréats. Nous présenterons les formulations de ces bétons, les résultats des tests mécaniques et l'ajustement des modèles analytiques.

3.1 Fabrication des bétons

Pour étudier l'influence du volume de granulats, le béton est conçu avec un mortier, identique dans tous les cas, dans lequel on met des granulats en pourcentage massique de plus en plus important. Le tableau 3.1 montre les proportions utilisées. Les pourcentages de granulats (par rapport à la masse totale sèche des granulats et du mortier) sont 20%, 25%, 30% et 50%.

Tableau 3.1: Composition des mélanges

	Proportion massique de granulats (%)			
	20	25	30	50
Quantité de granulat (kg)	8	11	14	32
Quantité de sable (kg)	16	16	16	16
Quantité de ciment (kg)	16	16	16	16
Quantité d'eau (l)	6	6	6	6
Rapport eau/ciment	0,37	0,37	0,37	0,37

Pour la réalisation de notre gâchée d'essai, nous pesons les composants y compris l'eau dans l'ordre suivant: gravier, sable, ciment. Les matériaux sont mélangés à sec, puis on verse l'eau de gâchage pour obtenir le béton frais.

Les éprouvettes (16x32) sont remplies conformément à la norme P 13-451, soit en deux couches identiques, chacune étant vibrée avec une aiguille vibrante de 25 mm. Les éprouvettes sont démoulées, le lendemain (24 h) de leur confection, elles sont ensuite marquées et datées. La conservation se fait dans un bassin humide jusqu'à maturation (28 jours). On mesure ensuite la résistance en compression du béton obtenu.

3.2 Résultats et discussions sur la résistance mécanique

La résistance en compression a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques en béton, en suivant la norme française NF P18-406. La capacité maximale du chargement de la presse est de 1500 kN avec une vitesse de charge 5 kN/s.

Pour chaque gâchée, trois éprouvettes ont été testées. Le tableau 3.2 et la figure 3.1 illustre les valeurs de résistance des différents bétons.

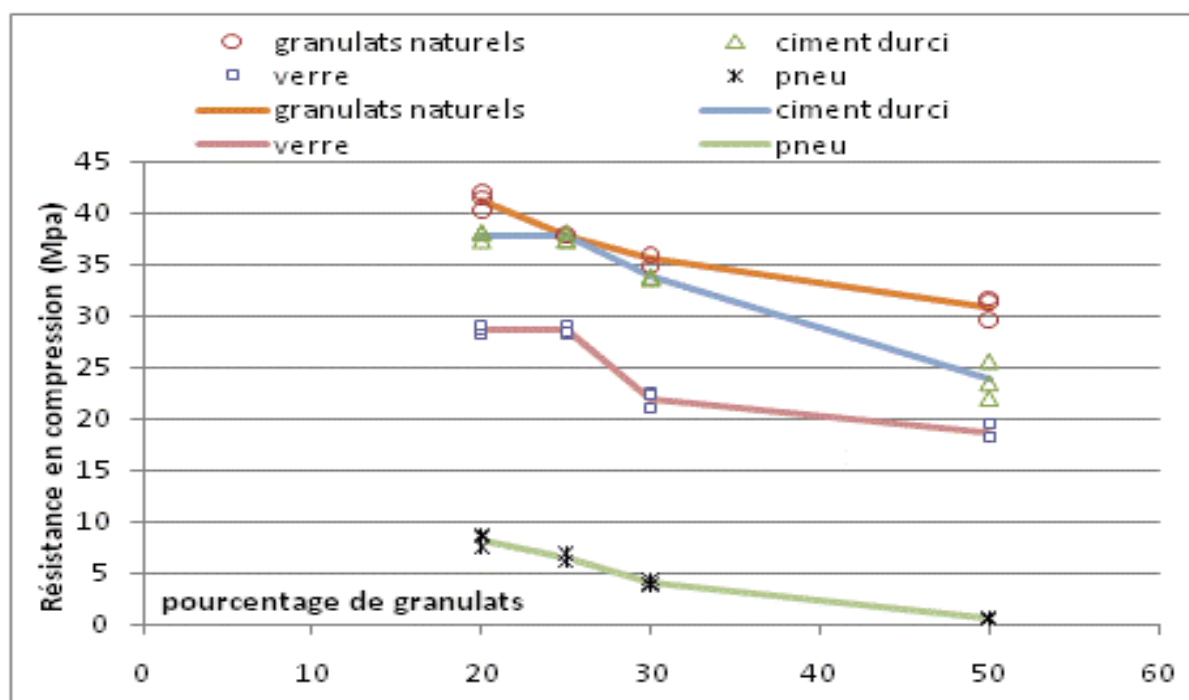


Figure 3.1: Résistance des différents mélanges en fonction du pourcentage massique de granulats

Tableau 3.2: Détails des résultats des résistances à l'essai de compression des différents bétons

Proportion (%) de granulats	Résistance en compression (MPa)				Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation
Béton de Gravier naturel							
20	41,5	40,3	42,1	41,3	0,92	0,022	
25	37,9	37,8	37,9	37,9	0,06	0,002	
30	36,0	34,8	36,0	35,6	0,69	0,019	
50	29,6	31,4	31,7	30,9	1,14	0,037	
Béton de Ciment durci							
20	38,2	37,4	38,1	37,9	0,44	0,012	
25	37,4	38,2	37,5	37,7	0,44	0,012	
30	33,7	33,8	33,9	33,8	0,10	0,003	
50	23,6	25,7	22,1	23,8	1,81	0,076	
Béton de Tesson de bouteille							
20	28,2	28,7	29,2	28,7	0,50	0,017	
25	29,1	28,3	28,4	28,6	0,44	0,015	
30	22,6	22,4	21,0	22,0	0,87	0,040	
50	18,2	19,6	18,3	18,7	0,78	0,042	
Béton de Pneu usagé							
20	8,5	8,8	7,6	8,3	0,62	0,075	
25	6,9	6,1	6,2	6,4	0,44	0,068	
30	3,9	4,0	4,4	4,1	0,26	0,065	
50	0,6	0,5	0,7	0,6	0,10	0,167	

La figure 3.1 ci-dessus présente les résistances obtenues en fonction des pourcentages massiques des différents types de bétons. On constate nettement une décroissance de la résistance en fonction du pourcentage de granulats quelque soit le matériau et en fonction du type de granulat. Les bétons à base de pneus recyclés donnent les plus faibles résistances

suivies des bétons de verre. Aussi, la décroissance de la résistance en fonction de l'augmentation de taux de granulats de verre est visible sur la figure 3.1 et dans le tableau ci-dessus. La résistance du béton de verre est inférieure à celui du béton de gravier naturel. L'adhésion incomplète du verre à la pâte de ciment est aussi cause de cette décroissance de la résistance. Ce constat concorde avec les résultats issus de la bibliographie donnant de très faibles résistances pour les bétons à base de pneu recyclés, et des résistances plus réduites que celles des bétons à base de granulats naturels dans le cas du verre (Topçu et al., 2004; 2008). D'autre part, les valeurs voisines des résistances des bétons de ciment durci et des bétons de granulats naturels pourraient s'expliquer par une meilleure adhérence de ces granulats à la matrice.

Le tableau 3.2 montre la grande différence entre le béton de gravier et de pneu pour les mêmes proportions de granulats. Il permet aussi de constater une faible dispersion des résistances autour de la valeur moyenne (écart type compris entre 0,10 et 1,81). Les valeurs obtenues sont donc significatives et pourront être utilisées pour établir l'influence du type de granulats et de leur dimension sur la qualité des bétons.

Le tableau 3.3 présente l'analyse statistique des essais de compression pour chaque pourcentage de granulats, (moyenne, écart type et le coefficient de variation (cov = écart type/moyenne)).

Tableau 3.3: Résistances moyennes en compression, écarts types et coefficient de variation

%	moy gn	moy cd	moy v	moy p	ec gn	ec cd	ec v	ec p	Cov gn	cov cd	cov v	cov p
20	41,30	37,90	28,70	8,30	0,92	0,44	0,50	0,62	0,022	0,012	0,017	0,075
25	37,87	37,70	28,60	6,40	0,06	0,44	0,44	0,44	0,002	0,012	0,015	0,068
30	35,60	33,80	22,00	4,10	0,69	0,10	0,87	0,26	0,019	0,003	0,040	0,065
50	30,90	23,80	18,70	0,60	1,14	1,81	0,78	0,10	0,037	0,076	0,042	0,167

gn = granulats naturels, cd = ciment durci, v = verre concassé et p = pneu usagé, cov = écart type/moyenne, ec = écart type, moy = moyenne

Ce tableau montre qu'il n'existe pas de relation entre le pourcentage de substitution et les écarts types quelques soit le type de granulats. La dispersion des valeurs des résistances n'est donc pas liée à la proportion de granulats. Cela confirme que les résistances en compression

dépendent pour l'essentiel de la proportion et du type de granulat dans le béton. Aussi, pour déterminer le facteur lié à la proportion et au type de granulat qui influence le plus la résistance des bétons de recyclâts les analyses suivantes ont été effectuées.

3.2.1 Influence du taux volumique

Le taux volumique est le pourcentage de granulat par unité de volume du béton. Plus la proportion de granulat est élevée, plus le taux volumique est grand. Par conséquent, les granulats auront tendance à être en contact les uns les autres. C'est ce qui explique la baisse de la résistance avec l'augmentation du pourcentage de granulat (Cf. fig.3.1). Pour généraliser ce constat aux différents types de granulats leurs résistances à la compression a été normalisée (c'est-à-dire que la résistance a été divisée par la valeur moyenne). Cette normalisation permet de minimiser l'effet de la valeur de la résistance sur la répartition des courbes. La figure 3.2 montre les courbes des résistances normalisées en fonction du pourcentage et du type de granulat.

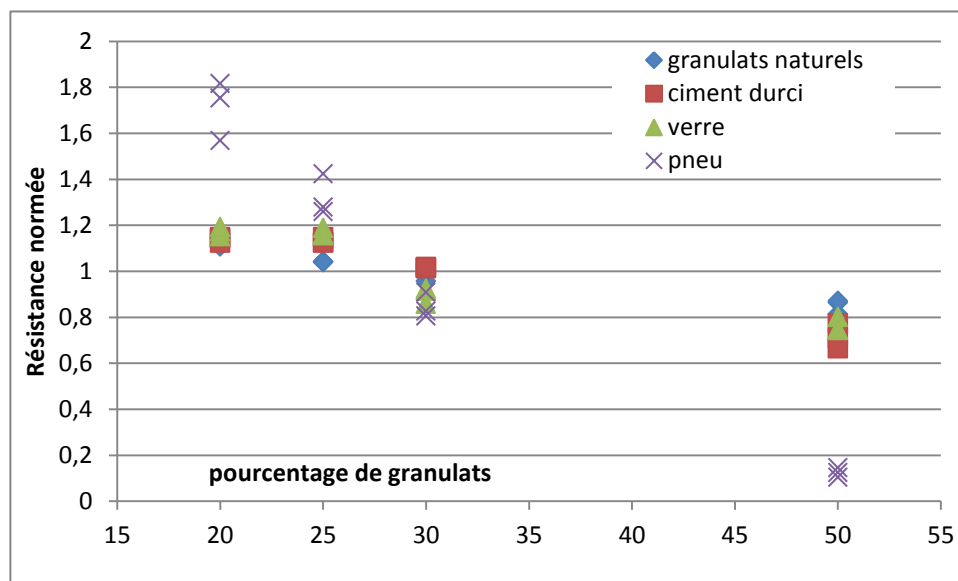


Figure 3.2: Résistance normalisée en fonction du pourcentage et du type de granulats

Cette figure indique que le comportement des granulats naturels, ciment durci et verre est quasi identique en dehors du granulat de pneu. Ce comportement peut être caractérisé par une pente de la droite de régression. Le tableau 3.4 donne ces pentes. Le ciment durci et le verre ont des pentes pratiquement identiques (-0,014). Leurs taux volumiques influencent donc la

résistance à la compression de façon similaire dans la matrice cimentaire. Par contre, avec le granulat naturel la droite est pratiquement horizontale (pente = -0,009) donc le taux volumique influence peu la résistance à la compression. Cependant, le granulat pneu lui présente une très forte pente (-0,051) par rapport au trois premiers, son taux volumique influence plus la résistance à la compression.

Tableau 3.4: Pentas de la résistance normée en fonction du pourcentage de granulats (%-1).

granulats naturels	-0,009
ciment durci	-0,015
verre	-0,014
pneu	-0,051

3.3 Influence de la taille des grains

Les granulats de ciment durci, de verre et gravier naturel ont en commun (à la différence du pneu usagé): un comportement fragile, un module d'Young proche, une densité proche et une granulométrie similaire (tableau 2.7 et 2.8). Or, suivant le pourcentage, pour un type de granulat, ce ne sont pas les mêmes caractéristiques physiques qui vont influencer le plus la résistance à la compression. Par conséquent, il est difficile de déterminer celle qui influe le plus. Néanmoins les coefficients de corrélation entre ces différentes caractéristiques et la résistance par pourcentage de granulat ont été calculés. Le tableau 3.5 illustre cette approche.

Tableau 3.5: Coefficients de corrélation entre la résistance ou le coefficient de variation et les caractéristiques des granulats

	densité	Young	min	20%	50%	80%	max	5-20mm	20-31,5mm
Coefficient de corrélations avec la résistance non normée									
20%g	0,07	-0,68	-0,98	0,78	0,68	0,26	0,26	-0,18	0,18
25%g	-0,17	-0,84	-0,90	0,91	0,84	0,49	0,49	-0,42	0,42
30%g	-0,07	-0,78	-0,94	0,86	0,78	0,39	0,39	-0,32	0,32
50%g	0,41	-0,39	-0,99	0,52	0,39	-0,09	-0,09	0,17	-0,17

Dans ce tableau, les corrélations ont été établies à partir de trois valeurs (le pneu étant exclu de cette analyse). Ainsi, la corrélation (ou le coefficient de variation) est élevée dès que le classement des résistances est le même que le classement de la caractéristique, sans qu'il y ait une raison physique. Les coefficients supérieurs à 0,90 ont été grisés.

Ce tableau indique que les coefficients de corrélation des tailles de 5-20 mm et de 20-31,5 mm sont opposés. Cela s'explique par le fait que leurs taux sont complémentaires à 100% (Cf. tab 2.8). Ainsi, si la résistance s'exprime par une équation linéaire avec une des variables, elle s'exprimera aussi linéairement avec son complémentaire.

Pour tous les pourcentages, la valeur qui est le mieux corrélée à la résistance est la taille minimale de granulat (tab.3.5). C'est un coefficient négatif donc plus la taille minimale est faible plus la résistance est forte. Les coefficients vont décroissant avec les percentiles 20%, 50% et 80% et sont tous positifs pour chaque taux de remplacement. On peut exclure la ligne 50 % de granulats pour laquelle la seule corrélation est avec le minimum. Le signe positif s'explique par le fait que plus la taille en dessous de laquelle se trouvent n% de granulats est grande plus la résistance est grande. En conséquence, pour les pourcentages de granulats de 20%, 25% et 30%, plus la courbe granulométrique est étendue avec une taille minimale faible et 50% de granulats bloqués à un passant élevé plus la résistance est élevée. Le reste de la courbe granulométrique (le percentile à 80% et la taille maximale) semble ne pas influencer.

Une autre explication pourrait provenir de la surface spécifique des granulats (somme des surfaces latérales). Plus il y a de petits granulats plus la surface spécifique est grande. Or la surface spécifique est caractéristique du volume total d'interphase granulat-mortier. Cette interphase influe sur la résistance du béton. Si sa résistance est faible et que son volume est important elle est le siège d'amorces de fissuration ce qui diminue la résistance du béton. D'après Yang (**Yang, 1998**) ou Burlion et al (**Burlion, 2007**) par rapport au granulat naturel l'interphase du verre est de très faible résistance. Ici le verre a la plus grande taille minimale et la plus faible interphase. Le granulat naturel a la plus petite taille minimale, par contre on n'a pas d'information sur la qualité des interphases du granulat naturel et du ciment durci.

Un autre facteur joue dans cette caractéristique est que la résistance à la rupture d'un gros granulat est plus faible que celle d'un petit granulat. Plus la taille est faible plus les granulats sont résistants. Mais dans cette explication il n'y aurait pas de corrélation positive entre la résistance et les percentiles (ce qui est probable car les résistances du béton à base de ciment durci et celui à base de granulat naturel sont proches d'une part et ne varient pas dans le même sens que les percentiles).

Ces 2 derniers facteurs peuvent expliquer cette forte corrélation de la résistance avec la taille minimale (min).

3.4 Proposition d'une loi donnant la résistance

Une droite pourrait s'ajuster sur chaque série de points de la figure 3.1 donnant pour chaque matériau la résistance en fonction du pourcentage de granulats. Ainsi, à 0% de granulat, 4 valeurs très différentes de la résistance du mortier s'obtiendraient. Ce qui n'est pas logique car il s'agit du même mortier. Aussi, pour trouver une valeur commune de résistance du mortier qui s'ajuste avec ces différents types de bétons, un modèle de type exponentiel comme celui proposé par (Benazzouk et al., 2007) pour les granulats de pneu est choisi. Le modèle donnant la résistance sera donc de la forme:

$$R = R_1 \exp(F(\text{granulat})V_g) \quad [13]$$

Dans lequel F est une fonction qui dépend des caractéristiques des granulats uniquement (donc du type de granulats), et V_g est la fraction volumique de granulats. La fraction volumique a été préférée à la fraction massique pour concevoir les mélanges car la masse volumique des granulats est différente et l'espace occupé par chacun varie donc en fonction de la densité de chaque matériau. L'avantage de cette relation est qu'elle permet de tenir compte de la différence entre les granulats, de l'influence de la quantité relative de granulats et d'avoir pour $V_g = 0$ une valeur commune. La figure 3.3 montre les courbes obtenues.

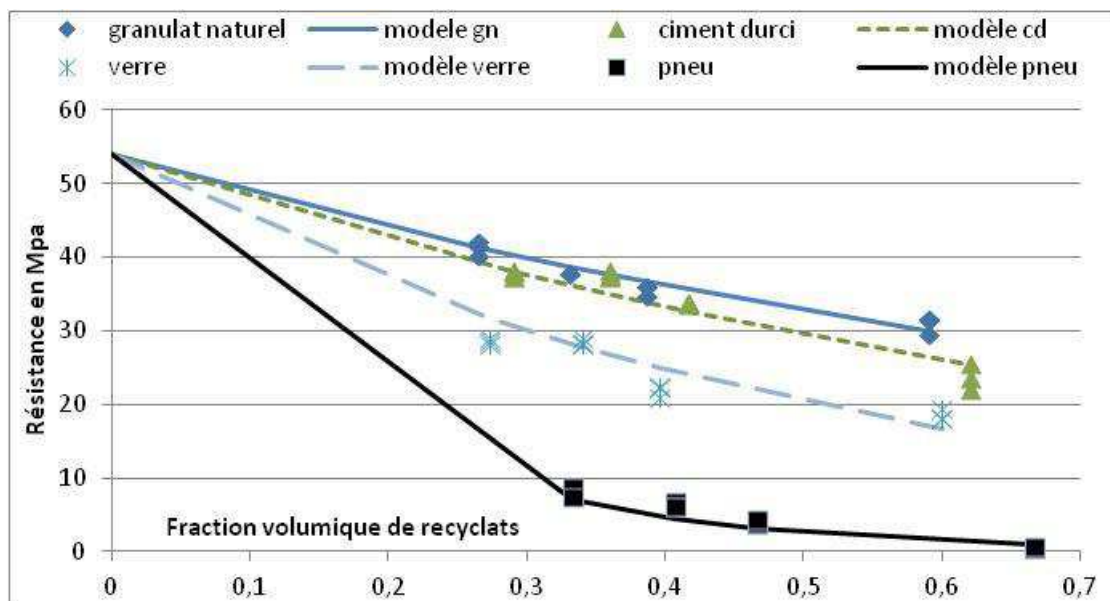


Figure 3.3. Modèle de variation de la résistance en fonction de la fraction volumique

La figure 3.3 permet d'obtenir la valeur de la résistance du mortier : $R_1 = 54$ MPa. C'est la valeur qui minimise l'écart entre le modèle et les points expérimentaux. La fonction F dépend donc uniquement des caractéristiques des granulats. La valeur de F est obtenue en faisant un filtre avec une fonction exponentielle. Le tableau 3.6 présente les valeurs de F et les valeurs des caractéristiques de chaque matériau (module de Young, densité et les paramètres de Weibul). La structure des données dans le tableau 3.4 est particulière, en effet l'ensemble de 4 valeurs se divise en trois valeurs (gravier naturel, ciment durci, verre) et le pneu plus éloigné. De ce fait toutes les valeurs sont corrélées entre elles.

Tableau3.4: Valeurs caractéristiques des granulats

	F	densité	Young (GPa)	k	λ
Grave naturelle	-1,003	2,5	60,0	3,359	7E-05
Ciment durci	-1,212	2,2	50,0	3,402	4E-05
Verre	-1,953	2,4	69,0	3,926	2E-05
Pneu	-6,073	1,8	2,0	6,708	5E-10

D'après (**Ganjian et al., 2009**), les valeurs relatives du module d'Young des granulats par rapport à celui du mortier ou à celui du sable intervient dans la résistance. En effet, quand on comprime le matériau, on n'impose pas la même déformation au granulat et au mortier ou au sable si l'écart de module est important et de ce fait des microfissures se forment autour des granulats, ce qui forme autant d'amorce de fissures. D'autre part si l'écart de masse volumique ou de densité entre le granulat et le sable est trop important il y aura ségrégation et formation d'amas de granulats. Or les amas sont des lieux de concentration de contrainte, donc des lieux privilégiés d'amorce de fissures. Ainsi, la fonction F dépend de la densité et du module de Young.

Par ailleurs, la compacité intervient aussi dans la résistance. Or la compacité est liée aux courbes granulométriques et aussi aux coefficients qui la caractérisent (percentiles et coefficients k et λ de la loi de Weibul). La figure 3.4 présente un exemple de comparaison entre le modèle de Weibul et les données expérimentales dans le cas du gravier naturel.

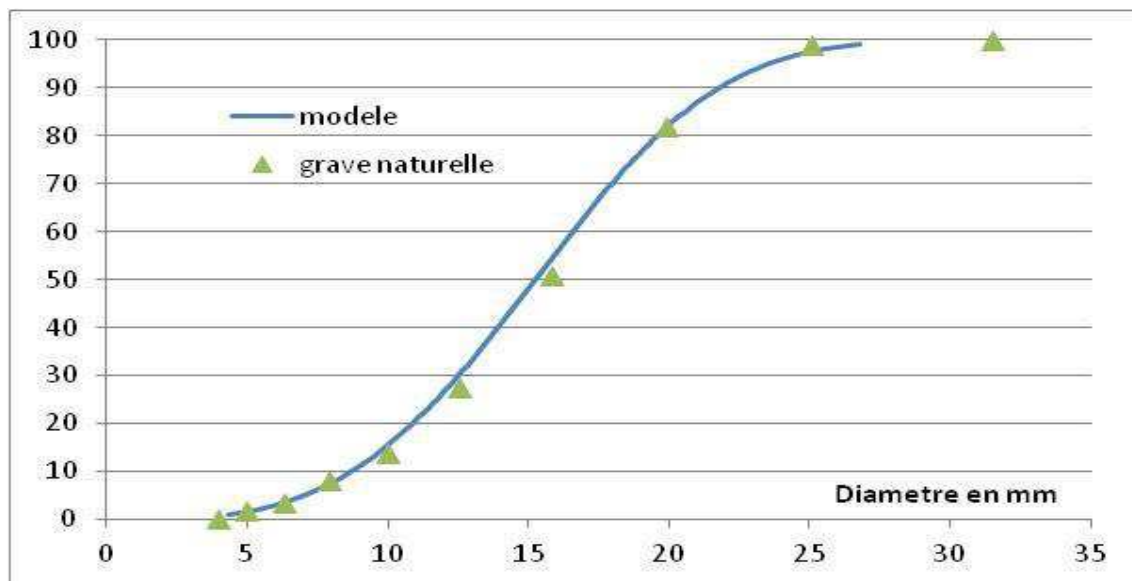


Figure 3.4: Comparaison entre le modèle de Weibull et les données expérimentales pour la granulométrie de la grave naturelle

Dans l'ensemble l'ajustement de loi de Weibull sur les courbes granulométriques est très bon pour les granulats ($R^2 = 0,99$) mais un peu moins bon pour le sable ($R^2 = 0,93$). Par conséquent, les valeurs de k , $\ln(\lambda)$ permettent d'exprimer la fonction F .

Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 présentent la variation de F en fonction de $\ln(\lambda)$, k et $(1-d_g/d_s)$ où d_s représente la densité du sable et d_g la densité du gravier recyclé.

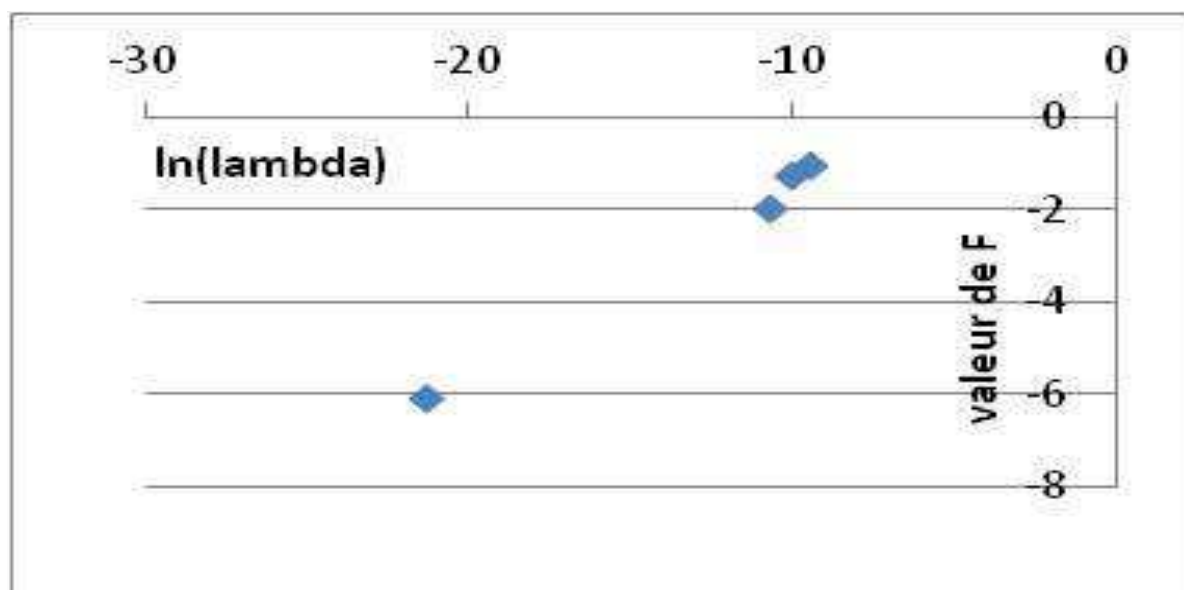


Figure 3.5: Variation de F avec le logarithme du paramètre d'échelle λ .

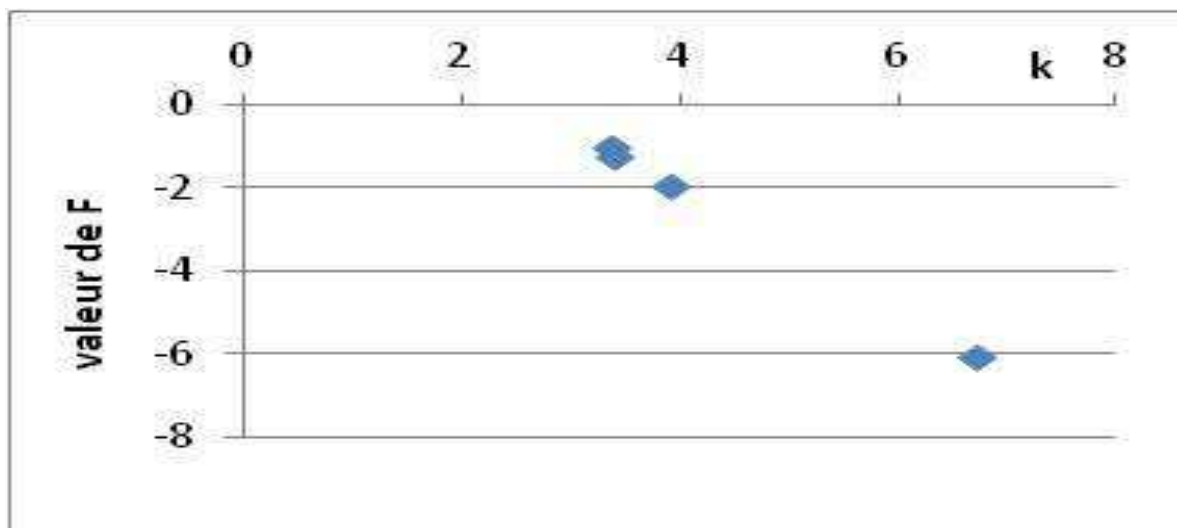


Figure 3.6: Variation de F avec le logarithme du facteur de forme k.

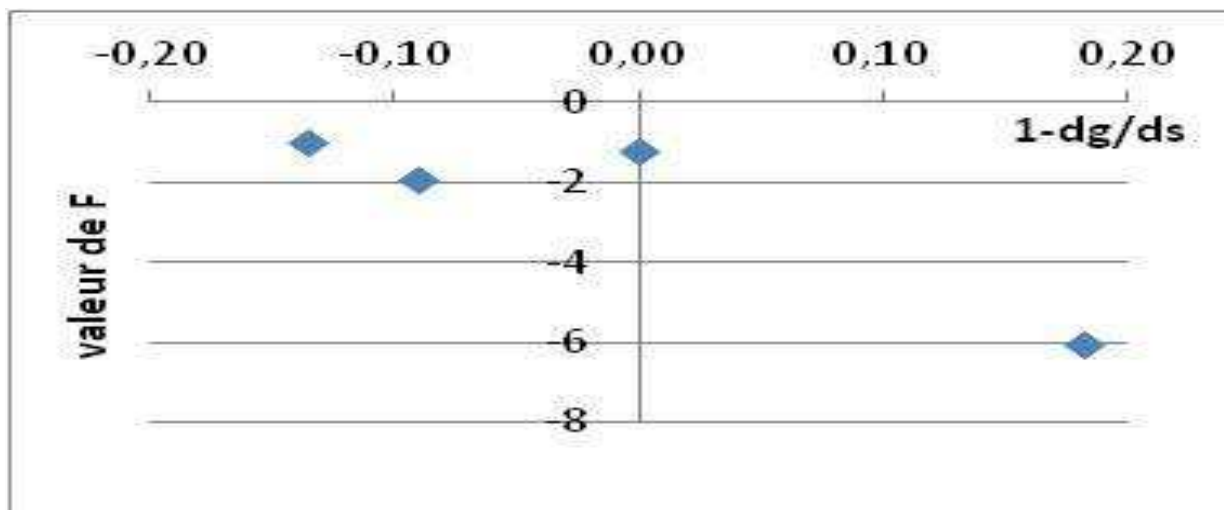


Figure 3.7: Variation de F avec la densité relative ($1-d_g/d_s$) du granulat recyclé par rapport au sable.

Toutes ces figures montrent que F peut s'écrire sous la forme d'une fonction affine de ces différents facteurs. Ainsi, aucun de ces facteurs ne paraît plus dominant sur la valeur de la résistance. Une relation générale de F peut donc s'écrire de la forme :

$$F = a_0 + a_1 \left(1 - \frac{d_g}{d_s}\right) + a_2 k + a_3 \lambda \quad [14]$$

▪ Discussion

Nous avons recherché un modèle universel explicatif des variations de la résistance à la compression en fonction du matériau et de la fraction volumique des granulats. Le fait que le modèle s'ajuste bien sur les données expérimentales n'est bien sûr pas une preuve en soit qu'il est bon et universel. La dépendance sous forme de fonction exponentielle avec V_g recoupe des résultats issus de la bibliographie (Benazzouk et al), et permet de séparer ce qui ressort du type de granulat et ce qui ressort de la fraction volumique. La figure 3.8 présente la comparaison entre le modèle et les résultats expérimentaux. La valeur de 54 MPa pour le mortier ($V_g = 0$) paraît élevée. Une autre campagne d'essai (voir chapitre suivant) donne une valeur de 36 MPa. D'autre part, les données expérimentales ne permettent pas de distinguer ce qui relève de la granulométrie et ce qui relève du matériau. D'autres essais avec les mêmes matériaux et des granulométries différentes permettrait de valider ou d'invalider les pistes proposées dans cette étude. La bibliographie indique aussi une dépendance avec le module d'Young si celui du granulat est très différent de celui du sable. Cela n'a pu être mis en évidence dans cette étude.

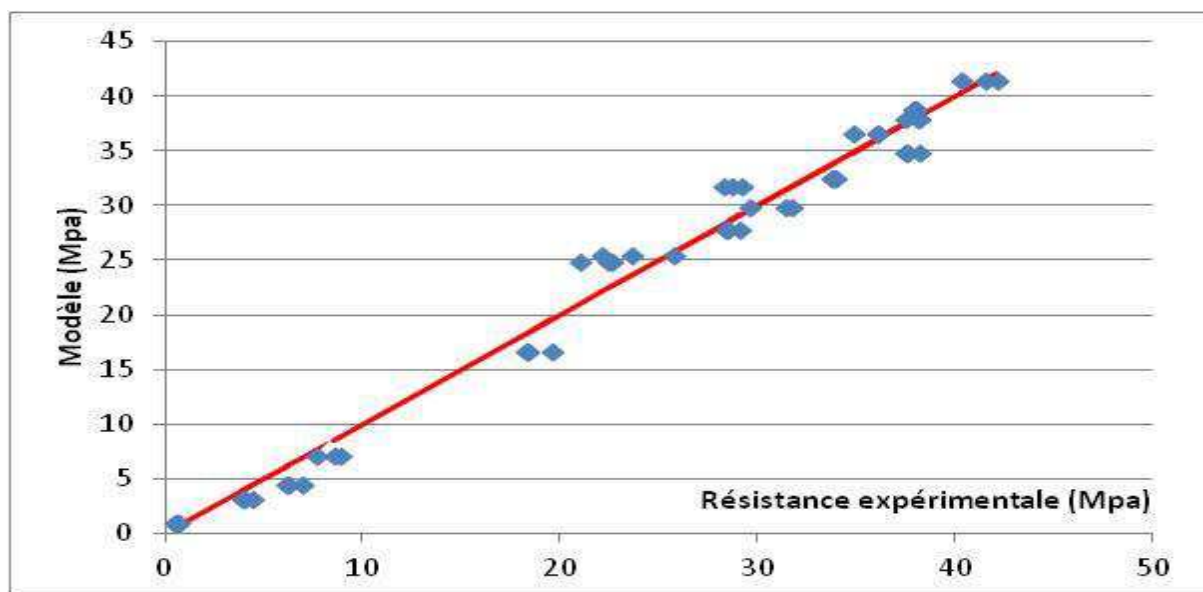


Figure 3.8: Comparaison de la résistance expérimentale et de la résistance donnée par le modèle pour les 4 matériaux

3.5 Conclusion partielle

Des bétons à base de différents recyclâts ont été réalisés et testés en compression à 28 jours. Leurs résistances à la compression avec la nature du granulat utilisé ont été étudiées. De plus, elle est influencée par la densité, le module de Young, le pourcentage et la taille des granulats. Cependant, la prédominance d'aucun de ces facteurs sur la résistance n'a pu être dégagée. Par ailleurs, La résistance à la compression a pu être modélisée à l'aide d'une loi exponentielle qui permet de tenir compte de la fraction volumique de matériau, de la densité et de la granulométrie (modélisée par une loi Weibul). Les données matériau ne se prêtant faiblement à une telle modélisation un, approfondissement d'une telle loi serait nécessaire en utilisant d'autres matériaux de densité et de module d'Young intermédiaires entre les caractéristiques du pneu et les caractéristiques du ciment durci, ainsi que plusieurs granulométries par matériau.

3.6 Influence de l'association granulats naturels-recyclâts sur les performances mécaniques du béton : Cas du verre et pneu

Toujours dans le souci d'économie et protection de cette ressource naturelle (concassé de roche) et surtout pour minimiser la quantité de granulat naturel utilisé, une étude de l'influence de l'association de granulat (granulats naturel + recyclât) est effectuée. Déterminer un béton recyclé dont la résistance est proche de celle du béton de granulat naturel avec l'apport de la spécificité du granulat recyclé est aussi un intérêt recherché dans cette étude.

3.6.1 Expérience

Pour atteindre les objectifs, les éprouvettes cylindriques 16/32 ont été réalisées avec des granulats naturels pour les taux de substitution de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % par des granulats recyclés. Six gâchées de béton ont été produites. Pour chaque type de béton trois échantillons ont été confectionnés d'où 18 pour la substitution partielle avec un recyclât donné. Comme deux types de recyclât ont été utilisés (verre et pneu), au total 36 éprouvettes ont été élaborées. Les compositions du mélange de bétons produits sont présentées dans le tableau 3.8. Les éprouvettes ont été conservées dans un bassin humide pendant 28 jours de maturation. La résistance à la compression des bétons a été déterminée sur 3 échantillons pour chaque proportion.

Tableau 3.8: Composition de mélange de la substitution partielle

Matériels	Différents types de bétons						
	N	V5	V10	V15	V20	V25	V30
Ciment (kg)	16	16	16	16	16	16	16
Eau (l)	6	6	6	6	6	6	6
E/C	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Sable (kg)	16	16	16	16	16	16	16
Gravier (kg)	14	13,3	12,6	11,9	11,2	10,5	9,8
Recyclé (kg)	-	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2
Substitution (%)	0	5	10	15	20	25	30
Vgp	0	6,20	6,34	6,48	6,62	6,76	6,90
Vgv	0	6,08	6,09	6,11	6,13	6,15	6,16

Les abréviations utilisées dans le tableau 3.8 sont les suivantes: N = Béton normal, V5 = Béton recyclé à 5 % de substitution, V10 = 10 % de substitution, V15 = 15 % de substitution, V20 = 20 % de substitution, V25 et V30 = 25 et 30 % de substitution. Vgp = Volume occupé par les granulats de pneu, Vgv = Volume occupé par les granulats de verre.

3.6.2 Résistance à la compression du béton de granulats associés

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de résistance issues des essais de compression sur trois éprouvettes et les valeurs moyennes de densité pour chaque proportion de bétons.

Tableau 3.9: Valeurs résistance en compression et densité

Proportion de granulats (%)	Résistance en compression (MPa)			Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation	Densité
Béton de gravier naturel + concassé de verre							
0	36,20	34,5	36,10	35,6	0,954	0,047	2,31
5	18,9	20,4	21,8	20,36	1,45	0,171	2,22
10	20,6	22,3	18,1	20,33	2,11	0,317	2,21
15	22,6	22,4	21	22	0,87	0,201	2,27
20	18,8	23,1	24,6	22,16	3,01	1,357	2,20
25	18	18,4	18,7	18,4	0,35	0,089	2,26
30	20,4	16,4	17,9	18,23	2,02	0,289	2,22
Béton de gravier naturel + pneu usagé							
0	36,2	34,5	36,1	35,6	0,95	0,0268	2,31
5	14,7	10,4	12,5	12,5	2,15	0,172	2,23
10	06,9	10,8	08,5	08,7	1,96	0,224	2,12
15	07,6	05,7	06,2	06,5	0,98	0,152	2,07
20	06,3	04,93	07,1	06,11	1,10	0,180	2,05
25	05,4	06,1	05,8	05,8	0,35	0,070	2,02
30	03,8	04,10	04,4	04,1	0,30	0,073	1,89

On remarque sur le tableau 3.9 que la résistance en compression à 28 jours au niveau de l'association des granulats baisse lorsque la proportion de granulats recyclés augmente. Cette baisse 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 (voir tableau 3.8). 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 (g.n) raide et un élément moins raide (pneu ou 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 rigidités plus faible constituent des zones de faiblesse.

Aussi, la résistance à faible pourcentage est plus élevée parce que la quantité de sable et de ciment est suffisamment grande pour former une bonne matrice autour des granulats. On

constate aussi pour chaque valeur de la substitution partielle que les valeurs de résistance sont très rapprochées. Les écarts entre les différentes valeurs ne sont pas très significatifs.

Par ailleurs, la densité du BPU diminue aussi avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Ainsi les granulats de pneus contribuent à l'allègement des éprouvettes par la baisse de masse des échantillons. Des études approfondies ont été menées sur des bétons et mortiers de granulats de pneus usagés (**Eldin et Senouci, 1993**) et (**Fedroff et al, 1996**). Les densités indiquées dans le tableau 3.9 montrent que le béton de granulats de pneus présente une plus faible densité par rapport au béton de verre.

3.6.3 Conséquence du type de recyclâts de substitution

Pour mieux caractériser l'effet de la baisse de résistance avec l'augmentation de la quantité de granulat recyclé, des courbes donnant la résistance en fonction de la proportion de granulats de substitution sont présentées sur les figures 3.9 et 3.10.

De plus, le béton issu de l'association des granulats naturels et du pneu présente une faible résistance à la compression par rapport au béton de l'association granulats naturels et concassé de verre. Cette diminution est bien remarquable au niveau du béton de pneu (figure 3.10).

Plusieurs travaux de recherche soutiennent aussi la baisse de la résistance en compression avec l'augmentation de la proportion de granulats recyclés de verre dans le béton (**Tung et al, 2011**), (**Kou et Poon, 2009**), (**Wang et Huang, 2010**) et (**Topçu et Mehmet, 2004**). Toutes fois, **Polley et al, (1998)** expliquent cette baisse de la résistance lorsque la proportion de verre augmente dans le mélange par l'adhérence, la forme et la surface des gros granulats de verre. D'autre part, l'introduction de déchets de caoutchouc des pneus dans la formulation d'un béton conduit à un abaissement général des propriétés mécaniques. Notre résultat est similaire à plusieurs travaux de recherche, pour (**Ali et al, 1993**), (**Raghvan et al, 1998**) et (**Oikonomou et Mavridou, 2009**) l'utilisation de pneus en caoutchouc dans les matériaux cimentaires (bétons) entraîne une diminution des propriétés mécaniques. Aussi (**Oikonomou et Mavridou, 2009**) remarquent que le pourcentage de poudre de caoutchouc de pneus affecte la résistance à la compression plus que la résistance à la flexion.

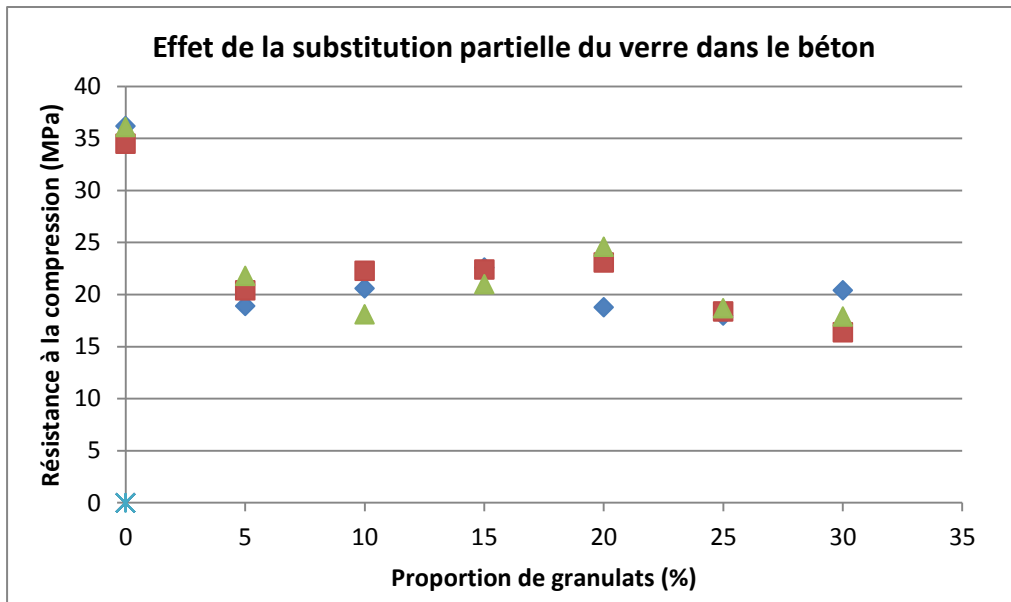


Figure 3.9: Résistance du Béton de verre en fonction de la proportion

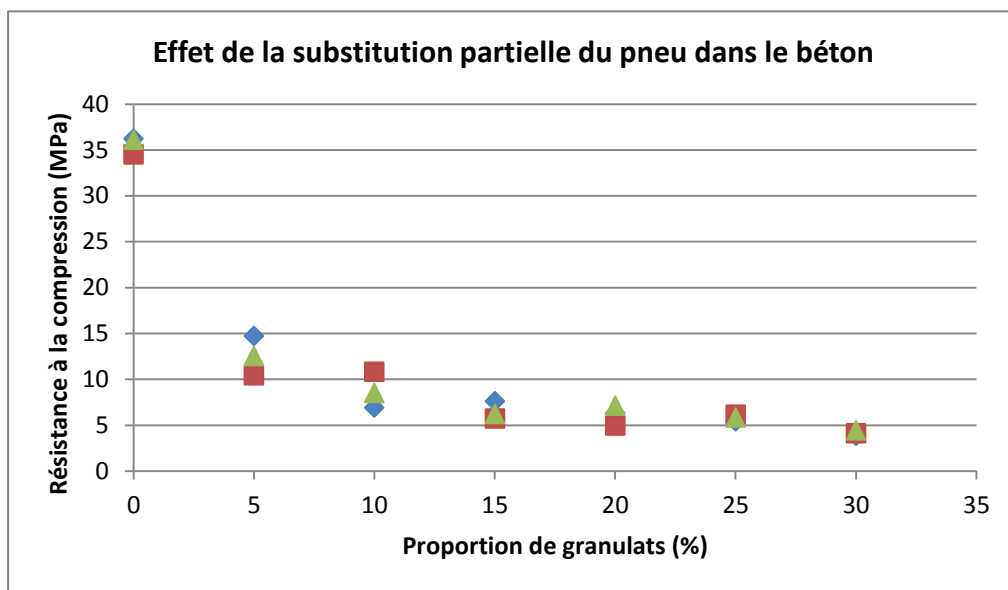


Figure 3.10: Résistance du Béton de pneu en fonction de la proportion

L'effet de l'association est aussi observé sur les éprouvettes après être soumis a une contrainte. La figure ci-dessous montre les photos des éprouvettes après avoir subie les contraintes de compression.



Béton de pneu usagé + Gravier



Béton de concassé + Gravier

Figure 3.11: Epreuves après compression

Les éprouvettes de béton contenant l'association des granulats de caoutchouc et des granulats naturels présentent des fissures verticales du haut vers le bas mais les éprouvettes ne se disloquent pas. Cependant, les bétons contenant l'association de bouteille de verre + granulat naturel se disloquent et explosent sous la contrainte (effet de fragilité du matériau).

Le caoutchouc atténue donc la contrainte et s'oppose à la fissuration qui fragilise le matériau. On observe un état de dégradation nettement plus avancé pour le béton de concassé, que le béton contenant des granulats de caoutchouc. Après la contrainte maximale, la résistance en compression diminue progressivement indiquant que les échantillons ne sont pas complètement fracturés en raison de la présence des granulats de caoutchouc et peut supporter des charges post-rupture avec augmentation des déformations.

Le béton de caoutchouc des pneus peut donc être avantageux pour des applications spéciales où la demande principale n'est pas les propriétés mécaniques, telles que la production de barrières sonores, des blocs de ciment et, comme les murs en béton léger. Selon les résultats d'étude de **(Oikonomou et Mavridou, 2009)**, les mélanges de béton de caoutchouc peuvent être utilisés dans des applications où il y a un besoin pour de faible pénétration d'ions chlorure dans des structures et où la corrosion des armatures doit être évitée.

Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications la résistance en compression présente moins d'intérêt que le comportement post pic **(Bonnet et al., 2004)**.

3.7 Application

Pour comparer le coût lié à l'usage de matériau recyclé, on s'intéresse dans cette partie à un poteau de largeur 35 cm de 3,5 m de haut supposé articulé aux 2 extrémités devant supporter une charge de 1,1 MN de charge permanente et 0,4 MN de charge d'exploitation. Les armatures en acier ($f_a = 400$ MPa) sont disposées en 2 lits symétriques et les barres ont un diamètre de 8 mm dans tous les cas étudiés. La classe d'exposition est 4 (environnement marin) ce qui donne un enrobage des armatures de 40 mm. Le fractile à 5 % de la résistance est utilisé conformément en supposant que la résistance en compression suit une loi normale de moyenne et d'écart type ceux donnés par les essais. Le nombre d'essais est trop faible mais cela permet ici de donner une idée du coût d'usage de ces bétons recyclés. La méthode de Faessel (en annexe) est utilisée pour dimensionner le poteau. On impose une largeur de poteau 35 cm et on cherche la largeur qui permet de résister au flambement. Le tableau 3.5 résume les éléments de calcul. Les poids de sable ou de ciment (la proportion est la même dans les mélanges) est déterminée en prenant 2500 kg/m^3 comme masse volumique du béton.

Tableau 3.5: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire

Granulat	Pourcentage	f_{c28} (MPa)	Longueur (cm)	Volume béton (m^3)	Poids sable ciment (kg)	Poids granulat (kg)
gn	20 %	39	37	0,518	450	225
	25 %	37	39	0,546	475	237
	30 %	34	43	0,602	523	262
	50 %	29	50	0,7	609	304
cd	20 %	37	39	0,546	446	306
	25 %	36	40	0,56	457	314
	30 %	33	44	0,616	503	346
	50 %	20	72	1,008	823	566
V	20 %	27	54	0,756	582	509
	25 %	27	54	0,756	582	509
	30 %	20	72	1,008	775	678
	50 %	17	85	1,19	915	801

Différents coûts sont à prendre en compte, le tableau 3.6 les résume et donne une valeur approximative de ces coûts.

Tableau 3.6: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire

Symbole	Définition	Valeur basse	Valeur haute
C1	Extraction du sable (€/tonne)	3,6	8,8
C2	Extraction du granulat naturel (€/tonne)	4,8	9,4
C3	Transport de granulat (€/tonne/km)	1	1
C4	Production du granulat recyclé (€/tonne)	2	63
C5	Fabrication du béton (€/tonne)	9	9

Les prix des matériaux naturels correspondent au tarif de vente d'une entreprise de l'est de la France. Le prix de production du granulat recyclé est dépendant du temps de fabrication: 9 € (5904 FCFA) est le SMIC horaire, s'il faut une journée pour produire une tonne de recyclâts à une personne cela fait 63 €/tonne (41328 FCFA/tonne). C'est un prix élevé correspondant à une production «artisanale». Ce prix dépend du coût de la main d'œuvre, il est moins élevé en Côte d'ivoire où a été réalisée l'étude. Le prix bas est l'ordre de grandeur du prix de la tonne de granulat issu du recyclage des retours de toupie. La fabrication du béton est estimée à 9 € (moins d'une heure de travail). Le prix du ciment est de 225 € la tonne (147600 FCFA).

Tableau 3.7: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire

Granulat	Pourcentage	Prix bas	Prix haut	Coût du transport (€)		
		sans transport (€)	sans transport (€)	50 km	100 km	200 km
gn	20 %	116	119	127	138	161
	25 %	122	126	134	146	169
	30 %	134	138	148	161	187
	50 %	156	161	172	187	217
cd	20 %	115	136	151	166	197
	25 %	118	139	155	171	202
	30 %	130	153	170	188	222
	50 %	212	251	279	307	364
v	20 %	151	185	177	202	253
	25 %	151	185	177	202	253
	30 %	201	247	236	270	338
	50 %	238	291	278	319	399

1 € = 656 FCFA

La différence entre le prix haut et le prix bas de l'ouvrage sans transport de granulats, montre la nécessité d'industrialiser la fabrication du granulat recyclé. Cela signifie que pour que cela soit plus intéressant pour un entrepreneur, la mécanisation ou l'industrialisation de la collecte et de la fabrication du granulat recyclé est nécessaire. Le ciment durci revient au même prix que le granulat naturel. Le problème est que le ciment durci est une ressource que l'on doit faire disparaître. L'industrialisation d'une telle ressource semble difficile puisque cette ressource doit être appelée à devenir rare, en raison du prix élevé du ciment. Cela signifie que seuls les prix hauts doivent être regardés pour cette ressource. C'est la raison pour laquelle pour les calculs tenant compte du transport, ce sont les prix bas qui ont été pris en compte pour le granulat naturel et le verre, et la valeur haute de production pour le ciment durci, puisque celle-ci ne peut être qu'artisanale.

La comparaison des coûts montre que le ciment durci même produit artisanalement est plus intéressant qu'un granulat naturel produit à 100 km pourvu qu'on ne mette pas 50% de granulats. Même un granulat naturel produit à 300 km serait plus intéressant dans une

composition si l'on met 50 % de granulats. En revanche pour un écart de 100 km, les coûts sont semblables entre le ciment durci et le granulats naturels utilisés à des taux de 20, 25 ou 30 %.

Le transport du granulats verre recyclé, revient plus cher car il en faut plus pour construire le poteau. Il est donc intéressant d'utiliser sur place, à condition qu'il n'y ait pas de granulats naturels dans un rayon de 300 km.

3.8 Conclusion générale du chapitre

Des essais ont été réalisés sur des bétons de différentes compositions (substitution totale et partielle) comportant des granulats issus du recyclage. Ces granulats recyclés sont le verre concassé, le ciment durci concassé, et le pneu usagé. Des essais de résistance en compression ont été réalisés avec des bétons contenant différents pourcentages de granulats. Le pourcentage de granulats utilisés a plus d'influence sur le béton de pneu usagé où l'on observe une forte décroissance de la résistance en compression. Les bétons de granulats naturels, de ciment durci et de verre concassés ont une résistance qui décroît faiblement avec le pourcentage de granulats. Si l'on regarde le type de granulats, on constate que le granulats naturel et le ciment durci ont des résistances sensiblement égales. Le verre donne une résistance moyenne plus faible et le béton de pneu usagé se situe bien en dessous des autres recyclats. De plus, la résistance en compression peut être modélisée à l'aide d'une loi exponentielle qui permet de tenir compte de la fraction volumique de matériau, de la densité et de la granulométrie.

Une application a été réalisée afin de comparer le coût d'usage de ces recyclats. Un poteau a donc été calculé en tenant compte des résistances des trois matériaux (le pneu usagé étant exclu en raison de sa résistance trop faible dans la réalisation des bétons de structures). Il ressort qu'à moins de baisser le prix de production de granulats recyclés (industrialisation de la collecte et de la production, ou construction dans un pays à main d'œuvre à bas coût), cette ressource est plus chère que du granulats naturel produit à moins de 200 km. Il convient donc d'améliorer le rapport performance mécanique/coût de façon à rendre ce matériau compétitif. Cependant, l'impact écologique qui n'a pas été étudié (bilan carbone par exemple) permettrait de montrer l'intérêt du recyclage de ces déchets. L'utilisation de déchets dans le béton offrira des avantages dans l'élimination des déchets et, en outre, de préserver l'environnement des dommages dus à l'utilisation des ressources naturelles comme granulats. Le chapitre suivant constitue une étape importante de l'étude: la détermination de l'influence du taux de substitution des granulats de retour de toupie sur le béton. Ces granulats sont de

plus en plus disponibles à cause de l'augmentation des chantiers de construction. Les études sur ces granulats sont peu nombreux, leur caractérisation est donc nécessaire pour mieux comprendre leur comportement ainsi que la possibilité de les utiliser dans le BTP.

Chapitre 4: Valorisation des granulats issus des bétons frais de retour de toupies

Introduction

L'industrie du béton est l'un des plus gros consommateurs de ressources naturelles et simultanément producteur de déchets. Cette utilisation intensive des ressources naturelles de sable et de gravier et la gestion de l'accumulation des déchets sont une préoccupation environnementale de grande importance. Les agrégats dans le béton comprennent environ 60 à 75 % du volume total du béton **(Paulo, 2009)**, donc toute réduction de la consommation des agrégats naturels aura des impacts significatifs sur l'environnement.

Actuellement, la gestion des déchets de bétons frais est de les stocker dans des décharges **(Vivian et Tam, 2007)**. En France, plus de 2 millions de tonnes de bétons frais (retour de toupie) sont non utilisés dans les secteurs BTP. Cette non utilisation est due à un excès du volume du béton en avant-projet de construction. Ce béton non utilisé est retourné aux centrales pour être stocké et ensuite utilisé dans les travaux publics routiers. Le recyclage des déchets de béton frais comme substitut est l'une des meilleures options pour diminuer la consommation des matières premières naturelles, la réduction des décharges sauvages donc favorable à la sauvegarde de l'environnement.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la possibilité d'utiliser les déchets de béton frais comme granulats dans le béton en substitution d'une fraction massique du sable, de gravier ou les deux ensembles et d'analyser les comportements des nouveaux bétons obtenus à l'état frais ainsi qu'à l'état durci en les comparant à ceux d'un béton composé de granulats ordinaires (témoin).

La méthode de formulation de «Dreux-Gorisse» a été utilisée pour fabriquer sept compositions qui ont été testées avec le CEM II 32,5 R. Ces compositions ont été établies en vue d'obtenir un C25/30.

Nous présenterons dans ce chapitre les sept compositions des bétons testés ainsi que leurs propriétés à l'état frais (affaissement et consommation d'eau) et durci (résistance à la compression, résistance à la traction et la flexion, module d'élasticité dynamique, porosité, absorption et densité).

4 Plan expérimental

4.1 Matériaux

4.1.1 Granulats

Les granulats sont issus des bétons frais après retour des toupies en centrales (bétons non utilisés). Ces bétons non utilisés sont ensuite stockés et concassés après durcissement pour constituer des granulats concassés. La classe des granulats utilisés dans notre étude est la classe 0/10. Ces granulats ont été séparés en deux classes: 0/5 pour remplacer le sable (SR) et 5/10 utilisés pour remplacer le gravier (GR). Les granulats naturels utilisés en combinaison avec les granulats recyclés sont composés de sable 0/5 roulés des rivières Girondines (SNG) et un gravier 5/10 de même nature (GNG). Les propriétés physiques essentielles sont présentées dans le Tableau 4.1. On note une forte absorption d'eau des granulats recyclés notamment le sable qui est constitué en grande partie de mortier de l'ancien béton.

Tableau 4.1. Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques	Sable naturel	Sable recyclé	Gravier naturel	Gravier recyclé
d/D (mm)	0/5	0/5	5/10	5/10
Finesse (%)	2,2	3,2	-	-
Densité	2,7	2,4	2,6	2,6
Absorption d'eau	1,6	13	1,5	4,3

Les résultats de différentes analyses granulométriques effectués sur ces granulats sont illustrés par la figure 4.1. Cette analyse permet de déterminer les classes granulaires et les modules de finesse qui sont présentés dans le tableau 4.1. Elle permet également de calculer les proportions des granulats pour le béton témoin. Sur ce tableau, le module de finesse du sable recyclé qui est de l'ordre de 3,2 est plus fort que celui du sable naturel. Le sable recyclé est donc plus grossier ce qui peut avoir un effet négatif sur l'ouvrabilité des bétons constitués base de ces granulats.

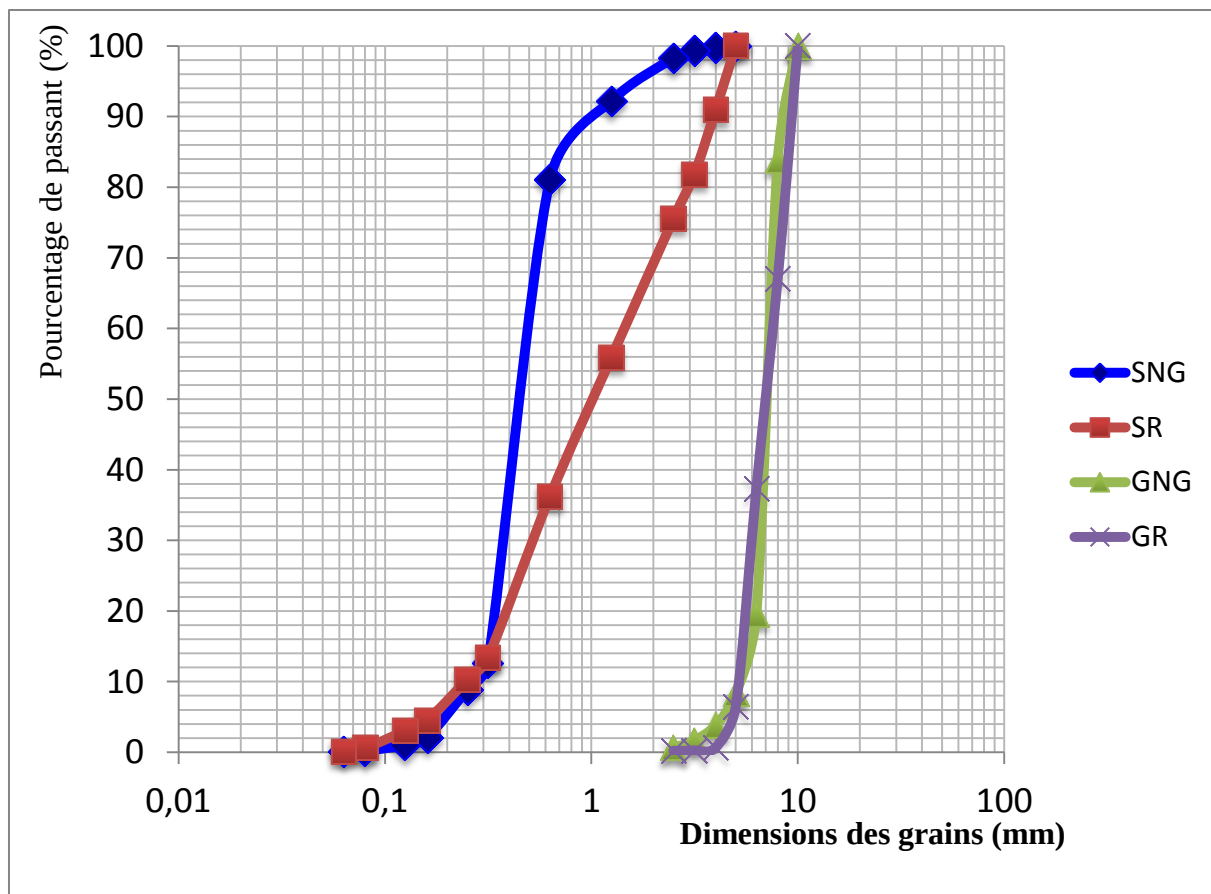


Figure 4.1: Courbe de l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés

4.1.2 Ciment

Le ciment Portland utilisé est de classe et type CEMII/32,5 R CE NF de chez Calcia Bussac sac de 35 kg. Il répond à la norme française NF P 15-317. La composition chimique du ciment est résumée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Composition chimique (valeurs moyenne en %)

65 %< Clinker < 94			
%	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S
%	8,9	74,8	3,7
Eléments	SO ₃	S ⁻	Na ₂ O
%	2,7	-	0,17

4.2 Plan d'expérience

4.2.1 Méthodologie

Les bétons ont été produits après la substitution de 50 % ou 100 % de sable et de gravier naturels par les granulats recyclés selon un plan expérimental à deux variables (pourcentage de sable et gravier recyclés). Le nombre optimal des mélanges de bétons a été calculé par la méthode des plans d'expériences (2^n) avec n le nombre de facteurs: le facteur 1 (F1) est le pourcentage de gravier recyclé et le facteur 2 (F2) est le pourcentage de sable recyclé. Ce plan de 4 expériences a été utilisé une fois pour 0 et 50% de substitution et une deuxième fois pour 0 et 100 % de substitution (Fig.4.2).

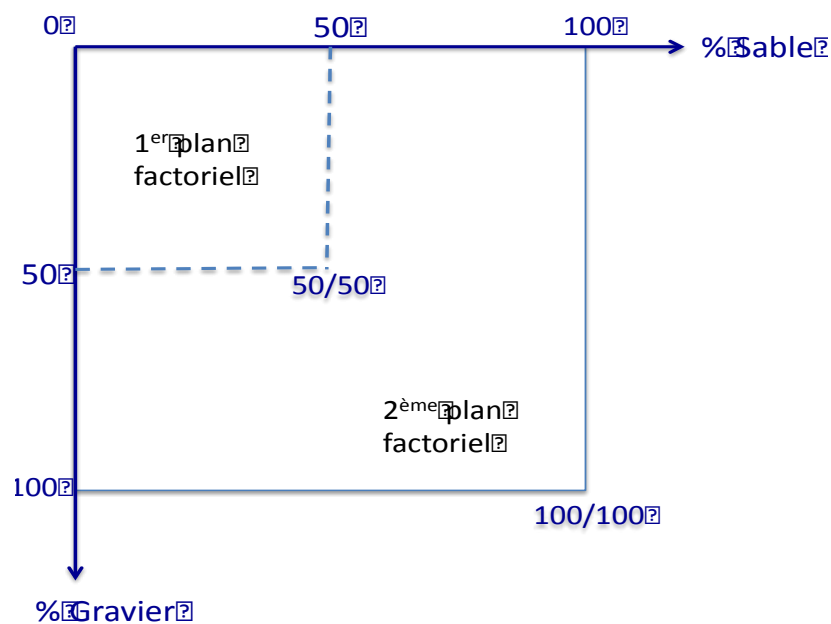


Figure 4.2: Plan factoriel des expériences

La gâchée de référence (0 % de sable recyclé, 0 % de gravier recyclé) n'a pas été prise en compte dans le second plan d'expériences puisqu'elle est déjà contenue dans le premier. Le nombre total de gâchées est donc égale à 2^2 (0-0 0-50 50-0 50-50 %) + 2^2 (0-0 0-100 100-0 100-100 %) -1 (gâchée 0-0), soit sept gâchées (voir tableau 4.3).

Tableau 4.3: Plan d'expériences

Mélanges	Désignation	F1 : sable recyclé	F2 : gravier recyclé
1	BNN	-1	-1
2	BNRNN	0	-1
3	BRN	1	-1
4	BNNNR	-1	0
5	BNRNR	0	0
6	BNR	-1	1
7	BRR	1	1

4.2.3 Composition des bétons

Le béton de référence est un béton ordinaire de résistance mécanique visée à 28 jours de 25 MPa avec une ouvrabilité plastique (classe S2 selon la norme **EN 206**). La composition des bétons recyclés est identique au béton de référence. Toutefois, pour garantir la même ouvrabilité dans le cas des bétons recyclés et à cause de l'absorption d'eau assez élevée du sable recyclé, une correction en eau a été nécessaire. En effet, différents auteurs comme (**Jose, 2002; Katz, 2003; Rao, 2005**) révèlent que l'absorption d'eau des granulats recyclés est inévitable et risque d'affecter l'ouvrabilité du béton frais. Celles-ci nécessitent une quantité d'eau supplémentaire à ouvrabilité plastique similaire aux bétons de granulats naturels. La quantité d'eau ajoutée aux bétons constitués de 100 % de granulats fins recyclés est de 78,39 L pour donner une ouvrabilité convenable. Cette quantité d'eau est plus élevée que celle ajoutée aux bétons de graviers recyclés (36,16 L). Le tableau 4.4 résume la composition des sept bétons testés.

Tableau 4.4: Compositions des différents bétons ('R' = recyclé, 'N' = non recyclé, la première lettre concerne le pourcentage de sable et la seconde celle du gravier, B signifie béton)

	BNN	BRN	BNR	BRR	BNRNR	BNRNN	BNNNR
% sable recyclé	0	100	0	100	50	50	0
% gravier recyclé	0	0	100	100	50	0	50
% total de granulats recyclés	0	50	50	100	50	25	25
Ciment (kg/m ³)	385	385	385	385	385	385	385
Sable naturel (kg/m ³)	627	-	618	-	314	313,5	627
SR (kg/m ³)	-	856	-	823	314	313,5	-
GR (kg/m ³)	-	-	1109	840	574	-	573,5
Gravier naturel (kg/m ³)	1147	860	-	-	574	1147	573,5
Eau (l)	178	178	178	178	178	178	178
Eau corrigée (l)	-	78,39	36,16	98,06	33,83	22,2	2,4
w/c	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
w/c corrigé	-	0,67	0,56	0,72	0,55	0,52	0,47

4.3 Gâchage et malaxage

La qualité de la zone de transition inter faciale entre les granulats et la pâte de ciment a une influence majeure sur les propriétés du béton. Dans le cas du béton à base de granulats recyclés, cette zone de transition est lâche. Ceci est dû à la pâte de ciment poreuse attachée aux granulats recyclés. Tam (**Tam, 2006**) a montré que la qualité de cette zone de transition peut être améliorée en variant le mode de malaxage et en adoptant un malaxage double. Le malaxage double consiste tout d'abord à mélanger le sable et les gravillons pendant une minute. Ensuite, la moitié de l'eau nécessaire est ajoutée. Le malaxage se poursuit pendant une minute, avant d'ajouter le ciment et de continuer le malaxage pendant 30 secondes. Ceci constitue la première étape. Enfin pendant la seconde étape, le reste de l'eau est ajouté et le malaxage continue pendant deux minutes.

Selon Tam (**Tam, 2006**) cette méthode de malaxage permet l'obtention d'une zone de transition inter faciale plus dense entre un granulats recyclés et la pâte de ciment, ce qui améliore la qualité du béton. En fait, durant la première étape de malaxage, une couche fine de coulis de ciment se forme sur la surface des granulats et pénètre dans l'ancienne pâte remplissant ainsi les pores et les fissures et donnant ainsi un béton recyclé de qualité meilleure.

4.4 Eprouvette : fabrication, conservation et tests

Pour chaque composition de béton, des éprouvettes cylindriques 16x32 cm, 11x22 cm et prismatique 7x7x28 cm ont été fabriquées. Le démoulage est effectué après 24 heures et les éprouvettes sont ensuite immergées totalement sous l'eau à température ambiante dans un bassin humide pour 1, 14 et 28 jours de maturation.

Les résistances mécaniques des bétons ont été mesurées aux échéances 1, 14 et 28 jours sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm² pour la compression selon la norme **NF P 18-406**, 11x22 cm² pour la traction par fendage selon la norme **NF P 18-408** et sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³ pour la traction par flexion selon la norme **NF P 18-407**. Le module d'élasticité dynamique a été mesuré par technique ultrasonore en transmission directe à 200 kHz de fréquence. La porosité accessible à l'eau ainsi que la densité ont été également mesurées selon les recommandations **AFNOR**.

4.5 Résultats

4.5.1 Comportement à l'état frais

Les caractéristiques à l'état frais des bétons se sont limitées aux essais de l'affaissement au cône d'Abrams. Pour la formulation de nos différents bétons, nous avons choisi d'avoir un béton plastique de classe S2, plus précisément 8 cm d'affaissement au cône d'Abrams pour une mise en place facile. Toute fois la maniabilité est plus faible dans le béton recyclé tel que rapporté par de nombreux auteurs, surtout lorsque les taux de remplacement sont supérieurs à 50 % (**Top and Sen, 2004**). Ainsi, pour atteindre les 8 cm, un apport d'eau supplémentaire a été effectué comme précisé dans le tableau 4.4.

Le béton avec 100 % de granulats recyclés (BRR) absorbe 98,06 L d'eau supplémentaire pour atteindre cette ouvrabilité. Les bétons de granulats fins et grossiers recyclés absorbent respectivement 78,39 L et 36,16 L. Ceci pourrait s'expliquer par la grande absorption d'eau des granulats recyclés. Cette absorption d'eau par les granulats poreux a été observée avec l'utilisation des granulats légers (granulats poreux) dans le béton (**Chan et Ber, 2002**).

Evidemment, cette augmentation de la quantité d'eau aura un impact négatif sur les propriétés des nouveaux bétons.

4.6 Propriétés mécaniques

4.6.1 Résistance à la compression

La figure 5.3 présente l'évolution de la résistance mécanique en compression pendant la cure pour le béton de référence et les bétons à base de granulats recyclés. On note un comportement similaire pour l'ensemble des bétons. Cependant, les bétons à base de granulats recyclés ont des résistances très faibles à jeune âge avec une cinétique d'hydratation plus lente. Ce qui peut être expliqué par la forte quantité d'eau de ces bétons qui ralentie le durcissement. Cette résistance à jeune âge est similaire pour l'ensemble des bétons à base de recyclât (4 MPa en moyenne) quel que soit le pourcentage de recyclât. On distingue une différence entre ces bétons en termes de résistance en compression qu'à partir de 14 jours de cure. Le modèle de l'Eurocode 2 a été utilisé pour relier la résistance en fonction de la cure (Eq 15) sur la figure 50. On montre que ce modèle est également valable pour les bétons à base de granulats recyclés. Cependant, on note un écart significatif de l'ordre de 2 MPa (50 % en relatif) à 1 jour de cure.

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times f_{cm} \quad [15]$$

avec $s = 0,25$ (Ciment CEM II 32,5 R), et t le nombre de jours de cure

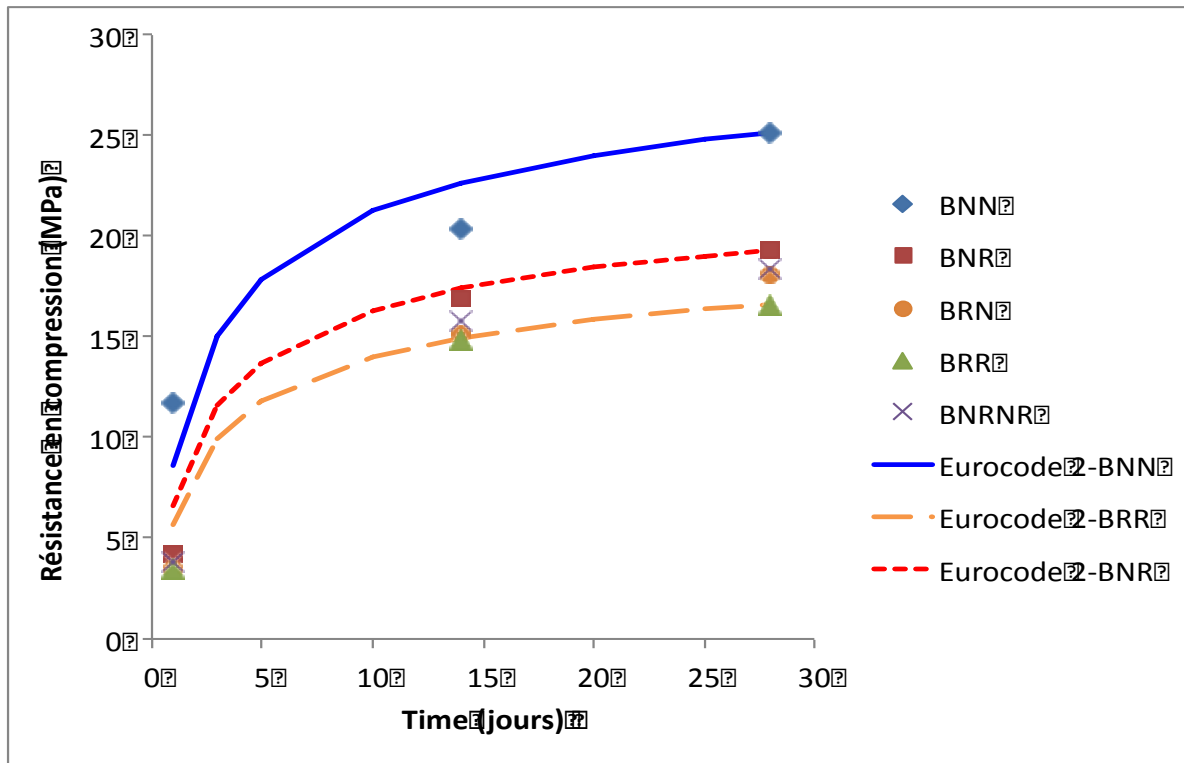


Figure 4.3: Evolution de la résistance en compression pendant la cure pour le béton de référence et les bétons de granulats recyclés

Sur la figure 4.3 le béton de granulats grossiers recyclés (BNR) a une résistance meilleure que celle du béton de granulats fins recyclés (BRN). Le béton avec 100 % de granulats recyclés (BRR) présente la plus faible performance qu'on attribue au fort taux de granulat recyclé et la forte quantité d'eau absorbée. Le BNN qui est le béton témoin a la plus forte résistance.

La relation entre la résistance en compression et le pourcentage de remplacement pour le sable recyclé, gravier recyclé et le mélange gravier plus sable est représentée par la figure 5.4. D'une part, la résistance diminue en fonction du pourcentage, d'autre part, l'écart entre les trois courbes est faible ce qui traduit un faible effet de la taille des granulats recyclés. Ainsi, il est possible d'en déduire une relation unique entre la résistance en compression et le pourcentage total de remplacement (sable et/ou gravier recyclé). Cette relation, de forme polynomiale de degré 2, est présentée sur la figure 4.5 avec un fort coefficient de détermination ($R^2 = 0,92$). Ces résultats sont en accord avec ceux présentés par **(Cor et al., 2009; Kho et al., 2012)**. Par exemple, le remplacement de 50 % des granulats (sable et gravier) par les granulats recyclés engendre une diminution de l'ordre de 24 % de la résistance mécanique à la compression du béton testé. Ceci s'explique par une forte absorption d'eau par les granulats recyclés qui est liée à une forte porosité en raison de la présence de l'ancien mortier collé aux granulats **(De Juan et Gut, 2009)**.

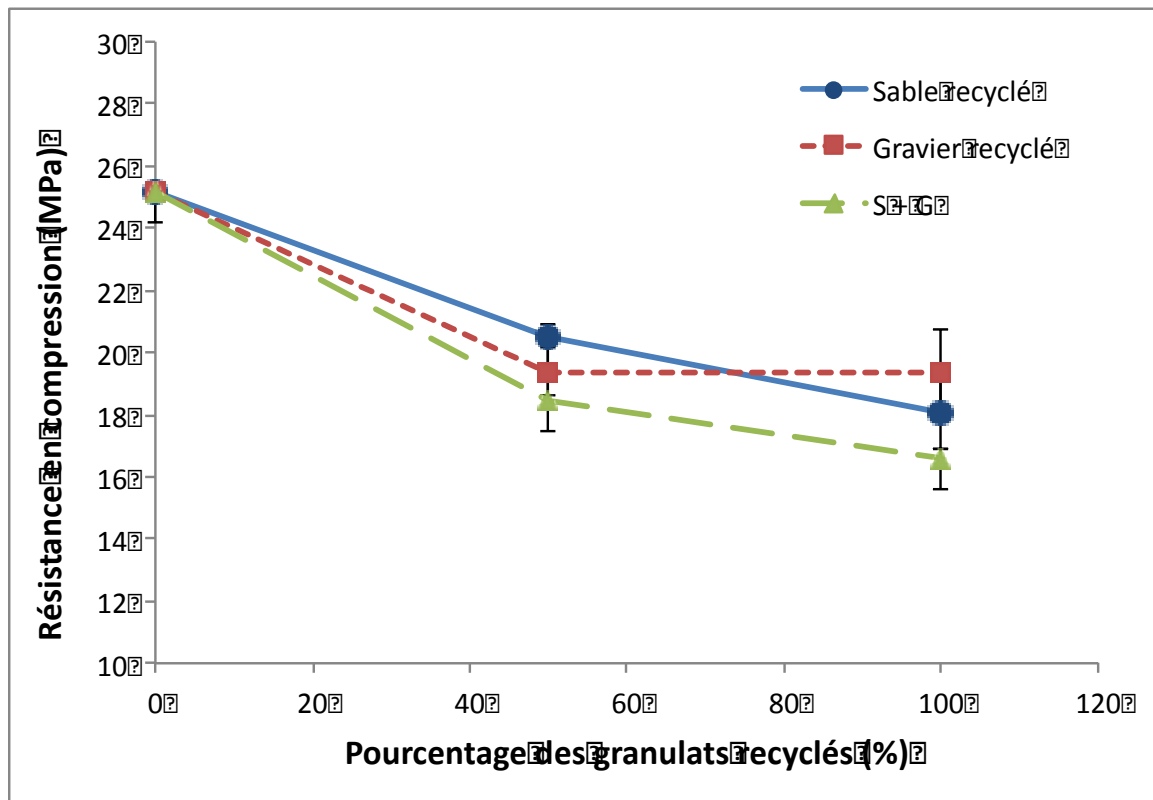


Figure 4.4: Relation entre résistance mécanique et le pourcentage total des granulats recyclés

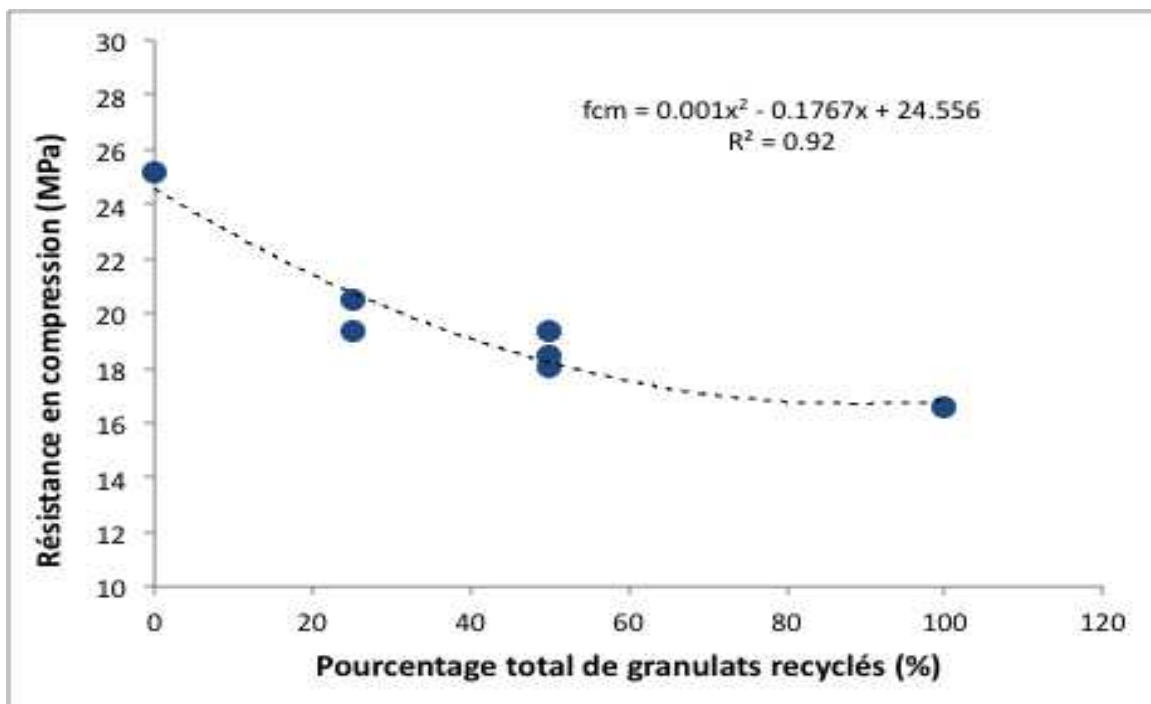


Figure 4.5: Relation entre résistance à la compression et le pourcentage total de granulats recyclés

4.6.2 Résistance à la traction par flexion et fendage

La relation entre résistance mécanique à la traction et le pourcentage de remplacement est présentée sur la figure 4.6. Sur cette figure, les mesures des deux types d'essais de flexion et de fendage sont présentées. On note une légère baisse de la contrainte de traction. Pour un taux de remplacement de 25%, la contrainte est de même ordre de grandeur que pour le béton de référence. On note également une résistance plus élevée à la flexion qu'au fendage pour des pourcentages de remplacement supérieurs à 25 %. Pour 100 % de remplacement, la résistance en traction mesurée par fendage diminue de seulement 18 %.

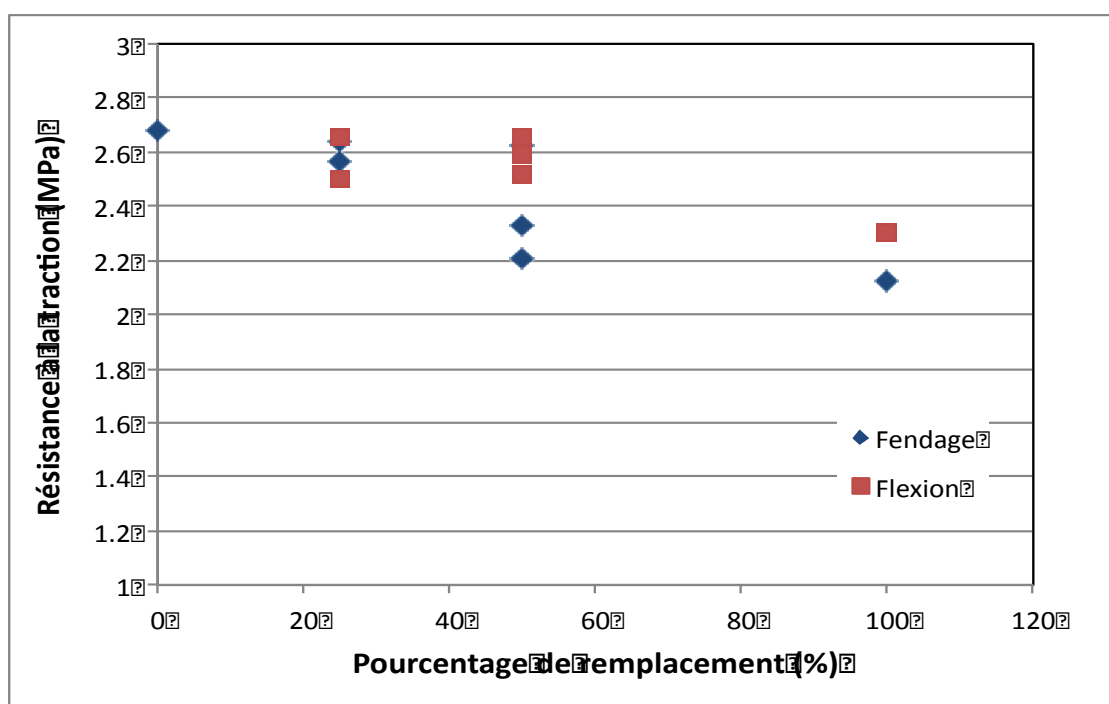


Figure 4.6: Résistance à la traction en fonction du pourcentage des granulats recyclés (mesurée par flexion et fendage)

4.6.3 Module d'élasticité dynamique

Les mesures par ondes ultrasoniques permettent de calculer une vitesse de propagation qui est corrélée théoriquement à l'élasticité des bétons exprimée par le module d'élasticité dynamique selon la relation suivante:

$$E_d = V^2 \left(\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right) \quad [16]$$

Avec V la vitesse des ondes ultrasoniques, ρ la masse volumique et ν le coefficient de poisson (rapport entre la déformation transversale et longitudinale).

La mesure ultrasonique montre une baisse du module d'élasticité dynamique du matériau en fonction du pourcentage des granulats recyclés (Figure 4.7). Le comportement est similaire à celui de la résistance mécanique en compression. La relation est quasiment linéaire et la baisse du module est de l'ordre de 34 % et 21 % pour un taux de remplacement total de 100 % et 50 %.

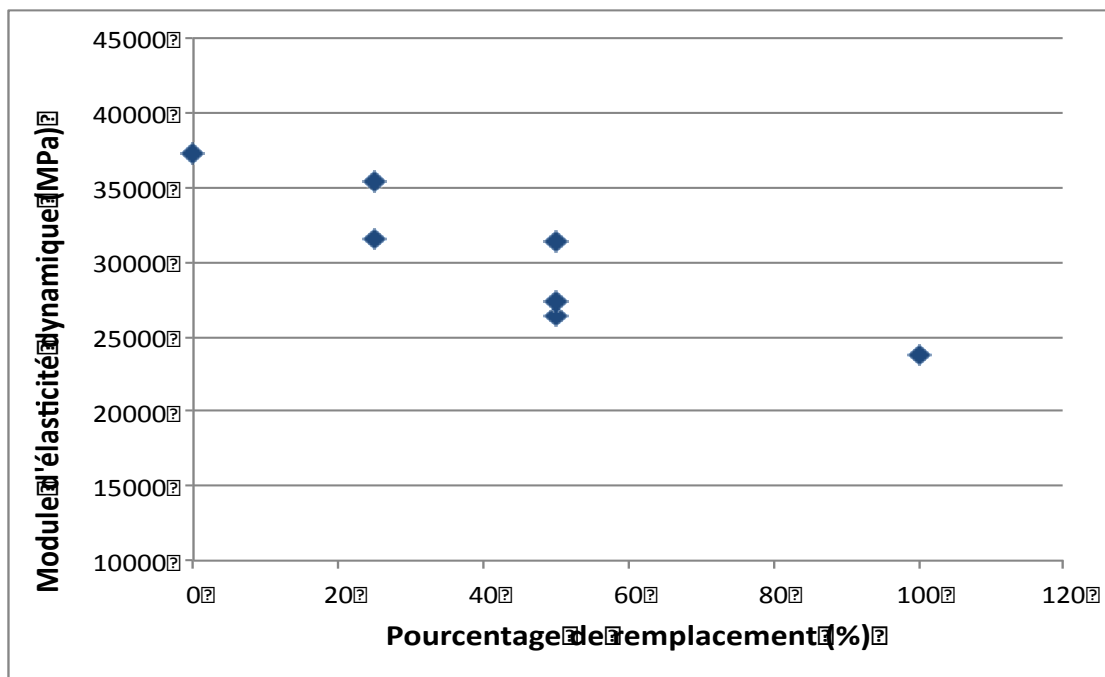


Figure 4.7: Module d'élasticité dynamique en fonction du pourcentage des granulats recyclés.

4.7 Propriétés physiques

4.7.1 Porosité

La figure 4.8 montre la variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés. Cette porosité a été mesurée selon les recommandations de l'**AFPC-AFREM**. Sur cette figure, on note une augmentation de la porosité en fonction du pourcentage de remplacement jusqu'à 26,3 % pour 100% de remplacement des granulats. Selon (**Kon et al., 2010**) cette forte porosité provient du mortier collé au granulats et en plus forte proportion au sable. Ces résultats montrent que la porosité dépend également de la classe des granulats recyclés. En effet, la porosité des bétons avec graviers recyclés est plus faible

que celle des bétons avec sable recyclé. Cela est dû à la porosité du sable recyclé qui est très forte puisqu'elle est constituée principalement du mortier de l'ancien béton. Par exemple, pour un même taux de remplacement de 50%, cette différence augmente de 17% à 20% et de 19,5 % à 24,3 % dans le cas d'un taux de 100 % de substitution. Le plan expérimental a permis de tracer la surface de réponse de la porosité (Fig.4.9) en fonction du taux de substitution du sable et du gravier selon un modèle empirique bi-linéaire (Eq.17).

$$\text{Porosité} = 0,0342 (G) + 0,0845 (S) + 15,797 \quad [17]$$

G et S représentent, respectivement le taux de substitution du gravier et le taux de substitution du sable

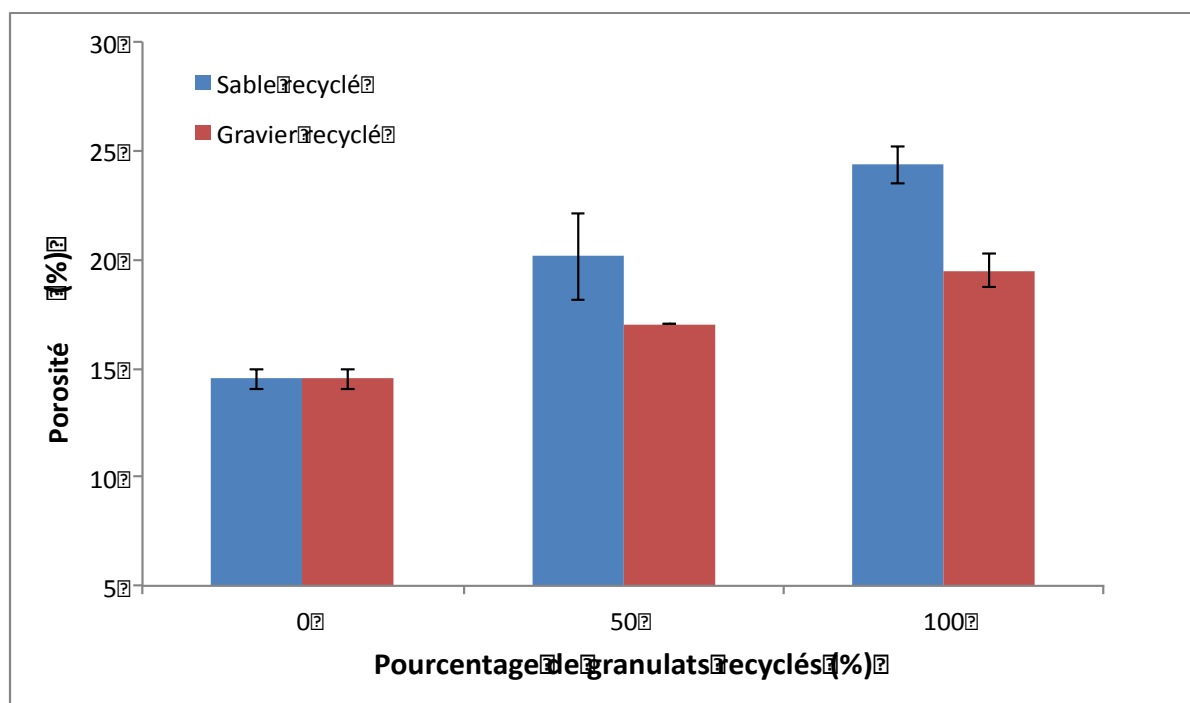


Figure 4.8: Porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés

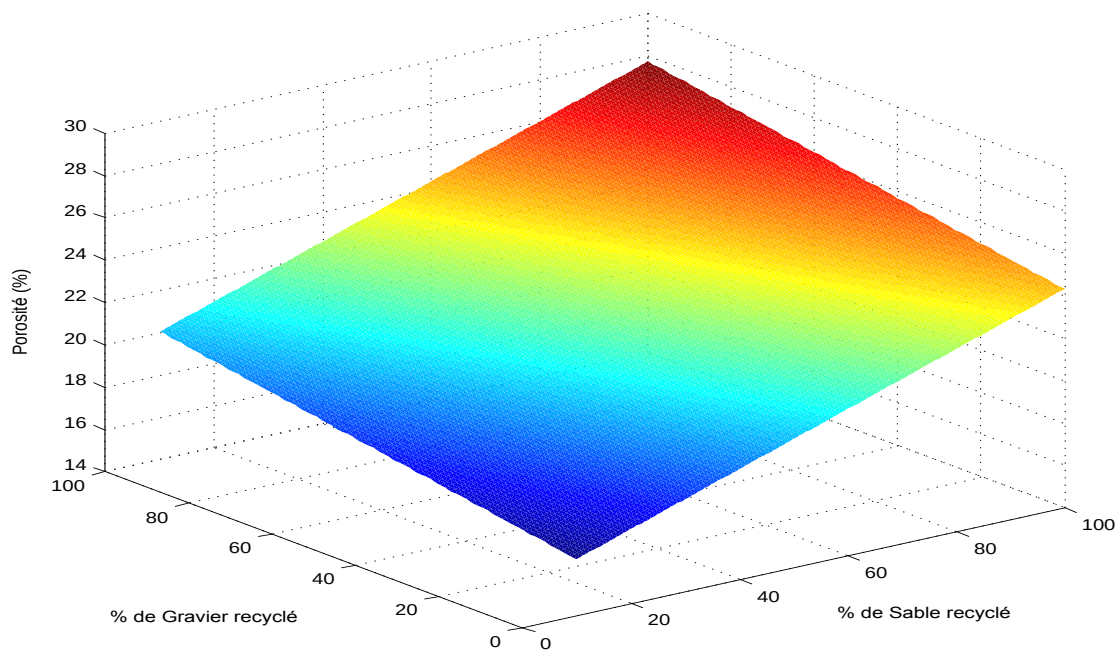


Figure 4.9: Surface de réponse de la porosité en fonction du pourcentage de sable et gravier recyclés

4.7.2 Absorption

De nombreuses recherches montrent que l'eau est un des constituants les plus sensibles affectant les propriétés du béton. Ceci est confirmé physiquement par plusieurs rôles importants joués par l'eau: l'hydratation des grains de ciment, plasticité du béton à l'état frais et cohésion interne du béton frais (**De Lar, 2000**), (**Cha et al., 2001**). L'excès d'eau dans le béton peut s'accompagner d'effets secondaires préjudiciables à la qualité du béton. Ce qui s'observe au niveau du BRR, la quantité d'eau utilisée pour l'hydratation est en excès et sa résistance à la compression est faible. Selon (**Han et Nar, 1983**), les granulats recyclés de béton continuent d'absorber de l'eau même après malaxage. Ainsi, la qualité moindre de notre béton recyclé ne serait donc pas seulement liée à la quantité d'eau utilisée. Cette qualité moindre peut être aussi attribuée à la résistance moindre des granulats recyclés et à la qualité des zones d'interfaces (**Rav et Tam, 1985**) (**Bai et Col, 1993**). On montre sur la figure 4.10 la variation de l'absorption des différents bétons en fonction du temps de maturation. Sur cette figure, l'influence de la taille et la quantité des grains sur l'absorption du béton sont significatives. Le BRR absorbe plus que le BNR et BRN, il contient une grande quantité de granulats recyclés que les autres. De plus, le béton de granulats fins recyclés (BRN) absorbe plus (256,39L) que le béton de granulats grossiers recyclés (BNR) (214.16 L). Les granulats

fins possèdent une surface spécifique plus élevée. Donc, plus le granulat recyclé est fin, plus la quantité d'eau adsorbée à sa surface par unité de volume sera grande. De plus, la nature des granulats fins (ancien mortier) accentue cet effet d'absorption des bétons recyclés. Pour mieux visualiser les effets, nous avons représentés les résultats de l'absorption en fonction du pourcentage de remplacement pour les bétons avec gravier recyclé, sable recyclé, ainsi que le mélange sable plus gravier recyclés sur la figure 4.11. Sur cette figure, il est clair que l'utilisation du sable recyclé impacte de façon plus significative l'absorption du nouveau béton. D'autre part, il apparaît que le remplacement de 50 % de gravier recyclé sans le remplacement du sable n'a aucun effet sur ce paramètre physique.

Ainsi, il est important de noter que la grande quantité d'eau ajoutée dans le béton augmente la porosité et l'absorption. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton vis-à-vis des agressions physico-chimiques. Cependant, il apparaît que le remplacement du sable a un impact plus fort sur la durabilité des nouveaux bétons en ce qui concerne la porosité et l'absorption d'eau.

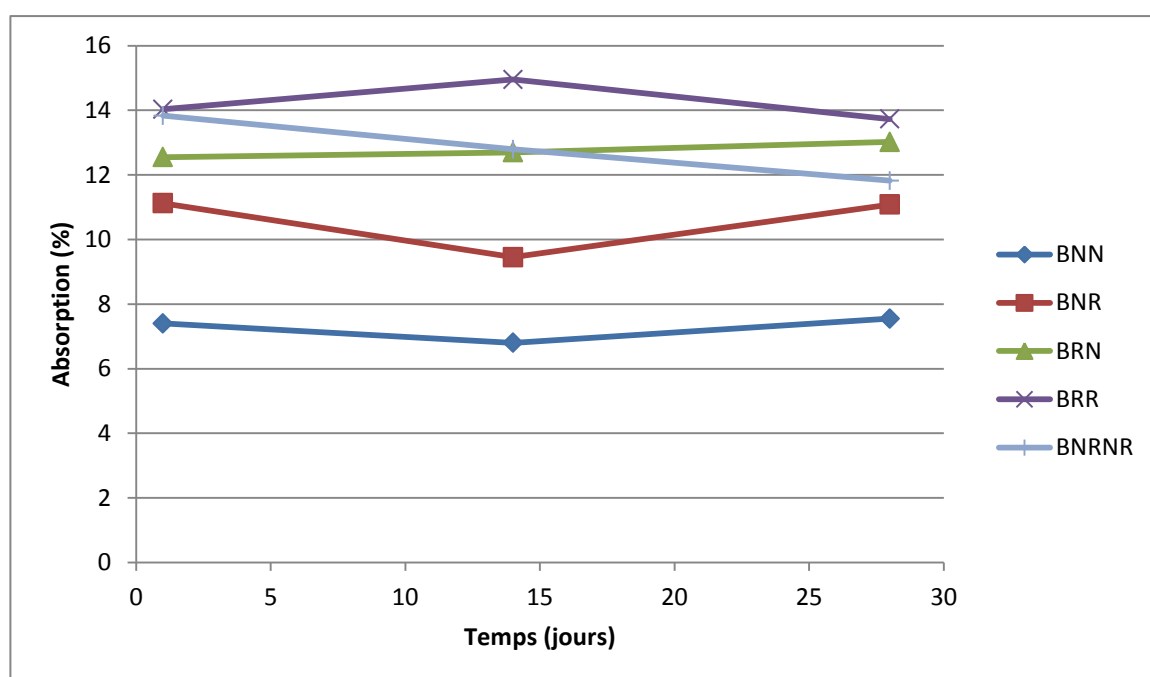


Figure 4.10: Absorption des bétons en fonction du temps

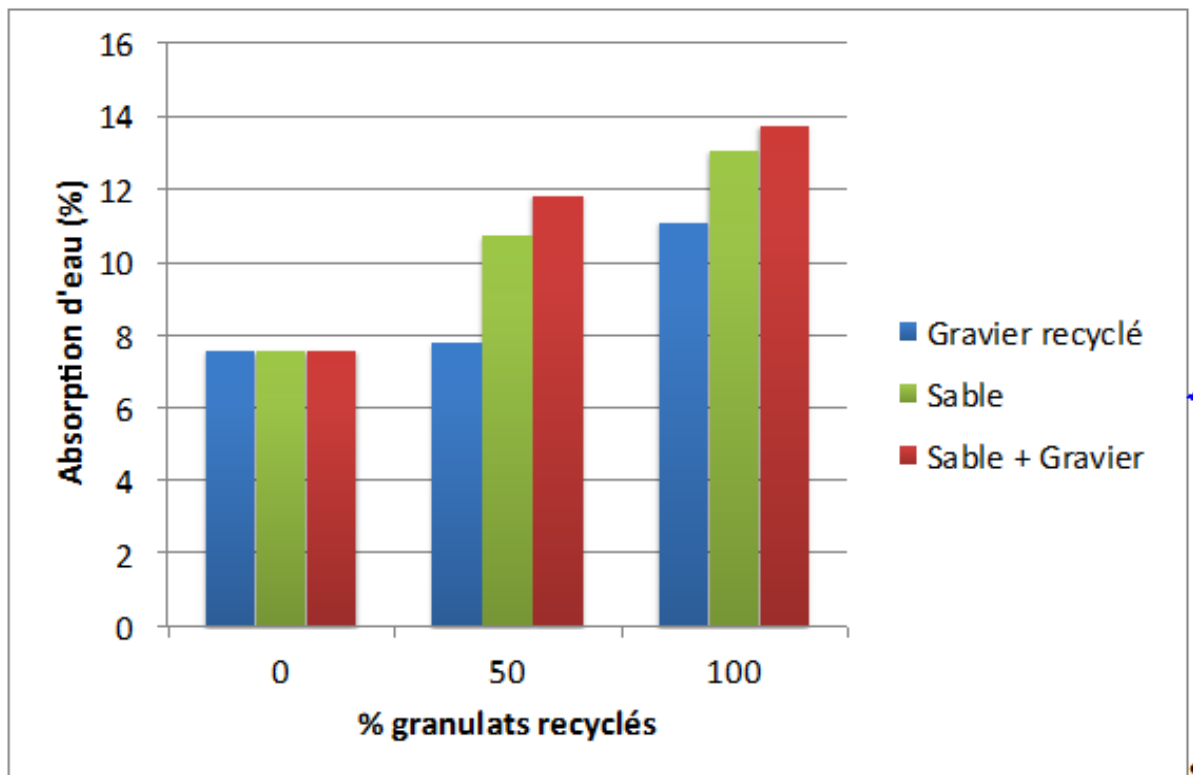


Figure 4.11: Absorption des bétons en fonction du pourcentage de remplacement à 28 jours de maturation

4.7.3 Densité

La figure 4.12 présente la variation de la densité des différents bétons en fonction du pourcentage de remplacement. Le béton de granulat fin recyclé a généralement une faible densité et un taux d'absorption d'eau plus élevé que le béton de granulat grossier recyclé et naturel. Cela peut affecter le temps de séchage et de rétrécissement dans le nouveau béton. Ces effets augmentent avec un pourcentage plus élevé de granulats recyclés. La figure montre également une baisse générale de la densité du béton avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés. Le béton avec 100 % de granulats recyclés (S+G) est le plus affecté suivi du béton de granulats fins recyclés. Toute fois, la fraction fine influence considérablement la densité du béton.

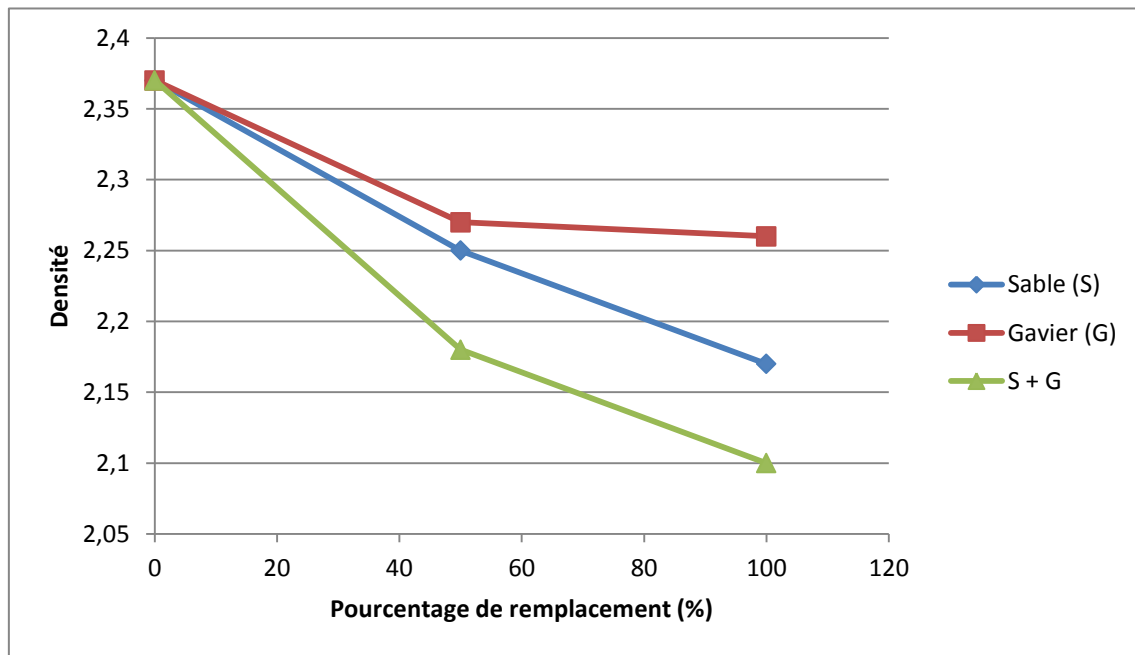


Figure 4.12: Densité des bétons en fonction du pourcentage de remplacement

4.8 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de retour de toupie. Ce déchet est intéressant puisqu'il est propre et nécessite qu'un concassage après stockage et séchage. A la suite de cette substitution, nous avons obtenu un béton recyclé avec des propriétés réduites en comparaison avec celles du béton de référence. Les conclusions de cette étude sont les suivantes:

- l'absorption en eau est de l'ordre de 13 % pour le sable recyclé et de 4,3 % pour le gravier recyclé. Ce fort taux d'absorption des granulats recyclés complique la mise en œuvre et pourrait compromettre la durabilité du béton recyclé. Un ajout d'eau ou de plastifiant est nécessaire.
- à l'état frais, le maintien d'une consistance plastique s'accompagne d'une augmentation de l'eau de gâchage et un rapport eau-ciment élevé. Cette augmentation de la quantité d'eau est une faiblesse puisqu'elle participe à la réduction de la résistance de ces bétons.
- au niveau des résistances mécaniques, une forte diminution de la résistance à la compression à 50 % de substitution et une légère réduction pour la résistance en flexion et au fendage.

- les résultats mécaniques montrent un faible effet de la classe des granulats. En effet, cette différence est inférieure à la variabilité de la résistance mécanique dans la même gâchée.
- le module d'élasticité dynamique mesuré par méthode ultrasonique présente un comportement similaire à celui de la résistance mécanique en compression, en l'occurrence une réduction en fonction du taux de substitution.
- au niveau de la porosité accessible à l'eau, une forte augmentation de cette propriété est constatée avec l'augmentation de la proportion de granulats recyclés. Cela est dû à la forte absorption d'eau des granulats recyclés qui induit un rajout d'une forte quantité d'eau pour garantir une plasticité acceptable. De plus, cela est lié à la présence de l'ancien mortier sur la surface de ces granulats.

On peut donc retenir à la suite des propriétés mesurées sur les bétons étudiés une utilisation possible des granulats recyclés à des pourcentages de substitution inférieure à 50 % pour garantir des propriétés acceptables dans des applications d'éléments préfabriqués (pavés de chaussées, blocs de béton, etc.). L'utilisation d'un plastifiant pourrait améliorer l'ouvrabilité de ces bétons sans augmentation de la quantité d'eau en limitant ainsi la baisse de ses performances. Enfin, en perspectives de cette étude, l'imagerie électrique à balayage sur la zone de transition pourrait nous permettre de mieux comprendre la baisse des performances de ces bétons. D'autre part, il est intéressant d'évaluer la répétabilité de ces mesures car la qualité de ces granulats recyclés peut être variable selon leur origine. Enfin, une étude approfondie des indicateurs de durabilité (profondeur de carbonatation, coefficient de diffusion) est nécessaire ainsi qu'une analyse de son comportement vis-à-vis du retrait et du fluage.

CONCLUSION GENERALE

D'une manière générale, cette étude a mis en évidence que la substitution des granulats naturels par des concassés de ciment durci, de verre, de pneu découpé et de retour de toupie engendrait des différences importantes dans les propriétés du béton, avec toutes les conséquences sur sa durabilité.

➤ Pneu

L'ensemble des essais réalisés montre sans équivoque que l'incorporation des granulats de caoutchouc est très préjudiciable vis-à-vis des résistances à la compression. Ces résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du dosage de substitution en G.C. Nous avons expliqué cette chute de la résistance par une faible adhérence des G.C avec la matrice cimentaire.

Malgré la chute de la résistance, le béton de G.C sous la contrainte laisse apparaître difficilement les fissures. Les fissures qui représentent le principal handicap des matériaux cimentaires (béton). L'amélioration de cette capacité par les G.C, nous amène à dire que dès qu'une microfissure débouche sur un G.C il se produit une redistribution des contraintes en défaveur de la propagation. Dans ce sens, on peut considérer que les G.C absorbent l'énergie accompagnant la propagation et se comportent comme des stoppeurs de fissures. Ils constituent des sites de relaxation des contraintes.

➤ Verre

L'utilisation dans le béton des granulats de verre 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 intéressé à l'influence des granulats 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.

Nous avons aussi évalué les effets combinés des granulats de caoutchouc et granulats naturels ainsi que granulats verre et granulats naturels dans le béton. Dans tous les cas, par rapport aux résultats obtenus sur des éprouvettes, nous avons observé une baisse des résistances en compression avec l'augmentation de la proportion des granulats recyclés.

➤ Ciment durci

Le concassé de ciment durci ayant des caractéristiques voisines à celles du concassé de granite, le comportement des bétons de ces granulats suit la même tendance. C'est-à-dire, une résistance à la compression voisine.

Toutefois, le ciment durci est un déchet qui doit disparaître à cause du coût de production et le prix d'achat du ciment. Sa fabrication est accompagnée d'un dégagement de CO₂ très nocif pour l'environnement.

➤ Modélisation analytique

La résistance à la compression a été modélisée à l'aide d'une loi exponentielle qui permet de tenir compte de la fraction volumique de matériau, de la densité et de la granulométrie. La granulométrie a été modélisée par une loi de Weibull et les coefficients ont été ajustés. Les résultats montrent une bonne concordance entre les résistances estimées et les résistances mesurées. Cependant, un approfondissement d'une telle loi serait nécessaire en utilisant d'autres matériaux de densité et de module d'Young intermédiaires entre les caractéristiques du pneu et les caractéristiques du ciment durci, ainsi que plusieurs granulométries par matériau.

➤ Retour de toupie

Le retour de toupie est un granulat de déchets de production de l'industrie du béton. Ces débris de béton résultent du nettoyage des installations de fabrication, des excédents de commande et du transport du béton frais.

On constate que les granulats de retours de toupie ont des caractéristiques physiques proches de celles des granulats de déchets de démolition. Leur masse volumique réelle est plus faible et leur absorption d'eau beaucoup plus forte que celle des granulats alluvionnaires. Les résistances mécaniques diminuent et la porosité augmente. De plus, la substitution du sable influe plus fortement sur les propriétés physiques que la substitution du gravier.

En conclusion, la résistance en compression de tous ces bétons recyclés baisse avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés. Cependant, la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés partiellement ou en totalité dans un béton offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser les matériaux et les carrières. Elle offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets pour préserver l'environnement.

Ainsi, le recyclage de ce type de déchets peut procurer des économies sur plusieurs points :

- des économies monétaires car si on réutilise ces matériaux, on évite les coûts pour en disposer dans le cas où la collecte est organisée et proche de la zone de fabrication des nouveaux bétons;
- des économies sur le transport dans la mesure où on est capable de traiter les matériaux sur place ; par exemple, si on reconstruit une chaussée en béton de ciment, on peut, s'il s'agit de travaux d'envergure, amener les unités de concassage sur le site et concasser les matériaux sur place ;
- socialement, il est aussi souhaitable d'économiser nos ressources non renouvelables de granulats naturels en réutilisant dans la mesure du possible ce type de résidus.

PERSPECTIVES

En perspective de ce travail, il est important de compléter cette étude par :

- L'analyse du comportement de ces bétons vis-à-vis du retrait et du fluage ;
- La durabilité de ces bétons recyclés est à analyser comme la carbonatation et le coefficient de diffusion des chlorures ;
- Etude environnementale comme le bilan carbone ;
- Analyse de prix ;
- Une optimisation multi-objective pour évaluer le type, la taille et la proportion optimale des granulats en fonction de l'ouvrage étudié et sa zone de construction.

Bibliographie

AFNOR – NF P 11- 300 (1992). Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

AFNOR – NF EN 1744 – 1 (2010). Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats.

AFNOR – NF P 933 – 11 (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés.

AFNOR – NF P 13285 (2010). Graves non traités – spécifications.

AFNOR – XP P 18- 545 (2008). Granulats – Eléments de définition, conformité et codification.

AFNOR NF P 18-416. (1984). Béton : surfacage au soufre des éprouvettes cylindriques, Nouveau guide du béton et ces constituants. 404 p.

Abbas A. Carcassès M. Ollivier J.P (2009). The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research, 52 (1).

Abrams D.A. (1952) « Scientific method of making concrete » Chemistry and Industry p42. Cité dans **(Franck, 2007)**

AFPC AFREM (2004). Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Document scientifique et technique AFGC. Cité dans **(Franck, 2007).**

Aïtcin J.C. Rougemon P. (1994). Optimization of the composition of high performance concrete. Cem con Agg (16), pp115-124. Cité dans **(Franck, 2007)**

Albano C., Camacho N., Reyes J., Feliu J.L. and Hernández M. (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites : Destructive and non-destructive testing. Composite Structures 71, 439–446. Cité dans **(Ho, 2010)**

Ali NA., Amos AD., Roberts M (1993). Use of ground rubber tires in Portland cement concrete. In: Dhir RK, editor. Proceedings of the international conference on concrete 2000. Scotland (UK): University of Dundee. p. 379–90.

Ameur E.A.H. (2009). Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de Doctorat de l'Université de la Rochelle. Pp.9-52.

Anh HO. M. C. (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse. Génie Civil. 9p.

Assié S. (2004) « La durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de doctorat de l'INSA Toulouse. Cité dans **(Franck, 2007)**

Babilotte C, Camporota P, Faure M, Lourdaux H, Mouton Y, Nouvier J, Robin Y, Chatard D (1998). Cours de routes. Cité dans **(Virginie, 2007).**

Bairagi N.K., Ravande, K., Pareek, V.K. (1993). Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. Resources conservation and recycling, vol. 9, pp. 108-126.

Baron J, Lessage (1976) : « La composition des bétons hydrauliques : du laboratoire au chantier »; Rapport de recherche des LCPC (64). Cité dans **(Franck, 2007).**

Baron, J. et Ollivier, J.-P (1992). La durabilité des bétons, Collection de l'Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris. Cité dans **(Thai, 2009)**

Baron J, Ollivier JP (1996) « Les bétons : Bases et données pour leur formulation » ; Ecole française du béton, ATIIH, Edition Eyrolles. Cité dans **(Franck, 2007).**

Batayneh, M., Marie, I. et ASI, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, vol. 27, n°.12, p.1870-1876. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Bazant, Z, K, P., ZI, G et Meyer, C. (2000). Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, Journal of Engineering Mechanics, mars, p.226-232. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Benazzouk A., Douzane O. and Quéneudec M (2004). Transport of fluids in cement–rubber composites. Cement & Concrete Composites 26, 21–29. Cité dans **(Ho, 2010)**

Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieur A., Queneudec M. (2003). "Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates". Cement & Concrete composites, vol.25, p.711-720

Benazzouk A., Queneudec M (2002). "Durability of cement-rubber composites under freeze thaw cycles". Proceeding of International congress of sustainable concrete construction, Dundee-Scotland, p.355-362

Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J. M., and Quéneudec, M. (2007). Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes - Cement and Concrete Composites - Vol. 29 - Numéro 10 - pp. 732-740

Berredjem L, Arabi N (2009). Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : formulation et caractérisation d'un béton a base de ces recycles. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October, pp. 12-14.

Bernier G (2004). Formulation des bétons. Techniques de l'ingénieur, base : Structure et gros œuvre, dossier C2210. Cité dans **(Ameur, 2009).**

Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R (2004). Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, WILEY-VCH, ISBN: 3527308008, 3-19. Cite dans **(Ameur, 2009).**

BETON DE HAUTE PERFORMANCE (2009):
http://fr.wikipedia.org/wiki/Béton_hautes_performances-48k

BETON A POUDRES REACTIVES (2009): [http : //rdereel.free.fr/volBQ2.htm/-45k](http://rdereel.free.fr/volBQ2.htm/-45k)

Biel T.D. and Lee H (1996). Magnesium oxychloride cement concrete with recycled. Transportation Research Record No. 1561, pp. 6-12. Cité dans **(Garros, 2007)**

Bignozzi M.C., Sandrolini F (2006). Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. Cement and Concrete Research 36. pp 735–739

Bolomey J.C. (1925) « Durcissement des mortiers et bétons » Paris :Rouge et Cie, 1925. Cité dans **(Franck, 2007)**

Bonnet S, Turatsinze A et Granju J-L (2004). Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment, Annales du bâtiment et des travaux publics.N° 6.

Bouzoubaa, B; and Fournier B (2003). Current sifiaation of SCMs in Canada. Materials technology Laboratory. Report MTL.

Bresson J (1999). Etude du recyclage des déchets inertes de l'industrie du béton. Rapport technique RT 054 – CERIB. Cité dans **(Raphaël, 2003)**

Brochti, J. et Mehta, K.P. (1978). Test methods for determining potential alkali-silica reactivity in cements, Cement and concrete research, vol.8, n°2, p.191-199. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Brunori C., Cremisini P., Massanisso V., Pinto and Torricelli L (2005). Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility, J. Hazard. Mater. 117 p. 55– 63. Cité dans **(Shkelzen, 10)**

Burlion N., Rougelot T., Bernard D., Skoczylas F (2007). Apport de la microtomographie pour l'étude de la fissuration des matériaux cimentaires sous lixiviation. 25èmes Rencontres de l'AUGC, 23-25, Bordeaux.

Byars, E., Zhu, H. et Morales, B. (2004). Conglasscrete, the Waste and Resources Action Programme, Mars. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Calibé (2004). Projet National Calibé. Résultats et recommandation du Projet national CALIBE: La maitrise de la qualité des bétons. Presses de ENPC, pp111-137.

Caquot A. (1937) Le rôle des matériaux dans le béton. Mémoires de la Société des ingénieurs Civils de France p. 562-582. Cité dans **(Noureddine, 1996).**

Chandra S., Berntsson L (2002). Lightweight Aggregate Concrete, Noyes. Publications, 406P.

Charonnat Y., Benichou E., Darcel M., Geoffray J. M., Gonzalez J. C., Launaire Y (2001). « Maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique », Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Guide technique, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris.

Charlot-Valdieu C. (1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB. Cité dans **(Raphaël, 2003)**

Chaki S, Bourse G (2006). «Ultrasonic stress measurement». Application to bolt tightening and prestressed steel stands monitoring. Ecole des Mines de Douai, department technologies des polymers et composites et ingénierie mécanique (TPC et IM). Cité dans **(Toukal, 2010)**

Chen, C.H., Huang, R. Wu, J.K et Yang, C.C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, Cement and Concrete Research, vol. 36, n°3, p.449-456. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Cimpelli C. et Lefort M (1996). Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclé UNICEM. Île de France. Cité dans **(Raphaël, 2003)**

Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G. et Montenero, A. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars, Waste Management, vol.25, p.197-201. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Correia S., Souza F., Dienstmann G., Segadaes AM. (2009). Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments, Waste Management, 29, pp. 2886-2891

Davis, C.E.S. (1951). Studies in cement-aggregate reaction. XVIII. Effect of soda content and of cooling rate of Portland cement clinker on its reaction with opal in mortar, Australian Journal of Applied Science, n°2, p.123-31. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Debieb, Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cement and Concrete Composites- Vol 32 (6).

De Larrard F. (2000. « Structures granulaires et formation des bétons » Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA34, Paris.

De Juan M. S & Gutiérrez P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, 23[2] 872-877.

Diamond, S. et Thaulow, N. (1974). Expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate, Cement and Concrete Research, vol.4, n°4, p.591-607. Cité dans **(Rachida, 09)**

Doye, I, Duchesne, J (2003). Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial résidus : laboratory investigation using batch - leaching tests. Applied geochemistry. (18) 1197.Cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Dreux (1995). Nouveau guide du béton. Eyrolles, 1995.

Dreux G. (1986). Nouveaux guide du béton, Eyrolles, 5^{ème} Edition, Paris. Cité dans **(Ameur, 2009).**

G. Dreux (1981). “Nouveau guide du béton”, Editions Eyrolles, Paris, France.

Dreux G. et Gorisse F (1969). Contribution à l’étude de la finesse des sables sur diverses qualités des bétons, annales I. T. B. T. P. n° 261. 41 p.

Dreux gorisse (1970). « Guide pratique du béton », Collection de l’ITBTP. Cité dans **(Nanthilde, 2009).**

Dreux G. (1964). Contribution à l’étude de l’influence de la propriété du sable sur diverses qualités du béton, annales I. T. B. T. P. n° 198. 37 p.

Dyer, T. D. et Dhir, R. K. (2001). Chemical reactions of glass cullet used as cement component, journal of materials in civil engineering, novembre/decembre, p.412-417. Cité dans **(Rachida, 2009)**

El Barak M. (2005) « Contribution à l’étude de l’aptitude à l’écoulement des bétons autoplaçant à l’état frais », Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier de Toulouse 3. Cité dans **(Franck, 2007)**

Eldin ,N.N. and Senouci A.B (1993). Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates. Volume 15, Issue 1. Cité dans **(Garros, 2007)**

Eldin N.N., Senouci A.B (1993)."Rubber tire particles as concrete aggregate". Journal of Materiel in civil Engineering, vol.5, N°4, p.478-496

Fattuhi N.I., Clark L.A (1996). Cement based materials containing shreddedscrap truck tyre rubber, Constr. Build. Mater. 10 (4) 229–236. Cité dans **(Bignozzi et Sandrolini, 2006)**

Faury J. (1944) « Les bétons : Influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers », Hachettes. Cité dans **(Franck, 2007)**

Fedroff D., Ahmad S., and Savas B. Z.(1996) Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Board, No. 1532, pp.66-72, 1996.

Feldman R. F., Sereda P. J (1968). “The model for hydrated portland cement as deduced from sorption-length change and mechanical properties”, Materials and Construction, 1, p. 509 – 520. Cité dans **(Nanthilde, 2009)**

Féret R. (1892). Sur la compacité des mortiers hydrauliques; Annales de Ponts et chaussées (4). Cité dans **(Franck, 2007)**

Fernando, P. T., Castro Gomes, J. P., Said, J (2008). Adhesion characterization of tungstenmine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. Construction and Bulding Materials 22(3), 154-161.

Franck, C. (2007). Produits préfabriqués en béton file: Vers l’amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production. DOCTORAT, Université de Toulouse III, 287 p.

Fookes, P.G., Pollock, D.J. et Kay. E.A (1981). Middle East concrete, II Rates of deterioration, Concrete, London, vol.9, n°15, p.12-19. Cité dans **(Rachida, 09)**

Fournier M. et Geoffray J.M. (1978). Pozzolan-lime binder, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°93, p.70-78. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Frédéric P (2000). Caractérisation des granulats recyclés fabriqués avec du béton de ciment et des enrobés bitumineux pour utilisation dans les fondations routières. Université Laval. Département de géologie et de génie géologique. P. 14-15.

Fuller W.B. Thompson S. (1907) « Proportion for concrete » Am Contractor, pp28-66. Cité dans **(Franck, 2007)**

Ganjian E., Khorami M and Maghsoudi A. A (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials* – Vol. 23. Numéro 5 – pp. 1828–1836.

Garros M (2007). Thèse de doctorat : Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Université Paul Sabatier de Toulouse.

(GDCBFNB, 1994) Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie-septembre 1994. Cité dans **(Raphaël, 2003)**

Glasser, L.S.D. et Kataoka, N. (1981a). A reply to J. Bensted's discussion of The chemistry of alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, vol.11, n°5-6, p.809-810. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Gomez-Soberon J (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cem Concr Res*. pp 32: 1301

Gramont-Garnier F. (1992) « Bétons Hautes Performances : Contribution à l'élaboration de règles de formulation » Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse. Cité dans **(Franck, 2007)**

Guedon-Dubied, J.S., Cadoret, G., Durieux, V., Martineau, F., Fasseu, P., Van Overbecke, V. (2000). Study on Tournai limestone in Antoing Cimescaut quarry – petrological, chemical and alkali reactivity approach, *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete*, Québec City, Québec, p.335-344. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Guénot-Delahaie I (1997). « Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Cité dans **(Nanthilde, 2009)**

Granger L (1996). « Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation », Thèse de doctorat de l'ENPC. Cité dans **(Nanthilde, 2009)**

Güneyisi E., Gesoğlu M and Özturan T (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research 34, 2309–2317. Cité dans **(Garros, 2007)**

Guomundsson G. et Ageirsson H. (1975). Some investigation of alkali aggregate reaction, Cement and concrete research, v5, n°3, p211-219. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Gupta V.K., Gupta M., and Sharma S (2001). Process development for the removal of lead and chromium from aqueous solutions using red mud – an aluminum industry waste, Water Res. 35 p. 1125 – 1134. Cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Hansen, T.C., Narud, H (1 983). Strength of recycled concrete *made* from mrshed concrete comse aggregate, Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83.

Herdan G. (1960). Smalll particule statistics: an account of of statistical methods for the investigation of finely divided materials, Butterworths, 2nd edition. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Ho A. C (2010). Thèse de doctorat: Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface. Université INSA de Toulouse. 60-62.

Hobbs, D. W. (1984). The effect of pfa upon alkali-aggregate reaction, Comments, Magazine of Concrete Research, vol.36, n°127, p.117-118. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Hobbs, D.W. (1980). Influence of mix proportions and cement alkali content upon expansion due to the alkali-silica reaction, Technical Report, Cement and Concrete Association, n°534, 31 p. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Huang B, Shu X, Li G (2005). Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. Cement and concrete Research , vol. 35, fascicule 10, pp. 2008-2013.

IDRRIM. (2011). Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité. Classification et aide au choix des matériaux granulaires recyclés pour leurs usages routiers hors agrégats d'enrobés. N°2. Février 2011.

ILER, R.K. (1979). The Chemistry of Silica: wiley-interscience, New York, p.886. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Jensen A.D., Chatterji S., Christensen P. et Thaulow N. (1984). Studies of alkalisilica reaction, Part II. Effect of air entrainment on expansion, Cement and Concrete Research, vol.14, n°3, p.311-14. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. (2000). "Glasscrete"-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, Material Journal, n°97, p.208-213. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Jose M. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of concrete aggregate: an experimental study, Cem Concr Res, 32: 1301-11.

Joisel A.(1952) « Compositions des bétons hydrauliques » Annales de l'ITBTP (58), Série : Béton et béton armé. Cité dans **(Franck, 2007)**

Juan M. S. & Gutiérrez P. A. (2009). 'Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate', Construction and Building Materials, 23[2] 872-877.

Kaloush K. E., Way G. B. and Zhu H (2005). Properties of Crumb Rubber Concrete. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1914.

KaramberI, A., Kerinis, M. et Moutsatsou, A. (2004). Innovative reuse of glass cullet in cement products, A. Source: Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste, p.133-140. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Katz A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cem Concr Res, 33: 703-11.

Kerasley E. P. and Wainwright P.J (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. Cement Concr Res, 31: 805–12. Cité dans **(Ho, 2010).**

Kharoune, M. (2006). Séquestration du CO₂ par carbonatation minérale en réacteurs dynamiques. 7^{ième} Salon International des Technologies Environnementales. AMERICANA. Cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Khatib Z. K. and Bayomy F. M (1999). Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 206-213. Cité dans **(Garros, 2007)**

Khou S., Zhan B., Poon C. (2012). Feasability study of using fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete – Construction and Building Materials, 28 pp. 549-556

Kojima, T., Takagi, N. et Haruta, K. (2000). Expanding characteristics of mortar with glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec, p.673-682. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Kong, Deyu, Lei, Ting, Zheng, Jianjun, Ma, Chengchang, Jiang, Jun, and Jiang, Jing. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, Vol. 24 - N5, pp. 701-708.

Kou S-C, Poon C-S (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. Cem Concr Compos 31(2):107–13.

Kou S., Zhan B., Poon C (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. Construction and Building Materials 28 549–556.

Kurihara, T. et Katawaki, K. (1989). Effects of moisture control and inhibition on alkali-silica reaction, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, p. 629-634, Kyoto, Japon. Cité dans **(Rachida, 2009)**

F. de Larrard (2002). Construire en béton. Presses de l'ENPC. Cité dans **(Ameur, 2009).**

F. de Larrard (2000). Structure granulaire et formulation des bétons. OA34 LCPC. Cité dans **(Ameur, 2009).**

F. de Larrard, T. Sedran (1999). Une nouvelle approche de la formulation des bétons. Les annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 6, 39-54. Cité dans **(Ameur, 2009).**

Larive, C. (1998). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alkali réaction et de ses effets mécaniques. Rapport issu de la thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 6 juin. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Lee G., Ling T.C., Wong Y.L., Poon C.S (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. Construction and Building Materials, 25, pp 2611-2618.

Levy S.M. Helene P (2004). Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research 34, pp. 1975-1980.

Li Y.Z., Liu C.J., Luan Z.K., Peng X.J., Zhu C.L., Chen Z.Y., Zhang Z.G., Fan J.H., et Jia Z.P (2006). Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash, J. Hazard. Mater. 137, p. 374 – 383. Cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Lker, I., Topc, B et Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass, Cement and Concrete Research, vol. 34, p.267-274. Cité dans **(Rachida, 09)**

Longuet, P., Burglen, L. et Zelwer A. (1973). The liquid phase of hydrated cement, Revue des Matériaux et Construction, vol.676, p.35-41. Cité dans **(Rachida, 09)**

Louvet F(1996). Introduction aux plans d'expériences appliqués à la formulation des bétons. Dans Bétons: Bases et données pour leur formulation. Ecole Française du béton, ATIHL, Edition Eyrolles.

Maher Shaira (2006). Caractérisation non destructive de la transformation martensitique de l'acier 304L induite par déformation cyclique. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Maillard J-L (1997). Evaluation de l'aptitude à l'emploi des sables de fonderie Publication technique n°118 – CERIB.

Malvar, L.J., Cline, G.D., Burke, D.F., Rollings, R., Sherman, T.W. et Greene, J.L. (2002). Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations, ACI Materials Journal, vol. 99, n° 5, p. 480-489. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Serifou M. (2008). Recherche de substitut du gravier dans le béton: Utilisation de déchets non biodégradables (ciment durci, bouteille, pneu usagé), Mémoire de DEA, Université Cocody-Abidjan.

Massazza, F. et Pezzuoli, M. (1980). Cement paste-quartz bond in autoclaved concretes, 7th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, Paris, 3 VII. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Massazza, F. (1976). Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, Cemento, vol.1, n°73, p.3. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Maccoy, W.J. et Caldwell, A.G. (1951). New approach to inhibiting alkali aggregate expansion, Journal of the American Concrete Institute, n°22, p.693-706. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1993) Concrete: Structure, Properties, and Materials, 2nd edition, Prentice-Hall p.548. Cité dans **(Noureddine, 1996)**

Menou A (2004). Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multiéchelles de l'endommagement thermique, Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Cité dans **(Ameur, 2009)**.

Metso, J. et Kajaus, E (1979). Activation of blast furnace slag by some inorganic materials, American Concrete Institute, SP, Fly Ash, Silica Fume, Slag Other Miner, By Products in concrete, vol.2, p.1059-1073. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Meyer, C., Baxter, S. et Jin, W (1996). Alkali-silica reaction in concrete with waste glass as aggregate, Materials for a New Millennium, Proceedings of ASCE Materials Engineering Conference, Washington, pp. 1388–1394. Cité dans **(Rachida et al, 2010)**

Meyer, C. et Baxter S (1997). Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocs Final Report 97-15, Albany, New York State Energy Research and Development Authority.

Meyer, C. et Xi Y.P. (1999). Use of recycled glass fly ash for precast concrete, Journal of materials in civil engineering, vol.11, no 2, p. 89- 90. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Micronisation du verre, 2012. F:\utilisation des recyclats\Micronisation-du-verre ciment.htm. Consulté en 2011.

Moisson M., (2005). Contribution à la maîtrise de la Réaction Alkali Silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton. Thèse de Doctorat de l'Institut des Sciences Appliquées de Toulouse. 28p.

Montes-Hernandez, G. Pérez-López, F. Renard, R. Nieto, J.M. et Chariet, L. (2009). Minéral séquestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. Journal of Hazardous Materials, Vol. 161, Issues 2-3, 30. p.1347-1354.

Nanthilde R (2009). Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression. Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Pp. 10-13.

Neville A.M. (2002). « Properties of concrete ». Fourth and final edition, Prentice Hall edition, pp 844. Cité dans **(Toukal, 2010)**

Neville A. M (2000). Propriétés des bétons, 4ème Edition, Éditions Eyrolles, Paris. Version traduite par le Centre de Recherches Universitaires sur le Béton. Cité dans **(Ameur, 09).**

Nishikawa, T., Takatsu, M. et Daimon, M. (1995). Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions, Cement and concrete research, vol.25, n°6, p.1218-1224. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Noureddine J (1996). Influence de la forme et de la rugosité des particules d'un granulat sur les propriétés et les coûts du béton compacté au rouleau. Pp. 17-23.

Oikonomou N., Mavridou S (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. Cement & Concrete Composites.

Okamura H., Ouchi M (2003). Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1, 5-15. Cité dans **(Ameur, 2009).**

Olafsson, H. (1986). The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars, Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Ottawa, Canada, p. 461-465. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Olorunsogo, F.T., Padayachee, N (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cement and Concrete Research. pp 32: 179-185

ONG, K.C.G., Ravindrarajah, R.S ., (1987) Mechanical properties and fracture energy of recycled-ogzegote concretes, RILEM, International conference on fracture of concrete and rock, Houston Tx., juin, pp. 150-158.

ODOC (2009) : BETON DE TRES HAUTE PERFORMANCE : www.oodoc.com/52925-bthp-beton-tres-haute-performance-43k

Özkan Ö. et Yüksel I (2008). Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products; *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 6, p. 1288-1298. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Papakonstantinou C.G. and Matthew J.T (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research* 36, 1686–1691.

Park, S.B. et Lee, B.C. (2004). Studies on expansion properties in mortar containing, waste glass and fibers, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°8 p.1145-1152. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Pattengil, M. et Shutt T.C. (1973), Use of ground glass as a pozzolan; *Albuquerque Symposium on Utilisation of Waste Glass in Secondary Products*. Albuquerque, New Mexico, U.S.A., p. 137–153. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Pessiki S. and Johnson M. R (1996). “Non-destructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength Plate Structures by impact-Echo Method“, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, N°3, pp. 260-271.

Pike, R.G., Hubbard, D. et Newman, E.S. (1960). Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, *Highway Research Board Bulletin*, n°275, p.39-44. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Price W. F. and Hynes J. P (1996). “In-Situ Strength Testing of High Strength Concrete”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, N° 176 pp. 260-271.

Proctor, D. M. Fehling, K. A. Shay, E. C (2000). Wittenbom, J. L. Green, J. J. Avent, C. Bigham, R. D. Connolly, M. Lee, B. Shepker, T.O. Zak, M.A., *Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags*. *Environ. Sci. Technol* 34 (8), p. 1576-1582.

Polley, C., Cramer, S.M. et Rodolfo, V (1998). Potential for using waste glass in Portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, n° 4, p.210-219. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Poole, A. B. (1992). Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion, 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, Londres, U. K, p.782-787. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Poon C.S, et Chan D (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick, *Construction and Building Materials*, vol. 20, fascicule 8, pp. 569-577.
Powers T. C (1968). “The thermodynamics of volume change and creep”, *Materials and Constructions*, vol.1, n°6. Cité dans **(Nanthilde, 2009)**

Rachida I (2009). Mécanismes d’action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat de l’université de Toulouse. 56 p.

Rachida I., Martin C., Arezki T (2010). Etude des propriétés des bétons de verre. *Technologie valorisation* Vol. 16 N°5/6. DECEMBRE.

Raghvan D., Huynh H., Ferraris CF (1998). Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tire rubber-filled cementitious composite. *J Mater Sci*; 33:1745–52.

Rahal K (2005). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, *Bulding and Environment*, Vol. 42, fascicule 1, pp. 407-415.

Ramachandran V-S (1981). Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada. Disponible sur: [http: // irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd215_f.htm/](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd215_f.htm/)

Rangaraju P. R. et Edlinski J. (2008). Comparative evaluation of Micro-Deval abrasion test with other toughness/abrasion resistance and soundness tests, *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, **20** [5],343-351.

Rao A. (2005), Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete, Thèse du Department de Génie Civil, Institut indien de Technologie, Kanpur.

Raphaël B (2003). Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. CERIB, RB/JRO, EA286/Matériau. Réf.DDE 27.

Ravindrarajah R. S., Tam C. T (1985). Properties of concrete made with ded concrete as coarse aggregate, Magazine of concrete research V01.37, No.13, pp. 29-38.

Rebeiz K.S (1996). Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET (polyethylene terephthalate) waste. Construction and Building Materials,., Vol. 17, fascicule 2, pp.215-220.

Regourd M (1982). « Le béton hydraulique », chapitre « L'eau », Presse de l'ENPC, pp.59–68. Cité dans **(Nanthilde, 2009)**

Saadani Sabrina (2006). Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Génie civil [en ligne]. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine, 156 P. Disponible sur: <http://www.umc.edu.dz/buc/buci/datum/theses/Geniecivil/SAA5286.pdf>

Schartzentruber A. catherine C. (2000). La méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE): Un nouvel outil d'aide à la formulation de béton adjuvanté. Materials and structures (33-8), pp475-482. Cité dans **(Franck, 2007)**.

Schmidt, A. et Saia, W.H.F. (1963). Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. American concrete institute, Material Journal, n° 60, p.1235-1236. Cité dans **(Rachida,2009)**

Schwarz, N et Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, Cement and Concrete Research, vol. 38, n°4, p.429-436. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Schüth, F., Sing, K.S.W. et Weitkamp, J (2002). Handbook of porous solids, Wiley, Haboken, NJ. Cité dans **(Thai, 2009)**

Segre N., Joeques I (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. Cement and Concrete Research 30, 1421-1425. Cité dans **(Ho, 2010)**

Sersale, R. (1980). Structure and characterization of pozzolanas and of fly ashes, 7th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, Paris, 1 IV. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Sglavo V.M., Maurina S., Conci A., Salviati A., Carturan G. and Cocco G. (2000). Bauxite “red mud” in the ceramic industry. Part 2. Production of clay-based ceramics, J. Eur. Ceram. Soc. 20 p. 245 – 252 cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Shao, Y., Lefort, T., Moras, et S. Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research, vol. 30, n° 1, p. 91-100. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material a field trial on concrete slabs, Cement and Concrete Research, vol. 36, n°2, 457-468. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shayan, A. et Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete, Cement and Concrete Research, vol. 34, n°1, p.81-89. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shayan, A. et Xu, A. (2002). Value-added utilisation of waste glass in concrete, IABSE symposium, Melbourne, p.1-11. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shi, C., Wu, Y. et Rieflerb, C. et Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 5, p. 987- 993. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shi, C., Wu, Y., Shao, Y. et Riefler, C. (2004). Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder, Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete, p.789-95. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Shkelzen B (2010). Evaluation du potentiel de la séquestration minérale du CO₂ par des résidus et sous – produits industriels à pouvoir alcalin. Mémoire présenté à l’école de thecnologie supérieure. Université du Québec. 38 p.

Sibick R. G. et Page C. L. (1992). Susceptibility of various UK aggregates to alkaliaggregate reaction, Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Londres, Angleterre, p. 980-987. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Sobolev, K., Turker, P., Soboleva, S. et Iscioglu, G. (2007). Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations, Waste Management, vol. 27, p.971-976. Cité dans **(Rachida, 09)**

Sprung, S. et Sylla, H.M. (1998). Course of the alkali/silica reaction in concrete with different types of aggregate, ciment, plâtre et chaux, Allemagne, vol.51, n°6, p.334-345. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Stanton, T.E. (1948). ASTM Sp.Tech.publ.99, use of pozzolanic materials in mortars and concretes, n°178. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Stanton, T.E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol.66, p.1781-811. Cité dans **(Rachida, 2009)**

ST-FRANCE. (2007). www.lyarglac.edres74.ac-grenoble.fr

Stokes, D.B., Wang, H.H. et Diamond, S. (1997). A lithium-based admixture for ASR control that does not increase the pore solution pH, Proceedings 5th CANMET/ ACI International Conference, V.M. Malhotra ed., ACI SP173, p. 855-868. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Stovall T. de Larrard F. Buil M. (1986). Linear packing density of grain mixture; powder technologie (48). Cité dans **(Franck, 2007)**

Tam (2006). Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. Magazine of Concrete Research, 58, No. 7, 477-484.

Tam, W. Y. V., Tam, C. M., Wang, Y (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials* 21(10), 1928-1939.

Terro M.J (2006). Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, vol. 47, fascicule 5, pp. 350.

Thai-Hoa V (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.

Topçu BI, Sengel S (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem Concr Res*; 34(8): 1307-12.

Topçu I.B (1995). The properties of rubberised concretes, *Cem. Concr. Res.* 25 (2) 304–310. Cité dans **(Bignozzi et Sandrolini, 2006)**

Topçu I. B., Mehmet C (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 34 267–274.

Topçu I., Boga A., Bilir T (2008). Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 . *Waste Manage*;28(5):878–84.

Toukal A (2010). Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons.

Tu T. Y., Chen Y. Y. & Hwang C. L. (2006). ‘Properties of HPC with recycled aggregates’, *Cement and Concrete Research*, 36, 943–950.

Tung-Chai L., Chi-Sun P., Shi-Cong K (2011). Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*.

Turcry Ph (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation. Doctorat de l'École Centrale de Nantes. Cité dans **(Ameur, 2009)**

UNPG, (2001). Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans **(Raphaël, 2003)**

Vachon, P. Rajeshwar , D. Tyagi; Auclair, J. - C. Willkinson , Kevin J (1994). Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red *Mnà*. *Environ . Sci. Technol.* 28 (1) 26. Cité dans **(Shkelzen, 2010)**

Valeria C., Alida M., Giacomo M (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials and Design* 32, pp.1646–1650.

Vivian, H.E. (1951). Cement-aggregate reaction. XIX. Effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate, *Australian Journal of Applied Science*, vol.2, p.488-494. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Vivian, H.E. (1950). Cement-aggregate reaction. IX. The effect on mortar expansion of amount of available water in mortar, *Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Bulletin*, n°256, p.21-30. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Wang HY., Huang WL (2010). Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. *Constr Build Mater*; 24(6):1008–13. Cité dans **(Tung et al, 2011).**

Wirquin E., Zaharieva R.H. et Buyle-Bodin F. (2000). ‘Utilisation de l’absorption d’eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés’, *Materials and Structures*, 33, 403-408. Cité dans **(Berredjem et Arabi, 2009)**

Woolf, D.O. (1952). Reaction of aggregate with low-alkali cement, *Public Roads*, n°27, p.50-61. Cité dans **(Rachida, 2009)**

(www.bruxellesenvironnement.be, 2012) L’utilisation de granulats issus du recyclage. Fiche 4.1 pp 3. Consulté en 2012.

[www.vd.ch,2011]

http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/dechets/fichiers_pdf/Rapport_valorisation_materiaux.pdf. Consulté en 2011.

Xi Y., Li Y., Xie Z., and Lee J.S. (2004). Utilization of Solid Wastes (Waste Glass and Rubber Particles) As Aggregates in Concrete, Proc. of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 45-54, May 20-21. Cité dans **(Ho, 2010)**

Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. (2003). ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland cement Mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, p.67-74. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Yamada, K. et Ishiyama, S. (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate mortar. Dans Achieving Sustainability in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-7. London, Thomas Telford Ltd, p.185-192. Cité dans **(Rachida, 2009)**

Yang C.C (1998). Effect of the transition zone on the elastic moduli of mortar, Cement and Concrete Research, vol28, N°5, pp727-736.

Yang Y.F, Han L.H (2006). Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. Journal of Constructional Steel research. Vol. 62, fascicule 1, pp. 1310-1324.

Annexes

Annexe 1 : la loi de Weibull

1 Définition

La définition la plus courante est liée à la loi exponentielle associée à la fonction puissance. La loi de Weibull est très utile en contrôle qualité. Elle peut décrire des phénomènes de durée de vie d'un matériel, d'un composant ou d'un système. Elle peut également modéliser le temps d'attente de la première panne, ou encore le temps écoulé entre deux pannes consécutives. Donc ce sont des lois d'une importance capitale en contrôle de la qualité et surtout en fiabilité.

2 A quoi cela sert ?

La loi de Weibull permet de déterminer:

- Une application à la fiabilité:
 - ❖ la distribution de Weibull permet en fonction de ses paramètres de représenter les périodes de vie d'un dispositif ;
 - ❖ mettre en évidence la probabilité de défaillance jusqu'à un certain âge
- Une estimation
- Un intervalle de confiance

3 Comment procéder dans le cadre de ce travail?

Soit le tableau suivant présentant une granulométrie (verre)

verre		
module	diam	% cum
	0	0
37,9954858	5	0,54558464
38,9996443	6,3	3,84294318
40,037607	8	8,65482082
41,0071446	10	20,171725
41,9766822	12,5	35,6448632
42,4690846	14	50,283227
43,0492659	16	64,507185
43,561022	18	74,9060879
44,0188035	20	91,0887842
44,5112059	22,4	96,0586727
44,8109734	24	100

On cherche à savoir si l'on peut mettre une relation du type Weibull entre le diamètre et le pourcentage cumulé p de granulats ayant un diamètre inférieur ou égale à ce diamètre d . On commence par ramener le pourcentage cumulé à un nombre entre 0 et 1 en divisant par 100 (en effet la théorie de Weibull correspond à des lois de probabilité où p , la probabilité, est compris entre 0 et 1).

La loi de Weibull s'écrit si k est son paramètre de forme et λ son paramètre d'échelle :

$$(1): \quad p(d) = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k}$$

Vérifier que la granulométrie suit une loi de Weibull à 2 paramètres revient à trouver les 2 paramètres k et λ . Directement ce n'est pas possible. On transforme l'équation (1) progressivement de façon à pouvoir avoir une droite (courbe dont on sait facilement identifier les paramètres). On isole l'exponentielle ce qui donne l'équation (2) :

$$(2): \quad e^{-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k} = 1 - p(d)$$

Puis pour éliminer l'exponentielle on prend le logarithme (c'est la fonction inverse de la fonction exponentielle $\ln(\exp(x)) = x$) :

$$(3): \quad \ln \left[e^{-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k} \right] = \ln[1 - p(d)]$$

Il est possible dans l'équation (3) de prendre l'exponentielle de $1-p(d)$ car p est inférieur à 1 et donc la quantité $1-p(d)$ est positive. On obtient l'équation (4) :

$$(4): \quad -\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k = \ln[1 - p(d)]$$

On constate que k est en exposant. Pour l'identifier il faut à nouveau appliquer le logarithme. Mais on ne peut pas prendre le logarithme d'un nombre négatif. Et $-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k$ est négatif. On prend donc l'équation opposée :

$$(5): \quad \left(\frac{d}{\lambda}\right)^k = -\ln[1 - p(d)]$$

Les 2 membres de l'équation (5) sont alors positifs et on applique le logarithme à chaque membre.

$$(6): \quad \ln \left[\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k \right] = \ln(-\ln[1 - p(d)])$$

Le membre de gauche se simplifie alors :

$$(7): \quad \ln \left[\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k \right] = k \cdot \ln \left[\left(\frac{d}{\lambda}\right) \right] = k \cdot \ln(d) - k \cdot \ln(\lambda)$$

Ce qui nous donne comme résultat final :

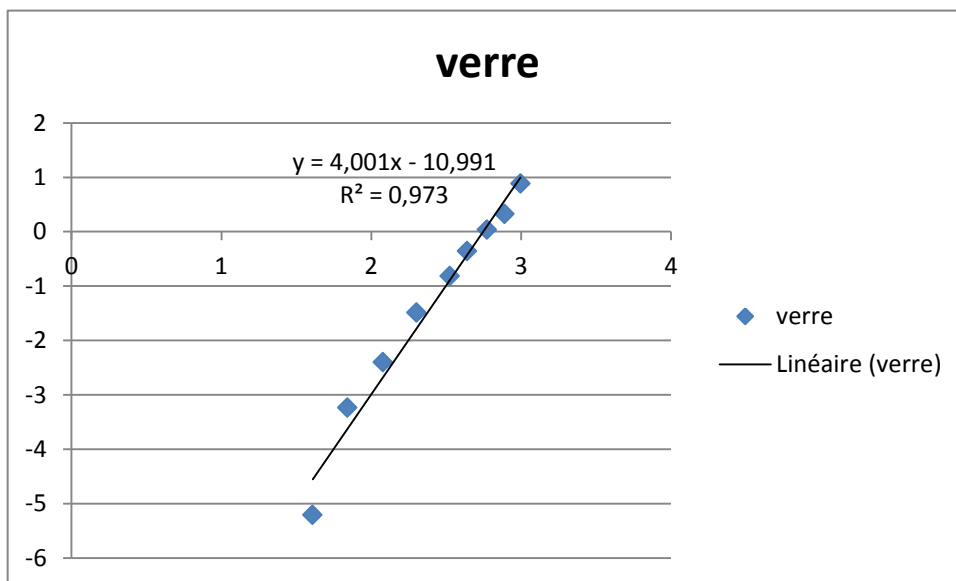
$$(7) : k \cdot \ln(d) - k \cdot \ln(\lambda) = \ln(-\ln[1 - p(d)])$$

Si l'on représente la courbe $\ln(-\ln[1 - p(d)])$ en fonction de $\ln(d)$ on obtient alors une droite de pente k et de terme constant (fonction ordonnée origine d'Excel) $-k \cdot \ln(\lambda)$.

L'application donne pour le verre :

module	diam	% cum	ln(diam)	ln(-ln(1-(%cum/100)))
	0	0		
37,9954858	5	0,54558464	1,60943791	-5,20833337
38,9996443	6,3	3,84294318	1,84054963	-3,23940198
40,037607	8	8,65482082	2,07944154	-2,40213278
41,0071446	10	20,171725	2,30258509	-1,49035607
41,9766822	12,5	35,6448632	2,52572864	-0,81926968
42,4690846	14	50,283227	2,63905733	-0,35835088
43,0492659	16	64,507185	2,77258872	0,0352126
43,561022	18	74,9060879	2,89037176	0,32392594
44,0188035	20	91,0887842	2,99573227	0,88288265
44,5112059	22,4	96,0586727		
44,8109734	24	100		

Ce qui donne comme courbe :



Annexe 2 : Mesure de la porosité à l'eau

Au cours de l'essai, l'échantillon passe par quatre phases distinctes:

▪ Phase 1 (saturation sous vide de l'échantillon):

Dans cette étape, l'échantillon est placé dans un récipient disposé à l'intérieur d'un dessiccateur en verre (figure x). Si on sature plusieurs échantillons en même temps, il faut procéder de telle sorte à bien les espacer afin de laisser leurs faces accessibles à l'eau de saturation. Le dessiccateur est relié à une pompe à vide capable de maintenir un vide absolu. La mesure se fait suivant les étapes suivantes :

- Mise en marche de la pompe, et maintenir le vide à l'intérieur du dessiccateur pendant 4 heures, cela permet un dégazage de l'échantillon.
- Au bout de 4 heures, on ferme la vanne reliant le dessiccateur à la pompe afin de vérifier que la pression intérieure au dessiccateur est stable. Dans le cas contraire, le pompage est répété afin de continuer le dégazage de l'échantillon.
- Une fois le vide stabilisé, on ouvre la vanne permettant l'introduction du liquide de saturation dans le récipient contenant l'échantillon, tout en maintenant la pompe en marche. La pression augmente alors légèrement jusqu'à atteindre celle de la vapeur saturante. Le remplissage du récipient doit se faire de façon à couvrir l'échantillon d'une lame d'eau d'environ 20 mm en 20 minutes, afin de laisser le gaz de la vapeur d'eau pénétrer la matrice poreuse.
- Dès que le remplissage est terminé, le robinet d'arrivée d'eau est fermé, et le pompage se poursuit pour maintenir l'enceinte à la vapeur d'eau saturante.
- La saturation sous vide se poursuit pendant 24 heures, à noter qu'il est possible d'arrêter le pompage pendant plusieurs heures si l'étanchéité de l'enceinte est parfaitement assurée.
- On ouvre ensuite le dessiccateur pour mettre le récipient contenant l'échantillon à la pression atmosphérique pendant 24 Heures en le fermant pour éviter une éventuelle contamination ou évaporation de l'eau.

▪ Phase 2 (Pesée dans l'eau) :

Après 24 heures à pression atmosphérique, l'échantillon est pesé une première fois dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique, la masse de l'échantillon immergé M_{eau} est alors obtenue.

▪ **Phase 3 (Pesée de l'échantillon et masse sèche)**

Après la deuxième phase, on sort l'échantillon de l'eau en prenant soin de légèrement essuyer ses faces pour qu'il n'y ait plus d'eau en trop, en suite on le pèse à l'air et ainsi la masse de l'échantillon saturé M_{air} est obtenue.

▪ **Phase 4 (Séchage de l'échantillon et masse sèche)**

A cette étape l'échantillon est mis dans une étuve à une température de 60°C ou 80°C, et si l'échantillon ne doit plus servir par la suite, on peut même le sécher à une température de 105°C. Il faut savoir qu'à cette température l'échantillon sera partiellement détruit et sa porosité se verra augmentée si jamais on veut la recalculer par la suite.

Pendant le séchage, on procède à un suivi de la perte de masse, et l'on peut considérer que notre échantillon est sec si :

$$\frac{\Delta m_{24h}}{m} \leq 0,1 \%$$

Où temps de séchage est ≥ 32 jours

Où Δm_{24h} est la perte de masse entre deux pesées effectuée à 24 heures d'intervalle.

Si cet équilibre est atteint, on obtient alors la masse de l'échantillon sec M_{sec}

La porosité est alors calculée comme suit:

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} = \frac{V_{eau-p}}{V_{échantillon}}$$

Où : V_{eau-p} est le volume d'eau dans les pores (m^3)



Figure 2: Dispositif expérimental pour la saturation sous vide

Annexe 3 : Contrôles sur bétons durcis : Essais non destructifs

1 Mesure de la dureté de surface par rebondissement au scléromètre

Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la "dureté au choc" du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).

Une tige en acier, sortant d'un cylindre, est appuyée sur le béton et comprime un ressort. En fin de course, ce ressort projette une masse sur la tige, sur laquelle elle rebondit. Ce rebondissement est d'autant plus important que le béton est dur. Un index fixé sur l'appareil permet de déterminer l'indice sclérométrique.

La surface de l'ouvrage à tester est divisée en zones d'au moins 400 cm^2 chacune. Il est nécessaire de faire une série de 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures de 3cm au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de 3cm des bords de la surface testée. L'indice sclérométrique I_s de la zone est la médiane des 27 mesures.



2 Mesures ultrasonores

Les mesures des vitesses des ultrasons sont réalisées par un testeur ultrasonique (figure 4) comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception de fréquence. Les transducteurs sont mis en contact sur les faces des éprouvettes par l'intermédiaire d'un gel. Le temps de propagation de l'onde à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital.



Figure 4: Testeur à ultrasons

La longueur du parcours est 320 mm et la dimension transversale est de 160 mm.

La vitesse des ultrasons est le quotient entre la distance séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps de propagation de l'onde.

La mesure de la vitesse de propagation se fait sur une série de trois éprouvettes: $V = \frac{d}{t}$



Figure 5: Positions des points de mesures ultrasonores

Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse des ondes à l'intérieur du béton ; cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton a un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante. A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique (E_d) selon l'expression suivante, (Nev, 2002) :

$$E_d = v^2 \rho_b \frac{(1+\vartheta)(1-\vartheta)}{1-\vartheta}$$

E_d : Module d'élasticité dynamique exprimé en MPa;

ρ_b : La masse volumique du béton, exprimée en kg/m³ ;

ϑ : Coefficient de Poisson du béton, dont la valeur est de 0,15 pour un béton de haute résistance et de 0,3 pour un béton de faible résistance;

V : Vitesse des ondes, exprimée en km/s;

2.1 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique

Le rapport entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique qui est toujours inférieur à l'unité est d'autant plus élevé que la résistance du béton augmente, ce qui explique probablement qu'il augmente avec l'âge du béton. Ce rapport variable entre deux modules signifie qu'il n'y a pas de conversion simple du module élastique, E_c , dont la connaissance est nécessaire pour la conception des structures en béton. Lydon et balendran (Nev, 2002).

- $E_c = 0,83 E_d$

L'expression suivante était incluse dans la norme Britanique CP110: 1972 pour la conception des structures, les modules étant en GPa:

- $E_c = 1,25 E_c - 19$

Cette équation ne s'applique pas aux bétons dosés à plus de 500 kg/m³ de ciment, pas plus qu'aux bétons légers. Pour ces derniers, l'équation suivante a été proposée:

- $E_c = 1,04 E_d - 4,1$

Pour les bétons légers ou de densité normale, Popovics a suggéré que la relation entre le module dynamique et statique est fonction de la masse volumique du béton.

- $E_c = K E_d^{1,4} \rho^{-1}$, ρ est la masse volumique du béton et K constance dépendant des unités de mesure, quelle que soit la relation entre le module statique et dynamique, on considère qu'elle n'est pas influencé par l'entraînement de l'air, la méthode de mûrissement, les modifications progressives d'une éprouvettes donnée, comme par exemple celles dues à une attaque chimique.

2.2 Relation entre la vitesse d'ultrason-résistance du béton

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse de propagation des impulsions. Mais il n'existe pas encore de relation unique valable pour tous les bétons. En effet pour un béton très haute résistance, la vitesse du son n'augmente plus au-delà de 35 MPa environ car elle est principalement fonction de la compacité du béton, étant donné qu'un béton de classe supérieure à 35 MPa est particulièrement toujours très compact. Pour les bétons courants, on pourra admettre que la résistance et le module d'élasticité dynamique, **(Cha, 2006)** sont liés par la relation:

$$résistance = 167 \exp\left(\frac{Ed}{122500}\right)$$

Les essais d'auscultation sont très efficaces pour le contrôle de la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures ou les imperfections intérieures. Cependant leur utilisation pour une évaluation de la résistance réelle et résistance estimée par cette technique est de l'ordre de 40 % ce qui est tout de même assez considérable.

Annexe 3: Contrôles sur bétons durcis : Essais destructifs

Les extrémités des éprouvettes soumises à l'essai de compression doivent être préalablement rectifiées afin que les plateaux de la presse assurent un contact plan et perpendiculaire aux génératrices de l'éprouvette.

Pour parvenir à ce résultat, il faudra utiliser une rectifieuse équipé d'une meule diamantée permettant l'usinage de manière à rendre les extrémités parfaitement perpendiculaires aux génératrices ou faire du surfacage au soufre décrit par la norme **NF P 18-416**.

1 Essai compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression f_c conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton.

La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 MPa/s avec une tolérance de $\pm 0,2$ MPa/s. Pour des éprouvettes 11 X 22 cela signifie une montée en charge de 5 kN/s ± 2 kN/s et pour des éprouvettes 16 X 32 de 10 kN/s ± 4 kN/s.

La charge de rupture, P , est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette; la résistance, f_c , est exprimée en MPa à 0,5 MPa près et a pour expression :

$$f_c = \frac{P}{S}$$

Dans la relation ci-dessus f_c est directement obtenue en MPa si P est exprimé en méganewtons (MN) et S en m^2 .



Figure 6: Rectification avec une meule diamantée



Figure 7: Rectification avec du soufre



Figure 8: Béton soumis à une contrainte

2 Essai de fendage

Cet essai permet de déterminer la résistance f_t au fendage du béton. C'est la résistance caractéristique du béton à la traction.

L'éprouvette est placée entre les plateaux de la presse, suivant sa génératrice. Elle s'appuie sur Deux bandes en contre-plaqué et doit être centrée et appuyée sur toute la longueur.

La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 1,94 kN/s $\pm$ 0,39 kN/s pour les cylindres 11 $\times$ 22 et 4,01 kN/s $\pm$ 0,80 kN/s pour les cylindres 16 X 32 (ce qui correspond à un accroissement de la contrainte de traction de 0,05 MPa/s avec une tolérance de $\pm$ 20 %).

Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut:

$$f_t = 0,637 \frac{P}{dh}$$

Dans la relation ci-dessus f_t est directement obtenue en MPa si P est exprimé en méganewtons (MN) et d et h en mètres (m). Cette contrainte doit être exprimée à 0,1 MPa près.



Figure 9: Machine à fendage

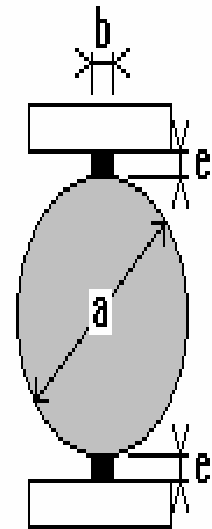


Figure 10: Epreuve

3 Essai de flexion

Cet essai permet de déterminer la résistance en flexion f_f du béton. Il s'applique uniquement aux éprouvettes prismatiques. L'éprouvette est placée sur l'appareil de chargement conformément au schéma ci-dessous:

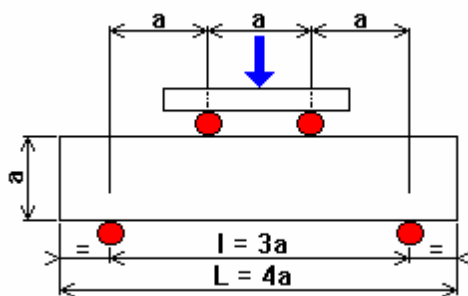


Figure 11: Disposition de l'éprouvette

Les appuis sont constitués par des rouleaux en acier 20 mm de diamètre. Il est recommandé d'utiliser un gabarit de centrage pour la mise en place de l'éprouvette. La charge est appliquée de manière continue et sans choc.

Noter la charge maximale F_{maxi} atteinte avant la rupture (en kN), à l'arrêt de base de l'éprouvette. f_f a pour expression (à 0,1 MPa près).

$$f_f = \frac{30 F_{\text{maxi}}}{a \times a}$$

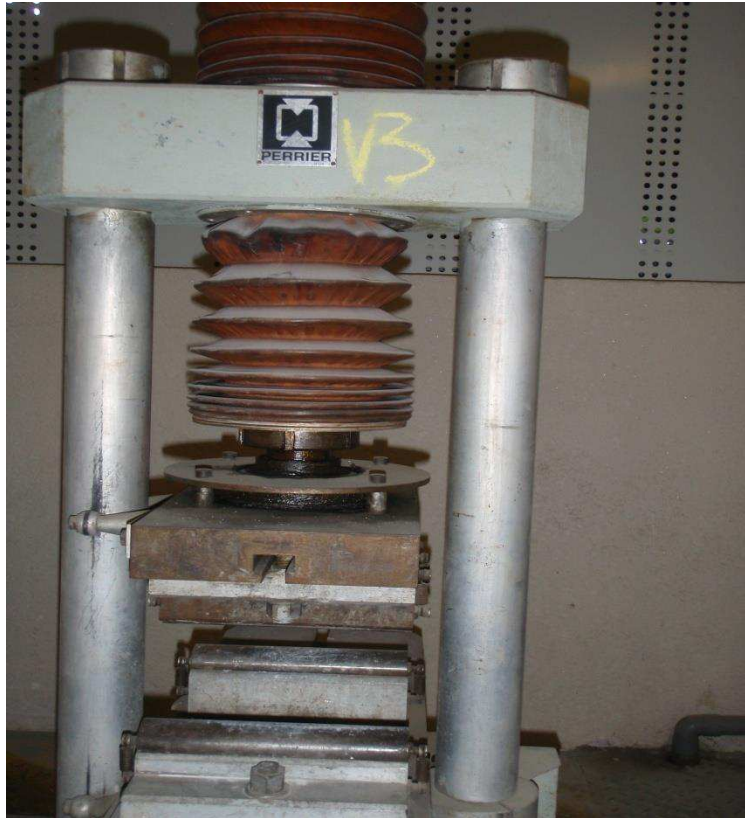


Figure 12: Machine à flexion

Annexe 4 : Tableau des valeurs de l'analyse granulométrique

Tableau 1: Analyse granulométrique du sable (0/5)

Poids utilisé pour l'essai (g)	Tamis en mm	Refus partiels Ri en g	Refus cumulés Rn en g	Refus cumulés en %	Tamisats cumulés en %
1000	5	1,65	1,65	0,17	99,83
	4	0,7	2,35	0,24	99,76
	2,5	20,2	22,55	02,26	97,74
	2	14,65	37,2	03,74	96,26
	1,25	39,05	76,25	07,65	92,35
	1	53,25	129,5	13,00	87,00
	0,63	76,05	205,55	20,64	79,36
	0,5	142,5	348,05	34,95	65,05
	0,315	580,5	928,55	93,25	06,75
	0,25	24,6	953,15	95,72	04,28
	0,16	32,2	985,35	98,95	01,05
	0,125	4,8	990,15	99,43	0,57
	0,063	3,7	993,85	99,80	0,2
	Fond	1,95	995,80	100,00	00,00

Tableau 2: Analyse granulométrique des graviers roulés (5/16)

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Tamis en mm	Refus partiels Ri en g	Refus cumulés Rn en g	Refus cumulés en %	Tamisats cumulés en %
3200	16	155,15	155,15	04,85	95,15
	10	2468,90	2624,05	82,10	17,90
	8	466,80	3090,85	96,68	03,32
	4	103,85	3194,70	99,93	0,07
	2	1,50	3196,20	99,97	0,03
	1	0,15	3196,35	99,98	0,02
	0,5	0,00	3196,35	99,98	0,02
	0,25	0,10	3196,45	99,98	0,02
	0,125	0,15	3196,60	99,99	0,01
	0,063	0,30	3196,90	99,99	0,01
	Fond	0,15	3197,05	100,00	0,00

Tableau 3: Analyse granulométrique des graviers roulés (5/10)

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Tamis en mm	Refus partiels Ri en g	Refus cumulés Rn en g	Refus cumulés en %	Tamisas cumulés en %
2000	10	323	323	16,18	83,82
	8	1283	1606	80,46	19,54
	6,3	224	1830	91,68	08,32
	5	90	1920	96,19	03,81
	4	43	1963	98,35	01,65
	3,15	21	1984	99,39	0,65
	2,5	7	1991	99,75	0,25
	1,25	4	1995	99,95	0,05
	0,63	0	1995	99,95	0,05
	0,315	0	1995	99,95	0,05
	0,16	0	1995	99,95	0,05
	0,08	1	1996	100 ,00	0,00
	Fond	0	1996	100,00	0 ,00

Tableau 4: Analyse granulométrique du verre

Taille	Masse	Masse cumulée	Passant %
24	0	0	100
22,4	66,1	66,1	96,0586727
20	83,35	149,45	91,0887842
18	271,4	420,85	74,9060879
16	174,4	595,25	64,507185
14	238,55	833,8	50,283227
12,5	245,5	1079,3	35,6448632
10	259,5	1338,8	20,171725
8	193,15	1531,95	8,65482082
6,3	80,7	1612,65	3,84294318
5	55,3	1667,95	0,54558464
0	9,15	1677,1	0

Tableau 5: Analyse granulométrique du pneu

Masse (g)	Taille (mm)	Masse cumulée	Pourcentage
4,00	11,43	4,00	0,46
4,00	11,68	8,00	0,93
4,00	12,45	12,00	1,39
6,00	13,97	18,00	2,09
3,00	14,22	21,00	2,43
3,00	14,73	24,00	2,78
6,00	14,99	30,00	3,48
5,00	14,99	35,00	4,06
4,00	15,49	39,00	4,52
4,00	16,51	43,00	4,98
8,00	16,51	51,00	5,91
5,00	16,76	56,00	6,49
5,00	17,27	61,00	7,07
7,00	17,27	68,00	7,88
6,00	17,27	74,00	8,57
6,00	17,53	80,00	9,27

5,00	17,78	85,00	9,85
7,00	18,03	92,00	10,66
5,00	18,29	97,00	11,24
6,00	18,29	103,00	11,94
9,00	18,54	112,00	12,98
4,00	18,80	116,00	13,44
6,00	18,80	122,00	14,14
8,00	18,80	130,00	15,06
7,00	19,05	137,00	15,87
5,00	19,05	142,00	16,45
7,00	19,30	149,00	17,27
7,00	19,30	156,00	18,08
8,00	19,30	164,00	19,00
5,00	19,30	169,00	19,58
8,00	19,56	177,00	20,51
7,00	19,81	184,00	21,32
5,00	19,81	189,00	21,90
3,00	20,07	192,00	22,25
4,00	20,07	196,00	22,71
5,00	20,07	201,00	23,29
10,00	20,07	211,00	24,45
9,00	20,07	220,00	25,49
7,00	20,32	227,00	26,30
10,00	20,32	237,00	27,46
3,00	20,57	240,00	27,81
10,00	20,57	250,00	28,97
7,00	20,83	257,00	29,78
11,00	20,83	268,00	31,05
6,00	20,83	274,00	31,75
5,00	20,83	279,00	32,33
4,00	21,08	283,00	32,79
11,00	21,34	294,00	34,07
6,00	21,34	300,00	34,76

9,00	21,34	309,00	35,81
6,00	21,34	315,00	36,50
3,00	21,59	318,00	36,85
10,00	21,59	328,00	38,01
8,00	21,59	336,00	38,93
10,00	21,59	346,00	40,09
7,00	21,84	353,00	40,90
6,00	21,84	359,00	41,60
10,00	21,84	369,00	42,76
10,00	21,84	379,00	43,92
4,00	21,84	383,00	44,38
6,00	22,10	389,00	45,08
8,00	22,10	397,00	46,00
7,00	22,35	404,00	46,81
8,00	22,35	412,00	47,74
11,00	22,61	423,00	49,02
10,00	22,61	433,00	50,17
12,00	22,86	445,00	51,56
7,00	22,86	452,00	52,38
9,00	22,86	461,00	53,42
7,00	22,86	468,00	54,23
6,00	23,11	474,00	54,92
6,00	23,37	480,00	55,62
5,00	23,37	485,00	56,20
8,00	23,37	493,00	57,13
7,00	23,62	500,00	57,94
9,00	23,88	509,00	58,98
11,00	24,38	520,00	60,25
10,00	24,38	530,00	61,41
10,00	24,38	540,00	62,57
7,00	24,38	547,00	63,38
7,00	24,64	554,00	64,19
7,00	24,64	561,00	65,01

8,00	24,64	569,00	65,93
10,00	24,64	579,00	67,09
7,00	24,89	586,00	67,90
11,00	24,89	597,00	69,18
6,00	25,15	603,00	69,87
5,00	25,15	608,00	70,45
7,00	25,15	615,00	71,26
9,00	25,15	624,00	72,31
8,00	25,15	632,00	73,23
3,00	25,40	635,00	73,58
11,00	25,40	646,00	74,86
10,00	25,65	656,00	76,01
9,00	25,91	665,00	77,06
10,00	26,16	675,00	78,22
8,00	26,16	683,00	79,14
8,00	26,16	691,00	80,07
10,00	26,16	701,00	81,23
7,00	26,42	708,00	82,04
10,00	26,92	718,00	83,20
8,00	26,92	726,00	84,13
11,00	27,18	737,00	85,40
10,00	28,19	747,00	86,56
11,00	28,19	758,00	87,83
10,00	28,45	768,00	88,99
8,00	28,45	776,00	89,92
8,00	28,96	784,00	90,85
10,00	28,96	794,00	92,00
10,00	29,21	804,00	93,16
6,00	29,21	810,00	93,86
12,00	29,21	822,00	95,25
8,00	29,21	830,00	96,18
12,00	30,48	842,00	97,57
11,00	30,99	853,00	98,84

10,00	31,75	863,00	100,00
-------	-------	--------	--------

Annexe 5: propriétés physiques du béton

Types de bétons	Temps (jours)	Absorption (%)	Masse volumique (g/m ³)	Porosité (%)
BNN	3	6,69	2,14	17,43
	14	6,81	2,2	13,19
	28	5,87	2,23	13,11
BNR	3	13	1,86	23,6
	14	15	1,87	25,9
	28	12	1,89	21,51
BRN	3	11,80	2,1	12,38
	14	10,47	2	20,18
	28	9,79	2,01	19,96
BRR	3	19	1,7	32,05
	14	18	1,69	29,04
	28	15,2	1,74	25,73

Annexe 6 – détermination des indices sclérométriques

Valeurs sclérométriques du BNR

	3 jours			14 jours			28 jours		
N°	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
1	20	21	20	20	20	20	25	25	24
2	21	22	22	20	20	22	26	25	24
3	21	22	23	22	20	23	26	25	25
4	22	22	24	22	20	24	26	25	25
5	22	22	24	22	22	24	26	25	25
6	22	23	24	22	23	24	26	25	25
7	22	24	24	24	24	24	26	25	25
8	23	24	25	24	24	24	26	25	26
9	23	24	25	24	24	24	26	25	26
10	23	24	25	24	24	26	26	25	26
11	23	24	25	24	24	26	26	26	26
12	24	25	25	25	25	27	27	26	26
13	24	25	26	25	25	27	27	26	26
14	24	25	26	26	26	27	27	26	28
15	24	25	26	26	26	27	27	26	26
16	24	26	26	26	26	27	27	26	26
17	24	26	26	26	26	28	27	26	26
18	24	26	26	26	26	28	28	26	26
19	24	26	26	27	26	28	28	26	27
20	25	26	26	27	26	28	28	26	27
21	25	26	26	27	26	28	28	26	27
22	25	26	26	27	27	28	28	26	27
23	25	26	26	28	27	28	28	27	27
24	25	26	27	28	27	28	28	27	28
25	25	26	27	28	28	30	28	27	28
26	25	26	27	28	28	30	28	27	28
27	26	26	27	30	28	30	28	28	28

Valeurs sclérométriques du BRR

	3 jours			14 jours			28 jours		
N°	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
1	16	16	13	18	18	18	20	20	20
2	16	17	15	20	18	18	20	20	20
3	16	17	15	20	18	18	20	20	22
4	16	17	16	20	20	18	20	20	22
5	16	17	17	20	20	19	20	20	22
6	16	18	17	20	20	19	22	22	22
7	17	18	18	20	20	19	22	22	22
8	17	18	18	20	20	20	22	22	22
9	18	18	18	20	21	20	22	22	24
10	18	18	18	20	22	20	22	22	24
11	18	19	18	22	22	20	22	22	24
12	18	19	18	22	22	20	22	22	24
13	18	19	19	22	22	20	22	22	24
14	18	19	19	22	22	21	22	22	24
15	18	19	19	22	22	22	22	22	24
16	18	19	19	22	22	22	22	22	24
17	18	19	19	22	22	22	23	22	24
18	19	19	19	22	22	22	23	24	24
19	19	19	19	22	22	22	23	24	24
20	19	19	20	22	22	23	24	24	24
21	19	19	20	22	22	23	24	24	26
22	19	19	20	22	23	23	24	24	26
23	19	20	20	23	23	24	24	24	26
24	19	20	20	23	24	24	24	24	26
25	20	20	21	23	24	24	25	28	26
26	20	20	21	24	24	24	26	26	26
27	20	21	22	25	26	25	26	30	26

Valeurs sclérométriques du BRN

	3 jours			14 jours			28 jours		
N°	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
1	20	24	22	22	20	20	25	24	24
2	22	24	22	23	22	20	25	25	24
3	24	24	24	24	22	22	25	26	24
4	24	24	24	24	24	24	25	26	24
5	24	24	24	24	24	24	26	27	24
6	25	25	24	24	24	24	26	28	26
7	25	25	24	26	24	24	26	28	26
8	26	25	24	26	24	24	27	28	26
9	26	25	25	26	24	24	28	28	26
10	26	25	26	26	24	24	28	28	26
11	26	25	26	26	25	25	28	28	26
12	26	26	26	28	26	26	28	30	28
13	27	26	26	28	26	26	28	30	28
14	27	26	26	28	26	27	29	30	28
15	27	26	26	28	27	28	29	30	30
16	27	27	26	28	28	28	29	30	30
17	27	27	26	28	28	28	30	30	30
18	28	27	27	30	28	28	30	32	30
19	28	28	28	30	29	30	30	32	30
20	28	28	28	30	30	30	30	32	30
21	28	28	28	30	30	30	30	32	30
22	28	28	28	30	30	30	30	32	32
23	28	28	28	30	30	30	32	32	32
24	28	28	28	30	32	30	32	34	32
25	28	28	28	32	32	30	32	35	32
26	29	28	30	34	32	30	31	36	32
27	34	28	30	35	32	32	36	36	34

Valeurs sclérométriques du BNN

	3 jours			14 jours			28 jours		
N°	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
1	18	14	14	24	22	22	24	24	26
2	18	14	14	24	26	24	26	24	26
3	18	14	16	25	26	25	26	24	28
4	18	14	16	26	26	26	26	24	28
5	18	16	18	26	26	26	26	26	28
6	18	16	18	26	26	26	28	26	28
7	18	18	18	28	26	26	28	26	28
8	18	18	18	28	26	28	28	26	28
9	20	18	18	28	26	28	30	26	30
10	20	18	18	28	28	28	30	26	30
11	20	18	18	28	28	28	30	28	30
12	20	18	20	30	28	28	30	28	32
13	20	18	20	30	30	28	30	28	32
14	24	20	20	30	30	28	30	28	32
15	24	20	20	30	30	30	32	28	32
16	24	20	22	30	30	30	32	28	32
17	24	22	22	30	30	30	32	28	32
18	24	22	22	30	32	30	32	30	34
19	24	22	22	30	32	30	32	30	34
20	24	22	22	32	32	32	34	30	34
21	24	22	24	32	32	32	34	30	34
22	25	24	24	32	32	32	34	30	35
23	26	24	24	32	32	32	36	32	36
24	26	24	24	32	32	32	36	32	36
25	26	24	24	32	36	32	36	34	36
26	26	26	24	34	36	32	36	34	36
27	26	26	26	36	36	34	38	38	37

Annexe 7 : Caractéristiques complémentaires

Tableau 2.8: Caractéristiques physiques et granulométriques des granulats utilisées

Granulat	densité	Min mm	20% mm	50 % mm	80% mm	Max mm	5-20 mm	20-31,5 mm	LA
Naturel	2,5	4,0	11,2	15,9	20,0	25,1	82,0	18,0	19
Ciment durci	2,2	5,0	12,0	17,8	22,9	31,6	58,0	42,0	22
Verre	2,4	6,3	10,0	14,1	20,0	25,1	80,0	20,0	-
Pneu usagé	1,8	13	19	23	26	31	35,0	65,0	-
GNG	2,61	5	6,5	7	8,5	10	100	0	-
GR	2,45	5	5,5	7	9	10	100	0	-

Les termes Min, 20%, médiane, 80% et max sont relatifs à la distribution des tailles issue de la granulométrie. Min représente la taille minimale, n% la taille en dessous de laquelle se situent n% des granulats, le max est la taille maximale. Les colonnes x-y mm donnent le pourcentage de granulats se situant dans cet intervalle de taille. Les investigations à propos de l'influence de ces paramètres sur les performances du béton permettront de mettre en évidence ceux qui contrôlent la qualité du béton (cf. III-4-3).

De même d'autres caractéristiques non mesurées expérimentalement mais issues du savoir collectif comme le module d'Young des matériaux, ou leur contrainte à rupture en compression des granulats vont aussi influencer sur le comportement en compression du béton (cf. III-4-3). Ces caractéristiques sont données dans le tableau XVI. Pour le ciment durci, les caractéristiques du calcaire ont été choisies car il a une forte ressemblance entre ces deux matériaux.

Annexe 8 : Caractéristiques de l'ensemble des granulats

Tableau : Propriétés des granulats

Type de propriété	Propriété des granulats	Valeur	Préférentiel
Physiques	Densité :		
	- sable (0/2)	2,62	-
	- sable (0/5)	2,65	
	- sable r (0/5)	2,40	
	- G.C (8/25)	2,50	
	- G.NG (5/16)	2,56	
	- G.NG (5/10)	2,61	
	- C.D (8/25)	2,10	
	- B.C (8/25)	2,50	
	- P.D (16/28)	1,80	
	- R.T (0/10)	2,40	
	- R.T (5/10)	2,45	
	Absorption (%) :		
	- sable (0/2)	1,70	0,5 à 1
	- sable (0/5)	1,60	
	- sable r (0/5)	13,0	
	- G.C	0,36	
	- G.NG (5/16)	0,20	
	- G.NG (5/10)	1,50	
	- C.D	2,30	
	- B.C	-	
	- P.D	-	
	- R.T (0/10)	9,60	
	- R.T (5/10)	4,33	
	Module de finesse (%):		
	- sable (0/2)	2	2,20 à 2,80
	- sable (0/5)	2,23	
	- sable r (0/5)	3,2	
	Equivalent de sable (%) :		
	- Sable (0/2)	73	[70 ; 80]
	Los Angeles (%) :		
	- G.C	19	< 35
	- C.D	22	

Annexe 9 – Comparaison des indices sclérométriques, des résistances en compression et des vitesses d'ondes

BNR							
Temps (jours)	Échantillons	Résistance en compression (MPa)	Moyenne	Indice sclérométriques	Moyenne	Vitesse de propagation d'ondes (m/s)	Moyenne
3	E ₁	22	22	24	25	3660,51	3668,77
	E ₂	22,45		25		3639,49	
	E ₃	21,3		26		3618,72	
14	E ₁	22,9	23	26	26,33	3706,30	3680,01
	E ₂	23,1		26		3673,23	
	E ₃	23		27		3660,51	
28	E ₁	21,5	23,22	27	27	3487,35	3588,09
	E ₂	24,95		26		3576,67	
	E ₃	23,2		28		3700,25	

BRR							
Temps (jours)	Échantillons	Résistance en compression (MPa)	Moyenne	Indice sclérométriques	Moyenne	Vitesse de propagation d'ondes (m/s)	Moyenne
3	E ₁	10,1	10,2	18	18,67	3254,62	3238,09
	E ₂	10,25		19		3244,63	
	E ₃	10,2		19		3215,01	
14	E ₁	16,45	15,43	22	21,67	3301,05	3304,86
	E ₂	14,45		22		3316,94	
	E ₃	15,4		21		3296,59	
	E ₁	17,25		22		3356,98	

28	E ₂	16,65	17	22	22,67	3396,55	3366,16
	E ₃	15,2		24		3344,94	

BRN							
Temp s (jours)	Échantillo ns	Résistance en compressio n (MPa)	Moyenn e	Indice sclérométriqu es	Moyenn e	Vitesse de propagatio n d'ondes (m/s)	Moyenn e
3	E ₁	14,7	14,58	27	26,33	3610,48	3592,44
	E ₂	14,45		26		3615,83	
	E ₃	14,6		26		3551,02	
14	E ₁	19,35	19	28	27,33	3931,54	3865,94
	E ₂	18,5		26		3829,89	
	E ₃	18,9		28		3836,38	
28	E ₁	24,35	24,3	28	28,67	4113,14	4070,07
	E ₂	24,25		30		4050,08	
	E ₃	24,3		28		4046,98	

BNN							
Temps (jours)	Échantillons	Résistance en compression (MPa)	Moyenne	Indice sclérométriques	Moyenne	Vitesse de propagation d'ondes (m/s)	Moyenne
3	E ₁	8	8	24	21,33	3986,38	3900,11
	E ₂	8,5		20		3825,67	
	E ₃	7,5		20		3888,27	
14	E ₁	18,25	18	30	29,33	4461,39	4465,25
	E ₂	17,85		30		4469,19	
	E ₃	18,1		28		4465,17	
28	E ₁	20,4	21,5	30	30	4546,76	4576,71
	E ₂	22,6		28		4592,36	
	E ₃	21,5		32		4591,02	

Annexe 10 : résistances en compression, au fendage, en flexion des éprouvettes

BNR							
Temp s (jours)	Échantillon s	Résistance en compression (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par flexion (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par fendage (MPa)	Moyenn e
3	E ₁	22	22	2,02	2,5	2,2	2,25
	E ₂	22,45		2,2		2,36	
	E ₃	21,3		3,27		2,18	
14	E ₁	22,9	23	2,84	2,97	2,57	2,64
	E ₂	23,1		2,69		2,75	
	E ₃	23		3,37		2,62	
28	E ₁	21,5	23,22	3,31	4,13	2,74	2,76
	E ₂	24,95		5,27		2,83	
	E ₃	23,2		3,80		2,71	

BRR							
Temp s (jours)	Échantillon s	Résistance en compression (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par flexion (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par fendage (MPa)	Moyenn e
3	E ₁	10,1	10,2	2,1	2,13	1,59	1,43
	E ₂	10,25		2,3		1,35	
	E ₃	10,2		1,99		1,34	
14	E ₁	16,45	15,43	2,42	2,31	1,77	1,85
	E ₂	14,45		2,14		1,94	
	E ₃	15,4		2,38		1,85	

28	E ₁	17,25	17	2,96	3	1,86	1,86
	E ₂	16,65		2,67		1,86	
	E ₃	15,2		3,20		1,86	

BRN							
Temp s (jours)	Échantillon s	Résistance en compression (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par flexion (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par fendage (MPa)	Moyenn e
3	E ₁	14,7	14,58	2,59	2,69	1,93	2,22
	E ₂	14,45		3,25		2,53	
	E ₃	14,6		2,24		2,20	
14	E ₁	19,35	19	2,90	2,90	2,86	2,51
	E ₂	18,5		3,13		2,65	
	E ₃	18,9		2,68		2,03	
28	E ₁	24,35	24,3	3,39	3,47	2,35	2,66
	E ₂	24,25		3,39		2,75	
	E ₃	24,3		3,62		2,87	

BNN							
Temp s (jours)	Échantillon s	Résistance en compression (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par flexion (MPa)	Moyenn e	Résistanc e en traction par fendage (MPa)	Moyenn e
3	E ₁	8	8	2,32	2,26	1,65	1,91
	E ₂	8,5		3,20		2,19	
	E ₃	7,5		2,26		1,90	
14	E ₁	18,25	18	2,95	3,12	2,16	2,15
	E ₂	17,85		2,31		2,13	
	E ₃	18,1		3,12		2,15	
28	E ₁	20,4	21,5	3,91	3,83	2,59	2,78
	E ₂	22,6		3,71		2,82	
	E ₃	21,5		3,86		2,93	

Annexe 11 : Méthode de FAESSEL

Cette méthode s'applique à tous les cas d'élancement et de longueur de flambement. De plus, elle ne s'applique que pour les sections carrées et rectangulaires.

Le calcul est basé sur la méthode de l'équilibre d'un moment interne résistant et d'un moment externe appliqué. Une itération pour dimensionner les aciers est faite jusqu'à ce que le moment externe soit inférieur au moment interne.

Le moment pris en compte dans cette itération est celui calculé à partir des excentricités du premier et du second ordre.

3.1 Excentricité additionnelle

$ea = \max (2 \text{ cm} ; L/250)$ où L est la longueur libre du poteau.

3.2 Excentricité du premier ordre

$$e1 = M_u / N_u + ea$$

M : moment ultime appliqué

N_u : effort normal ultime appliqué

3.3 Excentricité du second ordre

On ne peut pas déterminer l'excentricité du second ordre à partir des formules de la méthode forfaitaire, car on n'est plus dans le cas où :

$$L_f/h < \max [15 ; 20 \cdot e1/h]$$

Pour déterminer cette excentricité et calculer la section d'acier, on utilise la méthode Faessel. Cette méthode consiste à décomposer la flexion composée déviée en deux flexions composées équivalentes, puis à rechercher les sections d'aciers nécessaires, le ferrailage étant considéré symétrique.

Lors de la décomposition en deux flexions composées, l'utilisateur peut choisir de partager l'effort normal selon la méthode de Perchat.

3.4 Calcul des armatures

Le calcul se fait donc par itération :

On affecte $A_{min} / 4$ sur chaque face du poteau

Pour chaque direction, avec un pas défini par l'utilisateur, on augmente la section d'acier.

On compare le moment du second ordre correspondant au moment résistant de la section (ce qui oblige à un calcul de l'excentricité du second ordre à chaque itération), cette itération est basée sur les courbes d'interaction.

L'itération est stoppée si le moment résistant est supérieur au moment appliqué, ou si la section d'une nappe dépasse $A_{max} / 2$.

La figure ci-dessous est issue de la méthode de calcul dérivée de la méthode de Faessel dont la démarche est la suivante:

On considère une droite de déformation de la section béton caractérisée par un couple $(\varepsilon_m, \varepsilon_n)$

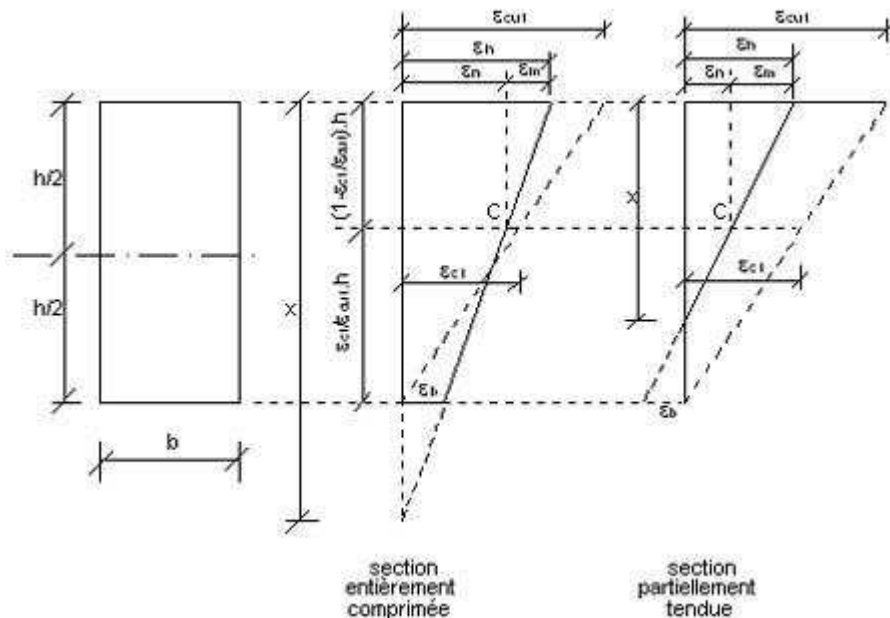


Figure 13: Diagramme des déformations de la section rectangulaire

Pour tout couple, on peut calculer les sollicitations résistantes N_{Rd} et M_{Rd} par la relation:

$e_i + M_{Ed}N_{Ed} + e_2 - M_{Rd}N_{Rd} = 0$, qui traduit l'équilibre : excentricité agissante = excentricité résistante avec :

e_i excentricité due aux imperfections géométriques prise à $L_0/400$ (article 5.2 de l'EC2)

e_0 excentricité extérieure du 1^{er} ordre = M_{Rd}/N_{Rd}

e_1 excentricité totale du 1^{er} ordre = $e_0 + e_i$

e_2 excentricité du 2^{ème} ordre = $\varepsilon_h - \varepsilon_{bh}(L_0\pi)^2$

h épaisseur du poteau dans le sens du flambement

HR humidité relative en %

L_0 longueur de flambement

M_{Ed} moment agissant en ELU

N_{Ed} effort normal agissant en ELU

M_{Rd} moment résistant de la section critique

N_{Rd} effort normal résistant de la section critique

r rayon de courbure de la section critique

ε_h déformation en fibre la plus comprimée

ε_b déformation en fibre tendue ou la moins comprimée

ε_{cl} déformation du béton sous contrainte maximale f_{ck}

ε_{cul} déformation maximale du béton à la rupture

φ_{ef} coefficient de fluage effectif

Une représentation graphique permet alors d'en déduire M_{RD} et N_{RD}