

République de Côte d'Ivoire

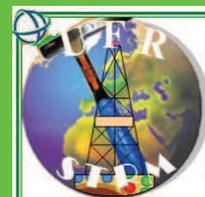
Année Universitaire 2012-2013

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique



Université FHB

N° d'ordre : 842/2013



UFR des Sciences de la Terre
et des Ressources Minières

Laboratoire de GEOMATERIAUX

THÈSE

Pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE FHB EN SCIENCES
DE LA TERRE**

Spécialité : GEOMATERIAUX

par

SERIFOU MAMERY

THÈME

**BETON A BASE DE RECYCLATS: INFLUENCE DU TYPE DE
RECYCLATS ET RÔLE DE LA FORMULATION**

Soutenue publiquement le 23 Décembre 2013 devant le jury composé de:

| | | |
|----------------------|--|--------------------|
| M AKA Kouamé | Professeur titulaire Univ. Félix Houphouët Boigny | Président |
| M BOFFOUE M. Olivier | Maître de conférences Univ. Félix Houphouët Boigny | Directeur de thèse |
| M EMERUWA Edjikémé | Professeur titulaire Univ. Félix Houphouët Boigny | Co-Directeur |
| M KOUAKOU K. Amedé | Docteur LBTP Abidjan | Rapporteur |
| M YOTTE Sylvie | Professeur titulaire Université Limoges | Examineur |
| M SBARTAI Z. Mahdi | Maître de conférences Université Bordeaux 1 | Examineur |

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 Félix 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...

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 soutenu 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 travail 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.

EMERUWA Edjikémé (Professeur Titulaire 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 (Maître assistant à l'Université Félix Houphouët Boigny) pour ses nombreux conseils.

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

Tous les enseignants et personnels de I2M-GCE et l'IUT, Prof **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 des thésards 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. Prof **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 **FADIGA Fatoumata**, mes oncles **BAYO N'gordo** et **BAYO 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 **CAMARA Adama Idrissa, DIOMANDE Issaka, KEITA Kélétiogui, DIOMANDE Aboulaye, YEO Wonnan Eugène, DJAKO Able** et **JOLISSAINT Obre**.

Et bien sûr, je ne peux terminer sans remercier **DIOMANDE 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.

Table des matières

| | Page |
|---|----------|
| Dédicace | i |
| Remerciements..... | iii |
| Table des matières | v |
| Liste des abréviations | xii |
| Liste des figures..... | xiv |
| Liste des tableaux..... | xvii |
| Résumé | xix |
| Abstract | xx |
| | |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ETUDE..... | 3 |
| | |
| Partie 1 | |
| | |
| GÉNÉRALITÉS | |
| | |
| Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | 4 |
| Introduction..... | 4 |
| I-1 Intérêt du recyclage dans le génie civil..... | 4 |
| I-2 Utilisation des recyclâts | 6 |
| I-3 Différents recyclâts..... | 8 |
| I-3-1 Laitiers | 8 |
| I-3-1-1 Laitier de haut fourneau..... | 8 |
| I-3-1-2 Laitier d'acier | 9 |
| I-3-2 Sous-produits provenant des centrales thermiques..... | 9 |
| I-3-2-1 Mâchefer..... | 10 |
| I-3-2-2 Scories..... | 10 |
| I-3-2-3 Cendres volantes..... | 10 |
| I-3-3 Déchets divers | 11 |

| | |
|---|----|
| I-3-3-1 Verre de récupération | 11 |
| I-3-3-2 Pneus usagers | 11 |
| I-3-3-3 Ciment durci | 12 |
| I-3-3-4 Résidus d'incinérateurs | 12 |
| I-3-3-5 Boues rouges | 12 |
| I-3-4 Les granulats recyclés..... | 13 |
| I-3-4-1 Granulats recyclés issus de déchets de démolition | 13 |
| I-3-4-2 Granulats de déchets de production de l'industrie du béton..... | 13 |
| I-3-4-3 Sables de fonderies | 14 |
| Conclusion | 14 |
| I-4 Granulats dans le béton..... | 15 |
| I-4-1 Environnement normatif | 15 |
| I-4-2 Aspect technique | 16 |
| I-4-3 Formulation | 16 |
| I-4-3-1 Incorporation de granulats recyclés dans les bétons..... | 17 |
| I-4-3-2 Influence de la granulométrie..... | 18 |
| I-4-3-3 Influence de la forme des granulats..... | 18 |
| I-4-3-4 Généralités sur la formulation des bétons | 18 |
| I-4-3-5 Méthodes de formulation traditionnelles..... | 19 |
| I-4-3-6 Méthodes de formulation novatrices | 21 |
| I-4-3-7 Méthodes de formulation numériques | 22 |
| I-5 Recyclage des verres | 23 |
| Introduction | 23 |
| I-5-2 Caractéristiques physiques et mécaniques du verre..... | 24 |
| I-5-2-1 Origine du verre | 25 |
| I-5-2-2 Surface spécifique | 25 |
| I-5-2-3 Masse volumique | 26 |
| I-5-2-4 Morphologie des grains | 27 |
| I-5-2-5 Porosité et absorption d'eau du verre à vitre concassé..... | 27 |
| I-5-3 Inconvénients et avantages | 28 |

| | |
|---|----|
| I-5-3-1 Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique | 28 |
| I-5-3-1-1 Réaction alcali-silice..... | 28 |
| I-5-3-1-2 Réaction pouzzolanique..... | 31 |
| I-5-4 Verre dans les bétons | 31 |
| I-5-4-1 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction alcali-silice..... | 32 |
| I-5-4-2 Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice..... | 33 |
| I-5-4-3 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction pouzzolanique..... | 34 |
| I-5-4-4 Influence de la teneur en verre des mélanges sur la réaction pouzzolanique..... | 35 |
| Conclusion | 35 |
| I-6 Recyclage des pneus..... | 35 |
| I-6-1 Origine des pneus..... | 37 |
| I-6-2 Granulats..... | 37 |
| I-6-3 Propriétés des granulats..... | 39 |
| I-6-4 Performance des bétons..... | 41 |
| I-6-4-1 Résistance à la compression..... | 41 |
| I-6-4-2 Résistance à la traction..... | 43 |
| I-6-4-3 Module d'élasticité..... | 45 |
| Conclusion..... | 46 |
| I-7 Recyclage des déchets de l'industrie du béton..... | 47 |
| Introduction..... | 47 |
| I-7-2 Bilan des déchets de production de l'industrie du béton..... | 47 |
| I-7-3 Caractéristiques des rebuts de fabrication de l'industrie du béton..... | 48 |
| I-7-4 Inconvénients..... | 49 |
| I-7-5 Performance des bétons..... | 50 |
| Conclusion du chapitre..... | 50 |
| Conclusion..... | 51 |

Partie 2

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

| | |
|--|-----------|
| Chapitre II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES | 53 |
| Introduction | 53 |
| II-1 Matière première et Méthodes de caractérisation..... | 53 |
| II-1-1 Matière première | 53 |
| II-1-1-1 Ciment | 53 |
| II-1-1-2 Sable | 53 |
| II-1-1-3 Retour de toupie..... | 53 |
| II-1-1-4 Gravier naturel | 54 |
| II-1-1-5 Ciment durci..... | 54 |
| II-1-1-6 Verre concassé | 54 |
| II-1-1-7 Pneu découpé | 54 |
| II-2- Méthode de la caractérisation de la matière première..... | 55 |
| II-2-1 Analyse granulométrique | 56 |
| II-2-2 Equivalent de sable (E.S.) | 57 |
| II-2-3 Masse volumique | 58 |
| II-2-4 Absorption | 58 |
| II-3 Formulation des bétons | 59 |
| II-4 Caractérisation du béton | 59 |
| II-4-1 Essai d'affaissement (bétons frais) | 59 |
| II-4-2 Essai de compression (béton durci) | 60 |
| II-4-3 Essai de traction par fendage | 62 |
| II-4-4 Essai de traction par flexion | 63 |
| II-4-5 Essai au scléromètre | 64 |
| II-4-6 Essai à l'ultrason | 65 |
| II-4-6-1 Relation entre la vitesse d'ultrason-résistance du béton..... | 67 |
| II-4-6-2 Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique..... | 67 |
| II-4-7 Mesure de la porosité à l'eau | 68 |

Partie 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|---|-----------|
| Chapitre III : RÉSULTATS DE LA CARACTERISATION DES MATERIAUX CONSTITUANT LES BETONS ETUDIES..... | 71 |
| Introduction | 71 |
| III-1 Ciment | 71 |
| III-1-1 Ciment CEM II 32,5 | 71 |
| III-1-2 Ciment CEM II 32,5 | 71 |
| III-2 Sable | 72 |
| III-2-1 Granulométrie | 72 |
| III-2-2 Module de finesse des sables | 73 |
| III-2-3 Equivalent de sable | 73 |
| III-2-4 Masse volumique et Absorption | 74 |
| III-3 Discussion : Modèle de Weibul..... | 74 |
| III-4 Gravier | 75 |
| III-4-1 Granulométrie | 76 |
| III-4-2 Masse volumique et Absorption..... | 76 |
| III-4-3 Caractéristique mécanique | 78 |
| III-5 Discussion : modèle de Weibul | 78 |
| Conclusion du chapitre..... | 80 |
| | |
| Chapitre IV : INFLUENCE DU TYPE ET DE LA QUANTITE DE GRANULATS RECYCLES SUR LES PERFORMANCES DU BETON..... | 81 |
| Introduction | 81 |
| IV-1 Fabrication du béton | 81 |
| IV-2 Résultats et discussions sur la résistance mécanique..... | 82 |
| IV-2-1 Influence du taux volumique | 85 |
| IV-2-2 Influence de la taille des grains..... | 86 |
| IV-2-3 Proposition d'une loi donnant la résistance..... | 88 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Conclusion partielle | 92 |
| IV-2-5 Applications | 93 |
| Conclusion générale du chapitre..... | 95 |

Chapitre V : INFLUENCE DE L'ASSOCIATION GRANULATS NATURELS-RECYCLATS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DU BETON : CAS DU VERRE ET PNEU.....

| | |
|---|-----------|
| 97 | 97 |
| Introduction | 97 |
| V-1 Expérience | 97 |
| V-2 Résistance à la compression du béton de granulats associés..... | 98 |
| V-3 Conséquence du type de recyclâts de substitution..... | 99 |
| V-4 Application du béton de pneu | 102 |
| Conclusion du chapitre..... | 102 |

Chapitre VI : VALORISATION DES GRANULATS ISSUS DES BETONS FRAIS DE RETOUR DE TOUPIES

| | |
|---|------------|
| 103 | 103 |
| Introduction..... | 103 |
| VI-1 Plan expérimental | 104 |
| VI-1-1 Matériaux | 104 |
| VI-1-1-1 Granulat | 104 |
| VI-1-1-2 Ciment | 105 |
| VI-2 Plan d'expérience | 105 |
| VI-2-1 Méthodologie | 105 |
| VI-2-2 Compositions des bétons | 107 |
| VI-3 Gâchage et malaxage..... | 108 |
| VI-4 Eprouvettes : fabrication, conservation et tests | 108 |
| VI-5 Résultats | 109 |
| VI-5-1 Comportement à l'état frais..... | 109 |
| VI-6 Propriétés mécaniques..... | 109 |
| VI-6-1 Résistance à la compression..... | 109 |
| VI-6-2 Résistance à la traction par flexion et fendage..... | 112 |

| | |
|---|------------|
| VI-6-3 Module d'élasticité dynamique..... | 112 |
| VI-7 Propriétés physiques..... | 113 |
| VI-7-1 Porosité..... | 113 |
| VI-7-2 Absorption..... | 114 |
| VI-7-3 Densité..... | 117 |
| Conclusion partielle..... | 118 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 120 |
| PERSPECTIVES..... | 123 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 124 |
| ANNEXES | 147 |

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
CERIB : Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton
CSH: Silicate de Calcium Hydraté
ES: Equivalent de Sable
F : La fonction qui dépend uniquement des caractéristiques des granulats.
FAE: Four à Arc Electrique
FP: Four Proche
FOP: Four à Oxygène Pur
GCo: Granulats Concassés
GCa: Granulats de Caoutchouc
GDCBFNB: Guide des Déchets de Chantier de Bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment
GNG: Granulats Naturels de Gironde
GRe: Granulats recyclés
GRo: 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
MDE: Micro-Deval en présence de l'Eau
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

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Grains de verre | 27 |
| Figure 2 : Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice..... | 29 |
| Figure 3 : Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres de différentes couleurs... | 33 |
| Figure 4 : Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre | 33 |
| Figure 5 : Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant le sable par des granulats de verre | 34 |
| Figure 6 : Granulats en caoutchouc de classe (0/4) mm utilisés..... | 38 |
| Figure 7 : Courbes granulométriques du sable et du G.C de classe (0/4) mm..... | 38 |
| Figure 8 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C..... | 41 |
| Figure 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)..... | 42 |
| Figure 10 : Influence de l'adjonction de G.C sur la résistance en compression..... | 42 |
| Figure 11 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage..... | 44 |
| Figure 12 : Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice..... | 45 |
| Figure 13 : Influence des G.C. sur le module d'élasticité..... | 46 |
| Figure 14 : Présentation des différents granulats recyclés | 55 |
| Figure 15 : Colonne de tamis | 56 |
| Figure 16 : Courbe de l'analyse granulométrique..... | 56 |
| Figure 17 : Mesure de l'équivalent de sable..... | 57 |
| Figure 18 : Mesure de la masse volumique..... | 58 |
| Figure 19 : Dispositif de mesure de l'affaissement | 60 |
| Figure 20 : Rectification avec une meule diamantée | 61 |
| Figure 21 : Rectification avec du soufre | 61 |
| Figure 22 : Béton soumis à une contrainte | 61 |
| Figure 23: Machine à fendage | 63 |
| Figure 24 : Epreuve centrée | 63 |
| Figure 25: Disposition de l'éprouvette | 63 |

| | |
|--|-----|
| Figure 26 : Machine à flexion | 64 |
| Figure 27 : Scléromètre | 65 |
| Figure 28 : Mesure au scléromètre sur éprouvette 16 x 32..... | 65 |
| Figure 29 : Testeur à ultrasons | 66 |
| Figure 30 : Positions des points de mesures ultrasonores | 66 |
| Figure 31 : Dispositif expérimental pour la saturation sous vide | 70 |
| Figure 32: Courbe granulométrique des sables | 72 |
| Figure 33: Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton | 73 |
| Figure 34 : Régression permettant de retrouver les paramètres | 74 |
| Figure 35 : Courbes granulométriques des granulats concassés et roulés..... | 75 |
| Figure 36 : Régression permettant de retrouver les paramètres | 76 |
| Figure 37: Résistance des différents mélanges en fonction du pourcentage massique de granulats..... | 82 |
| Figure 38 : Résistance normée en fonction du pourcentage et du type de granulats..... | 85 |
| Figure 39 : Modèle de variation de la résistance en fonction de la fraction volumique.. | 88 |
| Figure 40 : Comparaison entre le modèle de Weibull et les données expérimentales pour la granulométrie de la grave naturelle..... | 90 |
| Figure 41: Variation de F avec le logarithme du paramètre d'échelle λ | 90 |
| Figure 42: Variation de F avec le logarithme du facteur de forme k..... | 90 |
| Figure 43 : Variation de F avec la densité relative $(1-d_g/d_s)$ du granulat recyclé par rapport au sable..... | 91 |
| Figure 44 : Comparaison de la résistance expérimentale et de la résistance donnée par le modèle pour les 4 matériaux..... | 92 |
| Figure 45 : Résistance du béton de verre en fonction de la proportion..... | 100 |
| Figure 46 : Résistance du béton de pneu en fonction de la proportion | 100 |
| Figure 47 : Eprouvettes après compression | 101 |
| Figure 48 : Courbe de l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés | 105 |
| Figure 49 : Plan factoriel des expériences..... | 106 |
| Figure 50 : Evolution de la résistance en compression pendant la cure pour le béton de référence et les bétons de granulats recyclés | 110 |
| Figure 51 : Relation entre résistance mécanique et pourcentage total des granulats recyclés..... | 111 |
| Figure 52 : Relation entre résistance à la compression et pourcentage total de granulats | |

| | |
|--|-----|
| recyclés | 111 |
| Figure 53 : Résistance à la traction en fonction du pourcentage des granulats recyclés (mesurée par flexion et fendage)..... | 112 |
| Figure 54 : Module d'élasticité dynamique en fonction du pourcentage des granulats recyclés..... | 113 |
| Figure 55 : Porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés... | 114 |
| Figure 56 : Surface de réponse de la porosité en fonction du pourcentage de sable et gravier recyclés | 115 |
| Figure 57 : Absorption des bétons en fonction du temps | 116 |
| Figure 58 : Absorption des bétons en fonction du pourcentage de remplacement..... | 117 |
| Figure 59 : Densité des bétons en fonction du pourcentage de remplacement | 118 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I : Classification des graves de recyclage | 7 |
| Tableau II : Diamètre critique selon différents auteurs | 24 |
| Tableau III : Les surfaces spécifiques des différentes fractions granulaires de verre | 26 |
| Tableau IV : Densités des différentes classes granulaires..... | 26 |
| Tableau V : Masse volumique absolue et absorption d'eau du verre..... | 27 |
| Tableau VI : Relative chute 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 | 36 |
| Tableau VII : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc..... | 40 |
| Tableau VIII : Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D)..... | 43 |
| Tableau IX : Taux de rebut moyen et tonnages de rebuts et déchets pour différents secteurs de l'industrie du béton..... | 48 |
| Tableau X : Caractéristiques des granulats issus des rebuts de fabrication de blocs et pavés en béton | 49 |
| Tableau XI : Composition chimique et propriété physique du ciment Bélier..... | 71 |
| Tableau XII : Composition chimique (valeurs moyenne en %) du ciment calcia..... | 72 |
| Tableau XIII : L'équivalent de sable..... | 74 |
| Tableau XIV : Paramètres de distributions et coefficient de corrélation..... | 75 |
| Tableau XV : Masses volumiques des granulats | 77 |
| Tableau XVI : caractéristiques mécaniques moyennes généralement admises des granulats..... | 78 |
| Tableau XVII: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation..... | 79 |
| Tableau XVIII: Composition des mélanges..... | 81 |
| Tableau XIX: Détails des résultats des résistances à l'essai de compression des différents bétons..... | 83 |
| Tableau XX: Résistances moyennes en compression, écarts types et coefficient de variation..... | 84 |
| Tableau XXI: Pentas de la résistance normée en fonction du pourcentage de granulats (%-1)..... | 86 |
| Tableau XXII: Coefficients de corrélation entre la résistance ou le coefficient de variation et les caractéristiques des granulats..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| Tableau XXIII : Valeurs caractéristiques des granulats | 89 |
| Tableau XXIV: Éléments de calcul de la masse de granulat nécessaire..... | 93 |
| Tableau XXV: Définition des coûts intervenant dans le coût total du poteau..... | 94 |
| Tableau XXVI: Coût d'un poteau avec les différentes solutions..... | 94 |
| Tableau XXVII: Composition de mélange de la substitution..... | 97 |
| Tableau XXVIII: Valeurs de résistance en compression et densité..... | 98 |
| Tableau XXIX : Caractéristiques physiques des granulats utilisés..... | 104 |
| Tableau XXX: Composition chimique (valeurs moyenne en %)...... | 105 |
| Tableau XXXI: Plan d'expériences..... | 106 |
| Tableau XXXII: 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)..... | 107 |

Résumé

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

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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), ces 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 occasionnent 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 c). 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 b; 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 a).

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 inspirées 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, l'ambition du gouvernement Ivoirien est de faire de la Côte d'Ivoire un pays émergent 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 Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire) et l'Institut Mécanique et d'Ingénierie – département Génie Civil environnemental (I2M-GCE) de l'Université de Bordeaux 1 (France).

OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ETUDE

L'objectif du travail proposé est de trouver un substitut au granulats naturels (roche concassée) à travers l'incorporation de déchets non biodégradables (ex : granulats de caoutchouc (G.C), concassé de verre (C.V), concassé de 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, nous allons 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 bibliographique regroupant le recyclage des pneus usagés, des verres et des déchets de l'industrie du béton.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales. Dans ce chapitre sera présenté la matière première et les méthodes de caractérisation. Ainsi que la formulation et les méthodes de caractérisation du béton.

Le chapitre trois sera consacré à la caractérisation de la matière première. Cette partie présentera une étude complète des caractéristiques des granulats recyclés et naturels. Nous verrons également une modélisation de la granulométrie de ces granulats qui sera utilisée par la suite pour modéliser la relation entre 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 seront présentée dans le quatrième chapitre. Les réponses des composites en compression simple seront présentées dans ce chapitre.

Ensuite, au chapitre cinq sera 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 granulats et aussi à l'influence du taux de substitution de ce granulats. La compression, la traction par flexion et fendage, ainsi que la porosité et les propriétés d'élasticité seront présentées dans ce chapitre.

Nous terminerons par les conclusions, les perspectives de notre étude et les références bibliographiques.

Partie 1

ETUDE

Chapitre I: SYNTHESE 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.

I-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-Valdieu, (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 annuellement environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus (**bruxellesenvironnement, 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-Hoa., 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.

I-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 de 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 I présente les caractéristiques des granulats utilisés dans les travaux routes.

Tableau I: Classification des graves de recyclage (IDRRIM, 2011)

| 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 régi 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., 2005 ; Li et al., 2006**), 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 cimentaires classiques en améliorant les performances des bétons.

I-3 Différents recyclâts

I-3-1 Laitiers

I-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.

I-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.

I-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.

I-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 ».

I-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, 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)**.

I-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, ils 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-Hernandez 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 utilisées dans la construction de routes (**Shkelzen, 2010**).

I-3-3 Déchets divers

I-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 recyclats utilisés dans l'étude est un recyclat de verre.

I-3-3-2 Pneus usagés

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.

I-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.

I-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**).

I-3-3-4 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 Duchesne, 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.

I-3-4 Les granulats recyclés

I-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**).

I-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 type 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.

I-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 de 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 ».

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, 2008; Hansen et Narud, 1983**) et bétons concassés (**Gomez, 2002; Tu et al., 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.

I-4 Granulats dans le béton

I-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 (Valorisation, 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.

I-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.

I-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.

I-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 et Helene, 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 et Brito, 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 et Padayachee, 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.

I-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.

I-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-granulat).

I-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.

I-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 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 .

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

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

En 1907, Fuller et Thompson basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe 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 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 propose une courbe granulairé 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 granulairé 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 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 granulairé 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 granulats.

En 1942 et en 1952, Faury et Joisel s'inspirent des travaux de Caquot et y apportent des modifications. Le premier prolonge l'étendue granulairé 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 mettent en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulairé encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon une courbe granulairé 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 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 fixée.

I-5-6 Méthodes de formulation novatrices

En 1996, Baron et Olivier développent une méthode de formulation dérivée de celle de Dreux et 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 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 et Rougemon, 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 nombreux 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.

I-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, (**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 et Buil, 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:

$$f_c(j) = \frac{p \times f_{cm}(j)}{q \times f_{cm} + 1} \quad \text{Eq.I-8} \qquad \qquad \qquad EMP = D_{Max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Eq.I-9}$$

$$c_{sq}(28j) = c \times \left[1 + 1,1 \left(1 - \exp \left\{ \frac{\varepsilon K_{pi}(28j) \times P z_i}{c} \right\} \right) + 0,17 t_{c3A} \left(1 - \exp \left\{ -79 \frac{\varepsilon f_{ij}}{t_{c3A} \times C} \right\} \right) \right]$$

Eq.I-10

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

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 et Gorisse (**Dreux, 1998**). Car, cette formulation ne prend pas en compte l'ajout d'adjuvant.

I-6 Recyclage des verres

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.

I-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 granulats 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 granulats de verre au delà de laquelle la réaction Alcali silicate se produisait (RAS). Le tableau II donne les diamètres critiques pour différents auteurs. Ce diamètre situe le matériau entraînant peu de RAS dans les sables et les fines.

Tableau II: 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)** montrent que la résistance en compression en fonction du taux de remplacement décroît linéairement (pour les pourcentages de remplacement testés), l'expansion étant croissante en fonction de l'âge et du taux de remplacement (quelque soit l'âge du béton pour un taux donné). L'adhésion incomplète du verre à la pâte de ciment est aussi une cause de cette décroissance de la résistance.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés de masse volumique de 525 kg/m^3 se fait 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.

I-6-2-1 Origine du verre

Le verre utilisé dans la réalisation du béton est de plusieurs origines. Les recherches de **(Rachida, 2009)** ont 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.

I-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 III :

Tableau III: 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 III.

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).

I-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 IV rassemble les densités de l'ensemble des classes granulaires.

Tableau IV: 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 |

I-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. b et c) (**Rachida, 2009**).

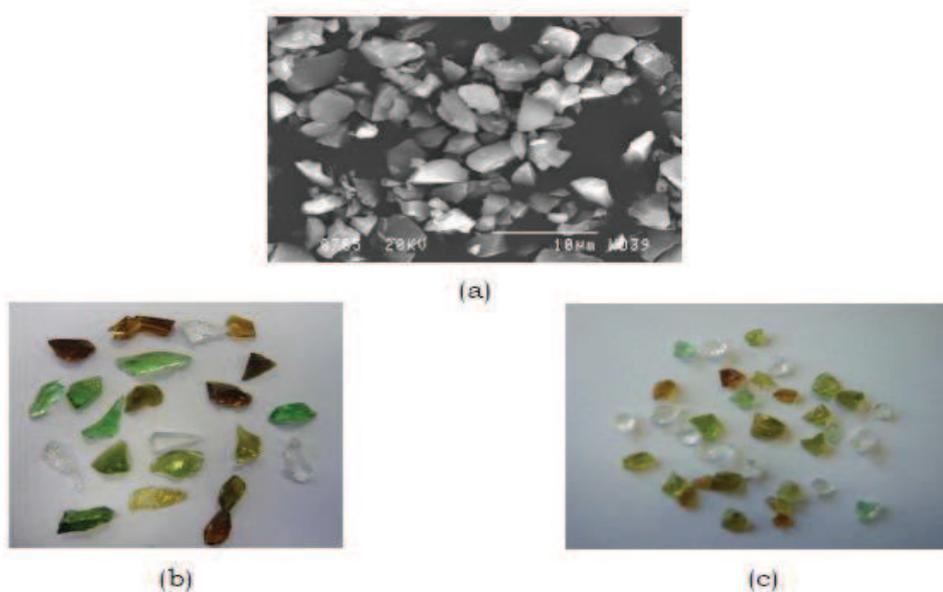


Figure 1: Grains de verre (**Rachida, 2009**)

- (a) Vue au microscope électronique à balayage d'une poudre de verre (classe C8)
- (b) Grains de classe C0
- (c) Grains de classe C1

I-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 V.

Tableau V: Masse volumique absolue et absorption d'eau du verre (**Moisson, 2005**)

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

I-6-3 Inconvénients et avantages

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

I-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**).

I-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 (**Poole, 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 **Poole, (1992)** l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit (Figure 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.

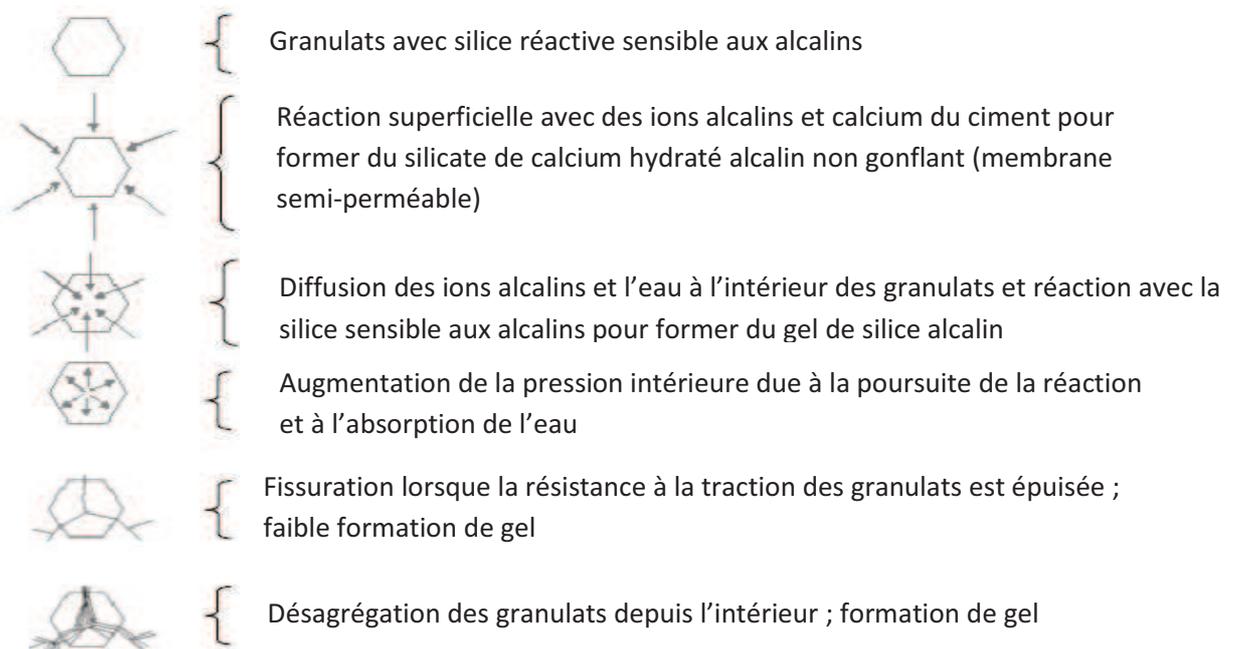


Figure 2: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice (**Sprung et Sylla, 1998**)

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 Thaulow., 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; Brochi et Mehta., 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 Katawaki., 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 Page., 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/m³.

Des inhibiteurs chimiques comme les sels lithium (**Maccoy et Caldwell, 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 Caldwell, 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.

I-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 Kajaus, 1979**) ou une température élevée (**Massazza et Pezzuoli, 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 Geoffray, 1978**).

I-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...**).

I-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 4).

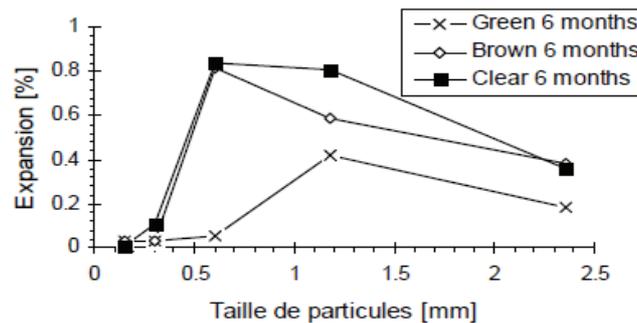


Figure 3: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres de différentes couleurs (Yamada et al., 2005)

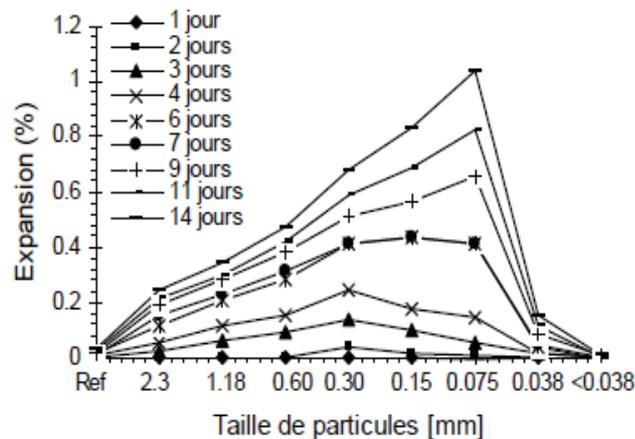


Figure 4: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre (Meyer et al., 1997)

I-6-4-2 Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice

Différentes 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). Les travaux de **(Polley et al., 1998)** et ceux de **(Özkan et al., 2008)** abondent dans le même sens. 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 pessimisme. 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 remplaçant du ciment en présence de granulats inertes ou réactif, quant au second groupe, il a utilisé le verre comme granulats.

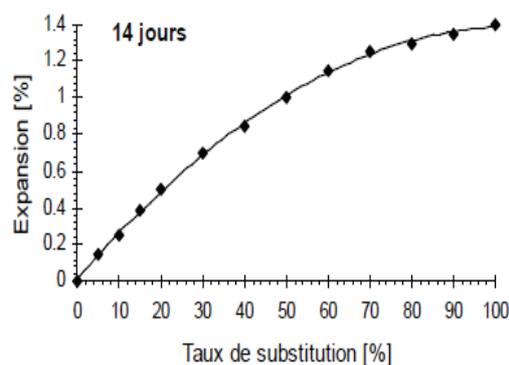


Figure 5: Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant le sable par des granulats de verre **(Jin et al., 2000)**

I-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 μm , 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 μm 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 m^2/kg pour avoir un bon indice d'activité pouzzolanique à 90 jours. Néanmoins, avec 20 % de remplacement de ciment par cette finesse de verre, au-delà d'une année de cure, la résistance de ces bétons a pu égaler celle des mélanges confectionnés avec 10 % de fumée de silice.

I-6-4-2-2 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.

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.

I-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 VI résume les taux de perte de résistance en compression mesurés par différents auteurs par rapport à un béton de référence.

Tableau VI: 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.

| Auteur | Taux de remplacement | | |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
| | 5% | Autre taux | 100% |
| Batayneh et al (1)(2007) | | 52 % (pour 40%) | 90 % |
| Khaloo et al (1)(1994) | | 99,95 (pour 50%) | 99,98% |
| Li et al (1)(2006) | | De 40% à 43% (pour 15%) | |
| Bravo et de Brito (1) | 14% | 45% (pour 15%) | |
| Fattuhi et Clark (2)(1996) | | 69% (pour 12%) | |
| Ganijian et al (2)(2003) | -4% | 21% (pour 10%) | |
| Toutanji (1) | | 57% (pour 50%) | 76% |

Selon **Valeria 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 employés 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 (**Eldin et Senouci, 1993**) et (**Khatib et Bayomy, 1999**). **Eldin et Senouci, (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 **Segre et Joekes, (2000)**, la ferraille des pneus en caoutchouc utilisée par **Fattuhi et Clark, (1996)** et la bande de roulement des pneus par **Topçu, (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.

I-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-t-elle 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.

I-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 6 montre les G.C utilisés dans ce travail.



Figure 6: Granulats en caoutchouc de classe (0/4) mm utilisés (Ho, 2010)

Leur courbe granulométrique est présentée à la figure 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).

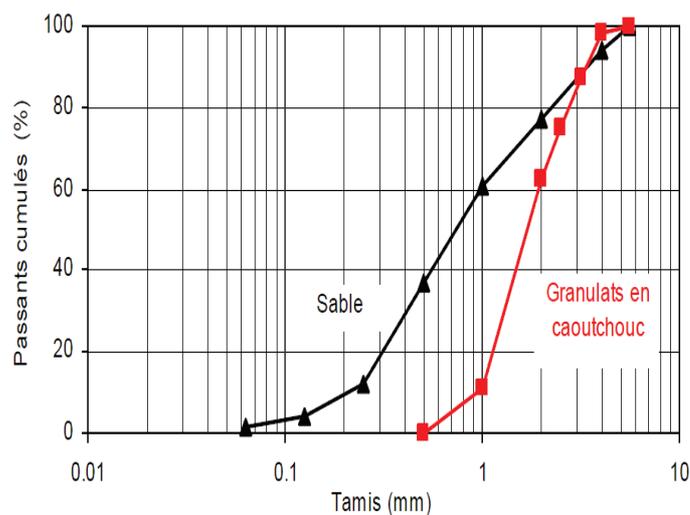


Figure 7: Courbes granulométriques du sable et du G.C de classe (0/4) mm (Ho, 2010)

I-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 la 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 microfissure 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 Joekes, (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 VII, 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 et al., (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 VII: Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc, (**Benazzouk et al., 2004**)

| 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 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).

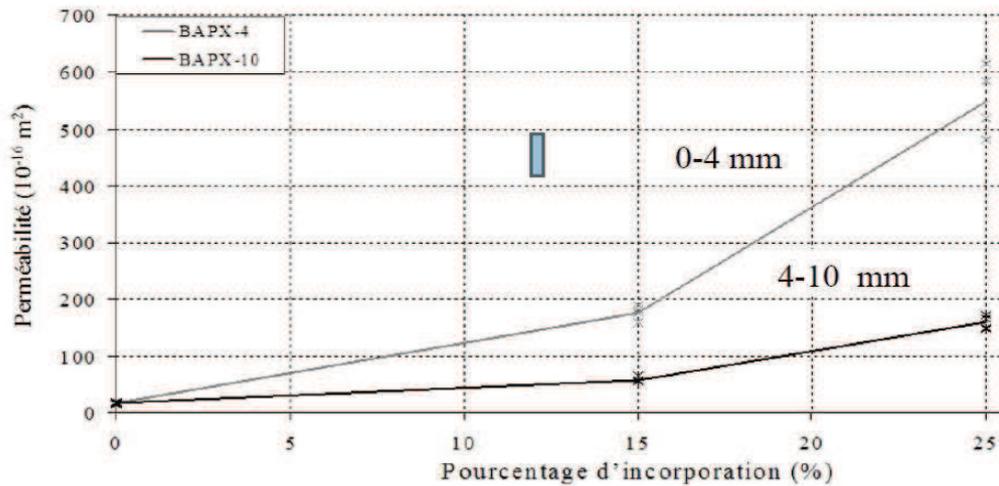


Figure 8: Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C., (Garros, 2007)

I-7-4 Performance des bétons

I-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 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 %.

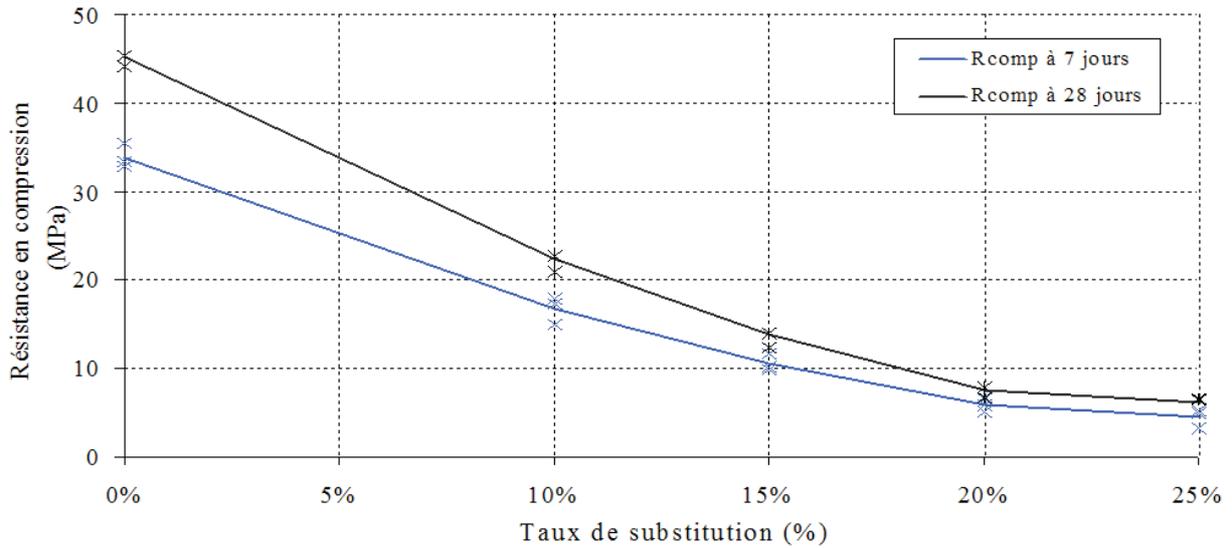


Figure 9: Influence du dosage en G.C sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4 mm remplacé par des G.C 0-4 mm), (Garros, 2007).

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 10, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20 % du volume total de la phase granulaire.

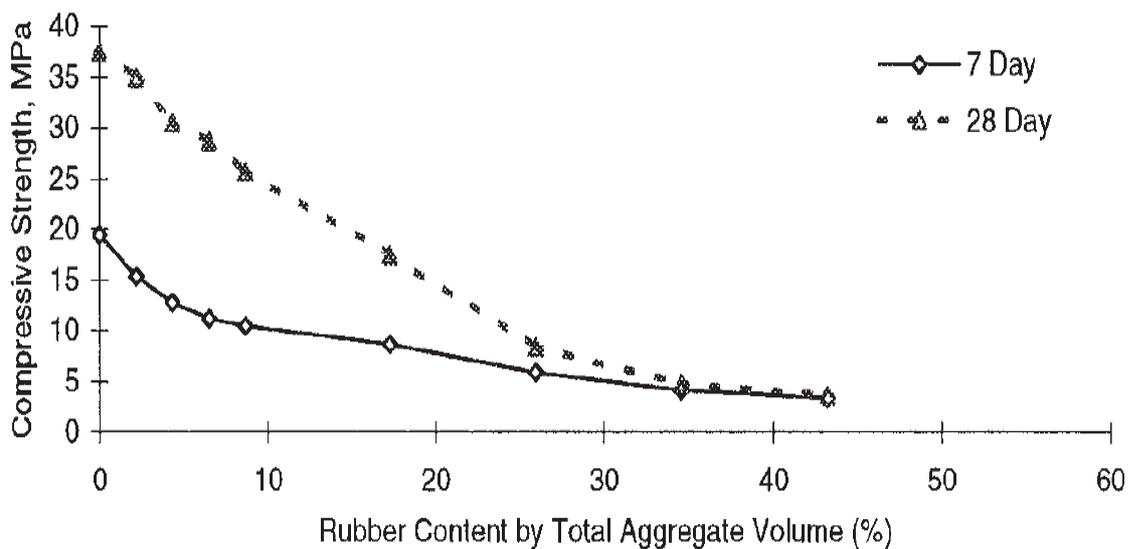


Figure 10: Influence de l'adjonction de G.C sur la résistance en compression, (Khatib, 1999)

I-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 VIII. 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 VIII: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D), (Kaloush et *al.*, 2005).

| 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 11.

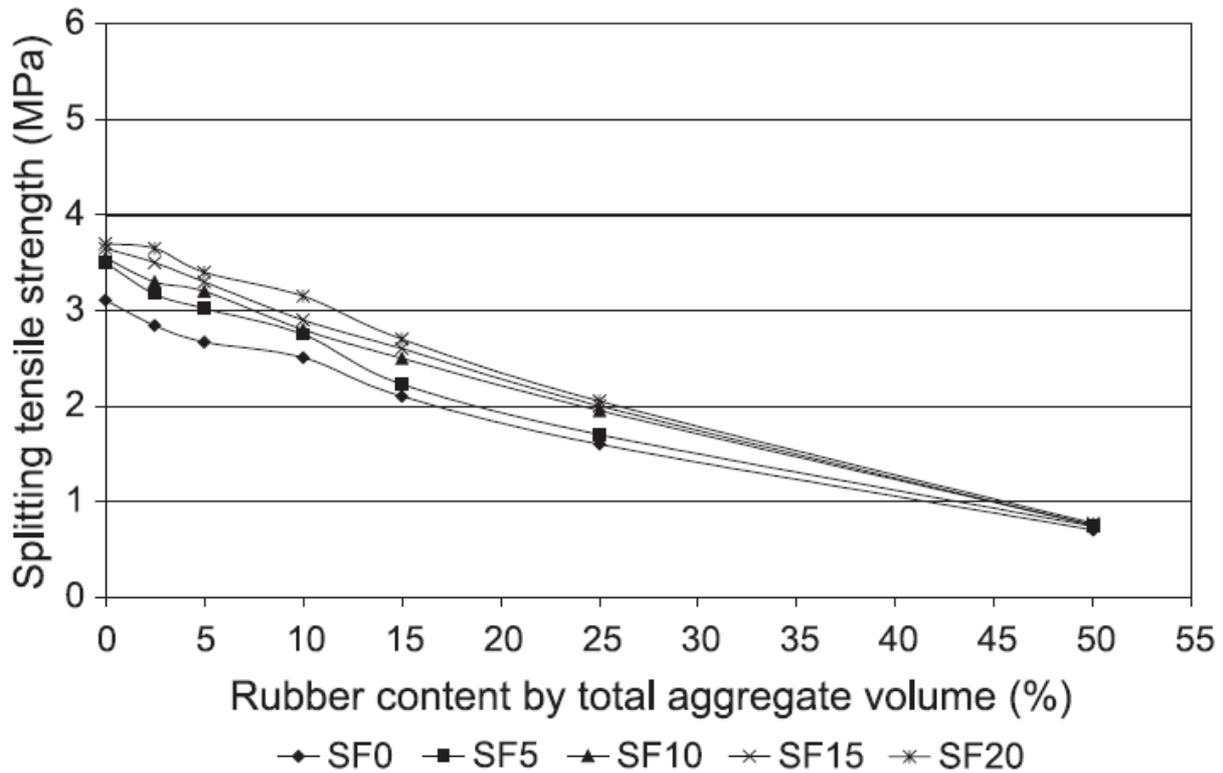


Figure 11: Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice (SF) sur la résistance à la traction par fendage, (Güneyisi et al., 2004)

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.

I-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 12 montrent une baisse de 83 % du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc.

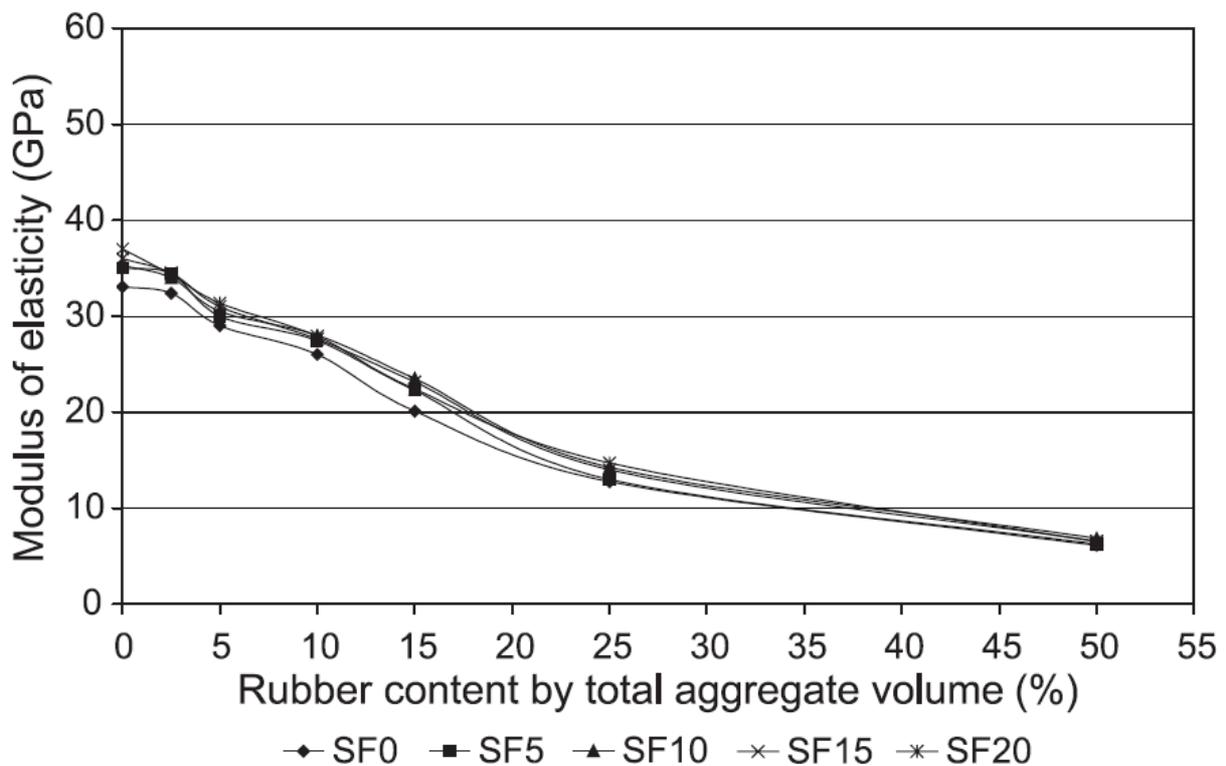


Figure 12: Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice, (Güneyisi *et al.*, 2004).

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 13 une réduction de 30 % du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10 % de G.C.

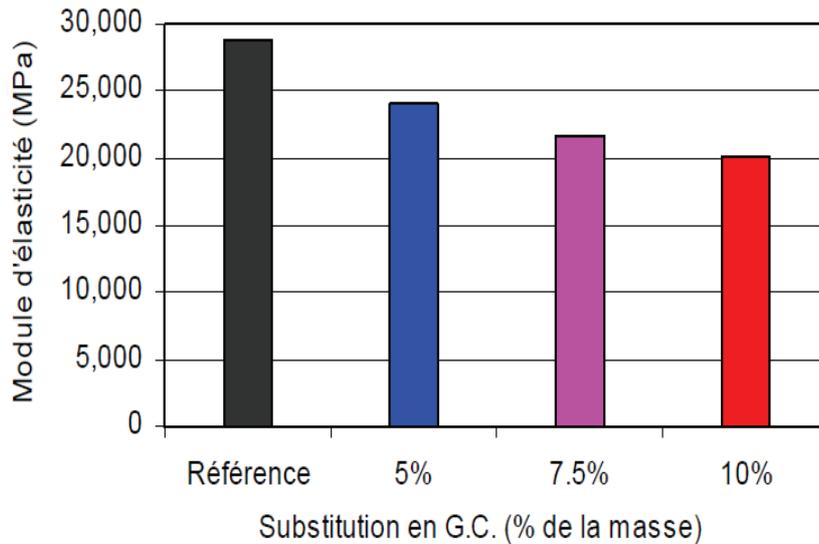


Figure 13: Influence des G.C. sur le module d'élasticité, (**Ganijian et al., 2009**).

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.

I-8 Recyclage des déchets de l'industrie du béton

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.

I-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 IX résume les déchets de béton produits par six secteurs de l'industrie du béton.

Tableau IX: Taux de rebut moyen et tonnages de rebuts et déchets pour différents secteurs de l'industrie du béton (année 2001)(**Raphaël, 2003**)

| Secteurs de l'industrie du béton | Production vendue en 2001 (millions de tonnes) | Taux de rebuts et déchets moyens en % | Quantité de rebus 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 |

I-8-3 Caractéristiques des rebuts de fabrication de l'industrie du béton

Dans le tableau X 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 X: Caractéristiques des granulats issus des rebuts de fabrication de blocs et pavés en béton (**Raphaël, 2003**)

| | |
|---|-----------------------|
| 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.

I-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 granulats recyclé de démolition et le granulats 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**).

I-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 atteint 30 %. Pour un E/C = 0,50, les valeurs du retrait sont élevés et la plupart des retraits ont eu lieu au cours des 7 premiers jours, puis diminue.

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.

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 (rebut 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.

Partie 2

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Chapitre II: TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Introduction

Différentes techniques ont été utilisées pour la caractérisation de la matière première et des matériaux confectionnés. Dans ce chapitre nous présentons les différentes techniques mises en œuvre pour caractériser les matériaux qui font l'objet de cette étude. Dans la première partie nous présenterons les différentes matières premières (sables naturels et recyclés, granulats naturels et recyclés) qui entrent dans la composition des échantillons à étudier et leurs méthodes de caractérisations. La deuxième partie sera consacrée à l'élaboration et à la caractérisation des bétons.

II-1 Matière première et Méthodes de caractérisation

II-1-1 Matière première

Pour ce qui concerne notre étude, les matières premières utilisées sont les granulats recyclés de caoutchouc, de concassés de ciment durci, de concassés de bouteilles, de retours de toupies puis les granulats naturels de concassés de granite, graviers roulés et du sable pour la confection du béton.

II-1-1-1 Ciment

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé deux types de ciments (CEMII B 32,5 R; et CEMII/ 32,5 R). Ces derniers proviennent de deux pays (CEMII B pour la Côte d'Ivoire et CEMII/ 32,5 R pour la France). Ces ciments ont été soumis à des analyses physiques et chimiques. Les résultats de ces analyses sont regroupés au chapitre 3.

II-1-1-2 Sable

Nous avons utilisé deux sables naturels: un sable lagunaire de la commune de Port-Bouet (Abidjan-Côte d'Ivoire) et un sable qui provient des rivières Girondines (Bordeaux-France). Les sables prélevés ont été soumis à des tests de caractérisation au laboratoire avant leur utilisation. Ces tests sont décrits au paragraphe 3.

II-1-1-3 Retour de toupie

Les retours de toupie sont des bétons frais non utilisés renvoyé en entreprise et stockés dans des entrepôts où ils durcissent. Ces bétons durcis non utilisés sont concassés pour constituer des granulats (sables et graviers). Ces granulats ont été séparés en deux classes: la fraction

fine (sable recyclé) pour remplacer le sable et la fraction grossière (gravier recyclé) utilisés pour remplacer le gravier. Ces recyclés proviennent de la société CEMEX et sont constitués de sable et graviers naturels puis d'ancien mortier.

II-1-1-4 Gravier naturel

Il s'agit des concassés de granite provenant de la carrière d'Attinguié (Côte d'Ivoire) et des graviers roulés (alluvionnaires) de la région de Bordeaux (France).

Les concassés de granite sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Ses minéraux constitutifs sont principalement du quartz, des micas (biotite et/ou muscovite), des feldspaths potassiques (orthoses) et des plagioclases. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les graviers roulés alluvionnaires sont essentiellement constitués des siliceux de Garonne.

II-1-1-5 Ciment durci

Accidentellement ou par négligence, le ciment une fois en contact avec l'humidité (eau) s'hydrate et fait prise. Ces deux phénomènes conduisent au durcissement. Après ce durcissement, le ciment durci ne peut être utilisé comme liant donc il est rejeté dans la nature et constitue à ce moment un déchet. Ce ciment durci est récupéré et concassé pour être soumis à des essais de caractérisation. Une image de ces granulats présentée en figure 14. Les résultats de ces essais sont présentés au chapitre 3.

II-1-1-6 Verre concassé

Les verres de récupérations proviennent de la commune du Plateau (Abidjan-Côte d'Ivoire). Cependant ils sont très souvent contaminés par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être préalablement éliminées avant leur utilisation comme granulats. Il est simplement nettoyé avec de l'eau potable. Ce verre est issu de bouteilles de couleur verte qui ont été concassées à la main (figure 14). Aucune analyse chimique du verre n'a été réalisée, de ce fait le taux d'oxyde de silice n'est pas connu.

II-1-1-7 Pneu découpé

Les pneus usagés proviennent des automobiles. Ce sont des déchets encombrants et très peu dégradables. Ils sont collectés dans la commune d'Abobo (Abidjan) et découpés à l'aide d'une scie et d'un burin à la main. Le caoutchouc est un élément indispensable dans la constitution d'un pneumatique: il représente environ 48 % de son poids. En plus du latex, matière de base

du caoutchouc naturel, les caoutchoucs synthétiques, dérivés de pétrole, ont permis d'améliorer les caractéristiques des pneumatiques. Les pneumatiques sont également renforcés d'armatures métalliques (15 % de poids) afin d'augmenter le niveau de leur performance, mais aussi de fibres textiles (5 % de poids) afin d'alléger leur poids tout en conservant leurs propriétés d'endurance (Ho, 2010).

La photo ci-dessous présente l'aspect des granulats recyclés utilisés au cours de notre étude

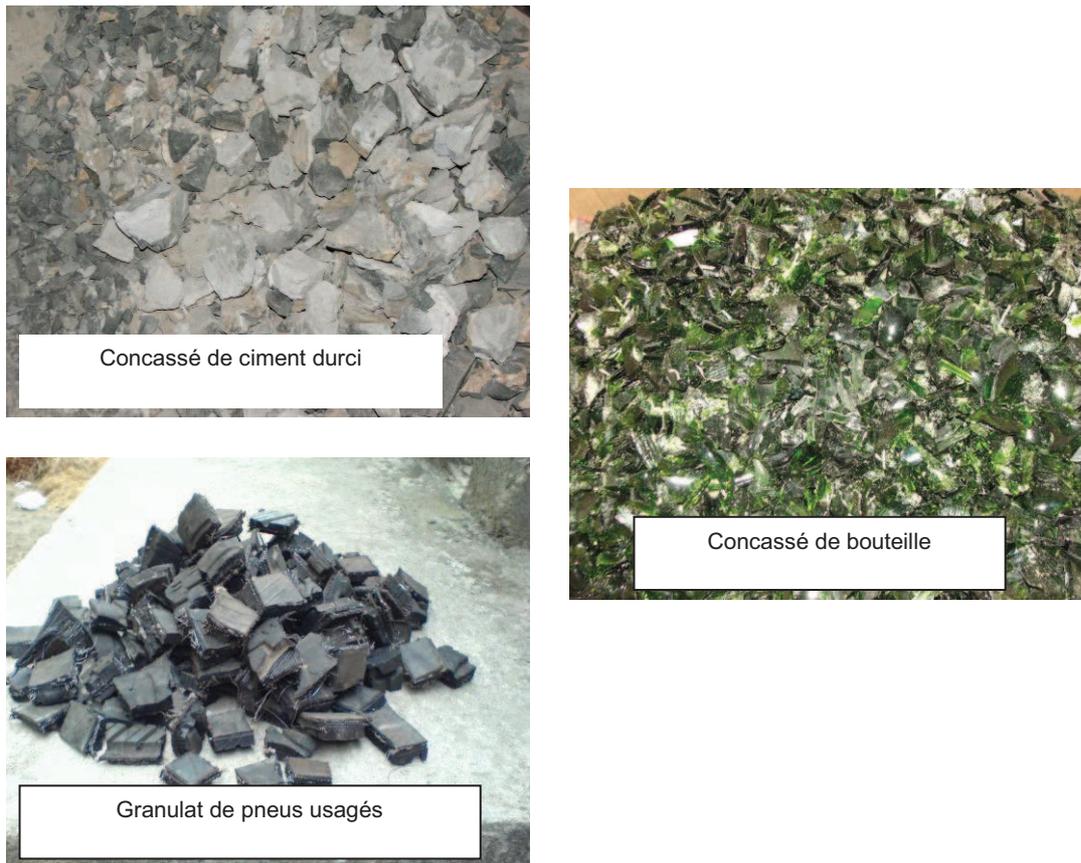


Figure 14: Présentation des différents granulats recyclés

II-2 Méthode de caractérisation de la matière première

La connaissance des propriétés de nos matières premières nécessite différents types d'analyses. Parmi les méthodes de caractérisation, nous avons retenu les analyses suivantes:

- l'analyse granulométrique pour déterminer la classe granulaire et le module de finesse,
- l'équivalent de sable pour déterminer la propreté du sable,
- la masse volumique important pour la formulation du béton,
- l'absorption important pour le malaxage.

Elles ont été effectuées sur le sable et les granulats par contre pour la caractérisation du ciment nous avons pris les données de la littérature.

II-2-1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm. L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis (figure 15) un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. La norme actuelle (**EN 933-2**) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm): 0,063; 0,125; 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125.

Les masses des différents refus ou tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique (figure 16).



Figure 15: Colonne de tamis

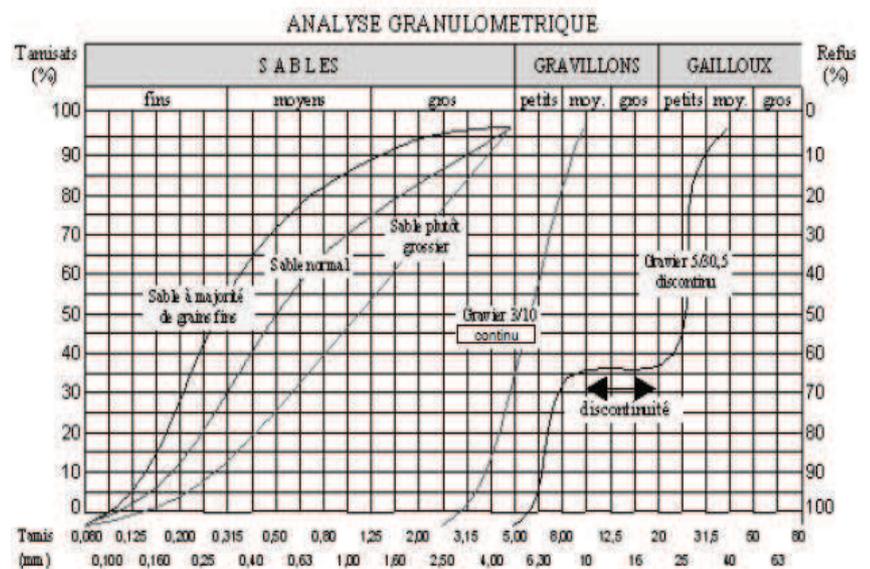


Figure 16: Courbe de l'analyse granulométrique

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants:

- les dimensions d et D du granulat ;
- la plus ou moins grande proportion d'éléments fins ;
- le module de finesse (caractéristique essentiel du sable) : Selon la norme Française **NF P 18-540**, il est égal au $1/100^e$ de la somme des refus cumulés en pourcentages sur les tamis de la série suivante: 0,16 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm. Et, pour la norme Européenne **EN 12620**, MF est égal à $1/100^e$ de la somme des refus cumulés en

pourcentages sur les tamis de la série suivante: 0,125 – 0,25 – 0,50 – 1 – 2 – 4 mm.

Lorsque MF est compris entre:

- 1,8 et 2,2: le sable est à majorité de grains fins,
- 2,2 et 2,8: on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2,8 et 3,3: le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

II-2-2 Equivalent de sable (E.S.)

L'essai s'effectue sur un échantillon de sable humide afin d'éviter les pertes d'argile selon la norme **NF P 18-597**. Il faut vérifier que les grains de sable ont bien un diamètre inférieur à 5 mm (l'essai se fait uniquement sur la fraction 0/2) par tamisage et vérifier que la masse sèche de l'échantillon soit 110 g. Il permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans le sol ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats.

Le sable est incorporé dans une éprouvette normalisée et préalablement remplie de solution «lavande», l'ensemble est agité à la main pour bien humidifier le sable et déloger les bulles d'air. L'humidification dure dix (10) minutes.

La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible de mesurer la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut à l'œil et au réglé ou à l'aide d'un piston normalisé (fig. 17). Pour déterminer l'E.S. on utilise les formules marquées sur la figure 17.

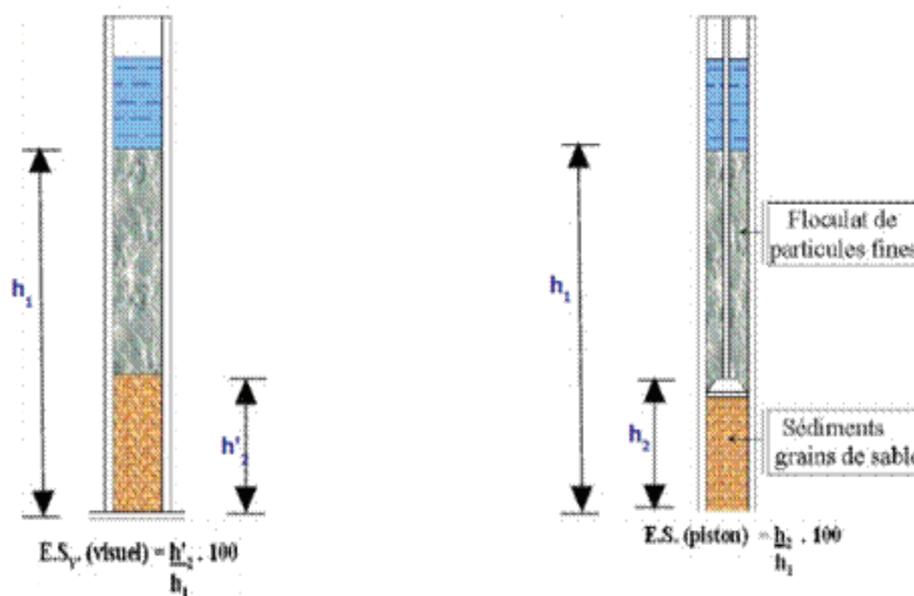


Figure 17 : Mesure de l'équivalent de sable

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité du sable et prédisent les caractéristiques d'un béton élaboré avec ce sable. Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par Dreux sont données au chapitre 3.

II-2-3 Masse volumique

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Pour les granulats la méthode de l'éprouvette graduée a été utilisée. Elle est très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible. Il s'agit de remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Ensuite peser un échantillon sec de masse M de granulats (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Et enfin lire le nouveau volume V_2 (Fig.18).

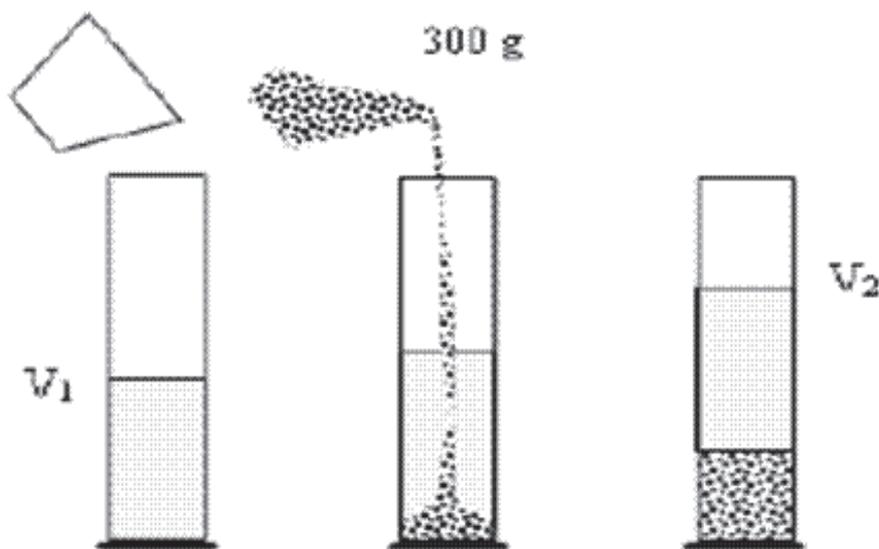


Figure 18 : Mesure de la masse volumique

La masse volumique absolue est: $\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$

II-2-4 Absorption

Le coefficient d'absorption en eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau à la masse de matériau sec. Il s'agit de peser 300 g d'échantillon sec et de l'immerger dans un récipient contenant de l'eau

pendant 24 heures. La masse absorbante M_{ab} est ainsi déterminée. Puis la masse sèche M_s après passage de l'échantillon humide à l'étuve à 105°C est déterminée. H_p le coefficient d'absorption est:

$$H_p = \frac{M_s}{M_{ab} - M_s} * 100$$

Ces trois caractéristiques sont définies selon (**norme NF EN 1097-6**). L'absorption est essentielle vis-à-vis des propriétés à l'état frais du béton car elle permet de maîtriser la teneur en eau du mélange.

II-3 Formulation des bétons

Le béton est un mélange de constituants de base dont on dissocie : la partie liante du béton (solide), le squelette (solide), la partie liquide et l'air (gazeux). Sa formulation a pour but de déterminer la proportion des constituants afin de répondre au cahier des charges imposés à savoir une bonne résistance en compression. Pour nos travaux, la méthode Dreux-goriss a été utilisée. Les formulations de béton retenues sont données aux Tableaux XXII; XXXI et XLIV des chapitres IV, V et VI. La confection des bétons s'est faite sans additions minérales et sans adjuvants.

Les éprouvettes ont été conservées par immersion dans un bassin humide à température ambiante durant les périodes retenues pour les caractérisations.

II-4 Caractérisation du béton

II-4-1 Essai d'affaissement (béton frais)

L'essai d'affaissement est utilisé pour déterminer la consistance du béton. Il est réalisé à partir du cône d'Abrams (Fig.19). La connaissance de ce paramètre est d'une importance fondamentale dans la définition de l'ouvrabilité du béton frais.

Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm). Le cône est rempli en trois (3) couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement (ou SLUMP).



Figure 19: Dispositif de mesure de l'affaissement

II-4-2 Essai de compression (béton durci)

L'essai en compression permet de déterminer la contrainte de compression f_c conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Pour ce fait, 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 cette rectification, il faudra utiliser une rectifieuse équipée d'une meule diamantée permettant l'usinage de manière à rendre les extrémités parfaitement perpendiculaires aux génératrices ou faire du surfaçage au soufre décrit par la norme **NF P 18-416** (Fig.20 et 21).

La mise en charge est effectuée grâce à une presse (Fig.22) 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 20: Rectification avec une meule diamantée



Figure 21: Rectification avec du soufre



Figure 22: Béton soumis à une contrainte

II-4-3 Essai de traction par 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 (Fig.23), suivant sa génératrice. Elle s'appuie sur Deux bandes en contre-plaqué et doit être centrée et appuyée sur toute la longueur (Fig.24).

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. Cette relation est établie pour un matériau homogène élastique. Elle n'est valable pour le béton que si l'éprouvette a un diamètre suffisamment grand ayant la taille du plus gros granulats. Si non l'écart type sur la mesure risque d'être élevé.



Figure 23: Machine à fendage

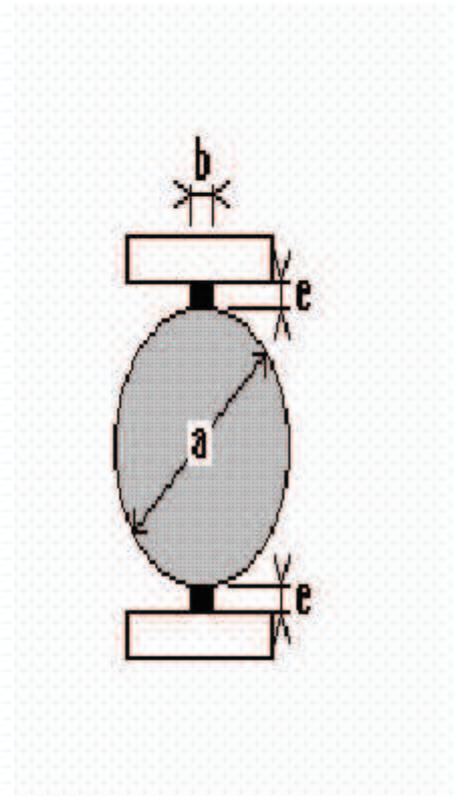


Figure 24 : Epreuve centrée

II-4-4 Essai de traction par 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 (Fig.25):

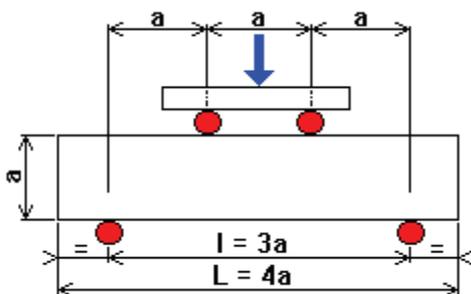


Figure 25: Disposition de l'éprouvette

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 (Fig.26). La charge est appliquée de manière continue et sans choc.

Noter la charge maximale F_{maxi} atteinte avant la rupture (en kN), a l'arrête de base de l'éprouvette. f_f a pour expression (à 0,1 MPa près).

$$f_f = \frac{30 F_{maxi}}{a \times a}$$

De même que pour l'essai de traction par fendage, cette relation a été établie pour des matériaux homogène et élastique. On l'utilise donc pour le béton avec des éprouvettes dont la taille est grande devant celle du plus gros granulat.



Figure 26: Machine à flexion

II-4-5 Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre permet de déterminer la "dureté au choc" du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique). A partir de cet indice les abaques permettent d'établir une

corrélation avec la résistance en compression. C'est un essai non destructif réalisé à partir d'un scléromètre.

Le scléromètre est composé d'une tige en acier, sortant d'un cylindre (Fig.27). Cette tige 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 rigide. 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 cm² chacune. Il est nécessaire de faire une série de 27 mesures sur chaque zone d'essai (Fig.28). La distance entre deux mesures de 3 cm au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de 3 cm des bords de la surface testée. L'indice sclérométrique (Is) de la zone est la médiane des 27 mesures.

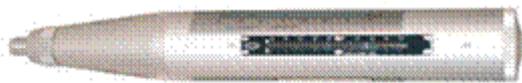


Figure 27 : Scléromètre

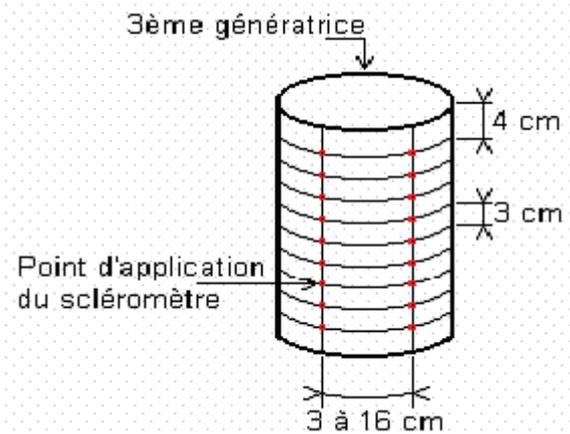


Figure 28 : Mesure au scléromètre sur éprouvette 16x 32

II-4-6 Essai à l'ultrason

L'essai à l'ultrason est un essai non destructif qui permet de calculer le module d'élasticité dynamique (E_d) puis de déduire la résistance. Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse des ondes qui se propagent dans le béton. Les mesures des vitesses des ultrasons sont réalisées par un testeur ultrasonique (Fig.29) comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception de fréquence (54 KHz). 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.

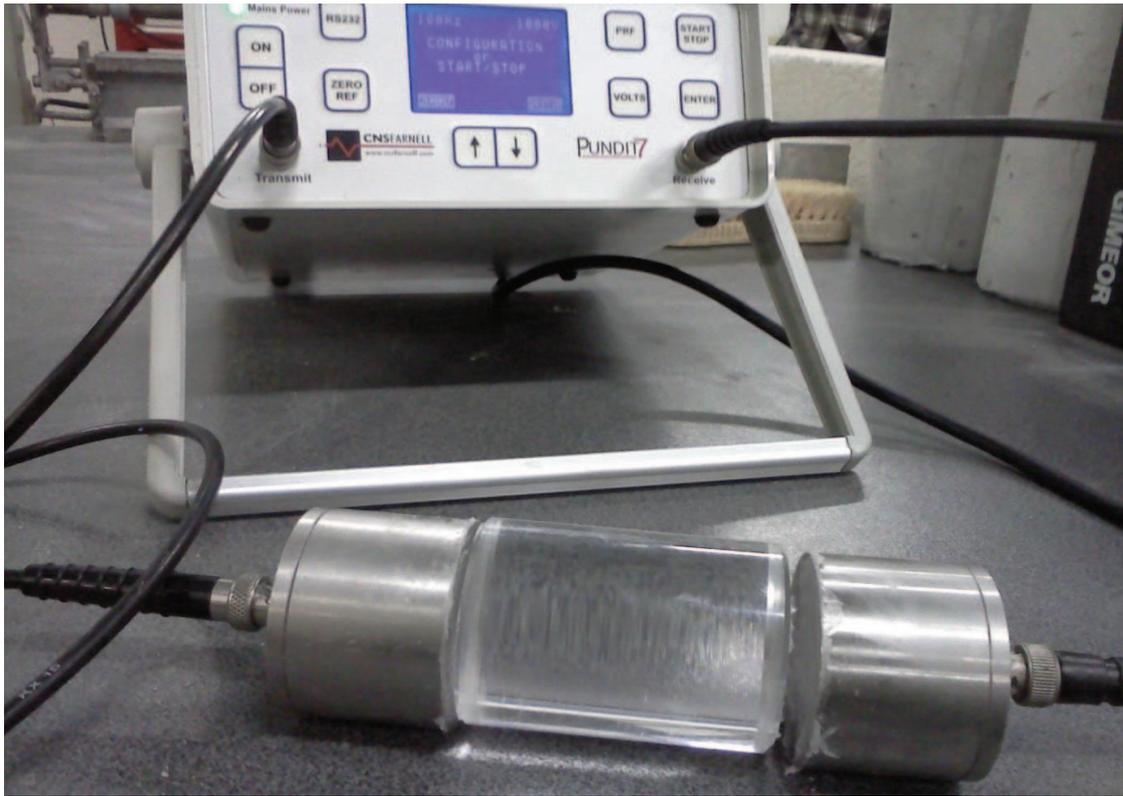


Figure 29: Testeur à ultrasons

La vitesse des ultrasons (V) est le quotient entre la distance (d) séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps (t) de propagation de l'onde : $V = \frac{d}{t}$

La mesure de la vitesse de propagation se fait sur une série de trois éprouvettes de dimension 16x32 cm (Fig.30).



Figure 30: Positions des points de mesures ultrasonores

Le module d'élasticité dynamique (E_d) est donné par l'expression suivante, (Neville, 2002):

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

E_d : Module d'élasticité dynamique exprimé en MPa;

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

ν : 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;

II-4-6-1 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, (Chaki, 2006) sont liés par la relation:

$$\text{résistance} = 167 \text{ Exp} \left(\frac{E_d}{122500} \right)$$

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.

II-4-6-2 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 (Neville, 2002).

- $E_c = 0,83 E_d$

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

- $E_c = 1,25 E_d - 19$

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 influencée 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.

II-4-7 Mesure de la porosité à l'eau

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise le béton. Ce n'est pas l'unique paramètre mais c'est celui qu'il faut déterminer en premier lieu car il va conditionner toutes les propriétés du béton comme la résistance en compression mais aussi les indicateurs de durabilité.

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 31). 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:

- 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:

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

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



Figure 31: Dispositif expérimental pour la saturation sous vide

Partie 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre III: CARACTERISATION DES MATERIAUX CONSTITUANT LES BETONS ETUDIES

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.

III-1 Ciment

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

III-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 cm²/g pour une densité de 2,935. Il répond à la norme ivoirienne NI 05.06.004.

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

Tableau XI: Composition chimique et propriété physique (Kouadio, 2010)

| 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 | | | | | | | |
| (cm ² /g) | | (µm) | | | | | | | |
| 3199 | 2,935 | 16,4 | | | | | | | |

III-1-2 Ciment CEM III 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 XII.

Tableau XII: Composition chimique du ciment calcia (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 ²⁻ | Na ₂ O |
| % | 2,7 | - | 0,17 |

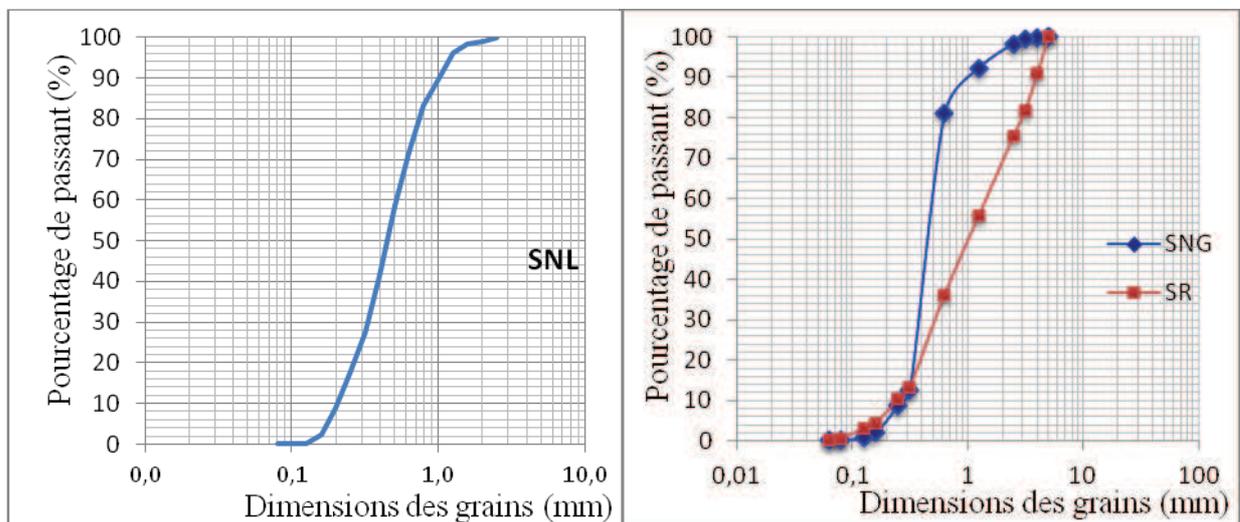
III-2 Sable

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

III-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 32.



III-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. 33). 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.

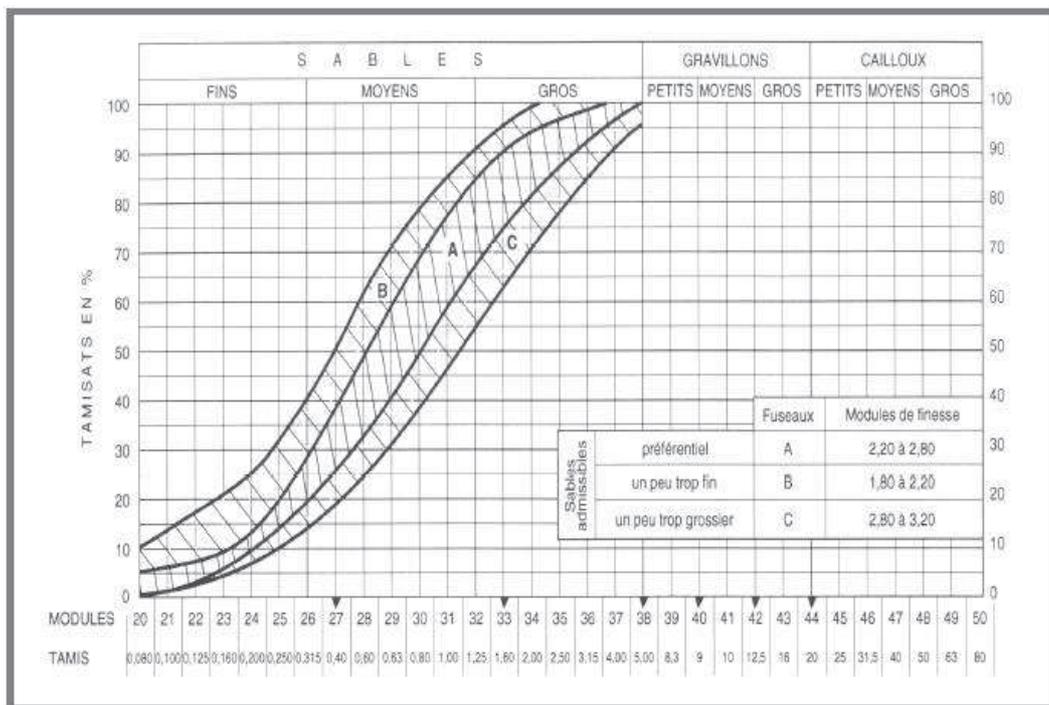


Figure 33: Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton (Rakotoniaina, 2007)

III-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 XIII.

Tableau XIII: L'équivalent de sable

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

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**).

III-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.

III-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 34. 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.

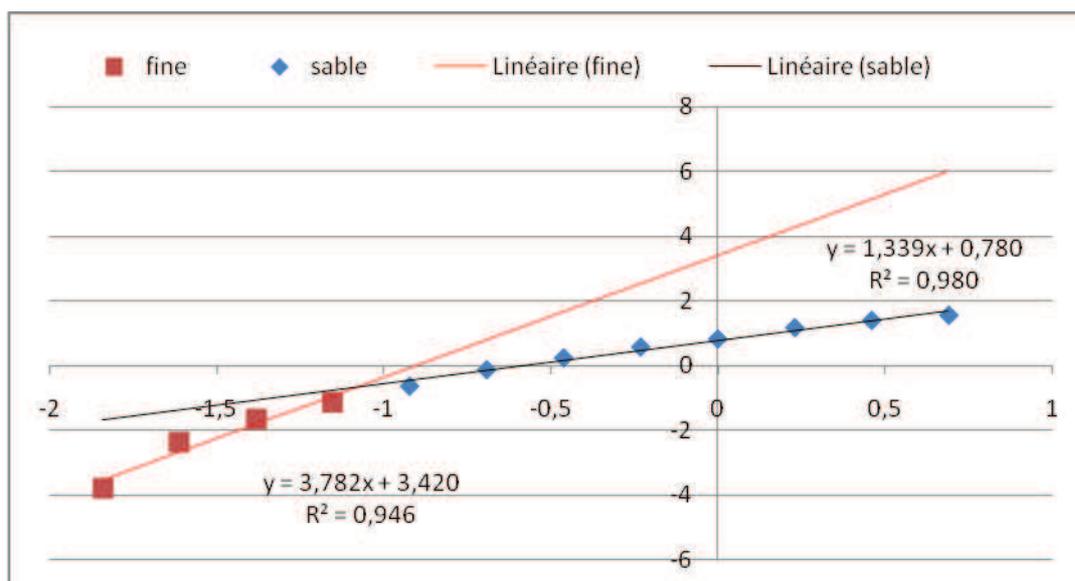


Figure 34: Régression permettant de retrouver les paramètres λ et k

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 XIV.

Tableau XIV: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation

| Paramètre | Fine | | | | Grossière | | | |
|-----------|----------------------------------|------|-----------|-------|----------------------------------|------|-----------|-------|
| | Diamètre (d) de la fraction (mm) | k | λ | R^2 | Diamètre (d) de la fraction (mm) | k | λ | R^2 |
| Sables | | | | | | | | |
| 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.

III-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.

III-4-1 Granulométrie

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 35. 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.

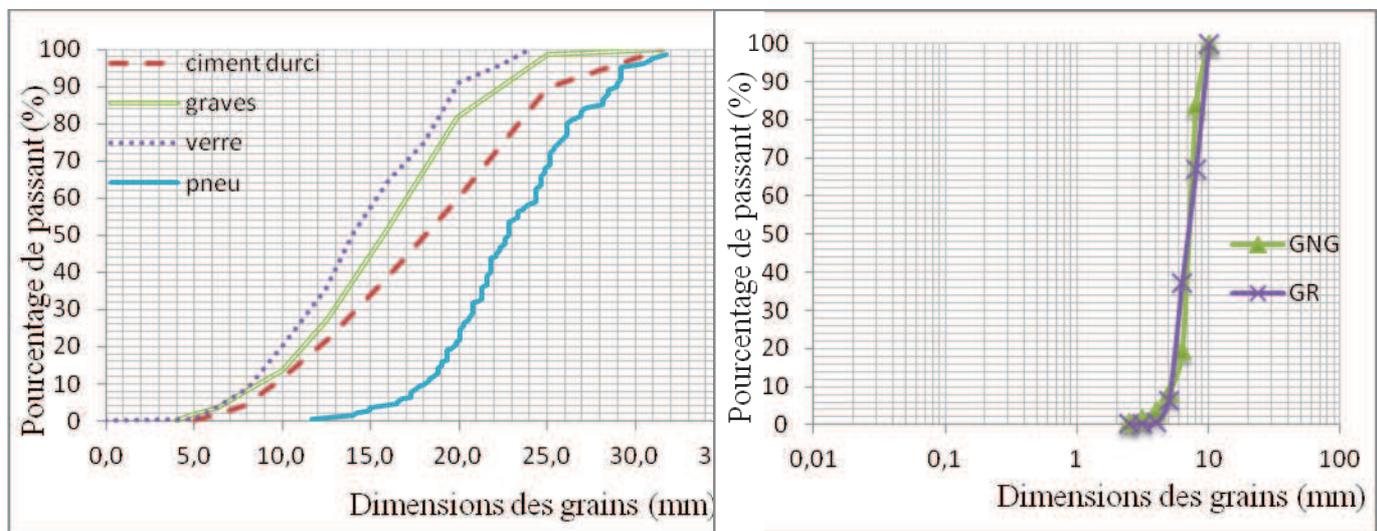


Figure 35: Courbes granulométriques des granulats concassés et roulés

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.

III-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 XV.

Tableau XV: 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 roulés de gironde (GNG) sont plus fins 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 g/cm³ et 2,3 %. La faible densité et sa grande absorption pourraient 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 g/cm³. 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 collée à la surface des grains qui contient un pourcentage élevé de vide occlus (souvent autour de 10 %).

III-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 XVI.

Tableau XVI: 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 élevés 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 microfissure dans le béton.

III-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. 36) 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 XVII.

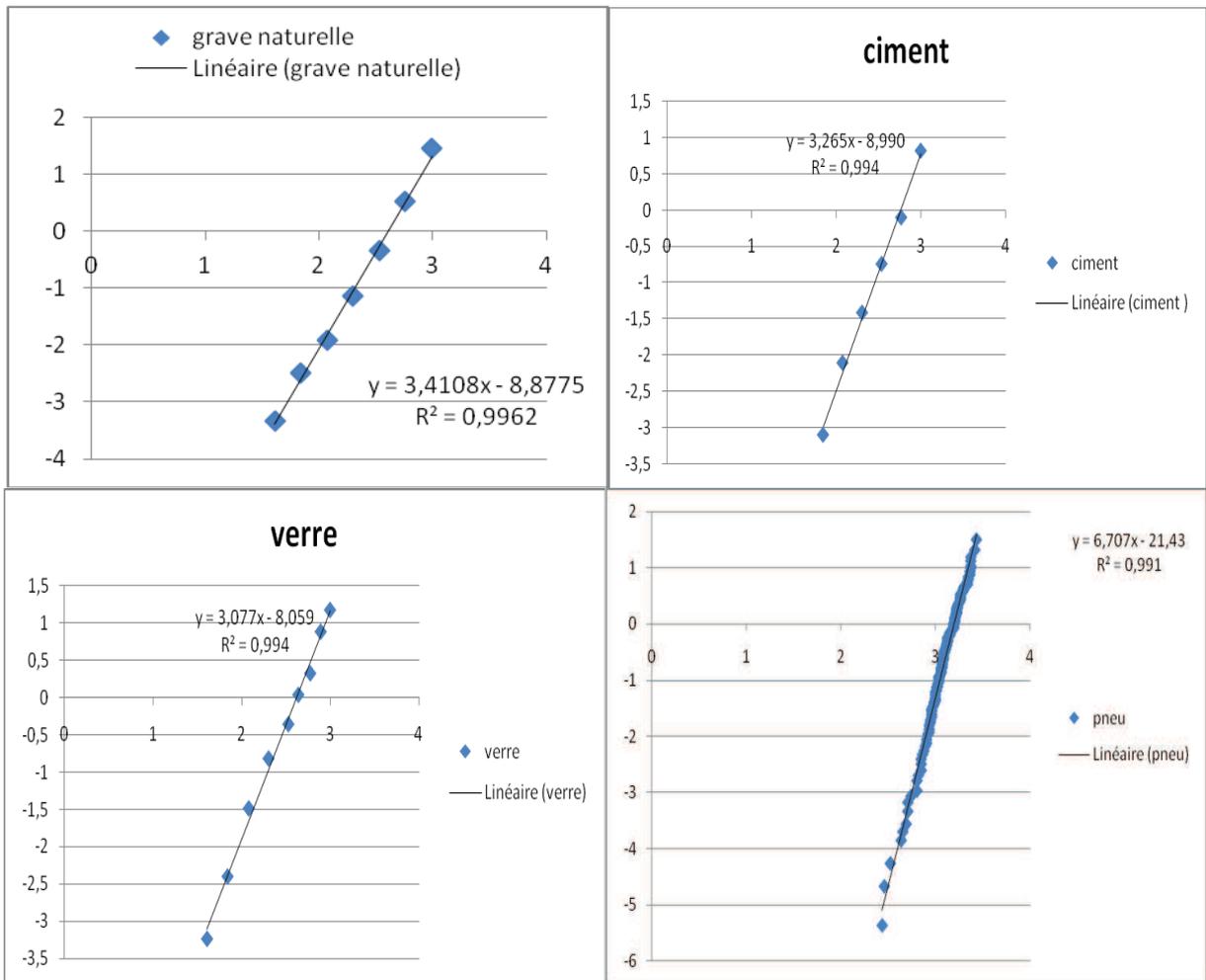


Figure 36: Régression permettant de retrouver les paramètres

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 XVII: Paramètres de distributions et coefficient de corrélation

| Paramètre | Grossière | | | |
|--------------|----------------------------------|------|-----------|-------|
| | Diamètre (d) de la fraction (mm) | k | λ | R^2 |
| Granulats | | | | |
| 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 |

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 de l'annexe 10. 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 de l'annexe 9.

Chapitre IV: INFLUENCE DU TYPE ET DE LA QUANTITE DE GRANULATS RECYCLES SUR LES PERFORMANCES DU BETON

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'agrégats. Nous présenterons les formulations de ces bétons, les résultats des tests mécaniques et l'ajustement des modèles analytiques.

IV-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 XVIII 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 XVIII: 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.

IV-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 selon la méthode décrite au chapitre II. 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 XIX et la figure 37 illustre les valeurs de résistance des différents bétons.

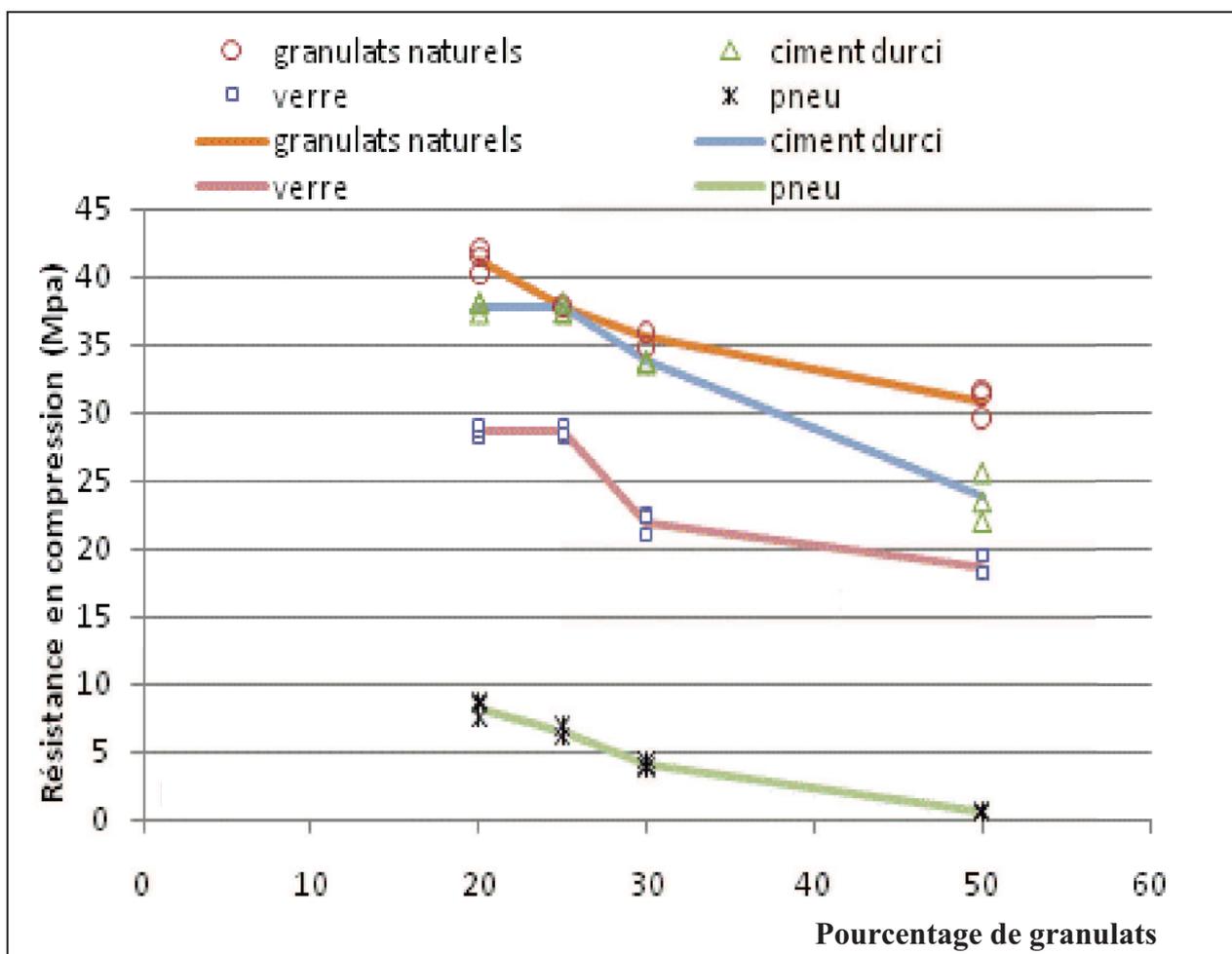


Figure 37: Résistance des différents mélanges en fonction du pourcentage massique de granulats.

Tableau XIX: 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 37 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 granulats. 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 37 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 XIX 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 XX 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 XX: Résistances moyennes en compression, écarts types et coefficient de variation

| % | moy | moy | moy | moy | ec | ec | ec | ec | Cov | cov | cov | cov |
|----|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | gn | cd | v | p | gn | cd | v | p | gn | cd | v | 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 granulat. La dispersion des valeurs des résistances n'est donc pas liée à la proportion de granulat. 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.

IV-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.37). 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 38 montre les courbes des résistances normalisées en fonction du pourcentage et du type de granulat.

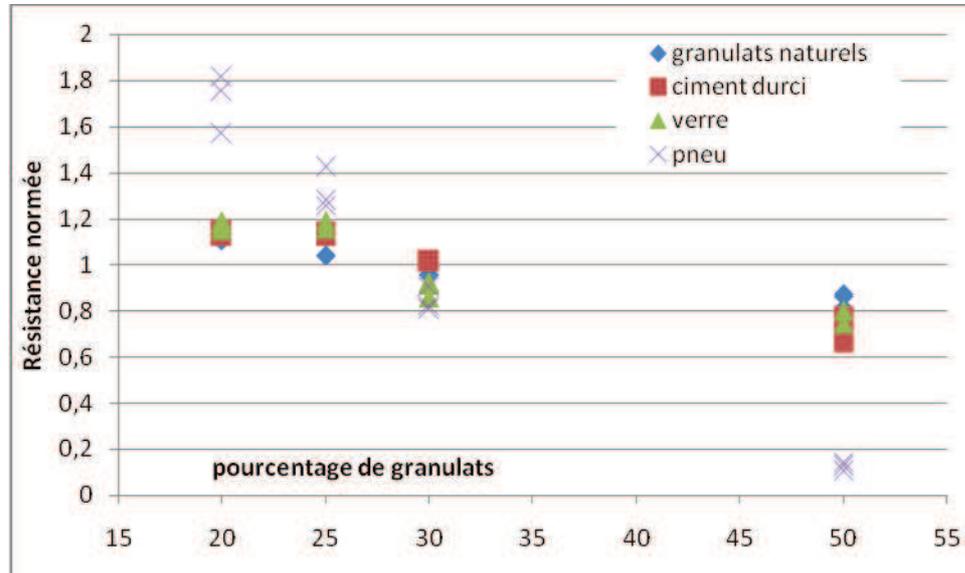


Figure 38: Résistance normalisée en fonction du pourcentage et du type de granulats.

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 XXI 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 granulats naturel la droite est pratiquement horizontale (pente = -0,009) donc le taux volumique influence peu la résistance à la compression. Cependant, le granulats 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 **XXI**: 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 |

IV-2-2 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 XVI et XVIII). Or, suivant le pourcentage, pour un type de granulats, 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 influence le plus. Néanmoins les coefficients de corrélation entre ces différentes caractéristiques et la résistance par pourcentage de granulats ont été calculés. Le tableau XXII illustre cette approche.

Tableau **XXII**: 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 XVIII). 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.XXII). 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 granulat 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 à 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).

IV-2-3 Proposition d'une loi donnant la résistance

Une droite pourrait s'ajuster sur chaque série de points de la figure 37 donnant pour chaque matériau la résistance en fonction du pourcentage de granulats. Ainsi, à 0% de granulats, 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 39 montre les courbes obtenues.

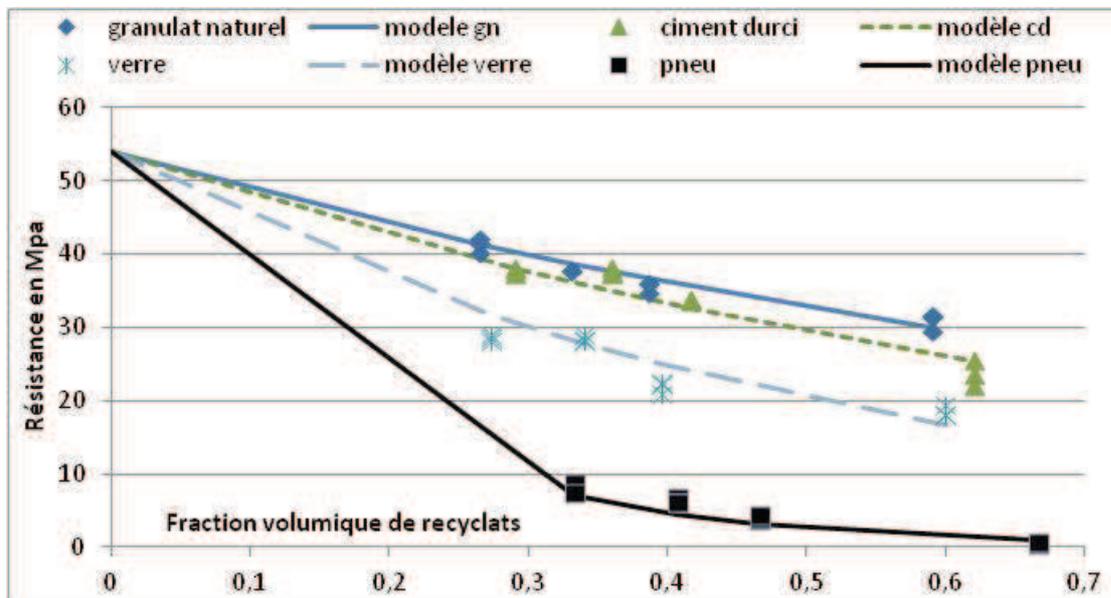


Figure 39 : Modèle de variation de la résistance en fonction de la fraction volumique

La figure 39 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 XXIII 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 XXI 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.

Tableau XXIII: 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 (**Ganijian 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 lambda de la loi de Weibul). La figure 40 présente un exemple de comparaison entre le modèle de Weibul et les données expérimentales dans le cas du gravier naturel.

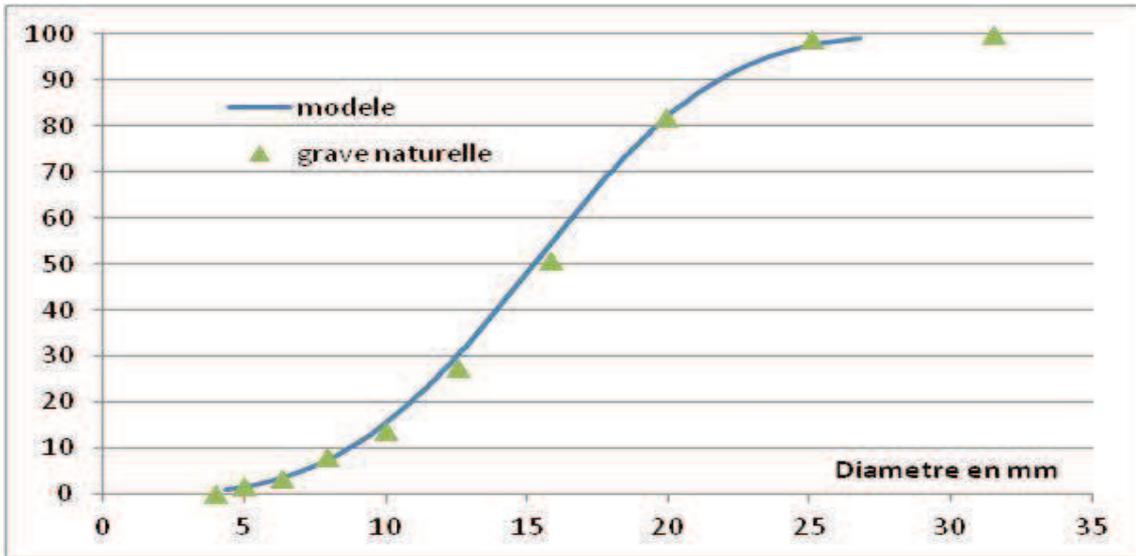


Figure 40: Comparaison entre le modèle de Weibull et les données expérimentales pour la granulométrie de la grave naturelle

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 41, 42 et 43 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.

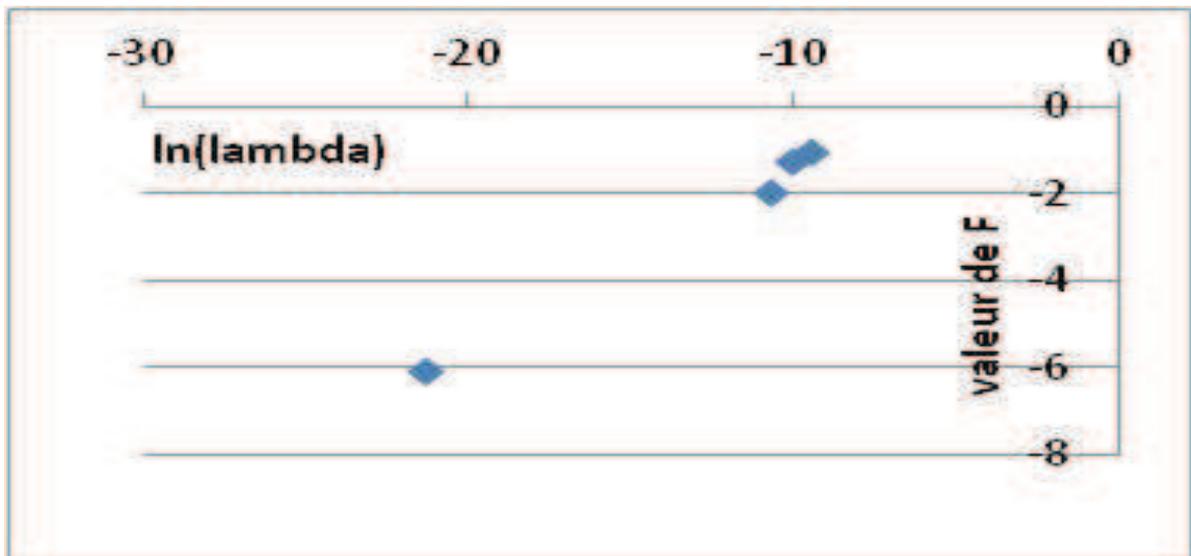


Figure 41: Variation de F avec le logarithme du paramètre d'échelle λ .

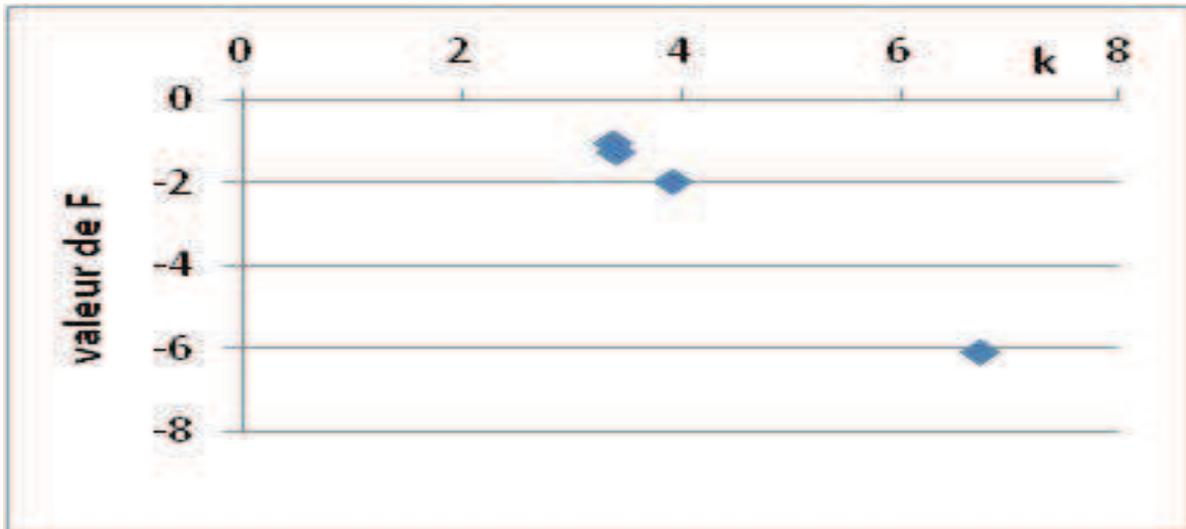


Figure 42: Variation de F avec le logarithme du facteur de forme k.

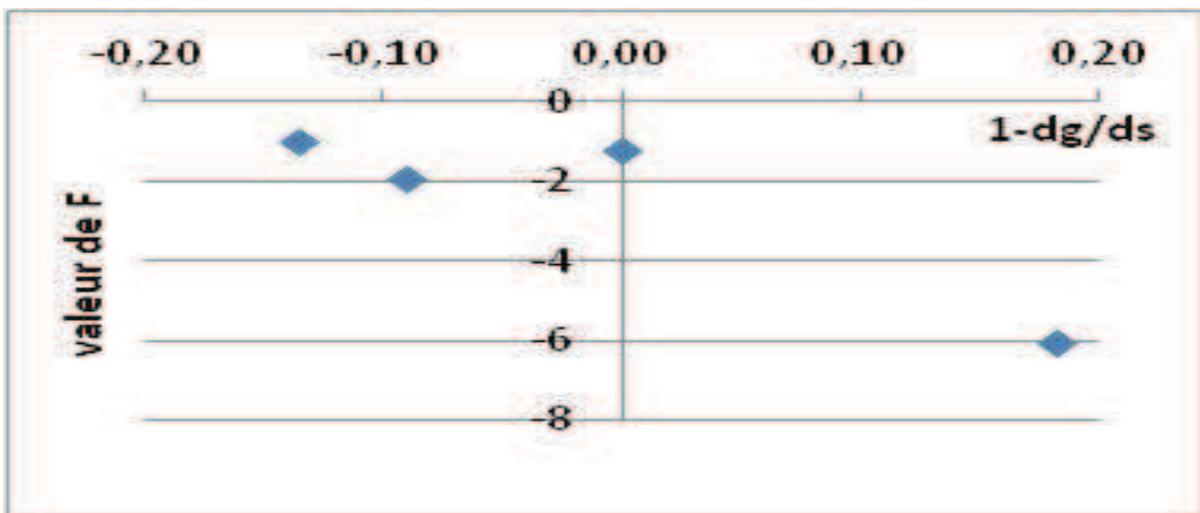


Figure 43: Variation de F avec la densité relative (1-dg/ds) du granulat recyclé par rapport au sable.

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 44 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.

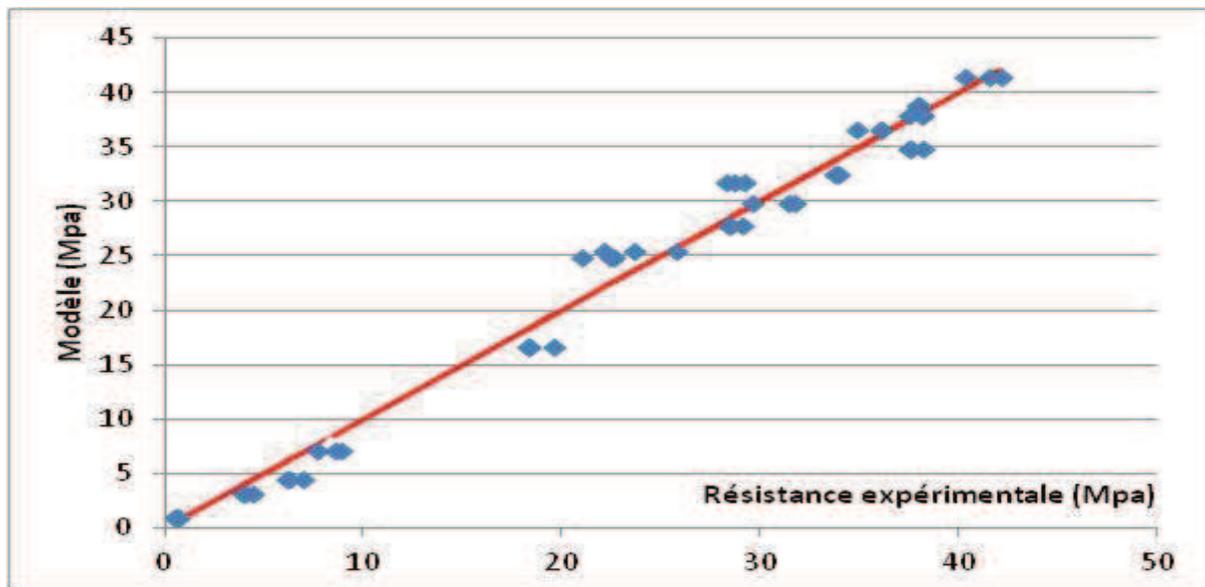


Figure 44: Comparaison de la résistance expérimentale et de la résistance donnée par le modèle pour les 4 matériaux.

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.

IV-2-5 Applications

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 XXIV 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 XXIV: Éléments de calcul de la masse de granulats nécessaires

| Granulat | Pourcentage | f_{c28} (MPa) | Longueur (cm) | Volume béton (m^3) | Poids sable ciment (kg) | Poids granulats (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 XXV les résume et donne une valeur approximative de ces coûts.

Tableau XXV: Définition des coûts intervenant dans le coût total du poteau

| 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 XXVI: Coût d'un poteau avec les différentes solutions

| Granulat | Pourcentage | Prix bas sans transport (€) | Prix haut sans transport (€) | Coût du 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 granulats recyclés est nécessaire. Le ciment durci revient au même prix que le granulats naturels. 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 granulats naturels 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 granulats naturels produit à 100 km pourvu qu'on ne mette pas 50% de granulats. Même un granulats naturels 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 recyclés, 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.

Conclusion générale du chapitre

Des essais ont été réalisés sur des bétons de différentes compositions 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 naturels 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 granulat 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'impacte 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. Dans la partie suivante, nous allons étudier en détail l'influence du taux de substitution du verre et du pneu 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 V: INFLUENCE DE L'ASSOCIATION GRANULATS NATURELS-RECYCLATS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DU BETON: CAS DU VERRE ET PNEU

Introduction

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

V-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 3 échantillons ont été confectionnés d'où 18 pour la substitution partielle avec un recyclé donné. Comme deux types de recyclés 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 XXVII. 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 XXVII: Composition de mélange de la substitution

| 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 XXVII 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.

V-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 XXVIII: Valeurs de 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 XXVIII 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-Chai et al., (2011)** et **Kou et Poon., (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 XXVII). 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 XXVIII montrent que le béton de granulats de pneus présente une plus faible densité par rapport au béton de verre.

V-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 présentés sur les figures 45 et 46.

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 45).

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.

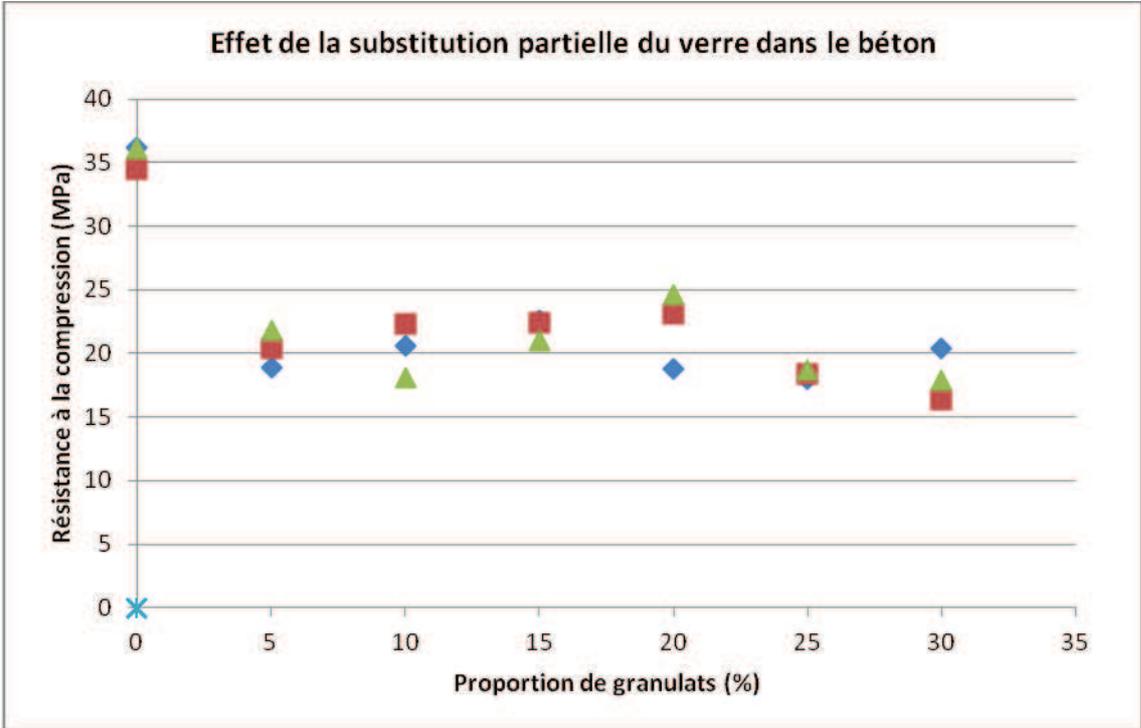


Figure 45: Résistance du béton de verre en fonction de la proportion

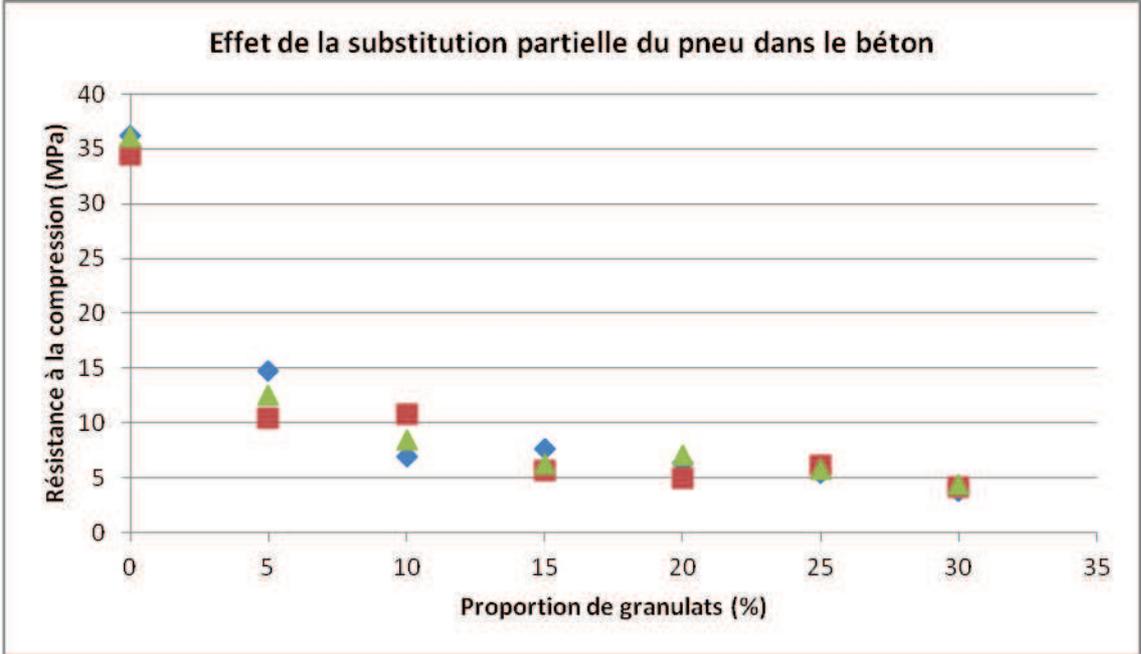


Figure 46: Résistance du béton de pneu en fonction de la proportion

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 + Graviers



Béton de concassé + Gravier

Figure 47: Eprouvettes 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.

V-4 Application du béton de pneu

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)**.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'influence de la substitution des verres et pneus dans le béton. Le protocole expérimental et la composition du mélange sont aussi précisés.

Ensuite, les résultats des mesures de résistance sur les bétons sont présentés et interprétés. Le constat général est que la résistance décroît avec l'augmentation des recyclats.

Enfin, une application des bétons de pneu est aussi examinée. Ils seraient adaptés aux grandes surfaces plus sensibles à la fissuration et aux structures de protection contre la corrosion des armatures.

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.

CHAPITRE VI: VALORISATION DES GRANULATS ISSUS DES BETONS 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).

VI-1 Plan expérimental

VI-1-1 Matériaux

VI-1-1-1 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 XXIX. 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 XXIX : 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 48. Cette analyse permet de déterminer les classes granulaires et les modules de finesse qui sont présentés dans le tableau XXIX. 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.

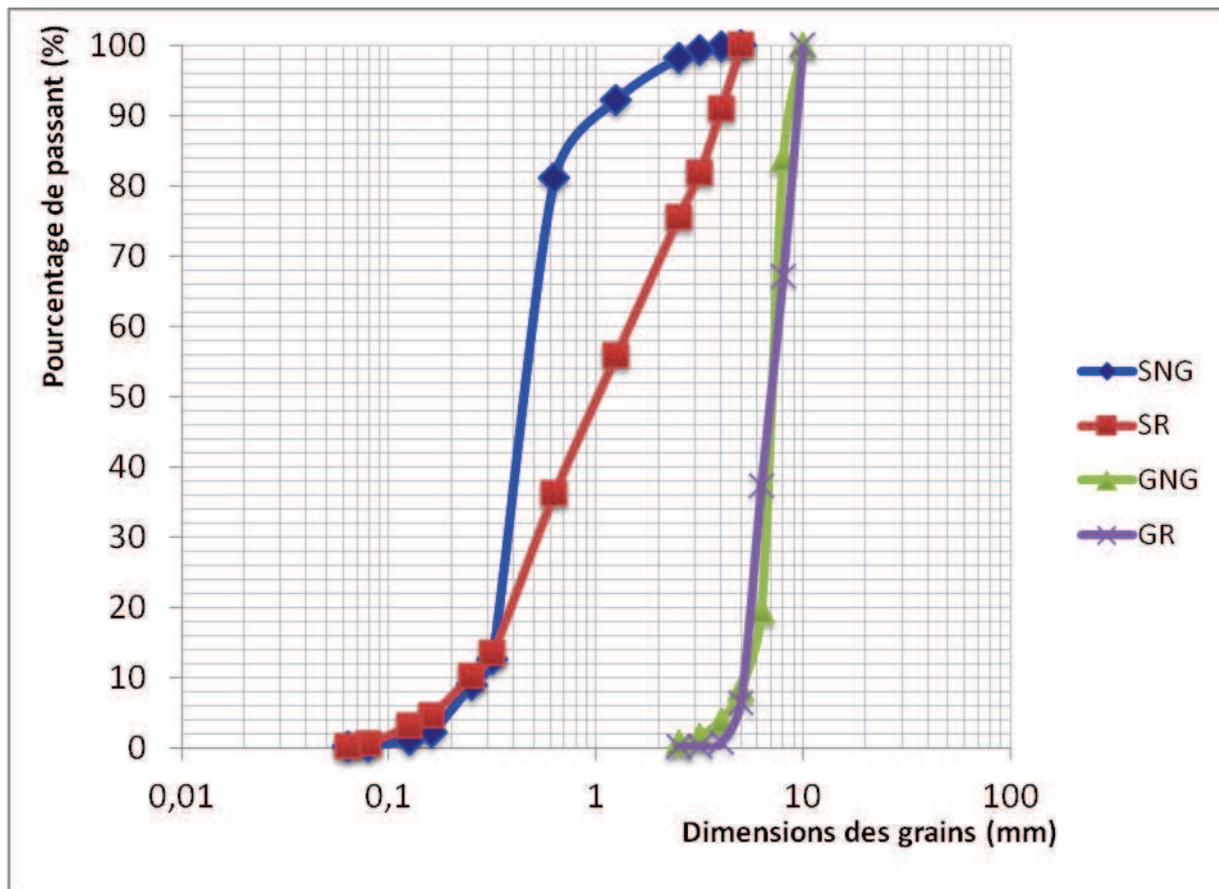


Figure 48: Courbe de l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés

VI-1-1-2 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 XXX.

Tableau XXX: 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 |

VI-2 Plan d'expérience

VI-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.49).

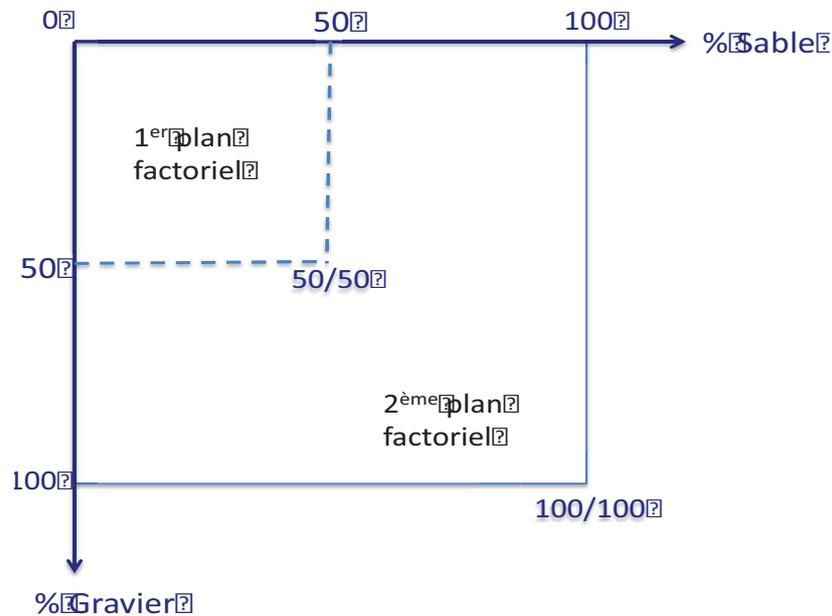


Figure 49: Plan factoriel des expériences

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 XXXI).

Tableau XXXI: 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 |

VI-2-2 Compositions 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)** et **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 XXXII résume la composition des sept bétons testés.

Tableau XXXII: 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 |

VI-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 recyclé 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.

VI-4 Eprouvettes : 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**.

VI-5 Résultats

VI-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 % (**Topçu and Sengel, 2004**). Ainsi, pour atteindre les 8 cm, un apport d'eau supplémentaire a été effectué comme précisé dans le tableau XXXII.

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 (**Chandra et Berntsson, 2002**). Evidemment, cette augmentation de la quantité d'eau aura un impact négatif sur les propriétés des nouveaux bétons.

VI-6 Propriétés mécaniques

VI-6-1 Résistance à la compression

La figure 50 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

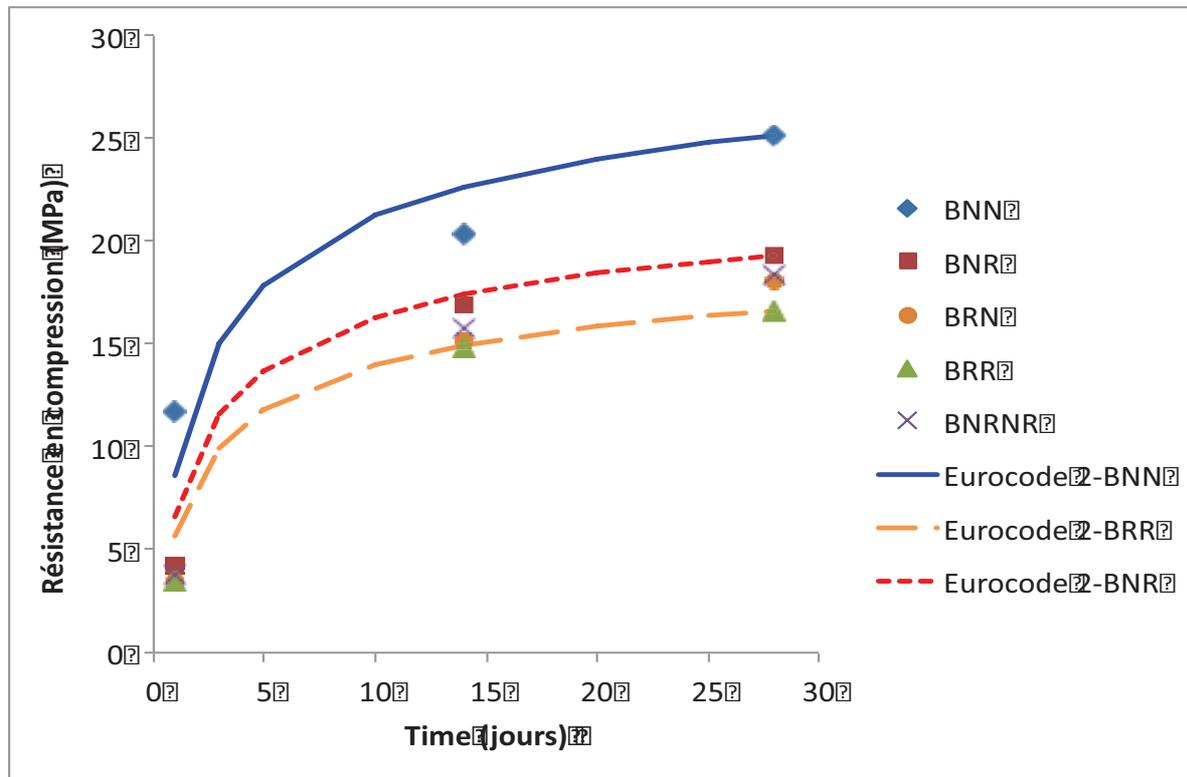


Figure 50: Evolution de la résistance en compression pendant la cure pour le béton de référence et les bétons de granulats recyclés

Sur la figure 50 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 51. 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 52 avec un fort coefficient de détermination ($R^2 = 0,92$). Ces résultats sont en accord avec ceux présentés par (Correia et al., 2009; Khou 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 Gutiérrez, 2009).

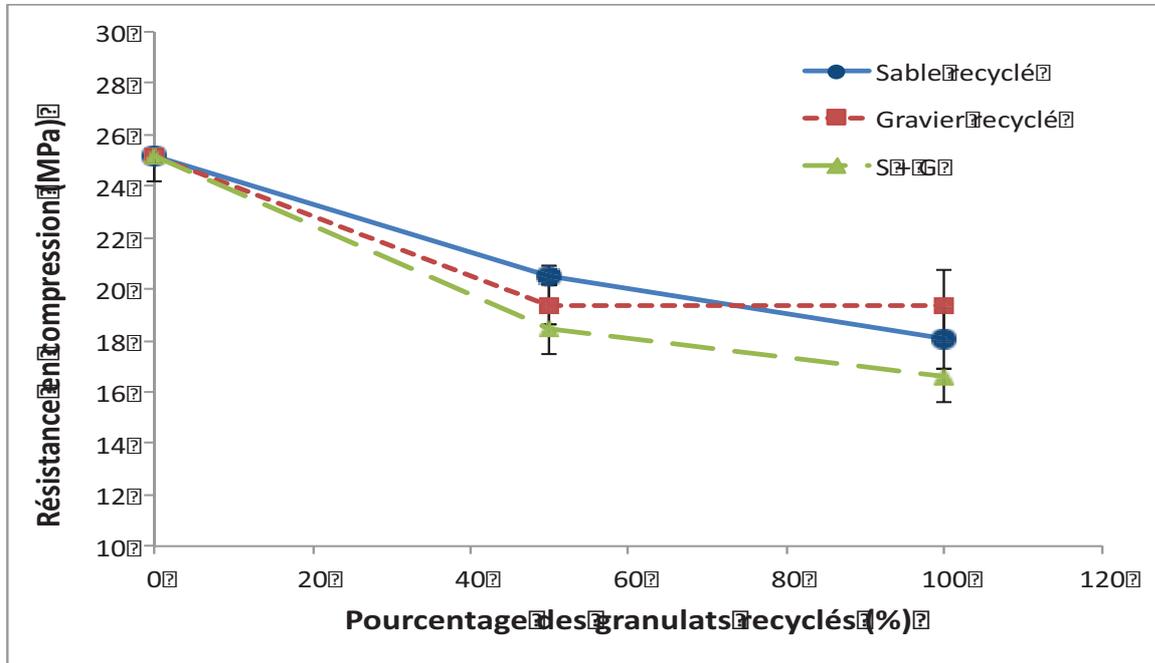


Figure 51: Relation entre résistance mécanique et le pourcentage total des granulats recyclés

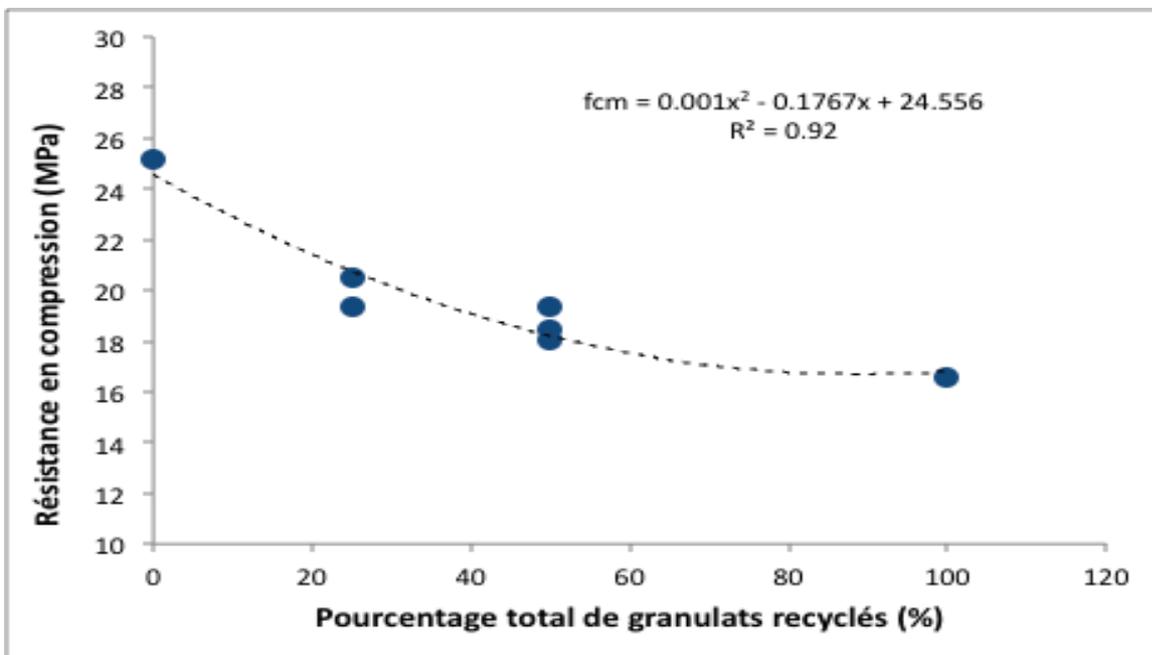


Figure 52: Relation entre résistance à la compression et le pourcentage total de granulats recyclés

VI-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 53. 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 %.

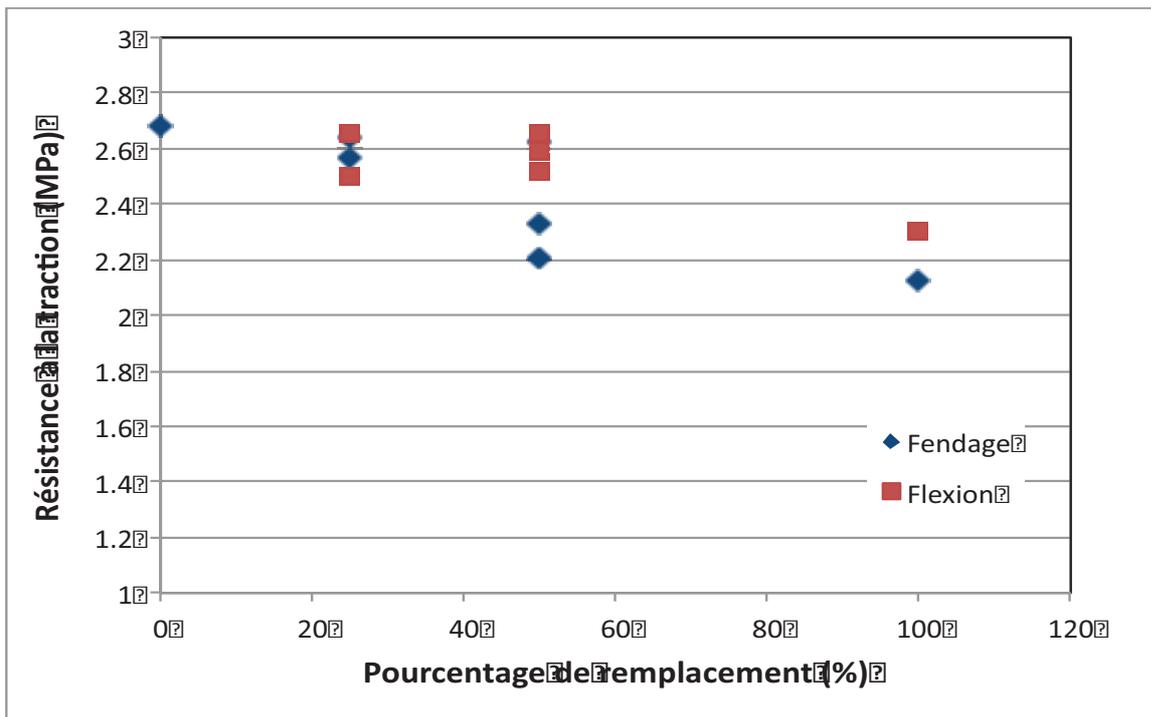


Figure 53: Résistance à la traction en fonction du pourcentage des granulats recyclés (mesurée par flexion et fendage)

VI-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:

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

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 54). 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 %.

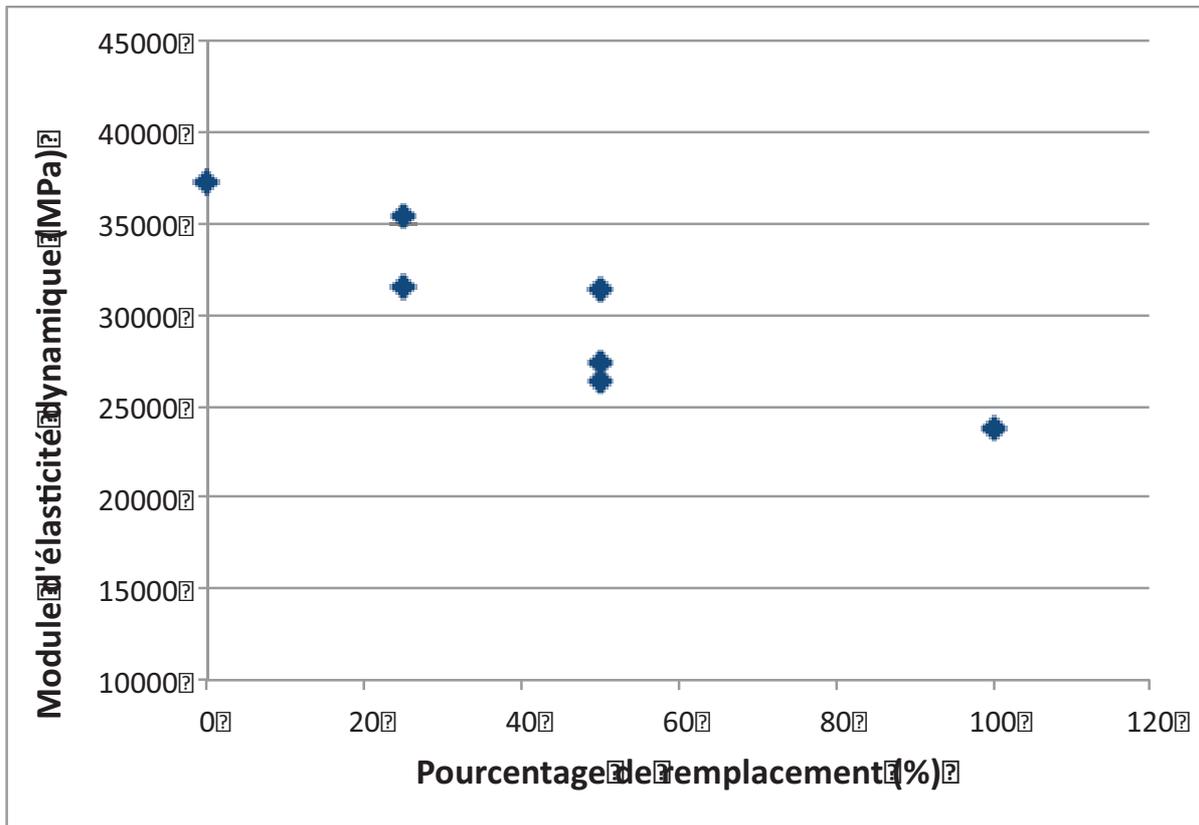


Figure 54: Module d'élasticité dynamique en fonction du pourcentage des granulats recyclés

VI-7 Propriétés physiques

VI-7-1 Porosité

La figure 55 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 55, on note une augmentation de la porosité en fonction du pourcentage de remplacement jusqu'à 26,3 % pour 100% de remplacement des granulats. Selon (Kong 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.56) en fonction du taux de substitution du sable et du gravier selon un modèle empirique bi-linéaire (Eq.17).

$$Porosité = 0,0342 \leftarrow G + 0,0845 \leftarrow S + 15,797 \quad [17]$$

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

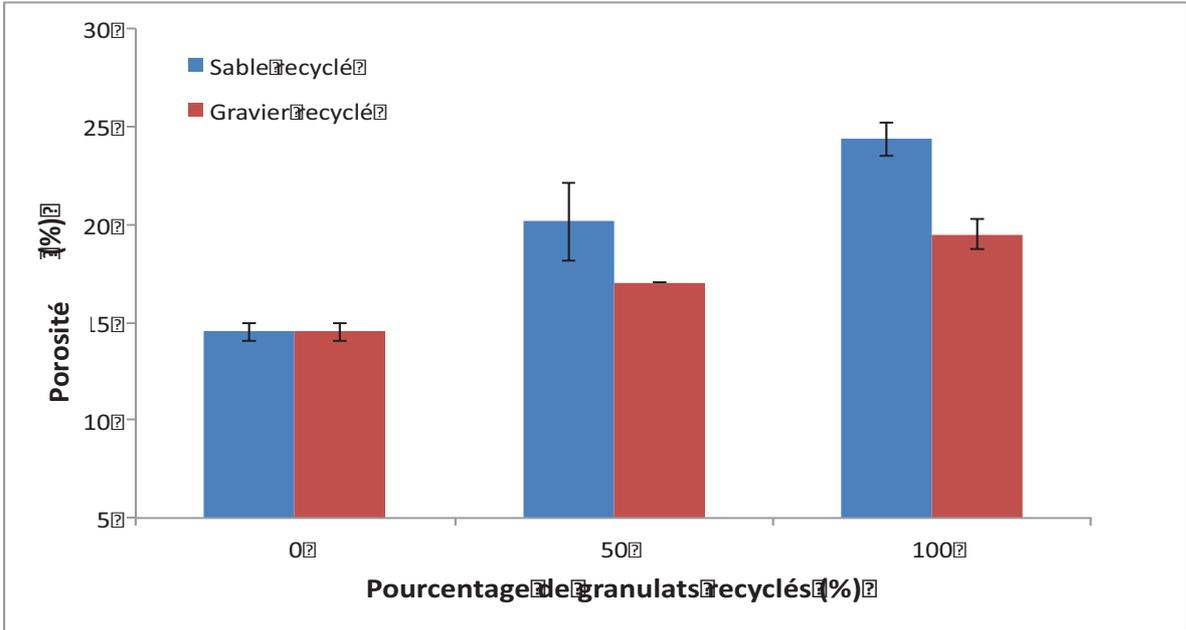


Figure 55: Porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés

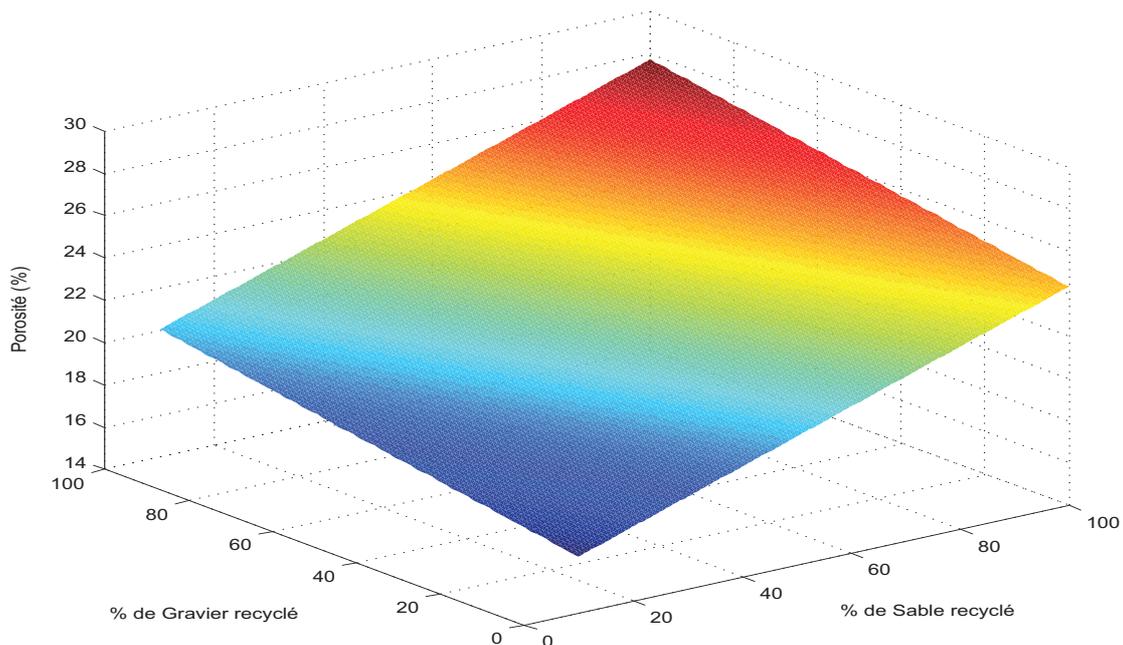


Figure 56: Surface de réponse de la porosité en fonction du pourcentage de sable et gravier recyclés

VI-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 Larrard, 2000**), (**Charonnat 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 (**Hansen et Narud, 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 (**Ravindrarajah et Tam, 1985**) (**Bairagi et al., 1993**). On montre sur la figure 57 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 58. 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.

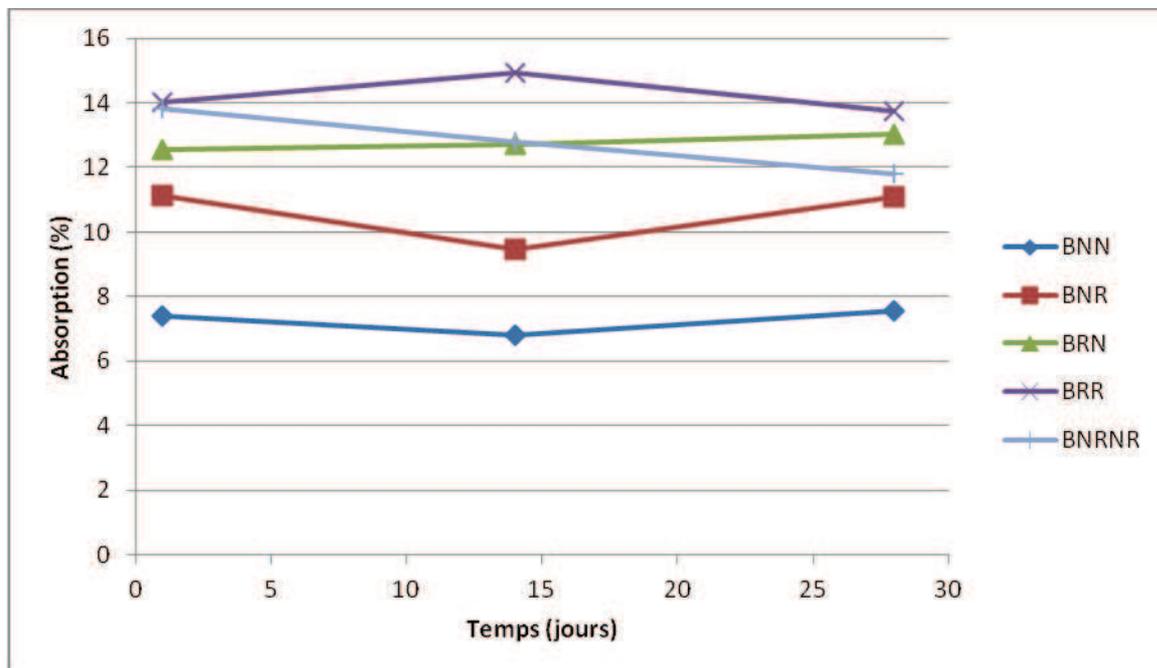


Figure 57: Absorption des bétons en fonction du temps

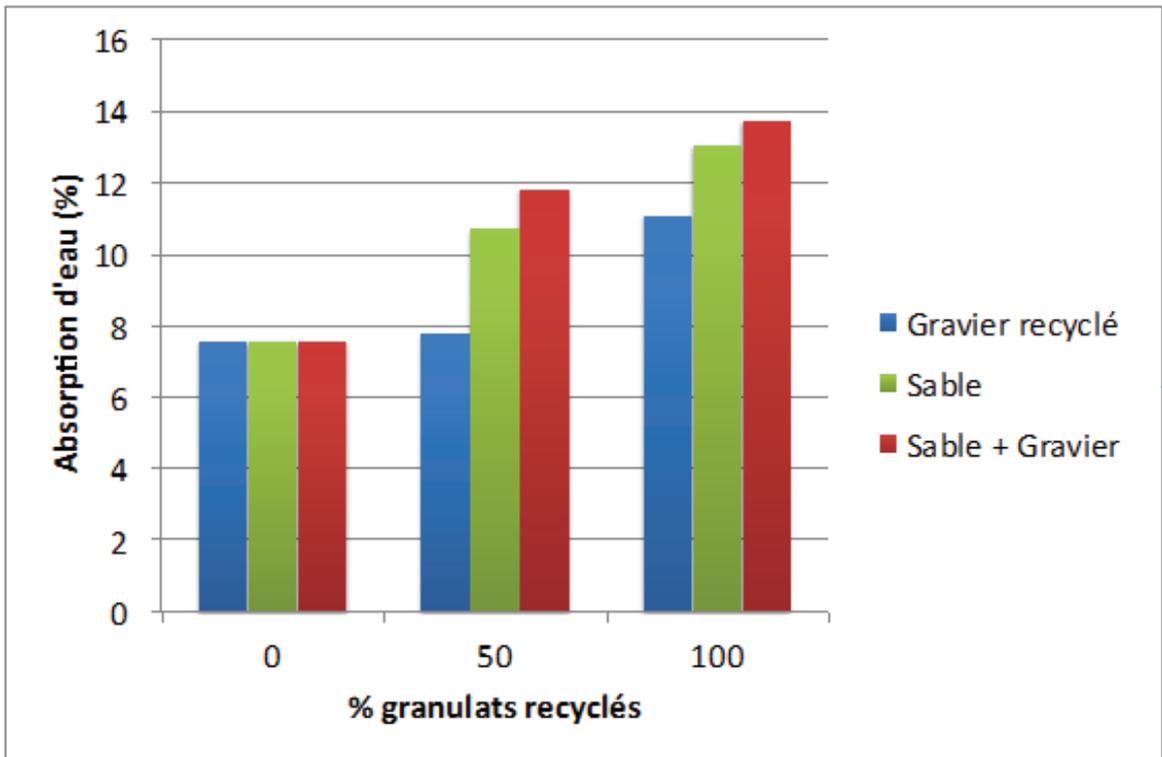


Figure 58 : Absorption des bétons en fonction du pourcentage de remplacement à 28 jours de maturation

VI-7-3 Densité

La figure 59 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.

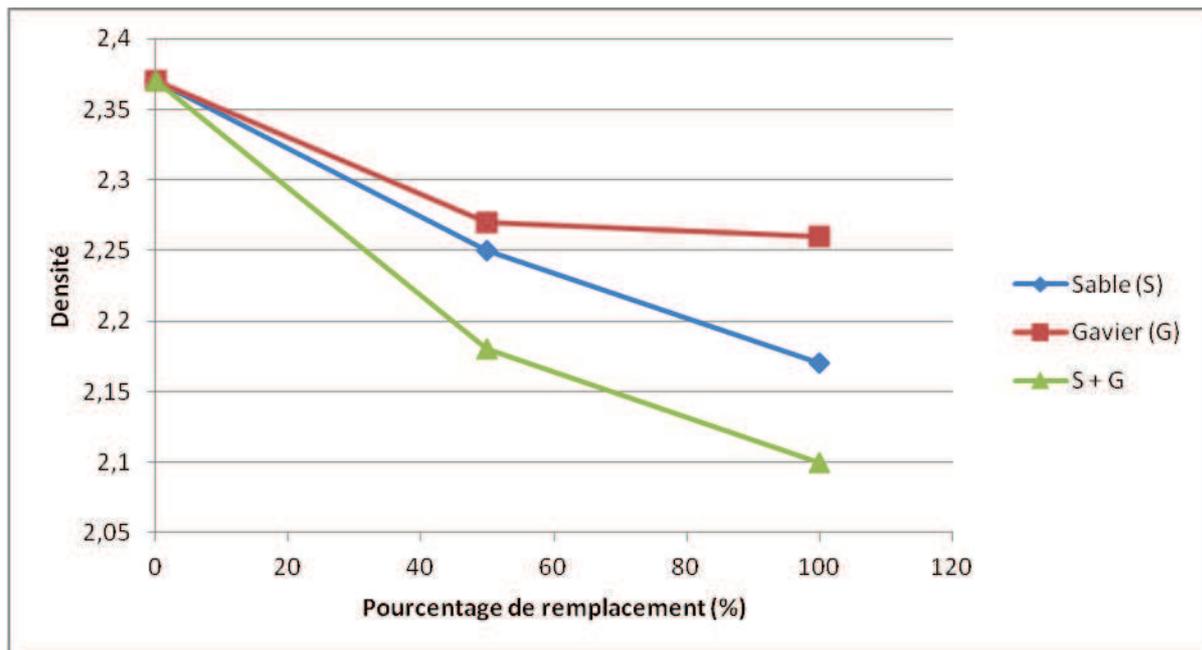


Figure 59: Densité des bétons en fonction du pourcentage de remplacement

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 plusieurs fois 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

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 sommes intéressés 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-elle avec la chute de la 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 de 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 Weibul 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

PERSPECTIVES

Ces travaux ont permis de donner des éléments de réponses aux questions posées, mais ils ont également soulevé certains points qu'il serait intéressant d'exploiter.

Parmi ceux-ci :

- 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 ;
- l'étude environnementale comme le bilan carbone ;
- l'analyse de prix ;
- l'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.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

Abrams D.A. (1952) « Scientific method of making concrete » Chemistry and Industry, 42 p.

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

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

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

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

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

AFPC AFREM (2004). Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Document scientifique et technique AFGC, 207 p.

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

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, pp 439–446.

Ali N., Amos A. et 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. Pp. 90–379.

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. 190 p.

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. 250 p.

Assié S. (2004) « La durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de doctorat de l'INSA Toulouse, 178 p.

Babilotte C., Camporota P., Faure M., Lourdaux H., Mouton Y., Nouvier J., Robin Y. et Chatard D. (1998). Cours de routes. Pp 12-16.

Bairagi N.K., Ravande, K. et 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. et Lessage (1976) : « La composition des bétons hydrauliques : du laboratoire au chantier »; Rapport de recherche des LCPC (64), 23 p.

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. 25 p

Baron J. et Ollivier J.P. (1996) « Les bétons : Bases et données pour leur formulation » ; Ecole française du béton, ATIIH, Edition Eyrolles, 23 p.

Batayneh M., Marie I., et Asi I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, vol. 27, n°.12, pp.1870-1876.

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

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

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

Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieur A. et Queneudec M. (2003 b). "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, pp.711-720

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

Berredjem L. et 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, pp 35-40.

Bertolini L., Elsener B., Pedefferri P. et Polder R. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, WILEY-VCH, ISBN: 3527308008, pp 3-19.

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

Bignozzi M.C. et 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, 257 p.

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. pp 56-77.

Bouzoubaa B. and Fournier B. (2003). Current sification of SCMs in Canada. *Materials technology Laboratory. Report MTL*, 7 p.

Bresson J (1999). Etude du recyclage des déchets inertes de l'industrie du béton. *Rapport technique RT 054 – CERIB*, 46 p.

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, pp.191-199.

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 pp. 55– 63.

Burlion N., Rougelot T., Bernard D. et 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, 30 p.

Byars E., Zhu H. et Morales B. (2004). Conglasscrete, the Waste and Resources Action Programme, Mars, 8 p.

Calibé (2004). *Projet National Calibé. Résultats et recommandation du Projet national CALIBE: La maîtrise de la qualité des bétons.* Presses de ENPC, pp 111-137.

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

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

Charonnat Y., Benichou E., Darcel M., Geoffray J. M., Gonzalez J. C. et 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, 38 p.

Charlot-Valdieu C. (1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB, 40 p.

Chaki S. et 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), pp 32-40.

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, pp.449-456.

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, 40 p.

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

Correia S., Souza F., Dienstmann G. et Segadaes A. (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, pp. 31-123.

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

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], pp 872-877.

De Larrard F. (2000). Structure granulaire et formulation des bétons. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. OA34 LCPC, pp 24-50.

De Larrard F. (2002). Construire en béton. Presses de l'ENPC, 58 p.

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

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, pp.591-607.

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

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.

Dreux G. (1981). "Nouveau guide du béton", Editions Eyrolles, Paris, France, 7 p.

Dreux G. (1986). Nouveaux guide du béton, Eyrolles, 5^{ème} Edition, Paris, 10 p.

Dreux G. (1995). Nouveau guide du béton. Eyrolles, 13 p.

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 G. et Gorisse F. (1970). « Guide pratique du béton », Collection de l'ITBTP, 36 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/décembre, pp.412-417.

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, 123 p.

Eldin N.N. and Senouci A.B (1993 a). Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates. Volume 15, Issue 1, 8 p.

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

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

Evangelista L. et Brito J. (2010). Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cem Concr Compos. Vol. 29. Pp 397-401.

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, 22 p.

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.

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

Féret R. (1892). Sur la compacité des mortiers hydrauliques; Annales de Ponts et chaussées (4), 22 p.

Fernando P., Castro T., Gomes J.P. et Said J. (2008). Adhesion characterization of tungstenmine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. Construction and Building Materials 22(3), pp 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, pp.12-19.

Fournier M. et Geoffroy J.M. (1978). Pozzolan-lime binder, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°93, pp 70-78.

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. Pp 14-15.

Fuller W.B. et Thompson S. (1907) « Proportion for concrete » Am Contractor, pp28-66.

Ganijian 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, pp 23-58.

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, 34 p.

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

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, 15 p.

Granger L. (1996). « Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation », Thèse de doctorat de l'ENPC, 13 p.

Guedon-Dubied, J.S., Cadoret G., Durieux V., Martineau F., Fasseu P. et Van O.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, pp.335-344.

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, pp 11-13.

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

Guomundsson G. et Ageirsson H. (1975). Some investigation of alkali aggregate reaction, Cement and concrete research, v5, n°3, pp 211-219.

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, pp 1125 – 1134.

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). Small particle statistics: an account of statistical methods for the investigation of finely divided materials, Butterworths, 2nd edition, 60 p.

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. pp 60-62.

Hobbs, D. W. (1984). The effect of pfa upon alkali-aggregate reaction, Comments, Magazine of Concrete Research, vol.36, n°127, pp117-118.

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.

Huang B., Shu X. et 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. 8 p.

Iler R.K. (1979). The Chemistry of Silica: wiley-interscience, New York, 886 p.

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, pp 14-311.

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

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

Joisel A. (1952) « Compositions des bétons hydrauliques » Annales de l'ITBTP (58), Série : Béton et béton armé, 22 p.

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], pp 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, Vol. 1914, 50 p.

Karamber I.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, pp.133-140.

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

Kerasley E.P. and Wainwright P.J. (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. Cement Concr Res, 31, pp 12–805.

Khaloo A. R (2008). Mechanical properties of concrete containig a high volume of tine-ruber particles. Waste Manegement. Vol. 28. Pp 2472-2482.

Kharoune M. (2006). Séquestration du C02 par carbonatation minérale en réacteurs dynamiques. 7ième Salon International des Technologies Environnementales. AMERICANA, 24 p.

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

Khou S., Zhan B. et 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, pp.673-682.

Kong, Deyu, Lei, Ting, Zheng, Jianjun, Ma, Chengchang, Jiang, Jun, and Jiang et 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. et Poon C-S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cem Concr Compos* 31(2), pp 13–107.

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

Kouadio K.C. (2010). Elaboration et caractérisation de blocs d'argile stabilisée au ciment (CIMAG): Influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Université Cocody. 152 p.

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*, pp 629-634.

Larive C. (1998). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali réaction et de ses effets mécaniques. Rapport issu de la thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 78 p.

Lee G., Ling T.C., Wong Y.L. et 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. et 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, pp 374 – 383.

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

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

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, 23 p.

Maher S. (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, pp 45-52.

Maillard J-L. (1997). Evaluation de l'aptitude à l'emploi des sables de fonderie Publication technique n°118 – CERIB, 47 p.

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, pp 480-489.

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

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

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, 11 p.

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

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, 56 p.

Metso J. et Kajaas 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, pp.1059-1073.

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, 34 p.

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.

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, pp. 89- 90.

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. 28 p.

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. pp 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. (2000). Propriétés des bétons, 4ème Edition, Éditions Eyrolles, Paris. Version traduite par le Centre de Recherches Universitaires sur le Béton, 25 p.

Neville A.M. (2002). « Properties of concrete ». Fourth and final edition, Prentice Hall edition, 844 p.

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, pp 1218-1224.

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

Oikonomou N. et Mavridou S. (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. Cement & Concrete Composites, 40 p.

Okamura H. et Ouchi M. (2003). Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1, pp 5-15.

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, pp 461-465.

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

ONG K.C.G. et 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.

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, pp 1288-1298.

Papakonstantinou C.G. and Matthew J.T. (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research* 36, pp 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 pp 1145-1152.

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., pp 137–153.

Paulo B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. Pp 1292-1297.

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, pp 39-44.

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. et 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), pp 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, pp 210-219.

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

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, 19 p.

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. et Arezki T. (2010). Etude des propriétés des bétons de verre. *Technologie valorisation* Vol. 16 N°5/6, pp 11-51.

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

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

Rakotoniaina V. (2007). Contribution à l’étude du béton de sable-applications. Mémoire du Diplôme d’Etudes Approfondies (D.E.A) des Sciences des Matériaux. Université d’Antanarivo. 37 p.

Ramachandran V-S. (1981). Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, pp 20-38.

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], pp 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, 45 p.

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, pp 23-51.

Ravindrarah R.S. et 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.

Saadani S. (2006). Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Génie civil. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine, 156 p.

Schartzentruber A. et 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), pp 475-482.

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, Pp 1235-1236.

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, pp 429-436.

Schüth F., Sing K.S.W. et Weitkamp J. (2002). Handbook of porous solids, Wiley, Haboken, NJ, 25 p.

Segre N. et Joekes I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. Cement and Concrete Research 30, pp 1421-1425.

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, pp 24-35.

Sersale R. (1980). Structure and characterization of pozzolanas and of fly ashes, 7th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, Paris, 1 IV, 11 p.

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, pp 245 – 252

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

Shayan A. et Xu A. (2002). Value-added utilisation of waste glass in concrete, IABSE symposium, Melbourne, pp 1-11.

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

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, pp 457-468.

Shi C., Wu Y. et Riefler C. et Wang H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 5, pp 987- 993.

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, pp 95-789.

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, pp 980-987.

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, pp 971-976.

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, pp 334-345.

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

Stanton T.E. (1948). ASTM Sp.Tech.publ.99, use of pozzolanic materials in mortars and concretes, n°178, 11 p.

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, pp 855-868.

Stovall T. de Larrard F. Buil M. (1986). Linear packing density of grain mixture; powder technologie (48), 24 p.

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

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

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

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 I.B. (1995). The properties of rubberised concretes, *Cem. Concr. Res.* 25 (2), pp304–310.

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

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

Topçu I., Boga A. et 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), pp 84–878.

Toukal A. (2010). Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons, 54 p.

Toutanji H.A. (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement Concrete Compos.* Vol. 18. pp 135-139.

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

Tung-Chai L., Chi-Sun P., et 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*, 18 p.

Turcry P. (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation. Doctorat de l'École Centrale de Nantes, 53 p.

UNPG. (2001). Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats, 11 p.

Vachon P., Rajeshwar D., Tyagi, Auclair J.C., Wilkinson et Kevin J. (1994). Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red Mnà. Environ . Sci. Technol. 28 (1), 26 p.

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. (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, pp.21-30.

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, pp.488-494.

Wang H.Y. et Huang W.L. (2010). Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. Constr Build Mater; 24(6), pp 13–1008.

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, pp 403-408.

Woolf D.O. (1952). Reaction of aggregate with low-alkali cement, Public Roads, n°27, pp 50-61.

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, pp 45-54.

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, pp 67-74.

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, pp 185-192.

Yang C.C. (1998). Effect of the transition zone on the elastic moduli of mortar, Cement and Concrete Research, vol28, N°5, pp 727-736.

Yang Y.F. et 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.

REFERENCE WEB

Béton (2009). Béton de haute performance. Disponible auprès de www.lyarglac.edres74.ac-grenoble.fr Consulté en 2009.

Bruxellesenvironnement (2012). L'utilisation de granulats issus du recyclage. Fiche 4.1 pp 3. Disponible auprès de www.bruxellesenvironnement.be. Consulté en 2012.

Micronisation du verre (2012). F:\utilisation des recyclâts\Micronisation-du-verre ciment.htm. Consulté en 2012

Oodoc (2009) : BETON DE TRES HAUTE PERFORMANCE. Disponible auprès de www.oodoc.com/52925-bthp-beton-tres-haute-performance-43k consulté en 2011.

Rdereel (2009). BETON A POUDRES REACTIVES. Disponible auprès de <http://rdereel.free.fr/volBQ2.htm/-45k>. Consulté en 2012.

Valorisation (2011). Recyclage des déchets de vieux bâtis. Disponible auprès de http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/dechets/fichiers_pdf/Rapport_valorisation_materiaux.pdf. Consulté en 2011

ANNEXES

Annexes

Annexe 1: le béton

Généralité sur les bétons

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (graviers et sable). Un béton contient environ (en volume):

- eau: entre 14 et 22 %
- ciment: entre 7 et 14 %
- granulats (dont sable): entre 60 et 78 %

Pour différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport eau/ciment différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectées. En effet, selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout d'additions et d'adjuvants (cendres volantes, fumées de silice, superplastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées.

Il existe plusieurs gammes de béton selon leur rapport eau/ciment. Celui-ci est passé de 0,50 dans les Bétons ordinaires à 0,45 dans les Bétons Hautes Performances et 0,20 dans les Bétons à Très Hautes Performances dont les résistances en compression à 28 jours dépassent les 100 MPa, de telles performances sont rendues possibles par l'utilisation de superplastifiant.

Comme nous venons de le voir, la composition du béton a une grande importance sur les caractéristiques finales du matériau, c'est pourquoi il est important de comprendre les mécanismes qui entrent en jeu à cette échelle microscopique dans les différentes phases du béton. Nous allons donc tout d'abord nous intéresser à la pâte de ciment pour comprendre sa formation et son rôle à l'échelle macroscopique. Ensuite nous étudierons le rôle des granulats et des éventuels adjuvants.

Ciments

Les ciments usuels sont également appelés liants hydrauliques, étant donné leur capacité à s'hydrater en présence d'eau, qui les transforme d'un état fluide pâteux en un état solide très peu soluble dans l'eau (**Men, 2004**)

Un ciment Portland est composé essentiellement de silicates et d'alumines de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux provient de roches calcaires, les autres éléments proviennent

des argiles. Calcaire et argiles sont broyés et portés à une température proche de 1400°C. En début de fusion, les oxydes se combinent pour former les composés suivants (**Ber, 2004**) (1):

- Le silicate tricalcique: 3CaO SiO_2 , noté C_3S (60 à 65 % en masse du ciment) ;
- Le silicate bicalcique: 2CaO SiO_2 , noté C_2S (20 à 25 % en masse du ciment) ;
- L'aluminate tricalcique: $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, noté C_3A (8 à 12 % en masse du ciment) ;
- L'aluminate ferrite calcique: $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, noté C_4AF (8 à 10 % en masse du ciment).

Sur la fiche technique d'un ciment, sont fournies les principales caractéristiques dont la masse volumique qui est située généralement entre 3000 à 3200 kg/m³, la surface spécifique située entre 250 et 500 m²/kg, la granulométrie du ciment, son type (CEM I, CEM II...), la classe de résistance (32,5 ; 42,5 ; 52,5...) et le temps de prise.

- Ciment anhydre pour désigner la poudre de ciment avant son gâchage avec l'eau.
- Ciment hydraté pour désigner les composés obtenus par combinaison chimique de l'eau avec le grain de ciment anhydre.
- Pâte de ciment fraîche pour le mélange eu-ciment anhydre avant que l'hydratation n'ait conduit à faire un solide appelé pâte de ciment durcie.

Les hydrates

Les hydrates les plus importants du ciment Portland sont les silicates de calcium hydratés, noté C-S-H ou appelé gel de C-S-H dû à son faible degré de cristallisation. Ces C-S-H sont à l'origine du pouvoir adhérent de la pâte de ciment et améliorent sa résistance. En effet, les C-S-H présentent une grande surface spécifique et une porosité d'environ 28 % (**Pow, 1968**). Les surfaces des C-S-H sont de plus très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment.

Plusieurs modèles existent pour simuler le comportement de cet hydrate, cependant, le modèle proposé par (**Fel et Ser, 1968**) semble être le plus performant pour comprendre les comportements différés de la pâte de ciment. (**Gué-Del, 1997**)

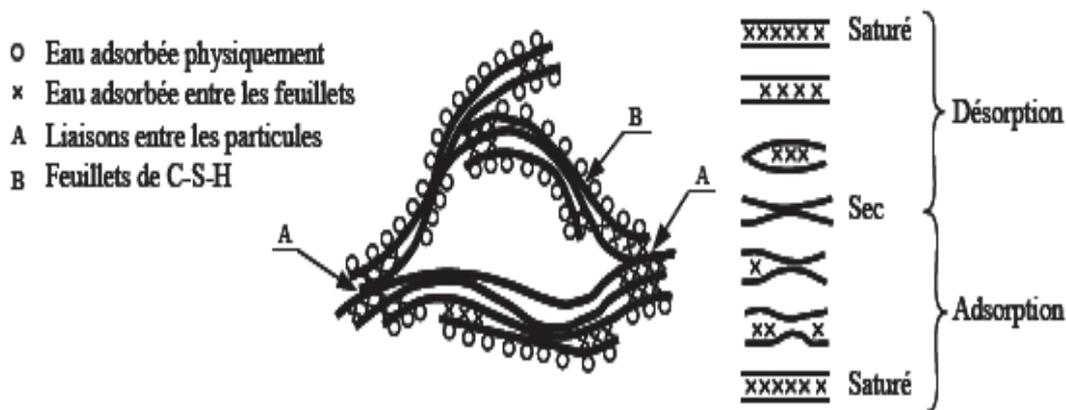


Figure 1: Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon le modèle de [Fel et Ser, 68]

En plus de ce gel, la pâte de ciment contient des cristaux grossiers comme la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ayant peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique et diminuant la durabilité du béton par sa solubilité dans l'eau. On cherche donc à limiter cette Portlandite (en ajoutant par exemple de la fumée de silice).

On trouve également les aluminates (ou sulfo-aluminates de calcium hydratés) qui cristallisent en plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment hydratés. La séquence de formation des sulfo-aluminates comprend l'apparition du trisulfo-aluminate de calcium ou ettringite.

La proportion de ces hydrates dans la pâte de ciment hydratée est fortement dépendante de la composition du ciment (teneur en C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Comme nous le verrons par la suite, la nature du ciment a un impact important sur les déformations différées, en effet, les hydrates subissent des déformations différentes selon leur nature.

La porosité

La porosité se décompose en pores des hydrates (environ 0,3 nm) et les pores capillaires entre les hydrates (de quelques centaines de nanomètre jusqu'au millimètre). La porosité est caractérisée par la taille de ces pores mais aussi par leur connectivité et par la tortuosité de leur réseau. Les pores contiennent de l'eau et l'air. (Gra, 1996)

L'eau a un double rôle d'hydratation de la poudre de ciment et de facilitation de la mise en œuvre du béton (ouvrabilité). En l'absence d'adjuvant plastifiant, la quantité d'eau est déterminée par la condition de mise en œuvre. Un béton contient donc une part importante d'eau libre, ce qui conduit à une utilisation non optimale de la poudre de ciment.

Dès le gâchage du ciment, l'eau devient multiforme. Elle peut être libre dans les pores capillaires entre les hydrates, adsorbée à la surface des solides ou combinées dans les premiers hydrates. **(Gra, 1996), (Reg, 1982)**

Il est à noter que l'eau libre est fortement chargée ioniquement (Ca^{2+} , OH^- , Na^+ , ...).

Granulat

La définition de granulat est donnée par la norme XP-P 18-540 : « ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons, [...] ».

Les sables sont des granulats dont le diamètre du plus gros grain doit être inférieur à 2 mm.

Les granulats ont une influence importante sur les performances mécaniques et sur les déformations différées du béton obtenu. En effet ils ont, en règle générale, de meilleures performances mécaniques que la pâte de ciment. L'origine du granulat doit être prise en compte pour l'explication du comportement différé du béton en conditions séchantes à température ambiante, et à hautes températures.

Les granulats peuvent également contribuer à la dégradation d'une structure en béton. En effet les granulats ne subissent pas de déformations différées à l'échelle de la durée de vie des structures. Les déformations différées de la pâte de ciment sont donc empêchées ce qui se traduit par :

- Des déformations différées à l'échelle du béton bien plus faibles que celles observées sur pâte de ciment.
- L'apparition de contraintes internes auto induites (sans chargement mécanique extérieur) dans la pâte de ciment et les granulats.

La forme et la rugosité des granulats ont une grande influence sur la compacité du mélange granulaire, qui est également sensible à la granulométrie (distribution de taille des granulats utilisés dans un béton donné). La granulométrie a pour but d'optimiser la réduction du volume des vides afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton.

(Dre-Gor, 1970)

La forme et la nature (calcaire, siliceuse, silico-calcaire) des granulats choisie joue également sur l'adhérence avec la matrice cimentaire.

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine soit naturelle, soit artificielle, soit recyclée.

Les granulats naturels

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et

quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres. Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories:

- les granulats alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires;
- les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage...

Les granulats artificiels

Ces granulats sont conçus pour répondre à un cahier des charges bien particulier:

- Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment les granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.
- Granulats très légers d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers – 20 à 100 kg/m³ – ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers: blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

Les granulats recyclés

Ce dernier type de granulat peut servir de ressource de substitution partielle ou totale aux granulats naturels. On peut citer le béton concassé ou le fraisat d'enrobés bitumineux qui peuvent servir de granulat recyclés.

Auréole de transition

Dans le béton durci, autour des granulats, une zone se crée au moment de l'hydratation, c'est l'auréole de transition. L'épaisseur et les propriétés de cette interface dépendent de la composition du béton, de la forme et de la nature du granulat.

Adjuvants et additions

Dans la composition des bétons, les adjuvants ou additifs améliorent les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci. Selon la norme EN NF 934-2, un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5 % des éléments fins (ciment,

fumées de silice et billes de laitier...). Il existe aussi des retardateurs de prise et des réducteurs d'eau, des plastifiants etc.

L'utilisation de (super)plastifiants permet d'avoir un béton avec une bonne ouvrabilité, tout en respectant le compromis avec la résistance. Cela conduit à avoir des bétons avec un rapport e/c beaucoup plus élevé que la réaction d'hydratation ne le nécessiterait. Une partie de l'eau non utilisée lors de la réaction d'hydratation se trouve donc non liée chimiquement dans le béton. (Gra, 1996)

Les adjuvants et additions ont également une influence sur les déformations différées du béton, puisqu'ils en modifient la microstructure (porosité, hydrates, tension de surface de l'eau,...).

Méthodes de formulation des bétons

Objectifs de la formulation d'un béton

Formuler un béton consiste à déterminer les proportions de chaque constituant permettant d'obtenir un mélange dont les propriétés seront celles souhaitées par l'utilisateur (Lar, 2000). En termes mathématiques, la formulation revient à déterminer un système d'équations sur les n inconnues que sont les proportions des constituants. On raisonne généralement sur un volume de béton de 1 m^3 . La première équation est donc l'égalité de la somme des volumes des constituants et de ce volume unité. Les $(n-1)$ autres équations doivent relier les proportions aux propriétés du matériau. Le nombre de constituants d'un béton est au minimum de quatre: gravillons, sable, ciment et eau. Le nombre d'équation reliant propriétés et proportions doit donc être, dans le cas le plus simple, de trois.

Le cahier des charges porte, quant-à-lui, sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Dans le cas de l'état frais, il est souvent réduit à une valeur d'affaissement au cône d'Abrams, la mesure courante de l'ouvrabilité du béton. La propriété visée pour le béton durci est, dans le cas le plus général, la résistance à la compression à 28 jours.

Dans la pratique actuelle, le nombre de constituants et le nombre de propriétés visées se limitent rarement aux valeurs données ci-dessus. Les bétons sont aujourd'hui formulés couramment avec des adjuvants et additions minérales, avec pour objectif des propriétés aussi variées que le temps de prise, la résistance au gel, la résistance au jeune âge, etc. Le processus de formulation d'un béton devient par conséquent de plus en plus complexe, nécessitant des outils de plus en plus sophistiqués.

Quelle que soit l'efficacité de la méthode de formulation, le processus intègre nécessairement une phase de vérification de la composition obtenue théoriquement, par des essais en

laboratoire, ou directement en centrale à béton (mesures des propriétés visées et ajustement éventuel des dosages des constituants).

Nous présentons dans la suite quelques méthodes de formulation, l'apport de la réglementation et la prise en compte de la durabilité dans le cahier des charges de formulation.

Méthodes classiques de formulation des bétons

Les approches classiques de la formulation sont notamment celles développées par Faury, Caquot et Dreux-Gorisse (**Ber, 2004**) (2). Dans ces méthodes, les propriétés principalement visées sont l'affaissement au cône d'Abrams et la résistance à la compression à 28 jours. Deux étapes s'imposent lors de la formulation d'un béton. La première consiste en la détermination des dosages en ciment et en eau à partir de la formule de Bolomey donnée par l'expression (1) :

$$f_{c28} = G \cdot \sigma_C \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Où : f_{c28} (MPa) est la résistance moyenne du béton à obtenir à 28 jours ; σ_C (MPa) est la classe vraie du ciment utilisé ; G (sans dimension) est un coefficient qui dépend de la qualité ainsi que de la taille des grains.

La méthode Dreux-Gorisse propose de fixer le dosage en ciment C à partir du rapport E/C et de l'affaissement désiré sur la base de données empiriques regroupée dans un abaque. Il reste alors à en déduire le dosage en eau efficace E.

La seconde concerne la détermination du dosage en granulats, par exemple en utilisant la méthode Dreux-Gorisse (**Dre, 1986**), qui est l'une des plus utilisées en France. Cette étape consiste à trouver les proportions des granulats de façon à obtenir un mélange qui peut être compacté à une masse volumique maximale sans trop d'effort (**Nev, 2000**).

Même si ces méthodes classiques sont très utilisées, elles deviennent néanmoins de plus en plus limitées car elles ne prennent pas en compte l'utilisation des adjuvants et des additions minérales, ainsi que les propriétés du béton autres que la résistance à 28 jours.

Méthodes récentes de formulation des bétons

Il existe de nos jours des méthodes modernes utilisant l'ensemble des constituants des bétons d'aujourd'hui (ciment composés, additions minérales, adjuvants, ...etc). Différents modèles empiriques ou semi-empiriques ont été développés dans ce sens permettant de formuler des bétons, en tenant compte des différentes propriétés que peuvent avoir ces bétons aussi bien à l'état frais que durci.

Méthode basée sur BétonlabPro

Le LCPC a développé une méthodologie pour relier les propriétés du béton et sa composition, mise en œuvre dans le logiciel BétonlabPro. Ce logiciel est disponible depuis 1999, il a été précédé par Bétonlab (1993-1996) qui avait un rôle similaire, et René-LCPC (1994-1999) qui est un logiciel d'optimisation granulaire.

La démarche de ce moyen de formulation de bétons se base principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues: celle de l'empilement sec, dont on cherche à prévoir la compacité et la ségrégation ; celle de l'empilement humide (béton frais), intéressant par ses propriétés rhéologiques ; et celle du mélange durci donnant les propriétés mécaniques du matériau (**Lar, 1999**).

Le logiciel peut donner, à partir des données caractéristiques des constituants d'un béton, une simulation de tout mélange faisant appel à ces derniers. Par la suite, si l'utilisateur doit respecter un certain cahier des charges, BétonlabPro peut optimiser la formule. Une fois les constituants choisis, il suffit de fixer des valeurs ou des intervalles pour les propriétés du matériau et indiquer selon quel critère l'optimisation doit se faire (en général, le coût par m³). Le logiciel recherchera alors la formule optimale qu'il faut néanmoins tester en laboratoire pour une éventuelle correction lorsque les propriétés recherchées ne seraient pas tout à fait atteintes (**Lar, 1999**).

Méthode basée sur VCCTL

Le VCCTL (Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory) est un logiciel se présentant sous d'une plateforme en ligne. Son développement a débuté en janvier 2000 au sein de la Division de Recherche en Matériaux et Constructions au NIST (national Institute of Standards and Technology). Le noyau du logiciel est un modèle de simulation de l'hydratation et du développement de la microstructure des matériaux cimentaires.

Le but de ce logiciel est de fournir un laboratoire d'essais virtuel qui peut être employé pour explorer les propriétés de la pâte de ciment et du béton. Il se base sur une distribution granulaire des composants (ciment, addition, granulats) du matériau à l'état sec. Le logiciel permet de simuler l'hydratation ainsi qu'une cure, et calcule les propriétés thermiques et mécaniques du matériau durci, et les propriétés de transport du matériau en fonction des conditions de cure.

Le cas particulier des bétons modernes

On désigne par béton modernes, par opposition aux bétons courant ou ordinaire, les bétons hautes performances (BHP) apparus durant les années 1990, ainsi que les bétons autoplaçants

(BAP) qui ont vu le jour au Japon à la fin des années 1980 (**Oka, 2003**) et utilisés en Europe depuis le début des années 2000.

Leurs propriétés spécifiques sont atteintes grâce à des proportions et des constituants différents de ceux qu'on rencontre dans les bétons ordinaires. Les méthodes classiques de formulation ne permettent donc pas de les concevoir.

Béton de hautes performances

Par convention, un BHP se définit par sa résistance en compression à 28 jours supérieure à 60 MPa. Pour obtenir un BHP, il est préférable de disposer de granulats de bonne qualité. Cependant, le point critique est la compatibilité entre le ciment et l'adjuvant, c'est-à-dire la capacité du superplastifiant à défouler et à lubrifier un ciment, à un faible rapport E/C (**Lar, 2002**).

Les BHP courants comportent des dosages élevés en ciment CEM I (de l'ordre de 400-450 kg/m³). Le recours aux fumées de silice ne devient véritablement nécessaire que pour des résistances spécifiques de 80 MPa et plus, mais on l'utilise parfois à des niveaux inférieurs, car cette addition a l'avantage de réduire significativement la viscosité plastique du béton frais.

La consistance requise est généralement fluide à très fluide, car pour des affaissements inférieurs à 20 cm, le risque est important d'évoluer vers des bétons plastiques, voire fermes, difficiles à mettre en œuvre.

Bien souvent, ce n'est pas la résistance à 28 jours qui commande la prescription des BHP mais plutôt la résistance au jeune âge, ou encore la durabilité. Toutes les propriétés de transport – perméabilité, diffusivité des ions chlorure, etc. – évoluent dans le sens d'un transfert plus difficile, ce qui fait des BHP des matériaux particulièrement indiqués pour les ambiances marines (**Lar, 2002**).

Béton autoplaçant / autonivelant

Les bétons autoplaçant sont utilisés pour remplacer des bétons ordinaires là où ces derniers deviennent vraiment difficiles à mettre en œuvre. Donc la principale différence réside dans leurs propriétés à l'état frais, la résistance finale à 28 jours demandée reste plus ou moins la même que celles des bétons ordinaires. Or par expérience, il a été démontré que cette gamme de résistance est facilement atteinte par les BAP.

Ces matériaux ont pour particularité d'être mis en place par le seul effet de la gravité, sans vibration ni compactage mécanique. En termes de composition, et par rapport à des bétons classiques, les BAP se caractérisent par un plus faible rapport gravillon/sable, un volume de pâte supérieur et l'utilisation systématique de superplastifiant.

A l'heure actuelle, la plupart des BAP sont fabriqués de manière empirique, les méthodes classiques telles que Dreux-Gorisse ne prennent en compte ni l'adjuvant ni les additions minérales et se trouvent donc non adaptées à ce type de bétons. Cette formulation se fait donc sur la base de savoir-faire acquis avec le temps. De façon générale, en se fiant à cette expérience acquise, des plages se sont dessinées pour chaque constituant rendant la formulation plus facile par tâtonnement sur ces plages là (**Tur, 2004**):

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport massique gravillons/sable proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³ de BAP fabriqué.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18-305), soit généralement de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant ne dépasse pas 5 % de la masse du ciment.

Conclusion

Selon leur composition, les matériaux cimentaires sont classés en différents types.

A travers ce qui a été exposé dans cette étude bibliographique, nous avons mis en évidence les éléments principaux entrant dans la composition d'un matériau cimentaire (béton) en général ainsi que les éléments intervenant dans leur formulation, nous avons les bétons ordinaires ou classiques, les BHP et les BAP/BAN.

Liste des symboles

- α : volume d'air occlus dans une unite de volume de pâte de ciment à l'état frais (m^3)
- c : masse de ciment par unite de volume de béton
- C : masse de ciment (kg/m^3)
- $c_{eq}(28j)$: masse équivalente de ciment dans le modèle R_C à 28 jours (kg)
- $d(t)$: terme cinétique exprimant le développement de la résistance à la compression à un âge t (temps)
- d : diamètre du plus petit grains
- D_{Max} : diamètre du plus gros grains
- EMP : épaisseur maximale de pâte (m)
- f_c : résistance en compression du matériau (MPa)
- f_{ij} : masse de filler calcaire par unite de volume de béton (kg)
- $f_{cm}(j)$: résistance en compression de la matrice à j jour (MPa)
- g : volume granulaire dans un volume unité de béton (m^3)
- g^* : compacité du granulat utilisé pour fabriquer un béton
- $K_{p,i}(28j)$: coefficient d'activité décrivant la contribution d'une pouzzolane à la résistance à la compression indépendamment de son dosage
- P : coefficient d'adhérence décrivant la contribution de la liaison pâte/ciment à la compression du béton
- Pz_i : masse de pouzzolane par unite de volume de béton (kg)
- R_{C28} : classe vraie du ciment à 28 jours (MPa)
- S_{pi} : surface spécifique (m^2/g)
- t : temps (s)
- t_{c3A} : teneur de C3A dans le ciment selon la formule de Bogue
- w : masse d'eau par unité de volume de béton
- ρ_c : masse volumique du ciment (kg/m^3)
- ε : déformation

Annexe 2: la loi de Weibull

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.

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

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 :

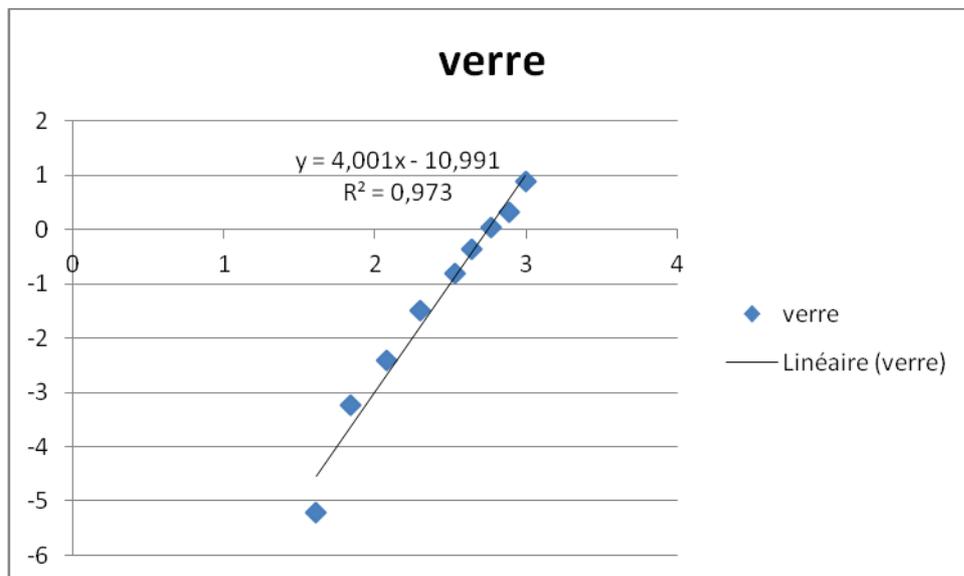
$$(7) : k \cdot \ln(d) - k \cdot \ln(\lambda) = \ln(-\ln[1 - p(d)])$$

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 3: 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 % | Tamises 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 4: 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 5 – détermination des indices sclérométriques

Valeurs sclérométriques du BNR

| N° | 3 jours | | | 14 jours | | | 28 jours | | |
|----|---------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|
| | 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

| N° | 3 jours | | | 14 jours | | | 28 jours | | |
|----|---------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|
| | 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

| N° | 3 jours | | | 14 jours | | | 28 jours | | |
|----|---------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|
| | 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 | 28 | 28 | 30 | 28 |
| 15 | 27 | 26 | 26 | 28 | 26 | 27 | 29 | 30 | 28 |
| 16 | 27 | 26 | 26 | 28 | 27 | 28 | 29 | 30 | 30 |
| 17 | 27 | 27 | 26 | 28 | 28 | 28 | 29 | 30 | 30 |
| 18 | 27 | 27 | 26 | 28 | 28 | 28 | 30 | 30 | 30 |
| 19 | 28 | 27 | 27 | 30 | 28 | 28 | 30 | 32 | 30 |
| 20 | 28 | 28 | 28 | 30 | 29 | 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

| N° | 3 jours | | | 14 jours | | | 28 jours | | |
|----|---------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|
| | 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 6 – 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 | |
| 28 | E ₁ | 17,25 | 17 | 22 | 22,67 | 3356,98 | 3366,16 |
| | E ₂ | 16,65 | | 22 | | 3396,55 | |
| | E ₃ | 15,2 | | 24 | | 3344,94 | |

| BRN | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|---------|------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| Temps (jours) | Échantillons | Résistance en compression (MPa) | Moyenne | Indice sclérométriques | Moyenne | Vitesse de propagation d'ondes (m/s) | Moyenne |
| 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 7: résistances en compression, au fendage, en flexion des éprouvettes

| BNR | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|---------|--|---------|--|---------|
| Temps (jours) | Échantillons | Résistance en compression (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par flexion (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par fendage (MPa) | Moyenne |
| 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 | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|---------|--|---------|--|---------|
| Temps (jours) | Échantillons | Résistance en compression (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par flexion (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par fendage (MPa) | Moyenne |
| 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 | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|---------|--|---------|--|---------|
| Temps (jours) | Échantillons | Résistance en compression (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par flexion (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par fendage (MPa) | Moyenne |
| 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 | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|---------|--|---------|--|---------|
| Temps (jours) | Échantillons | Résistance en compression (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par flexion (MPa) | Moyenne | Résistance en traction par fendage (MPa) | Moyenne |
| 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 8: Méthode de FAESSEL

Cette méthode s'applique à tous les cas d'élançement 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.

Excentricité additionnelle

$ea = \max(2 \text{ cm} ; L/250)$ où L est la longueur libre du poteau.

Excentricité du premier ordre

$$e1 = Mu/Nu + ea$$

M : moment ultime appliqué

Nu : effort normal ultime appliqué

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:

$$Lf/h < \text{Max} [15 ; 20 \cdot e1/h]$$

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.

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 (ϵ_m, ϵ_n)

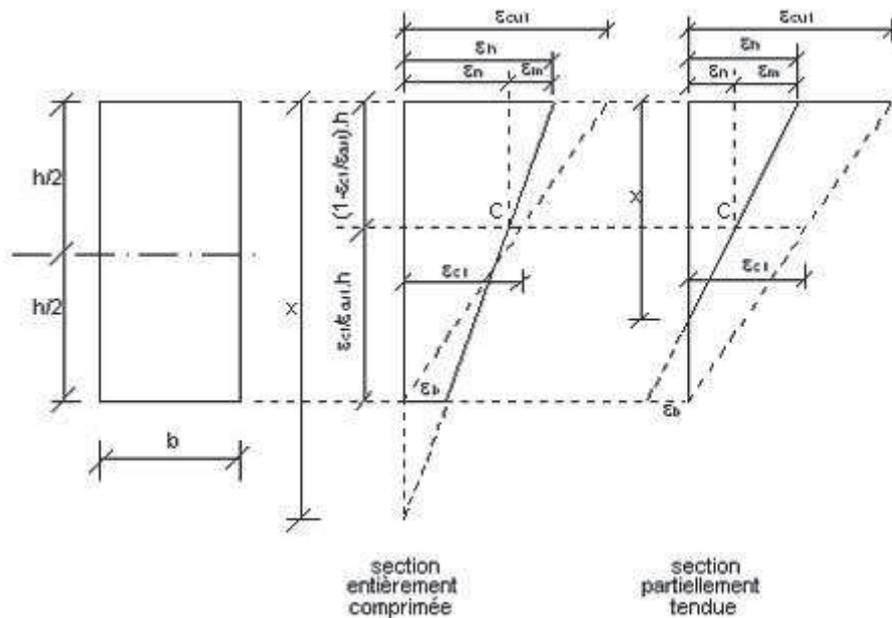


Figure 13: Diagramme des déformations de la section rectangulaire

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 = $\epsilon_h - \epsilon_{bh}(L_0\pi)^2$

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}

Annexe 9 : Caractéristiques complémentaires

Tableau XVIII: Caractéristiques physiques et granulométriques des granulats utilisées

| Granulat | densité | Min | 20% | 50 % | 80% | Max | 5-20 | 20-31,5 | LA |
|--------------|---------|-----|------|------|------|------|------|---------|----|
| | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | |
| 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 10 : Caractéristiques de l'ensemble des granulats

Tableau XIX: 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 | |
| | - 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 | 0,5 à 1 |
| | - 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 | |
| | - sable (0/5) | 2,23 | 2,20 à 2,80 |
| | - sable r (0/5) | 3,2 | |
| | Equivalent de sable (%) : | | |
| | - Sable (0/2) | 73 | [70 ; 80] |
| | Los Angeles (%) : | | |
| | - G.C | 19 | |
| | - C.D | 22 | < 35 |

ARTICLE 1

Journal of Construction Engineering:

<http://www.hindawi.com/journals/jceng/aip/>

Study Of Concrete Made With Fine And Coarse Aggregates Recycled From Fresh Concrete Waste: Mamery Sérifou, Zoubir Mehdi SBARTAI, Sylvie Yotte, Moro Olivier Boffoué, Edjikeme EMERUWA, and Frédéric Bos

Research Article

A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste

Mamery Sérifou,^{1,2} Z. M. Sbartai,¹ S. Yotte,³ M. O. Boffoué,² E. Emeruwa,² and F. Bos¹

¹ *University of Bordeaux, I2M, Department of GCE, CNRS, INRA, 351 Cours de la Libération, Bâtiment A 11, 33405 Talence Cedex, France*

² *University of Félix Houphouët Boigny, Laboratoire Géomatériaux et Technologie de l'Habitat, 01 BP V34 Abidjan 01, Cote d'Ivoire*

³ *Limoges University, GEMH, Centre Universitaire de Génie Civil, boulevard Jacques Derche, 19300 Égletons, France*

Correspondence should be addressed to Z. M. Sbartai; zm.sbartai@i2m.u-bordeaux1.fr

Received 26 February 2013; Revised 27 May 2013; Accepted 15 July 2013

Academic Editor: Anaclet Turatsinze

Copyright © 2013 Mamery Sérifou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper deals with the possibility of using fresh concrete waste as recycled aggregates in concrete. An experimental program based on two variables (proportion of fine aggregates replacement and proportion of coarse aggregates replacement) was implemented. The proportions of replacement were 0%, 50%, and 100% by mass of aggregates. Several mechanical properties were tested as compressive and tensile strengths. The results show a good correlation between aggregates replacement percentage and concrete properties. Concerning mechanical properties, a gradual decrease in compressive, splitting, and flexural strength with the increase in recycled aggregate percentage is shown.

1. Introduction

The intensive use of aggregates in constructions is a very important environmental concern. In the region of Aquitaine in France, the availability of aggregates becomes a serious problem. In order to reduce the use of natural aggregates for natural resources and energy preservation, the use of recycled aggregates in concretes is an interesting solution.

Numerous studies show the potential of recycling aggregates such as ceramics [1], rubber [2, 3], glass [4], and demolition wastes (bricks and concrete). Due to the high amount of concrete from demolition wastes, this material was studied as substitution of natural aggregates by several authors [5–8]. However, these aggregates are highly porous, and contain a high amount of impurities [8, 9]. Limited studies were conducted on the potential of fresh concrete waste (FCW). These aggregates are mainly composed of overordered fresh concrete. The advantage of this waste is that it contains limited amount of impurities in comparison with other recycled aggregates.

Every day, a concrete batching plant receives from several construction sites a huge amount of overordered fresh

concrete. This is caused mainly by the uncertainty in the exact quantity of the required concrete for construction projects. In France, 2.6 million tons of fresh concrete is considered as waste and should be recycled. Currently, the practice of managing overordered fresh concrete is to use it in road or to dump it into landfill, which is considered as a nonbenefit solution. Moreover it will be of high cost in the close future because of the saturation of landfill areas [10].

Recycling this material is of particular interest because its use can considerably reduce the problem of waste storage, and simultaneously it helps in the preservation of natural aggregate resources. Recent successful studies on the use of FCW as aggregates in concrete have been reported [11, 12]. The results of these studies show that the compressive strength and the slump decrease with increasing the FCW aggregates percentage. However, they are mainly devoted to experiences with crushed concrete as coarse aggregates. Therefore, there is a lack of knowledge about the behaviour of concrete made with fine fraction (grain size <5 mm) or coarse and fine aggregates of fresh concrete waste.

In this study, concrete mixes with fine and coarse aggregates recycled from fresh concrete waste as a substitution of

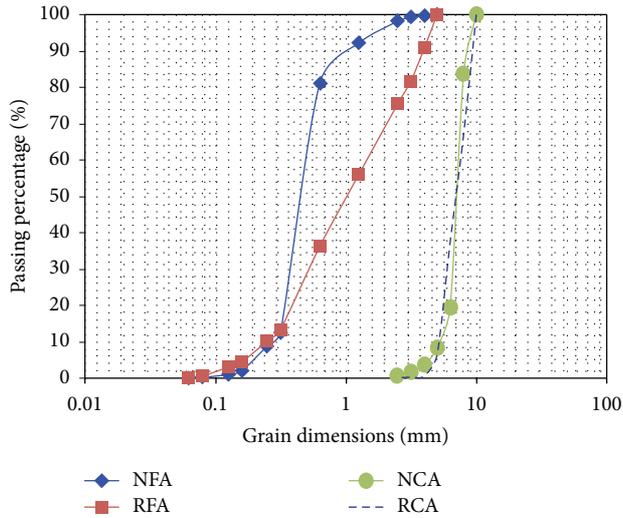


FIGURE 1: Grain size distribution of natural and recycled aggregates.

natural aggregates are studied. Optimised design of experiment was used with two variables (rates of fine aggregate replacement or of coarse aggregate replacement) on the basis of identical composition. Mechanical test results are presented and discussed.

2. Experimental Study

2.1. Materials. The used materials are natural coarse aggregates (NCA), recycled coarse aggregates (RCA), natural fine aggregates (NFA), and recycled fine aggregates (RFA). The recycled aggregates are crushed from the same fresh concrete waste (FCW) after one month of curing. Portland cement CEM II32.5 R is used. Figure 1 presents the grain size distribution of the natural and recycled aggregates. From Figure 1, the grain size distribution of natural and crushed aggregates is comparable. However, RFA are coarser which could reduce the work ability of concrete made with these fine aggregates. Recycled aggregates present relatively lower density (mainly in the case of RFA) and higher water absorption compared to natural aggregates as can be seen in Table 1. Water absorption is particularly high in the case of RFA (13% against 1.6%).

2.2. Mix Design. In order to limit the number of mixes and for a comparative study based on common references, the work ability is fixed constant (slump = 70 ± 20 mm). The experimental program was implemented based on two variables: percentage of fine aggregates (0–5 mm) and the percentage of coarse aggregates (5–10 mm). The proportion of replacement was 0%, 50%, and 100% by mass for both aggregates. The optimal number of mixes was calculated using design of experiment method (2^n), with n the number of studied factors (two in the case of this study) [11]. The first factor is the percentage of RCA, and the second factor is the percentage of RFA. This experimental program of 4 experiences is used for 0% and 50% of substitution and for 0%

TABLE 1: Aggregates characteristics.

| Characteristics | NFA | RFA | NCA | RCA |
|-----------------|-----|-----|------|------|
| d/D (mm) | 0/5 | 0/5 | 5/10 | 5/10 |
| Fineness (%) | 2.2 | 3.2 | — | — |
| Density | 2.7 | 2.4 | 2.6 | 2.6 |
| Absorption (%) | 1.6 | 13 | 1.5 | 4.3 |

and 100% of substitution. Table 2 summarize the percentage of substitution for the experimental design.

The concrete composition considered as the reference is an Ordinary Portland Concrete of 25/30 class of strength. Recycled concrete composition is the same as the reference concrete mixture. However, because of the high water absorption of recycled aggregates, water proportion was adjusted to reach the desired work ability. The volume of water added to the mixes made with 100% of RFA is 78.39 l, which corresponds to 44% of the total quantity of water. For the mixture made with 100% RCA, the water is increased only by 20%. The volume of added water of RFA is then higher than RCA. This can be explained by the fact that water absorption of RFA is higher than RCA. In the case of 100% substitution of both aggregates, the necessary increased water is about 56% as can be seen in Table 2. These corrections will drastically influence the strength of concrete, but, without plasticiser, water correction is needed to reach the desired work ability.

2.3. Casting, Curing, and Testing. Mechanical properties of the concrete mixes were tested at 1, 14, and 28 days. For each mix, three cylinders of 16×32 cm² in size, six cylinders of 11×22 cm², and three flexure beams of size $7 \times 7 \times 28$ cm³ were cast and compacted by vibrating machine. The specimens were kept in laboratory ambient temperature for 24 hours. After 24 hours, the specimens were placed in water for 28 days of curing. Cylindrical samples with 16 cm and 11 cm diameter were used, respectively, for compressive tests and tensile strength measurement by splitting test. In comparison with splitting test, flexural strength was tested with prismatic beams using three-point bending.

3. Results and Discussion

The compressive strengths for all mixes of 1, 14, and 28 days of curing are presented in Table 3. The results show that the higher the replacement by recycled aggregates, the lower the compressive strength for all the curing durations. These results are in agreement with Correia et al. [11] and Kou et al. [12]. Both coarse and fine recycled aggregates decrease the compressive strength. Typical results for the relationship between compressive strength and curing time are presented in Figure 2. The results concern mixes with RFA. All the tested mixes present a decrease in strength. This is mainly due to the added water for the work ability correction. However, the compressive strength of young concrete, typically after 1 day of curing, is more influenced by the incorporation of recycled aggregates than the mixes tested after 14 and 28 days. This is in agreement with the results of Kou et al. [7] who

TABLE 2: Design of experiments and mixtures proportions.

| | Mix1 | Mix2 | Mix3 | Mix4 | Mix5 | Mix6 | Mix7 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| RFA (%) | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 100 | 100 |
| RCA (%) | 0 | 50 | 0 | 50 | 100 | 0 | 100 |
| Total of recycled aggregates (%)* | 0 | 25 | 25 | 50 | 50 | 50 | 100 |
| CEM II 32.5 R (kg/m ³) | 385 | 385 | 385 | 385 | 385 | 385 | 385 |
| NFA (kg/m ³) | 627 | 627 | 314 | 314 | 618 | — | — |
| RFA (kg/m ³) | — | — | 314 | 314 | — | 856 | 823 |
| RCA (kg/m ³) | — | 574 | — | 574 | 1109 | — | 840 |
| NCA (kg/m ³) | 1147 | 574 | 1147 | 574 | — | 860 | — |
| Water (L) | 178 | 178 | 178 | 178 | 178 | 178 | 178 |
| Water, corrected (L) | — | 2.4 | 22.2 | 33.8 | 36.2 | 78.4 | 98.1 |
| w/c | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 |
| w/c, corrected | — | 0.47 | 0.52 | 0.55 | 0.56 | 0.67 | 0.72 |

*The total of recycled aggregates (%) is the percentage of the recycled aggregates with respect to the total masses of aggregates.

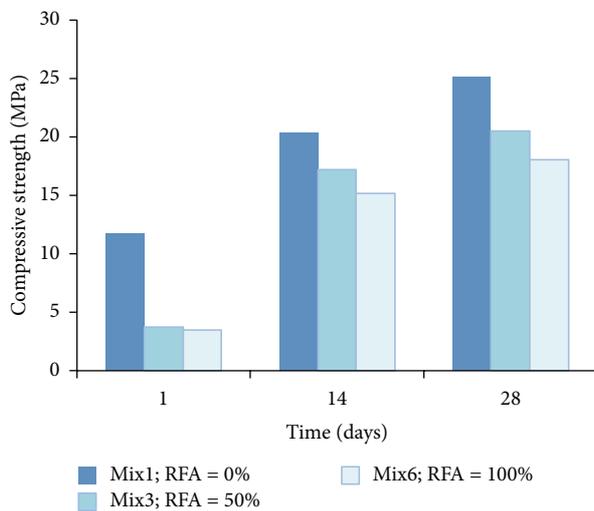


FIGURE 2: Compressive strength with respect to curing time for 0%, 50%, and 100% of RFA.

shows that the difference in compression strength between a natural aggregate concrete and a recycled aggregate concrete decreases with time.

The relationship between compressive strength and the percentage of the recycled fine and coarse aggregates at 28 days is presented in Figure 3. From these figures, the compressive strength decreases with increasing the percentage of recycled aggregates for RFA, RCA, and RFA + RCA. This is because the aggregates are a mix of aggregates and old mortar that increases the new concretes porosity. In addition, this porosity increases mainly in the transition zone between aggregates and the new mortar, which decreases the mechanical performances of concrete [13]. In fact, the aggregates crushed from FCW are composed of two parts: natural aggregate and old mortar (the old mortar is still wrapped around the natural aggregate after the crushing). Under loading, the crack should be created in the transition zone between aggregate and old mortar sooner than in other

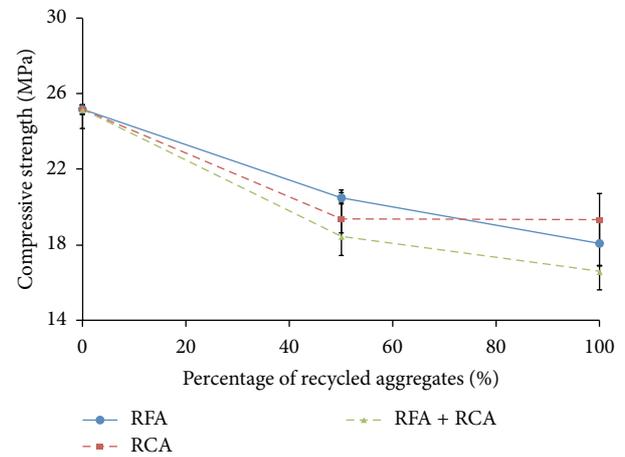


FIGURE 3: Effect of grain size on compressive strength at 28 days.

point of the new concrete. Moreover, the old mortar part has smaller compressive strength than the part of natural aggregate. The old mortar is then the weak point in the new concrete.

The effect of grain size is not significant because it is lower than the standard deviation of compressive strength measurement. For instance, in the case of mixes with 50% of recycled aggregates, the difference between RFA and RCA is of about 1.2 MPa whereas the standard deviation is of about 1.4 MPa for RCA and 0.8 MPa for RFA. Compressive strength is then not significantly affected by the grain size of recycled aggregates. However, at 100% replacement, a mix made with RCA gives 20% higher strength than a mix made with RFA.

As the grain size effect can be neglected, the compressive strength depends then only on the proportion of the recycled aggregates (fine or coarse) from FCW. As can be seen in Figure 4, the compressive strength shows only a 15% decrease for 25% of aggregates replacement and 32% decrease for 100% of aggregates replacement. These results show that it is possible to use 100% of recycled aggregates in application as, for example, pavements and concrete blocks. A high

TABLE 3: Compressive strength of the tested mixes at 1, 14, and 28 days.

| | % of recycled aggregates | | 1 | 14 | 28 |
|------|--------------------------|-----|------|------|------|
| | RFA | RCA | | | |
| Mix1 | 0 | 0 | 11.8 | 20.3 | 25.2 |
| Mix2 | 0 | 50 | 3.7 | 17.2 | 20.5 |
| Mix3 | 50 | 0 | 2.6 | 16.3 | 19.4 |
| Mix4 | 50 | 50 | 3.9 | 15.8 | 18.4 |
| Mix5 | 0 | 100 | 3.5 | 15.2 | 18.1 |
| Mix6 | 100 | 0 | 4.2 | 16.9 | 19.3 |
| Mix7 | 100 | 100 | 3.5 | 14.9 | 16.6 |

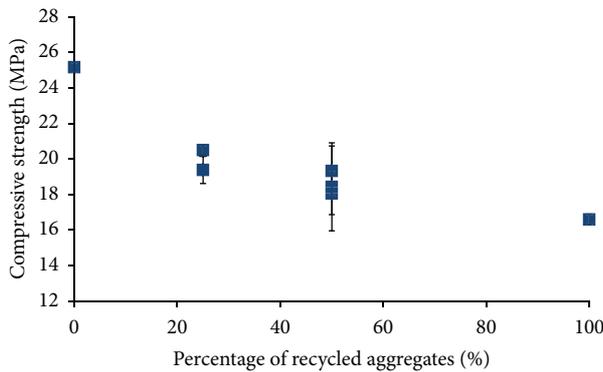


FIGURE 4: Relationship between compressive strength at 28 days and the proportion by mass of recycled aggregates.

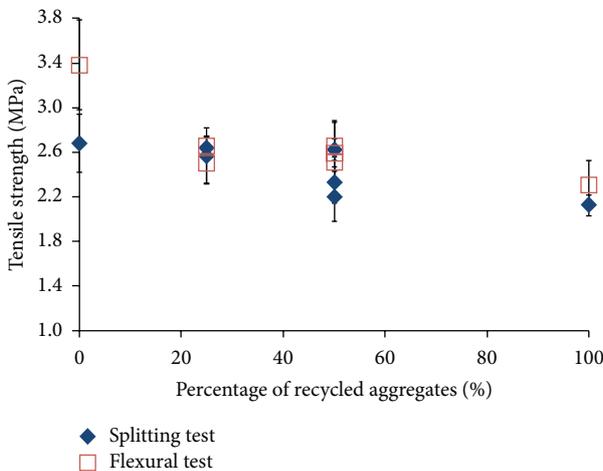


FIGURE 5: Relationship between tensile strength (splitting and bending tests) at 28 days and the proportion of recycled aggregates.

correlation exists between compressive strength and the total percentage of recycled aggregates. The behaviour is not linear but can be adjusted by a polynomial relation with $R^2 = 0.92$:

$$f_c = 0.001x^2 - 0.177x + 24.6, \quad (1)$$

where f_c is the concrete compressive strength and “ x ” the percentage of the total recycled aggregates.

The relationship between concrete tensile strength and the proportion of aggregates replacement is presented in Figure 5. In this figure, results of both splitting test and bending test are presented. A small decrease in the tensile strength can be seen. For 100% aggregates replacement, the tensile strength measured by splitting test decreases by only 18%. In the case of mix with 25% aggregates replacement, the tensile strength measured using splitting test is the same as the tensile strength measured using the bending test. For the other percentages of replacement (50% and 100%), the difference between bending and splitting test is not significant.

4. Conclusions

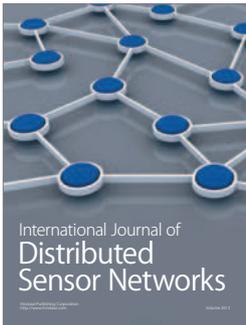
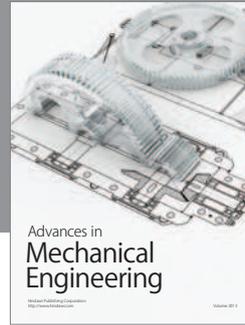
- (i) Water absorption of the recycled fine and coarse aggregates from fresh concrete waste is higher than the natural aggregates. The measured coefficient of absorption is 4.3% and 13% for coarse and fine aggregates, respectively.
- (ii) The use of fresh concrete waste, after crushing, as recycled fine and coarse aggregates decreases the mechanical performance of the new concrete.
- (iii) The compressive strength decreases gradually with respect to the increase of the percentage of recycled aggregates. This relationship can be approximated by a polynomial function with $R^2 = 0.92$. Moreover, this behaviour does not depend on the aggregates size for concrete made with aggregates size < 12.5 mm.
- (iv) The substitution of natural aggregates with 25%, 50%, and 100% of recycled aggregates decreases the compressive strength by about 15%, 25%, and 32%, respectively.
- (v) The decrease in tensile strength is by 18% when 100% of the recycled aggregates are incorporated.

Acknowledgments

This study was supported by the DURATINET European Project (<http://www.duratinet.org/>). Cemex Company is acknowledged for its support.

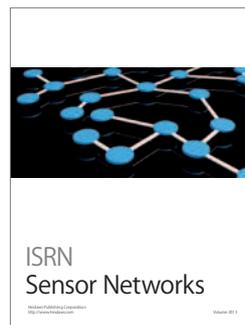
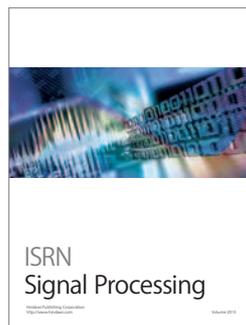
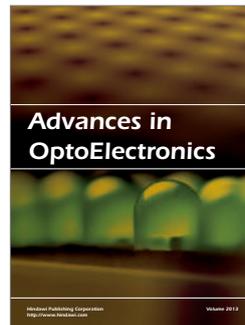
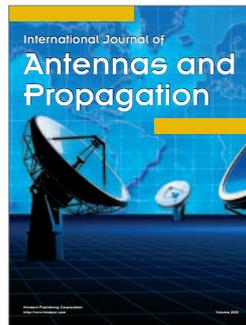
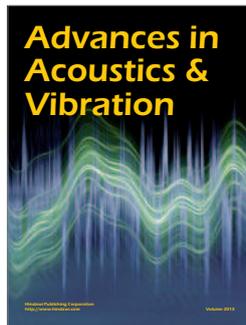
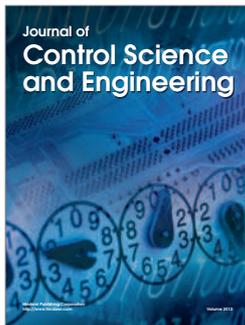
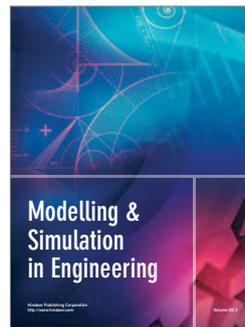
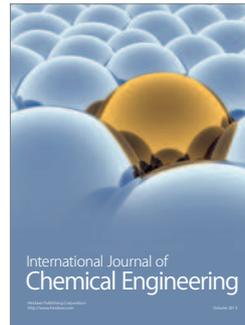
References

- [1] A. R. Khaloo, "Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate," *ACI Materials Journal*, vol. 91, no. 2, pp. 401–407, 1994.
- [2] N. Segre and I. Joeke, "Use of tire rubber particles as addition to cement paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1421–1425, 2000.
- [3] A. Turatsinze, S. Bonnet, and J.-L. Granju, "Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres," *Building and Environment*, vol. 40, no. 2, pp. 221–226, 2005.
- [4] I. B. Topçu and M. Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, 2004.
- [5] J. M. V. Gómez-Soberón, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 8, pp. 1301–1311, 2002.
- [6] T. Tu, Y. Chen, and C. Hwang, "Properties of HPC with recycled aggregates," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 5, pp. 943–950, 2006.
- [7] S. Kou, C. Poon, and M. Etxeberria, "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 286–291, 2011.
- [8] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, and E. Wirquin, "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003.
- [9] R. Boder, *Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés*, CER-IB, Epernon, France, 2003.
- [10] V. W. Y. Tam and C. M. Tam, "Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: a case study approach," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 2, pp. 208–218, 2007.
- [11] S. L. Correia, F. L. Souza, G. Dienstmann, and A. M. Segadães, "Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments," *Waste Management*, vol. 29, no. 11, pp. 2886–2891, 2009.
- [12] S. Kou, B. Zhan, and C. Poon, "Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 549–556, 2012.
- [13] M. S. de Juan and P. A. Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 872–877, 2009.




Hindawi

Submit your manuscripts at
<http://www.hindawi.com>



ARTICLE 2

International Journal of Materials Science and Applications

<http://www.sciencepublishinggroup.com/ijmsa>

Effect of Association Natural-Recycling Aggregates (Crushed Glass and Waste Tire) on Mechanical Properties of the Concrete : **Mamery Adama Serifou**, Olivier Moro Boffoué, Paul Sery Obre Jolissaint, Clement Koffi Kouadio, Edjikémé Emeruwa



Effect of Association Natural-Recycling Aggregates (Crushed Glass and Waste Tire) on Mechanical Properties of the Concrete

Mamery Adama Serifou, Olivier Moro Boffoué, Paul Sery Obre Jolissaint, Clement Koffi Kouadio, Edjikémé Emeruwa

Department of Earth Sciences and Mineral Resource, Geomaterial Laboratory, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Email address:

smadamsdedjen@yahoo.fr (M. A. Serifou)

To cite this article:

Mamery Adama Serifou, Olivier Moro Boffoué, Paul Sery Obre Jolissaint, Clement Koffi Kouadio, Edjikémé Emeruwa. Effect of Association Natural-Recycling Aggregates (Crushed Glass and Waste Tire) on Mechanical Properties of the Concrete. *International Journal of Materials Science and Applications*. Vol. 6, No. 1, 2017, pp. 28-31. doi: 10.11648/j.ijmsa.20170601.14

Received: October 31, 2016; **Accepted:** November 11, 2016; **Published:** January 12, 2017

Abstract: This study relates to the use of the industrial waste as substitute to the natural aggregates. It relates to two types of waste: Crushed glass and waste tires. These wastes were incorporated into concrete for a partial substitution of the aggregates in the proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% for the same matrix (mortar). The compressive strength and the mode of rupture are compared. The results show a decrease of compressive strength when the proportion of waste increases. Moreover, the compressive strength of concrete of used tire is lower than that of the concrete of crushed glass. Variation of the mode of rupture between these two types of concrete was also observed.

Keywords: Concrete, Compressive Strength, Crushed Glass, Industrial Waste, Recycling, Waste Tire

1. Introduction

Certain waste constitutes traps for water where the mosquitos responsible for many diseases such as malaria can reproduce. The collection and especially the creation of a viable economic activity of recycling this waste can bring a durable solution.

Also, with a view on economy and protection of the natural resources like crushed rocks and alluvial aggregates, a study aiming at reducing their quantity in the concrete is carried out. It consists in making a partial substitution of natural aggregates (crushed granite) by various proportions of waste and at studying their effect on the mechanical properties of these concretes.

Thus, an association of crushed glass on the one hand and used tire on the other hand are carried out with the natural gravels by a substitution from 5% to 30%.

The use of siliceous aggregates such as glass in the concrete involves a reaction of the concrete on the aggregate (alkali-silica reaction). An expansive gel is formed on the interface aggregate-paste and involves an embrittlement of material by creation of microscopic cracks. As Glass is

mainly made up of silica, the recycling of glass in the concrete raises this problem. If glass is crushed into fine powder, it can react with the portlandite (pozzolanic reaction) and form new Calcium Silicate Hydrate (CSH), which improves resistance of the concrete.

Many authors like [1-5] located the critical size of glass aggregate between 0.038 and 1.18 mm. Over those dimensions the alkali-silica reaction occurred (ASR). The use of crushed glass as gravels would thus induce an alkali-silica reaction whatever the selected reference. However, this reaction (ASR) occurs more than ten years later and also the importance of environmental problems caused by non-recycling glass and the waste of used tires, on the protection of the natural resources justify this study.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Glasses used in this study are non-recycling bottles. They were collected from discharges in Abidjan. After a sorting, only the green bottles were used as according to [6], these

bottles because of their low silica content will induce less ASR.

In Côte d'Ivoire, the main way of elimination of waste tires is incineration which produces an important quantity of CO₂. To solve this situation, used tires were collected to be used as aggregates in this study. Tires and bottles are manually reduced into small pieces by cutting for the first and crushing for the other.

The grain size analyses of natural aggregates and glass were carried out by sifting according to (NF P 94-056 Standard) and the results are presented on figure 1. That of the tire was carried out by measuring the median dimension of the parallelepiped aggregate and the mass of each one of them. Indeed because of the metal reinforcements of tire; it was very difficult to sieve the aggregates of tire. The curve was carried out starting from measurements taken on 116 samples for a total mass of 863 g.

Thus each mixture has the same quantities of cement, sand and the ratio water/cement is constant.

Table 1. Proportions of mixture.

| Material | Concretes | | | | | | |
|---------------------------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | N | V ₅ | V ₁₀ | V ₁₅ | V ₂₀ | V ₂₅ | V ₃₀ |
| Cement (kg) | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Water (l) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| W/C | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| Sand (kg) | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Natural Aggregates (kg) | 14 | 13,3 | 12,6 | 11,9 | 11,2 | 10,5 | 9,8 |
| Recycling aggregates (kg) | - | 0,7 | 1,4 | 2,1 | 2,8 | 3,5 | 4,2 |
| Substitution (%) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| V _{gp} | 0 | 6,20 | 6,34 | 6,48 | 6,62 | 6,76 | 6,90 |
| V _{gv} | 0 | 6,08 | 6,09 | 6,11 | 6,13 | 6,15 | 6,16 |

V_{gp}: Volume of used tire in concrete

V_{gv}: Volume of crushed glass in concrete

The concrete samples of 16x32 Cm² are made in accordance with the standard P 13-451. They are unmolded after 24 hours. Moreover, the conservation is done in a wet basin until maturation (28 days).

2.2.2. Characterization of Samples

After the 28 days of maturation the bulk density of the samples was determined by measurement of their mass and dimensions.

The compressive strength was also determined according to standard NF P 18-406.

3. Results and Discussion

3.1. Compressive Strength and Bulk Density

Table 2 and figures 2, 3 present the value of compressive strength test and the average value of bulk density for each proportion of concretes.

Table 2. Values of compressive strength and density.

| PA (%) | CS (MPa) | | A | ET | CV | D |
|--|----------|------|------|------|------|-------|
| Concrete of natural aggregates and crushed glass | | | | | | |
| 0 | 36,2 | 34,5 | 36,1 | 35,6 | 0,9 | 0,047 |
| 5 | 18,9 | 20,4 | 21,8 | 20,4 | 1,5 | 0,171 |
| 10 | 20,6 | 22,3 | 18,1 | 20,3 | 2,1 | 0,317 |
| 15 | 22,6 | 22,4 | 21 | 22 | 0,9 | 0,201 |
| 20 | 18,8 | 23,1 | 24,6 | 22,2 | 3,0 | 1,357 |
| 25 | 18 | 18,4 | 18,7 | 18,4 | 0,4 | 0,089 |
| 30 | 20,4 | 16,4 | 17,9 | 18,2 | 2,0 | 0,289 |
| Concrete of natural aggregates and waste tire | | | | | | |
| 0 | 36,2 | 34,5 | 36,1 | 35,6 | 0,95 | 0,027 |
| 5 | 14,7 | 10,4 | 12,5 | 12,5 | 2,15 | 0,172 |
| 10 | 06,9 | 10,8 | 08,5 | 08,7 | 1,96 | 0,224 |
| 15 | 07,6 | 05,7 | 06,2 | 06,5 | 0,98 | 0,152 |
| 20 | 06,3 | 04,9 | 07,1 | 06,1 | 1,10 | 0,180 |
| 25 | 05,4 | 06,1 | 05,8 | 05,8 | 0,35 | 0,070 |
| 30 | 03,8 | 04,1 | 04,4 | 04,1 | 0,30 | 0,073 |

PA: proportion of aggregates; CS: compressive strength; A: average; ET: ecart type; CV: Coefficient of variation; D: density

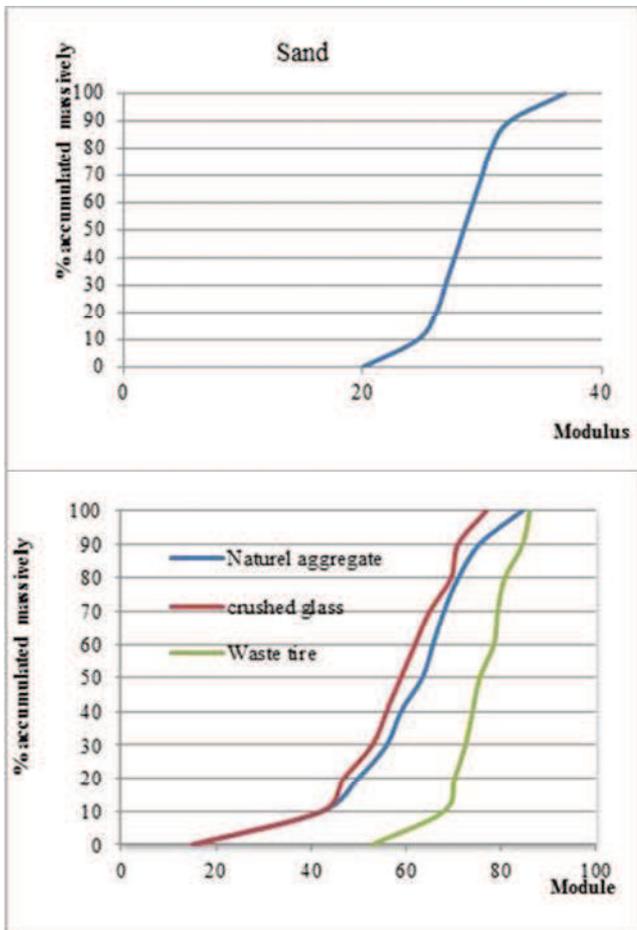


Figure 1. Curves grading (a) sand (b) aggregates.

2.2 Methods

2.2.1. Elaboration of Concrete

In order to study the effect of the volume of aggregates, concretes are elaborated like a mortar, in which content of aggregates is gradually increased. All concretes are similarly made.

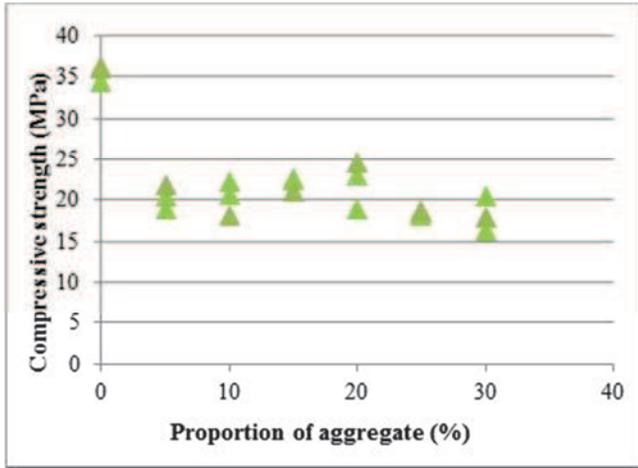


Figure 2. Compressive strength of the concrete according to the proportion of aggregate of glass.

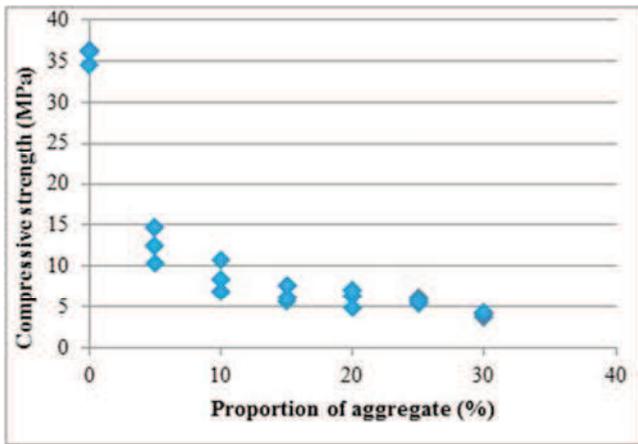


Figure 3. Compressive strength of the concrete according to the proportion of aggregate of tire.

Table 2 shows that compressive strength of the different samples decreases when the proportion of recycling aggregates increases. It can be explained by the low adherence between aggregates and mortar. Indeed the recycling aggregates used (glass and tire) have none absorbing and smooth surfaces. These surfaces prevent a good fixing of the mortar so application of load causes a fast separating of the mortar from aggregate [7-8].

For these authors, the decrease of compressive strength depends on the adherence of those aggregates to the mortar. However, for [9] it can be caused by the shape of aggregates. [10] show that the compressive strength decrease linearly according to the ratio of replacement.

The over reason is the volume occupied by the recycling aggregates (table 1). Indeed, when the volume occupied by the aggregates increases, the quantity of mortar becomes insufficient to bind the aggregates suitably. That induces the creation contact between aggregates of different nature; that is to say contact between a stiff element (natural aggregates) and a less stiff element (tire or glass). This contact constitutes a weakness zone through which the crack can propagate.

Many authors, [11-17] estimate the loss of compressive

strength between 21 and 99.95% compared to a concrete of reference.

For this study (substitution of 30%) the loss of resistance is approximately 50% for crushed glass and 90% for waste tires.

Table 2 also shows that the bulk density of the concretes containing the glass aggregates is similar to that of the concretes of reference, on the other hand that of the concretes containing tire aggregates decreases with the increase in those aggregates. Thus, like [18-19], this study indicates that tire aggregates contribute to the lightening of the concretes by their low density.

3.2. Influence of Nature of Recycling Aggregates on the Mode of Rupture of the Concretes

The effect of this association is also observed on the samples of concrete after being submitted to a constraint. The figure 6 shows samples after compressive strength test.



Figure 4. Samples after compressive strength test.

- a. Concrete of natural aggregates and used tire
- b. Concrete of natural aggregates and crushed glass

The concrete containing the association of waste tire and the natural aggregates (figure 4a) present vertical cracks but they are not dislocated. Whereas, the concretes containing the association of crushed glass and natural aggregates (figure 4b) are dislocated and exploded under the constraint (effect of brittleness of material). Indeed after the maximum constraint, compressive strength of used tire concrete decreases gradually indicating that the samples are not completely dislocated because of the presence of the rubber aggregates and can support loads post-rupture with increase in the deformations. Degradation is more significant for the concrete of crushed glass than the concrete containing of the rubber aggregates.

According to the observation, it can be notice that rubber attenuates the constraint and blocks cracking which weakens material. The aggregates of tire absorb energy associated to cracks propagation and behave like cracks stoppers.

4. Application of the Concrete of Tire

tire concrete can be advantageous for special applications where the main request is not the mechanical properties, such as the production of sound barriers, terraces and platform.... According to [20] the association of used tire concrete can be used in applications where there is a need for weak penetration of chloride ions in structures and where the corrosion of the reinforcements must be avoided.

In spite of the bad compressive strength, the concretes of waste tire present obvious interest in all the applications where compressive strength is less of interest than the post rupture behaviour.

5. Conclusion

Partial substitution of the natural aggregates by crushed glass and used tires generates significant differences in the properties of the concrete, with consequences on durability. Tests carried out obviously show that the incorporation of the recycling aggregates involve a decrease of the compressive strength. Which can be explained by a low adherence of the waste tire and crushed glass aggregates to the matrix.

However, the compressive strength of crushed glass concrete is higher than those of used tire.

In spite of the decrease of compressive strength, the used tire concrete, under the constraint resist to cracking. Cracking which represents the main handicap of cementitious materials such as concrete. Lastly, an application of used tires concretes of would be the use for large surfaces more sensitive to the cracking and the structures of protection against the corrosion of the reinforcements.

References

- [1] Rachida I., Martin C., Arezki T (2010). Etude des propriétés des bétons de verre. *Technologie valorisation* Vol. 16 N°5/6, pp 70-77.
- [2] Jin C., Meyer C. et Baxter S. (2000). "Glasscrete"-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, *Material Journal*, n°97, pp.208-213.
- [3] Yamada, K. et Ishiyama, S (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate in mortar, dans Dhir, R. K. Newlands, Dyer, T. D. (2005) *Achieving Sustainability in Construction*, Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-7 July.
- [4] 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, 10].
- [5] 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.
- [6] Topçu I., Boga A. et Bilir T. (2008). Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li₂CO₃. *Waste Manage*;28 (5), pp 84-878.
- [7] Tung-Chai L., Chi-Sun P., et 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*, 18 p.
- [8] Kou S-C. et Poon C-S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cem Concr Compos* 31 (2), pp 103-107.
- [9] 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, pp 210-219.
- [10] Topçu I. B. et Mehmet C (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 34, pp 267-274.
- [11] Batayneh, Malek K., Marie, Iqbal, and Asi, Ibrahim (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries - *Waste Management - Vol. 28 - Numéro 11* - pp. 2171-2176.
- [12] Khaloo, Ali R., Dehestani, M., and Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles - *Waste Management - Vol. 28 - Numéro 12* - pp. 2472-2482.
- [13] Li, Guoqiang, Garrick, Gregory, Eggers, John, Abadie, Christopher (2004). Stubblefield, Michael A., and Pang, Su Seng - *Waste tire fiber modified concrete- Composites Part B: Engineering - Vol. 35 - Numéro 4* - pp. 305-312.
- [14] Bravo, Miguel and de Brito, Jorge (2012). Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance - *Journal of Cleaner Production - Vol. 25 - Numéro 0* - pp. 42-50.
- [15] Fattuhi, N. I. and Clark, L. A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber - *Construction and Building Materials - Vol. 10 - Numéro 4* - pp. 229-236.
- [16] Ganijian, Eshmaiel, Khorami, Morteza, and Maghsoudi, Ali Akbar (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete - *Construction and Building Materials - Vol. 23 - Numéro 5* - pp. 1828-1836.
- [17] Toutanji H. A (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates - *Cement and Concrete Composites - Vol. 18 - Numéro 2* - pp. 135-139.
- [18] Eldin N. N., et Senouci A. B. (1993). "Rubber tire particules as concrete aggregate". *Journal of Materiel in civil Engineering*, vol.5, No4, pp.478-496.
- [19] 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.
- [20] Oikonomou N. et Mavridou S. (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. *Cement & Concrete Composites*, 40 p.

COMMUNICATION 1

CONGRES International Francophone



NoMaD 2012

Nouveau Matériaux et Durabilité

19 et 20 Novembre 2012
Université Paul Sabatier
Toulouse



SESSION 7 - SOUS-PRODUITS :
VALORISATION DE GRANULATS RECYCLÉS

BETONS A BASE DE RECYCLATS – APPLICATIONS AU VERRE, PNEU ET CIMENT DURCI

SERIFOU Mamery^{A,B}, BOFFOUE Moro Olivier^A, EMERUWA Edjikemé^A, YOTTE Sylvie^B, SBARTAI Mehdi^C

^A UFR Science de la Terre UNIVERSITE DE COCODY 01 BP V34 Abidjan 01 - Côte d'Ivoire

^B Université de Limoges, Centre de Génie Civil, 19550 Egletons

^C Univ Bordeaux, I2M, dpt GCE, domaine universitaire, 33405 Talence cedex

RESUMÉ: 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 3 types de déchets : du verre concassé, du ciment durci concassé et des pneus découpés. Ces déchets ont été incorporés à du béton pour remplacer 100% des graviers. La matrice du mortier reste identique et seul le pourcentage de recyclât change. Les résistances mesurées sont comparées et une loi donnant la résistance en fonction des caractéristiques des agrégats et de leur fraction volumique est proposée.

MOTS CLÉS : Béton, recyclât, résistance, verre, pneu, ciment durci.

COMMUNICATION 2

CONGRES International Francophone



NoMaD 2012

Nouveau Matériaux et Durabilité

19 et 20 Novembre 2012
Université Paul Sabatier
Toulouse



SESSION 7 - SOUS-PRODUITS :
VALORISATION DE GRANULATS RECYCLÉS

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS A BASE DE GRANULATS ISSUS DES BÉTONS FRAIS RECYCLÉS

SERIFOU M.^{A,B}, SBARTAI Z.M.^A, YOTTE S.^A, BOFFOUE M.O.^B

^A Université de Bordeaux, I2M, dpt GCE, CNRS, INRA, domaine universitaire, 33405 Talence cedex

^B Université de Cocody-Abidjan, Laboratoire Géomatériaux et Technologie de l'Habitat, Abidjan

RESUMÉ: Cette étude concerne l'utilisation des granulats issus du concassage des déchets des bétons frais comme substituant des granulats naturels. Un plan d'expériences à 2 variables (% du sable et % du gravier) a été utilisé pour réduire le nombre de mesures. Les proportions de remplacement utilisées sont : 0%, 50% et 100%. Plusieurs propriétés mécaniques et physiques ont été mesurées notamment la résistance à la compression et à la traction ainsi que la porosité. Ces résultats montrent une bonne corrélation entre le pourcentage de remplacement et les propriétés de ces bétons. Par exemple, Le remplacement de 50% des granulats (sable et gravier) par ces granulats recyclés engendre une diminution de l'ordre de 24 % de la résistance mécanique à la compression du béton testé.

MOTS CLÉS : Déchets du béton frais, granulats recyclés, environnement, ressources naturelles.

COMMUNICATION 3



International Conference

Durable Structures

From construction to rehabilitation

31st May - 1st June 2012 • Lisbon • Portugal

programme



Index

| | |
|---|-----------|
| Keynotes | 1 |
| Design for durability of concrete structures..... | 3 |
| Degradation models and measurement of corrosion in marine environment: state of the art and challenges..... | 3 |
| Durable structures. What we need to learn more?..... | 4 |
| Limit state calculation of reinforcement corrosion..... | 4 |
| Mechanisms involved in chloride transport through reinforced concrete – simulations of their effects on corrosion initiation..... | 5 |
| Novel sensors for monitoring the durability of concrete structures..... | 5 |
| SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION MATERIALS: AN OVERVIEW | 6 |
| Durability | 7 |
| Stainless steel rebar for long service life..... | 9 |
| Probabilistic fatigue behaviour of a structural detail of puddle iron from the Eiffel bridge..... | 9 |
| Corrosion protection of steel structures..... | 9 |
| Assessment of corrosion in offshore environment. Study in windfloat prototype: Wind_enermar project..... | 9 |
| Effect of climate change on concrete carbonation..... | 11 |
| Numerical tool for durability assessment of concrete structures subjected to aggressive environment..... | 11 |
| A simple durability design method for carbonation-induced corrosion..... | 11 |
| Role of performance indicators in assessing the state-of-health of concrete infrastructure..... | 12 |
| Limitations of durability of portland cement-based concretes due to sulphate attack..... | 12 |
| Metakaolin influence in chloride penetration in concrete..... | 12 |
| Reaching more sustainable materials for sewer networks through an accelerated test..... | 14 |
| Environmental degradation of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinyl ester resins..... | 14 |
| Application of water vapour tight coatings on early age (green) concrete..... | 14 |
| Controlled permeability formwork liners in constructing waste-water treatment plants..... | 15 |
| Durability performance based approach of mortar patch repair..... | 15 |
| Behavior of anchor systems in cracked concrete under tension loading..... | 15 |
| Hydration rate and compressive strength of metakaolin-cement blended mortar, cured at different temperatures..... | 17 |
| Chloride transport through cementitious membranes using pulsed current..... | 17 |
| Ductility of damaged reinforced concrete beams..... | 17 |
| Concrete building in marine environment – prevention of chloride induced reinforcement corrosion..... | 18 |
| Effect of microclimate on the durability of concrete structures..... | 18 |
| Theoretical and experimental study of the shear beams reinforced with basalt fibre glass..... | 18 |
| Assessment & Inspection | 19 |
| Concrete structures durability design – probabilistic approach..... | 21 |
| Analysis and capitalisation for the diagnosis of constructors..... | 21 |
| Dynamic tests of a bridge with the deck retrofitted with external pre-stressing..... | 21 |
| Durability assessment of concrete structures in marine environment – case studies..... | 22 |
| Real time assessment of rehabilitation works under operational loads..... | 22 |
| Progress of internal expansive reactions in concrete structures..... | 22 |
| Destructive and non-destructive condition assessment of a 100 year old concrete bridge..... | 24 |
| The recourse to cutting-based tomography for quantifying the surface strengthening of altered stones..... | 24 |

**International Conference Durable Structures
from construction to rehabilitation**

| | |
|--|-----------|
| Proposal of a calibration protocol to determine the concrete water content on site with Non Destructive capacitive technique | 24 |
| Petrographic study of concrete. A contribution to a European standard | 25 |
| Optimization of non destructive testing when assessing stationary stochastic processes: application to water and chloride content in concrete | 25 |
| Repair | 27 |
| Compatible mortar for masonry restorations: discrete optimization for equivalent strength & colour prescription | 29 |
| Durable mortars of a Portuguese military structure from the XVII th century | 29 |
| Lime-metakaolin mortars for historical buildings repair: study of the hardening reaction | 29 |
| Role of aggregates in air lime mortars durability: influence of curing conditions | 30 |
| Lime-based mortars for rendering and repointing | 30 |
| Repointing masonry infill walls with novel fibrous structures | 30 |
| Self-compacting concrete technology as a competitive repair option | 32 |
| Shrinkage-compensating concrete: behavior at early age and long term of commercial products | 32 |
| Polymer cement mortar in repair: Action on corrosion rates | 32 |
| Inorganic protective coatings for durability of concrete | 33 |
| Concrete hydrophobic protection: short-term performance and durability | 33 |
| Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with corrosion inhibitors | 33 |
| Management & Monitoring | 35 |
| Assessment of uncertain soil properties for complex infrastructures from monitoring | 37 |
| Automatic concrete health monitoring | 37 |
| Monitoring of temperature variations in the Tagus river suspension bridge | 37 |
| Use of a multi-electrode sensor to monitor early age properties of concrete | 38 |
| Probability of damage in timber structures by monitoring of biological activity - MONITOR project | 38 |
| Variation of stress in arch structures due to variable concrete pressure modulus | 38 |
| SGCIA – Balance of a cycle of inspections 2007-2011 | 40 |
| Life-cycle cost optimization in highway concrete bridges management | 40 |
| Portuguese railway network – bridge inspection and maintenance strategy | 40 |
| Testing on bridges within the scope of management of a road network | 41 |
| Sustainability | 43 |
| Sustainable energy buildings refurbishment: the need for developing a decision model tool | 45 |
| Effect of natural pozzolan on local concrete sustainability | 45 |
| Influence of the curing conditions on the durability-related performance of concrete with selected plastic waste aggregates | 45 |
| Evaluation of the durability of concrete made with grinded glass aggregates | 46 |
| Sulphate attack on eco mortar | 46 |
| Organic-inorganic hybrid coatings for corrosion protection of steel | 46 |
| Case studies | 47 |
| Oporto's sports pavilion – refurbishment and rehabilitation project | 49 |
| Strengthening and repair of Lameiros bridge | 49 |
| The new Beira graduate school of public administration – case study | 49 |
| Strengthening and repair of Mosteiro bridge | 49 |
| The monastery of "Santa Clara-a-Velha" – the importance of the study of the wall coverings for the interpretation of the monument | 51 |

International Conference Durable Structures
from construction to rehabilitation

| | |
|---|-----------|
| Evaluation of timber structures of Santa Cruz headquarters shop | 51 |
| Two case studies on corrosion damage of bridges | 51 |
| Inspection and testing of durability of the concrete structure of a school's buildings | 52 |
| Comprehensive repair study of historic building in downtown Zagreb – case study | 52 |
| Repair and conservation works on Tagus suspension bridge | 52 |
| Cathodic prevention of reinforced concrete structure – Cas. do Jardim do Tabaco – Lisbon | 53 |
| Poster session | 55 |
| Durafinet technical guide: management of structures | 56 |
| In-situ techniques for mechanical performance and degradation analysis of rendering walls | 56 |
| Shear reinforcement in concrete beams with vertical stirrups embedded | 56 |
| Evaluation by visual inspection technique of "hauff type" timber roof structure at "São Carlos Clube" gymnasium in Brazil | 57 |
| Parameters affecting on site corrosion rate evaluation | 57 |
| Evaluation by visual inspection technique of the pedestrian suspension bridge at Piedicabe in Brazil | 57 |
| Durafinet technical guide: maintenance and repair of steel structures | 58 |
| Durafinet technical guide: maintenance and repair of concrete structures | 58 |
| BEVOTED12 – a novel biocide for mural paintings and cultural heritage conservation | 58 |
| Rehabilitation of a chloride contaminated concrete structure through desalination | 58 |
| Evaluation and modeling of concrete variability using NDT techniques | 59 |
| Innovative solutions for the use in concrete of excavated materials from Lyon-Turin railway link tunnel | 59 |
| A new research program on FCC in cement mortars for structural repair | 59 |
| Polymer action on the alkali-silica reaction in cement mortar beds – damage assessment | 60 |
| Review and discussion of polymers in cement materials for the repair of concrete structures | 60 |
| Capillary pore volume and water absorption of polymer-modified cement mortars | 60 |
| Durafinet project: typology of infrastructures and maintenance strikes along french atlantic coast | 61 |
| Nanostructured coatings for metallic construction materials protection | 61 |
| Study of concrete made with recycled fine and coarse aggregates | 61 |
| Technical demonstration | 63 |
| Corrosion protection for steel structures | 64 |
| Refurbishment of roofs using polyurethane based liquid membranes | 64 |

Duratinet project: typology of infrastructures and maintenance stakes along french atlantic coasts

F. Schoefs, A. Audouin-Dubreuil and A. Dary

This paper summarises the results of a questionnaire broadcast in France and prepared within the Duratinet project. It aims to get a better knowledge of the patrimony of public structures in the Atlantic Area. The practices of maintenance and futures stakes are also in the field of this enquest. Both quantitative and qualitative results are presented herein.

g and preparing surfaces, schemes of initial protection and maintenance measures, laboratory testing of coating systems, as well as the execution and supervision of the work), we are deliberately restricting ourselves here to Part 5 of the standard "Coating systems", which was revised in January 2008.

Nanostructured coatings for metallic construction materials protection

L.Rute Fontinha, M. Manuela Salta and Mário G. S. Ferreira

Nanostructured coatings exhibit a high potential for corrosion protection of metallic materials, namely, the hybrid sol-gel coatings due to the synergic effect on the mechanical and chemical properties achieved by interconnecting organic and inorganic components. In this study, a nanostructured hybrid sol-gel coating with optimized anticorrosive properties was developed for protection of an aluminium alloy frequently used in the construction field. Its performance was assessed in different corrosive conditions, showing an effective ability to protect the alloy either individually or integrated an anticorrosive coating system usually applied in architecture, replacing the toxic Cr(VI) based pre-treatments.

Study of concrete made with recycled fine and coarse aggregates

M. Serfou, Z. M. Sbartal and S. Yotte

This paper deals with the possibility of using fresh concrete waste as recycled aggregates in concrete. An experimental program was implemented based on two variables (% of fine aggregates replacement and % of coarse aggregates replacement). The proportion of replacement was 0%, 50% and 100%. Several mechanical and physical properties were tested as strength and porosity. The results show good correlation between aggregates percentage of replacement and concrete properties.

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody



PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT UNIQUE EN SCIENCES DE LA TERRE

Présenté par Monsieur **SERIFOU Mamery**

THEME : « Béton à base de recyclâts : influence du type de recyclâts et rôle de la formulation ».

Vu et approuvé

Abidjan, le 20 janvier 2014

Le Doyen

Prof. BOFFOUE Moro Olivier



Vu et Permis d'Imprimer

Abidjan, le 20 janvier 2014

**Le Président de l'Université Félix
Houphouët Boigny**



Résumé

L'élimination de certains déchets est un enjeu important en Côte d'Ivoire. Une des solutions proposées 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