

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE GENIE CIVIL



Mémoire de **Magister**
Spécialité : Génie Civil
Option : Construction Civil & Industrielle

THEME

**VALORISATION DES DECHETS DE
BRIQUES ET BETON DE DEMOLITION COMME
AGREGATS DE BETON**

Présenté publiquement le

Par

Farid DEBIEB

Devant le Jury composé de :

Dr. Zine El Abidine ZITOUNI	Maître de Conférence, U. Blida,	Président
Dr. Bouzidi MEZGHICHE	Maître de Conférence, U. Biskra	Examineur
Dr. Lakhdar AZZOUZ	Maître de Conférence, C. U. Laghouat	Examineur
Dr. Mustafa BOUKENDAKDJI	Maître de Conférence, U. Blida,	Examineur
Dr. Said KENAI	Maître de Conférence, U. Blida,	Rapporteur

Institut de Génie civil. Université de Blida
B.P. 270 route de Sournâa
Algérie

REMERCIEMENTS

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

Je voudrais saisir cette occasion pour remercier chaleureusement en lui exprimant mon profond respect, mon promoteur D^r Said KENAI, pour son dévouement, ses conseils et ses critiques tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements les plus vifs et chaleureuses au professeur ABADLIA de l'INMC de Boumerdes pour son aide et ses conseils fructueux.

Je remercie vivement et au profond du cœur les directeurs des laboratoires CNERIB , LTPC et SETAM ainsi que le personnel et en particulier M^{rs} AIT-SAID , IDIR , BENNA , BELHAMEL , HAKIMI , MEZAACHE , MOUCI , SAROUTI et KARIM pour leur aide durant toute la période expérimentale de ce travail .

Je remercie également le corps enseignant de l'institut Génie Civil de l'université de Blida et en particulier Mr M.BOUKENDAKDJI et Mr B.MENADI.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres examinateurs, pour avoir accepté de juger avec toute l'attention voulue, mon travail.

En fin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et en particulier mes cousins SALIM et EL-HADI ainsi que mes collègues Moussa SALAG, KARIMA, MOHCEN, ABDOU, M.BENTCHIKOU et M. SAFIDDINE.



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail , fruit d'énormes sacrifices :

A Mon Pays

A Mon Très Chère et Regretté Père NOUR EDDINE.

A Ma Très Chère Mère YAMINA .

A Toute la Famille .

A Mes Meilleurs Amis et Frères Salim DEBIEB et Moussa SALAG.

A Tous Ceux qui m'ont Soutenus de Prés ou de Loin .



ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحليل إمكانيات استخدام مخلفات هدم البناءات (الخرسانة و الأجر) كركام في صناعة الخرسانة. تتعلق الدراسة التجريبية بثلاثة أنواع من الركام (خرسانة مكسرة أو أجر مكسر أو خليط من الاثنين). تم استبدال كلي أو جزئي إما للرمل وحده أو للحصى وحده (0، 25، 50، 75 و 100%) أو للرمل و الحصى معا. درست خصائص الخرسانة في الحالة الطرية و الصلبة و قورنت مع خواص الخرسانة المصنوعة من ركام طبيعي كما قورنت خواص ركام المخلفات مع الركام الطبيعي .

بينت هذه الدراسة إمكانية صناعة خرسانة اعتمادا على ركام من خرسانة و اجر الهدم و بخواص فيزيائية و ميكانيكية مقبولة بل و تقارب خواص الخرسانة ذات الركام الطبيعي إذا كانت نسبة الركام المستبدل محدودة بـ 75% و 50% لحصى و رمل الخرسانة المكسرة و إلى 25% و 75% لحصى و رمل الأجر المكسر.

RESUME

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la possibilité de valorisation des déchets de démolition (béton et brique) comme agrégats dans la fabrication du béton. L'étude expérimentale a porté essentiellement sur trois types de granulats recyclés (de béton concassé, de brique concassée et de combinaison de brique et béton concassé). Une substitution partielle ou totale des gros granulats ou des granulats fins seules (0, 25, 50, 75 et 100%) ou une combinaison des deux ont été étudiées. Les propriétés du béton recyclé à l'état frais et durci sont analysés et comparés à ceux d'un béton ordinaire à base de granulats naturels. Les propriétés de granulats recyclés sont aussi comparés à celles des granulats naturels.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer un béton à base d'agrégats de béton ou brique concassée de caractéristiques physiques et mécaniques acceptables et de même comparables à celles d'un béton à base d'agrégats naturels pourvu que le pourcentage de granulats recyclés soit limité à 75% et 50% pour les gros et fins de béton concassé et à 25% et 75% pour ceux de la brique concassée respectivement.

SUMMARY

The main objectif of this study is to analyse the possibilities of using demolition waste (concrete and brick) as aggregates in making concrete. The experimental study concerns mainly three types of recycled aggregates (crushed concrete, crushed brick and a combination of crushed concrete and crushed brick). A partial or total substitution of either coarse aggregates alone or fine aggregates alone (0, 25, 50, 75 and 100%) or a combination of both coarse and fine aggregates were used. Properties of fresh and hard concrete were investigated and compared to those of ordinary concrete with natural aggregates. Properties of recycled aggrégates are also compared to natural aggregates.

The results of this study have shown that it is possible to use recycled crushed concrete or crushed brick aggregates in making concrete of acceptable physical and mechanical properties which could be comparable to those of concrete made of natural aggregates provided that the quantity of recycled aggregates is limited to 75% and 50% for coarse and fine crushed concrete aggregates and to 25% and 75% for coarse and fine crushed brick aggregates.

LISTE D'ABREVIATIONS ET SYMBOLES

RILEM	: Regroupement international des laboratoires de recherches et d'essais pour matériaux et structures.
MIOM	: Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères
LD	: Scories d'aciérie
CPA	: Ciment Portland Artificiel
CET	: Centres d'enfouissement techniques
CSTC	: Centre scientifique et Technique de Construction
CEN	: Comité Européen de Normalisation
BS	: Norme Britannique (British standard)
ACI	: Règlement Américain
SSB	: Surface spécifique de Blaine
E/C	: Rapport Eau sur Ciment
GN	: Gravier naturel
GR	: Gravier recyclé de béton concassé
SN	: Sable naturel
SR	: Sable recyclé de béton concassé
GBC	: Gravier recyclé de brique concassée
SBC	: Sable recyclé de brique concassée
R'br	: Résistance à la compression
Rbr	: Résistance à la traction
E	: Module d'élasticité
C	: Compacité
P	: Porosité
ESP	: Equivalent de sable Piston
MVA	: Masse volumique apparente
MS	: Masse volumique spécifique
Rc	: Résistance à la compression
Rt	: Résistance à la traction
I	: Indice sclérométrique
V	: Vitesse du son
B_{G/S}	: Béton recyclé à base de substitution en gravier (G) et sable (S) de béton concassé
C_{G/S}	: Béton recyclé à base de substitution en gravier (G) et sable (S) de brique concassée
D_{G/S}	: Béton recyclé à base de substitution en gravier (G) et sable (S) de brique et béton concassé
Adj	: Adjuvant
R	: Erreur de régression
Rcj	: Résistance à la compression à j jours
Rtj	: Résistance à la traction à j jours
Rc (I sc)	: Estimation de la résistance à la compression par l'indice sclérométrique
Ec(V son)	: Estimation de la résistance à la compression par la vitesse du son

Liste des Tableaux

Tableau n°	Titre	Page
0.1	Estimation de la production des déchets de démolition en 1992	02
2.1	Taux de recyclage en Europe	20
2.2	Répartition de la production des déchets de chantiers selon l'origine en 1993	23
2.3	Los Angeles des agrégats à base de béton à différent rapport E / C	44
2.4	Le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés	45
2.5	Les quantités maximums d'impuretés nuisibles permises dans les agrégats de béton recyclé selon le projet de normes japonaises	47
2.6	Réduction de la résistance à la compression du béton d'agrégats recyclés en fonction du pourcentage d'ajout en sulfate	48
2.7	Composition des différents types d'agrégats recyclés proposés par le RILEM	51
2.8	Les différentes limites proposés par le RILEM sur les trois classes du béton recyclés	51
2.9	Classe du béton recyclés	52
2.10	Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport au béton ordinaire	52
3.1	Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé	62
3.2	Essais physiques sur ciment	64
3.3	Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge	64
3.4	Densité des granulats utilisés	68
4.5	Pourcentages d'absorption d'eau des granulats utilisés	69
4.6	Pourcentage d'impureté des gros granulats utilisés	69
3.7	Caractéristiques mécaniques	70
3.8	Pourcentage d'impuretés des granulats recyclés	71
3.9	Compacité et porosité des granulats recyclés	71
3.10	Analyse chimique des granulats utilisés	72
3.11	Composition optimale d'un m ³ de béton pour la confection des éprouvettes	74
3.12	La composition des différents bétons étudiés	80
3.13	Les différents essais utilisés	81

Tableau n°	Titre	Page
4.1	Quantités d'eau réelles et effectivement ajoutées ainsi que le Slump pour chaque mélange	89
4.2	Valeurs de l'air occlus et de la densité du béton frais des différentes compositions utilisées	91
4.3	Valeurs de l'air occlus et densité du béton durci des différentes compositions Utilisées	93
4.4	Résistance à la compression des bétons recyclés à base de granulats concassés	95
4.5	Résistance à la compression des bétons recyclés à base d'agrégats de briques concassées	96
4.6	Résistance à la compression des bétons partiellement recyclés à base de granulats de béton et brique concassée	96
4.7	Résistance à la compression par essais indirecte au scléromètre et à l'ultrason à 28 jours	110
4.8	Résistance à la traction des différents bétons recyclés	114
4.9	Rapport entre la résistance à compression et celle de la traction à l'âge de 28 jours	118
4.10	Propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé avec ajout fluidifiant	119
4.11	Module d'élasticité du béton recyclé à 28 jours	121
4.12	Perméabilité des bétons recyclés	134

Liste des Figures

Figure n°	Titre	Page
1.1	Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition par type	07
1.2	Les déchets de démolition et de construction	09
1.3	Traitement de déchets de chantier	10
1.4	Les principaux étapes de traitement des déchets de chantier	11
1.5	Les différents déchets des chantiers de construction	13
2.1	Répartition des quantités de déchets par types en 1991 au Royaume-Uni	24
2.2	Répartition des principaux déchets de démolition / construction en Grande-Bretagne	24
2.3	Traitement des déchets de chantier au Danemark jusqu'à l'an 2000	26
2.4	Evaluation de l'origine des déchets de chantier au Danemark en 1990	27
2.5	Déchets livrés dans les centres de recyclage / concassage 1992 au Danemark	27
2.6	Destination des déchets de chantier en 1992 au Danemark	28
2.7	Modèle du cycle de vie d'un Bâtiment ou d'un Ouvrage d'Art	32
2.8	Procédure de traitement des déchets de construction / démolition	34
2.9	Schémas de fonctionnement d'une centrale de recyclage / concassage	40
2.10	Granulométrie d'agrégats recyclés Produits par concasseur à mâchoires En un seul passage	42
2.11	Répartition de la production en granulats recyclés au Pays-Bas en 1992	50
2.12	Evolution de la résistance à la compression des bétons recyclés en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés de béton de démolition	55
2.13	Relation entre résistance à la compression et rapport E/C des différents mélanges de béton naturel et recyclé à base d'agrégats de béton démolis	56
2.14	Evolution de la résistance à la traction des bétons recyclés en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés de béton de démolition	57
2.15	Variation du module d'élasticité E des bétons recyclés en fonction du pourcentage de substitution en gros et fins granulats de béton démolis	58
2.16	Variation du module d'élasticité des différents bétons en fonction du rapport E / C	58
2.17	Le retrait du béton original et bétons recyclés en fonction du temps	59

Figure n°	Titre	Page
2.18	Différence d'absorption d'eau du béton original et béton recyclé à base d'agrégats gros et fins de béton naturel de rapport E/C = 0.55	61
3.1	Analyse granulométrique des gros granulats	67
3.2	Analyse granulométrique des granulats fins	
4.1	Evolution du rapport E / C des Bétons recyclés en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés	87
4.2	Evolution du rapport E / C des Bétons recyclés en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés de brique concassée	87
4.3	La quantité d'eau nécessaire pour obtenir un Slump constant d'environ 70 mm des béton partiellement recyclés à base d'agrégats de béton démolé.	88
4.4	La quantité d'eau nécessaire pour obtenir un Slump constant d'environ 70 mm des béton partiellement recyclés à base d'agrégats de brique concassée	88
4.5	Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de granulats concassés à 100% de granulats fins naturels	97
4.6	Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de granulats concassés à 100% de gros granulats naturels	97
4.7	Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de briques concassés à 100% de granulats fins naturels.	98
4.8	Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de briques concassés à 100% de gros granulats naturels.	98
4.9	Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés à base de combinaison d'agrégats de brique et béton concassée.	99
4.10	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats de béton concassé	101
4.11	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins de béton concassé	101
4.12	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats de brique concassé	102
4.13	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins de brique concassé	102
4.14	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de béton ($B_{G/0}$)	104

Figure n°	Titre	Page
4.15	Variation de la résistance à la compression des bétons en granulats fins de concassé de béton ($B_{0/S}$)	104
4.16	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros et fins granulats de concassé de béton ($B_{G/S}$)	105
4.17	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de brique ($C_{G/0}$)	105
4.18	Variation de la résistance à la compression des bétons en granulats fins de concassé de brique ($C_{0/S}$)	106
4.19	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros et fins granulats de concassé de brique ($C_{G/S}$)	106
4.20	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de béton ($B_{G/0}$)	107
4.21	Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de brique ($C_{G/0}$)	107
4.22	Rapport entre résistance à la compression par essai directe et indirecte (Scléromètre)	111
4.23	Rapport entre résistance à la compression par essai directe et indirecte (vitesse du son)	112
4.24	Variation de la résistance à la traction des bétons partiellement recyclés ($B_{G/0}$) à base de concassé de béton	115
4.25	Variation de la résistance à la traction des bétons partiellement recyclés ($B_{0/S}$) à base de concassé de béton	115
4.26	Variation de la résistance à la traction des bétons partiellement recyclés ($C_{G/0}$) à base de concassé de béton	116
4.27	Variation de la résistance à la traction des bétons partiellement recyclés ($C_{0/S}$) à base de concassé de béton	116
4.28	Relation entre résistance à la traction et celle de la compression	117
4.28	Evolution du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats recyclés	122
4.30	Evolution du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins recyclés	122

Figure n°	Titre	Page
4.31	Evolution du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés	123
4.32	Evolution du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés	123
4.33	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros granulats de concassé de béton ($B_{G/0}$)	126
4.34	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés granulats fins de concassé de béton ($B_{0/S}$)	126
4.35	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de béton ($B_{G/S}$)	127
4.36	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de béton ($B_{G/S}$)	127
4.37	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros granulats de concassé de brique ($C_{G/0}$)	128
4.38	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en granulats fins de concassé de brique ($C_{0/S}$)	128
4.39	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de brique ($C_{G/S}$)	129
4.40	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de brique ($C_{G/S}$)	129
4.41	Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de brique ($C_{G/S}$)	130
4.42	Evolution de l'absorption d'eau des bétons partiellement recyclés de béton concassé ($B_{G/S}$) en fonction du temps	132
4.43	Evolution de l'absorption d'eau des bétons partiellement recyclés de brique concassé ($C_{G/S}$) en fonction du temps	133

Table des Matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
INTRODUCTION	1
Généralités	1
Les objectifs	3
Plan de travail	4
I. UTILISATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL	5
I.1. Généralités	5
I.2. Différents déchets utilisés en génie civil	5
I.3. Utilisation des déchets inertes en bâtiment et travaux publics	7
I.4. Déchet en sou-produit industriel	11
I.5. Valorisation des déchets en ciment	16
II. AGREGATS RECYCLES ET BETON D'AGREGATS RECYCLES	20
II.1 Introduction	20
II.2 Historique et expériences étrangères	21
II.3 L'Algérie par rapport aux autres pays Européens	30
II.4 Spécifications unifiées et normes actuelles	31
II.5 Sources et production d'agregats recyclés	32
II.5.1 Sources d'agregats recyclés	32
II.5.2 Matériel de production	33
II.5.3 L'élaboration du produit finis	41
II.6 Caractéristique des granulats recyclés	42
II.6.1 Granulation, forme de particules et texture de surface d'agregats recyclés	42
II.6.2 La Densité	43
II.6.3 Résistance mécanique (Los Angles)	43
II.6.4 La Porosité	45
II.6.5 Mortier de liaison	45
II.6.6 Résistance aux sulfates	46
II.6.7 Homogénéité et contamination	47
II.6.8 Classification des granulats recyclés selon RILEM	50
II.7 Propriétés et dosage du béton frais à base d'agregats recyclés	53
II.7.1 Ouvrabilité	53
II.7.2 La Compacité	53
II.8 Propriétés mécaniques du béton durci	54

IV.1.1. Fluidité réelle et idéale	86
IV.1.2. Densité des bétons recyclés frais et mise en œuvre	90
IV.1.2. Densité des bétons recyclés frais et mise en œuvre	90
IV.2. Béton durci	92
IV.2.1. Couleur et aspects extérieurs des bétons recyclés	92
IV.2.2. Densité et homogénéité	92
IV.2.3. Résistance à la compression	94
IV.2.3.1. Développement de la résistance au cours du temps	94
IV.2.3.2. Effet du pourcentage de substitution en gros granulats recyclés	99
IV.2.3.3. Effet du pourcentage de substitution en granulats fins recyclés	100
IV.2.3.4. Effet combiné	100
IV.2.3.5. Loi de régression	103
IV.2.3.6. Relation entre R_c à jeune âge et R_c à long terme	108
IV.2.3.7. Relation Résistance à la compression et densité	109
IV.2.3.8. Rapport résistance à la compression indice sclérométrique	109
IV.2.3.9. Rapport résistance à la compression et la vitesse du son	111
IV.2.4. Résistance à la traction	112
IV.2.4.1. Effet du pourcentage de substitution sur la résistance à la traction	112
IV.2.4.2. Relation résistance à la traction et celle à la compression	117
IV.2.5. Influence de l'adjuvant sur les propriétés mécaniques	119
IV.2.6. Module d'élasticité	120
IV.2.7. Retrait	124
IV.2.8. Capillarité et absorption d'eau par immersion	130
IV.2.9. Perméabilité à l'eau	134
IV.3. Conclusion	135
CONCLUSION ET RECOMMANDATION	136
Généralités	136
CONCLUSIONS GENERALES	137
RECOMMANDATIONS	139

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

INTRODUCTION

INTRODUCTION

GENERALITES

Dans tous les pays du monde, le tissu urbain ne cesse de consommer des millions de tonnes de matériaux de constructions et de produire en parallèle des millions de tonnes de déchets de démolition. Pour un futur plus sain et rassurant, les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaires la valorisation et le recyclage des déchets. La disposition de décharge facilement accessible autour des grandes villes a diminué, les distances entre les sites de démolition et les surfaces de décharges publiques sont devenues plus grandes et des puniries critiques de bons agrégats naturels sont apparents dans plusieurs surfaces urbaines.

D'après de nombreuses recherches européennes [1], il a été estimé qu'entre les années 80 et l'an 2000, chaque année trois fois plus de béton démoli sera généré et actuellement l'Europe produit chaque année 200 million de tonnes de déchets de démolition et de construction. Le tableau 0.1 résume la production des déchets de démolition dans quelques pays européens.

Tableau0.1 Estimation de la production des déchets de démolition en 1992 [1,2,3]

Pays	Déchets de démolition et de construction par million de tonne	Moyenne en kg par habitant
Danemark	5	1000
Pays-Bas	14	820
Belgique	7.5	750
Allemagne	43-45	540
France	20-25	400
Royaume Uni	24	350
Espagne	13.5	350

En Algérie, suite à des sinistres naturels comme les séismes et les crues et par vieillissement et dégradations, des bâtiments publics, des ponts et des installations industrielles sont démolis mais jamais recyclés. L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets (briques et béton en particulier) qui est rarement valorisées. Aussi, l'Algérie connaît un déficit important en matériaux de construction et en particulier les agrégats et le ciment. De plus les ressources naturelles dans certaines régions comme Alger sont épuisées, le sable de mer interdit, les agrégats utilisés sont transportés de très loin, et les décharges publiques sont saturées. Malheureusement, les travaux de recherche sur la valorisation des déchets en bâtiment et travaux publics sont rares.

En Europe, des projets en collaboration entre plusieurs pays sont en cours sur ce thème et trois congrès sur la démolition et la réutilisation du béton et de la maçonnerie ont été organisés depuis 1985 par la RILEM, aux Pays-Bas (Rotterdam en 1985), au Japon (Tokyo 1988) et au Danemark (Odenx en 1993). Un projet (Recycling Waste Research and Development) REWARD est confié en France au CEBTP depuis 1991 dans le but d'augmenter la production des granulats recyclés et de développer leur utilisation [4, 5]. Des projets de normalisation et des guides internationaux sur les bétons à base d'agrégats recyclés sont en cours depuis 1996 et entrepris par la RILEM et le CEN (Comité européen de Normalisation) [1]. En France, la loi du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et protection de l'environnement, interdit à partir de l'an 2002 la mise dans les centres d'enfouissement technique (anciennes décharges) des déchets tels que les matériaux de démolition (en particulier brique et béton) [1, 4].

Cependant en Algérie, la réglementation dans le domaine de matériaux de démolition est inadéquate et il est impératif de développer l'industrie de recyclage et la valorisation des déchets de construction et de démolition par des travaux de recherche qui doivent être entrepris afin de produire un béton comparable au béton à base de matériaux naturels. Ceci peut contribuer à la résolution du problème de stockage des déchets, la réduction de la pollution de l'environnement, la préservation des ressources

naturelles, la réduction du coût de construction et enfin la résolution du problème d'approvisionnement en sable et graviers.

LES OBJECTIFS

Du fait de la limitation et l'épuisement dans certaines régions comme Alger, des ressources naturelles d'agrégats et aussi l'augmentation des coûts de transport et la pollution de l'environnement par les tonnages importants des déchets de démolition, il est indispensable d'étudier la possibilité de valorisation de ces déchets.

La présente étude fait partie d'un projet globale sur la valorisation des déchets de démolition en ciment et béton. L'objectif de ce projet est de contribuer à la réutilisation des déchets de la démolition et les déchets de l'industrie de construction (brique et béton) dans la fabrication du béton en étudiant les effets principaux d'incorporation.

Cependant, le but principal de ce travail est la valorisation de béton et brique de démolition comme agrégats en béton par une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant les granulats recyclés issus des produits de démolition qui contribue au développement de cette application. Une étude expérimentale sur l'effet de substitution des agrégats naturels par des agrégats de béton ou brique de démolition est réalisée sur les propriétés du béton frais et durci. Après que les agrégats recyclés sont caractérisés, des bétons de caractéristique égale à 25MPa (fluidité constante) incluant ces agrégats recyclés (gravier et sable) sont ensuite élaborés à différent pourcentage de substitution.

Le comportement du béton frais (ouvrabilité, densité) et les performances du béton durci à différents âges (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) seront évalués. La durabilité est caractérisée par des essais de perméabilité à l'eau.

Chapitre 01

Utilisation des déchets dans le génie civil

I. UTILISATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL

I.1. Généralités

En Europe il y a vingt ans, la poussée écologique imposa de tenir le plus grand compte de l'environnement soit en évitant des emprunts de matériaux naturels, soit en éliminant des sous produits et déchets dont les dépôts souvent disgracieux peuvent conduire à certaines pollutions du milieu naturel. De même le bouleversement du marché de l'énergie en 1973 et les décisions prises dans plusieurs pays de l'Europe dans le domaine des économies d'énergie accélérèrent des études de valorisation des déchets.

Dans ce chapitre, on présente une revue générale des déchets utilisés en génie civil. Ensuite une attention particulière est consacrée aux déchets valorisés en ciment et béton ; cependant, la valorisation des déchets de démolition comme agrégats en béton est traitée séparément dans le deuxième chapitre.

I.2. Différents déchets utilisés en génie civil

Il est considéré comme déchet toute substance mise en rebut, tout effluent ou autre substance non voulue résultant de la mise en œuvre de tout processus ou toute substance ou produit qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé ou abîmé d'une manière ou d'une autre. Est déchet ce que la personne qui le produit considère comme tel même si ce déchet possède de la valeur pour d'autres [6].

En général les déchets sont classés en cinq catégories :

a- Déchets industriels dangereux mais non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement ;

- des déchets de fer, de cuivre, de plomb,
- des déchets contenant des fibres d'amiante,
- des produits de préservation du bois,

-
-
- des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.

b- Déchets inertes

- des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel,
- des déchets solides et inerte de travaux routiers,
- des éléments en béton, mortier de ciment et béton,
- des terres de déblais non contaminées.

c- Déchets ménager

Ce type de déchets regroupe :

- des déchets en matériaux de synthèse,
- des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.

d- Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques.

e- Déchets industriels dans des conditions spécifiques

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes etc.).

Les déchets utilisables en génie civil sont les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques.

I.3. Utilisation des déchets inertes en bâtiment et travaux publics

Actuellement trois types de déchets sont concernés par le recyclage : ceux de la route, ceux provenant de la démolition des ouvrages d'art et des structures de bâtiment et ceux provenant de construction, réhabilitation et de la démolition des bâtiments.

Les déchets de démolition se répartissent selon la figure 1.1.

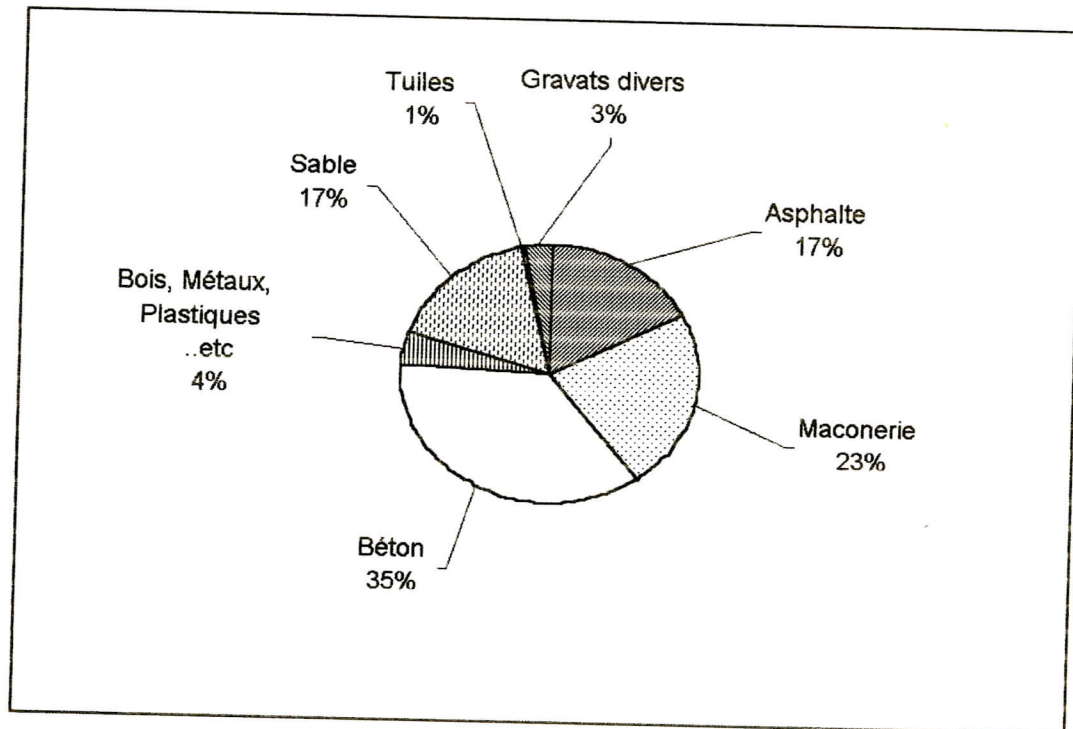


Fig. 1.1 Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition par type [6]

□ Les déchets de la route

Sont constitués dans la majorité des cas de béton non armé ayant très peu d'impuretés et ne demandant pas de traitements sophistiqués. Temporairement localisés sur le chantier après démolition de la couche de chaussée, ils sont de nature homogène et sont très bien recyclés dans des installations de recyclage mobiles (sur chantier).

□ Les déchets de démolition des ouvrages d'art et de structure de bâtiments

Ils sont en majorité constituée de béton armé qui présente très peu d'impuretés. Le recyclage se fait le plus souvent dans des installations fixes, c'est à dire monté en permanence sur un même site. Le seul problème qui figure pour ce type de recyclage est la séparation des aciers du béton qui demande des traitements spécifiques.

□ Les déchets de la construction, de la réhabilitation et de la démolition des bâtiments.

Ces déchets sont hétérogènes (plâtre, brique, bois, métal, plastique, verre, papiers, matière synthétique, fraction terreuse...etc.) ; dans ce cas un tri s'avère nécessaire et le recyclage de ces matériaux est plus onéreux. Les granulats recyclés provenant de béton, de briques ou de béton et briques sont utilisés dans le béton, dans l'asphalte (couches de fondations non liées ou couche de capillarité) et comme matériaux de remblai.

Les granulats recyclés utilisés dans le béton [7, 8], sont utilisés dans les routes en béton, les pistes d'atterrissage, les canalisations en béton, les tuyaux en béton, les ponts, les fondations de bâtiment, les planchers et autres.

La gestion des déchets de démolition et de construction est en quatre phases : la prévention, la séparation, le traitement et enfin l'utilisation dans le marché potentiel.

La figure 1.2 donne la répartition des différents déchets de démolition et de construction.

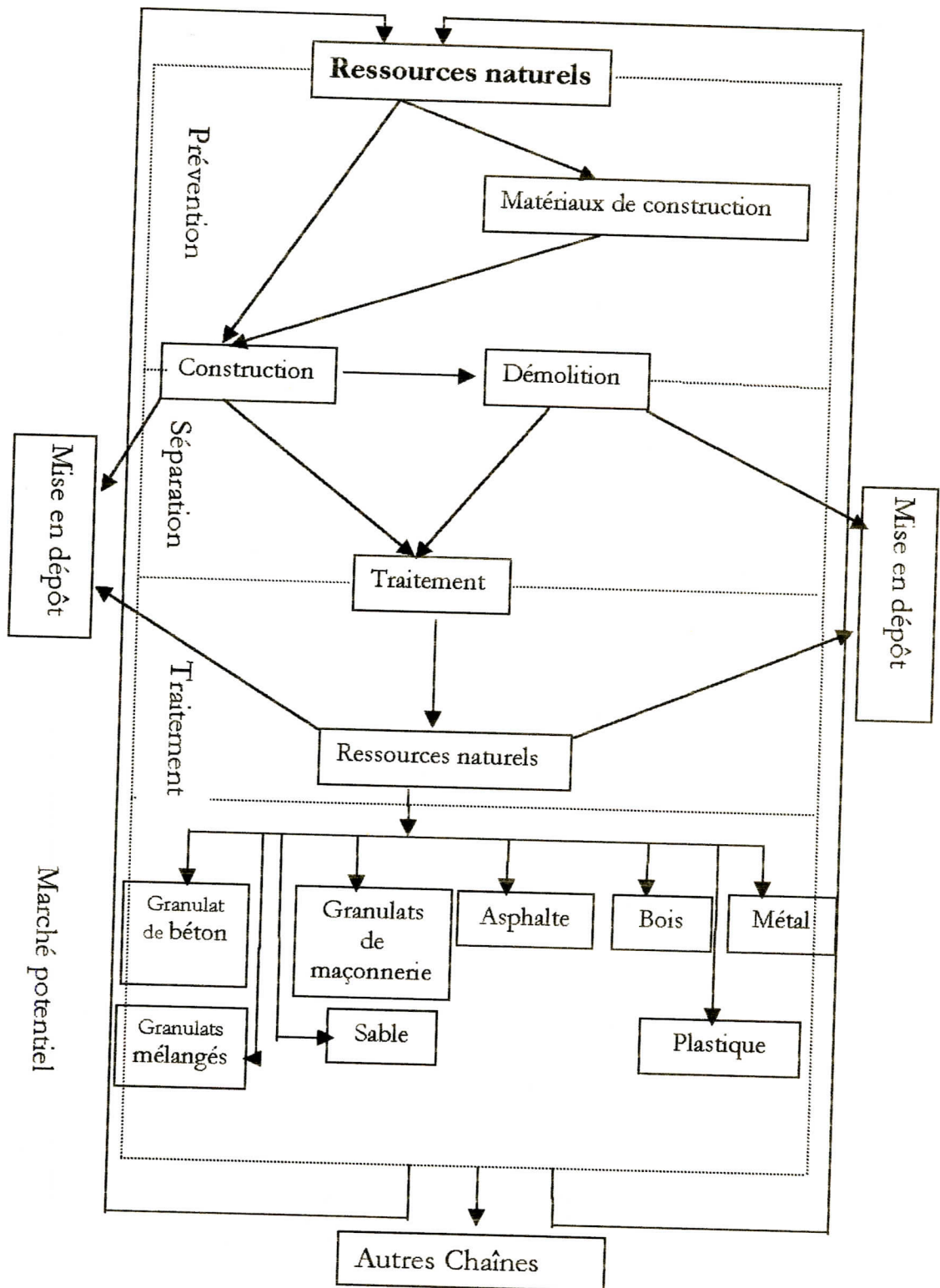


Fig. 1. 2 Les déchets de démolition et de construction [2].

Les déchets ne sont utilisés qu'après traitement approprié et tri des matières indésirables. La figure 1.3 illustre un traitement type de déchets de chantier.

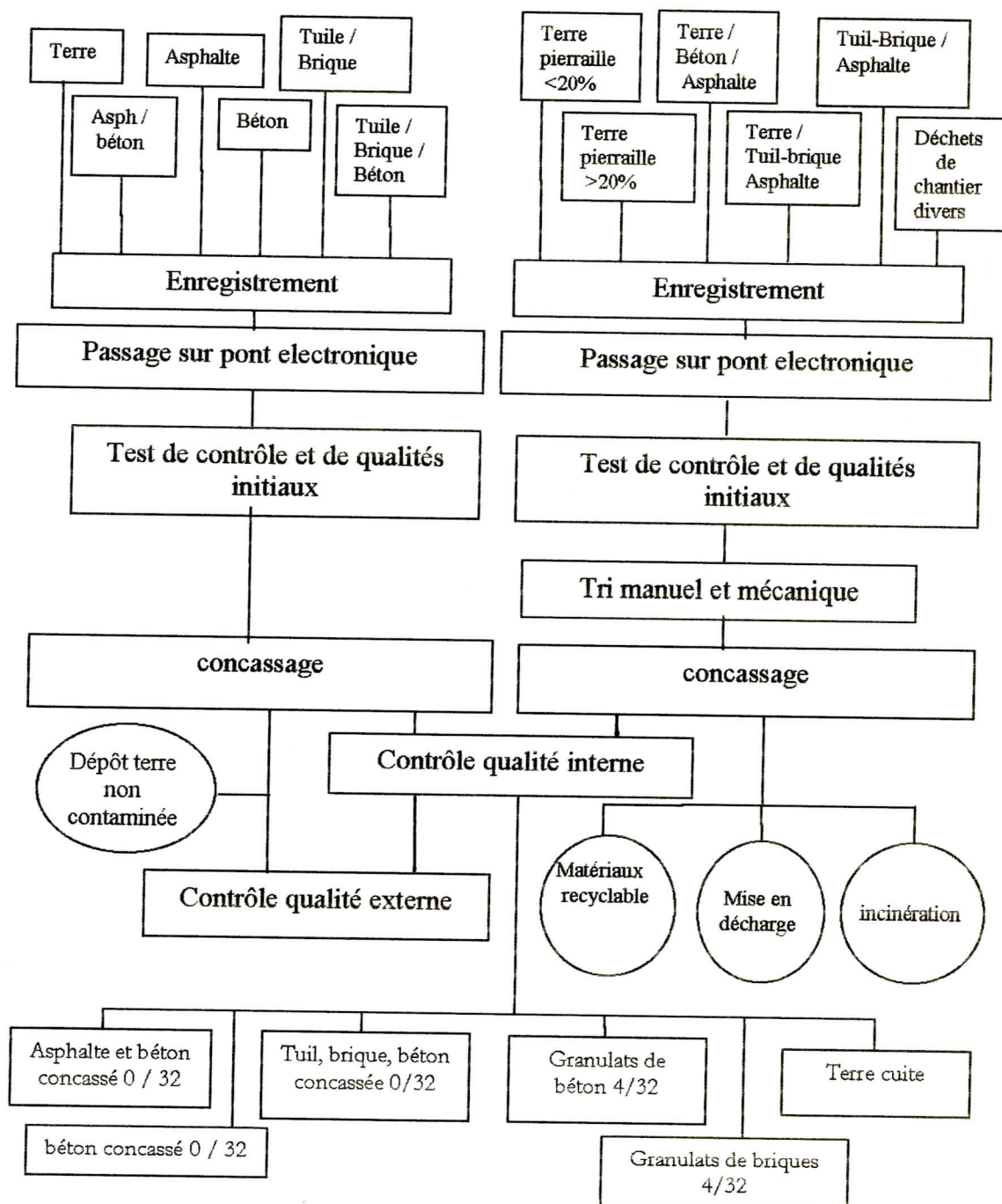


Fig. 1.3 Traitement de déchets de chantier [2, 3]

En résumé, selon la figure suivante 1.4, les déchets de chantiers passent par trois étapes :

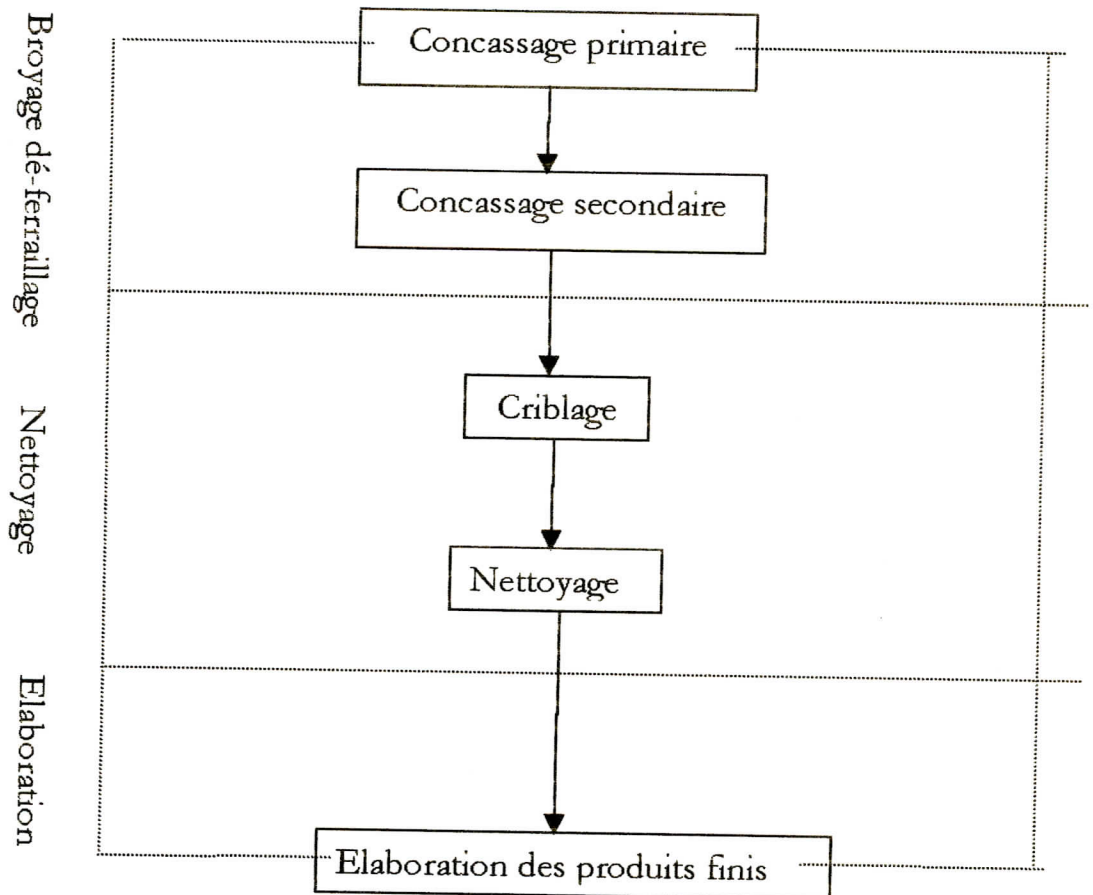


Fig. 1.4 Les principales étapes de traitement des déchets de chantier [9, 10]

I.4. Déchet en sous-produit industriel

○ Les déchets de hauts fourneaux

Le laitier de hauts fourneaux est le principal sous produit de l'industrie sidérurgique ; il est constitué de toutes les parties minérales contenues dans la charge du haut fourneau qui subsistent après l'extraction du fer. Le laitier lentement refroidi à l'air libre devient un matériau cristallisé qui a l'aspect et les propriétés d'une roche magnétique. Après concassage et criblage, le laitier peut être utilisé dans le domaine

routier, principalement par la construction des assises de chaussées. Cependant, s'il est suffisamment compact, il peut être utilisé pour la réalisation des couches de roulement. Le refroidissement rapide du laitier dans l'eau conduit à un liant à prise hydraulique (laitier granulé) dont les plus gros éléments jouent le rôle de sable correcteur de la granularité pour le traitement de gravats. Comme ajout, le laitier permet un accroissement lent de la résistance en ciment, avec laquelle sont recommandés des bétons résistants en milieux agressifs (la mer par exemple).

○ **Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM)**

Les recherches ont conduit à l'utilisation de ces matériaux en remblais ou en chaussée après maturation. En France [11], le ministère de l'environnement a par ailleurs publié un circulaire en 1994 qui précise les conditions environnementales de l'emploi de ces MIOM en génie civil.

D'après des études françaises récentes 1995 [11], le traitement de ces matériaux par un liant hydraulique peut conduire à des risques de gonflement, ce qui rend un emploi limité de MIOM non traité. Compte tenu de la grande variabilité des caractéristiques de ces MIOM, seule une démarche qualité incluant toutes les phases de l'élaboration de ces produits pourrait permettre une assurance de leur qualité.

○ **Les résidus de constructions (déchets de chantiers)**

Ce groupe de matériaux comporte le sol d'excavation, les résidus des travaux de démolition de route et de sites de constructions ainsi que les déchets de construction.

Le graphique suivant résume les différents sortes de résidus de construction :

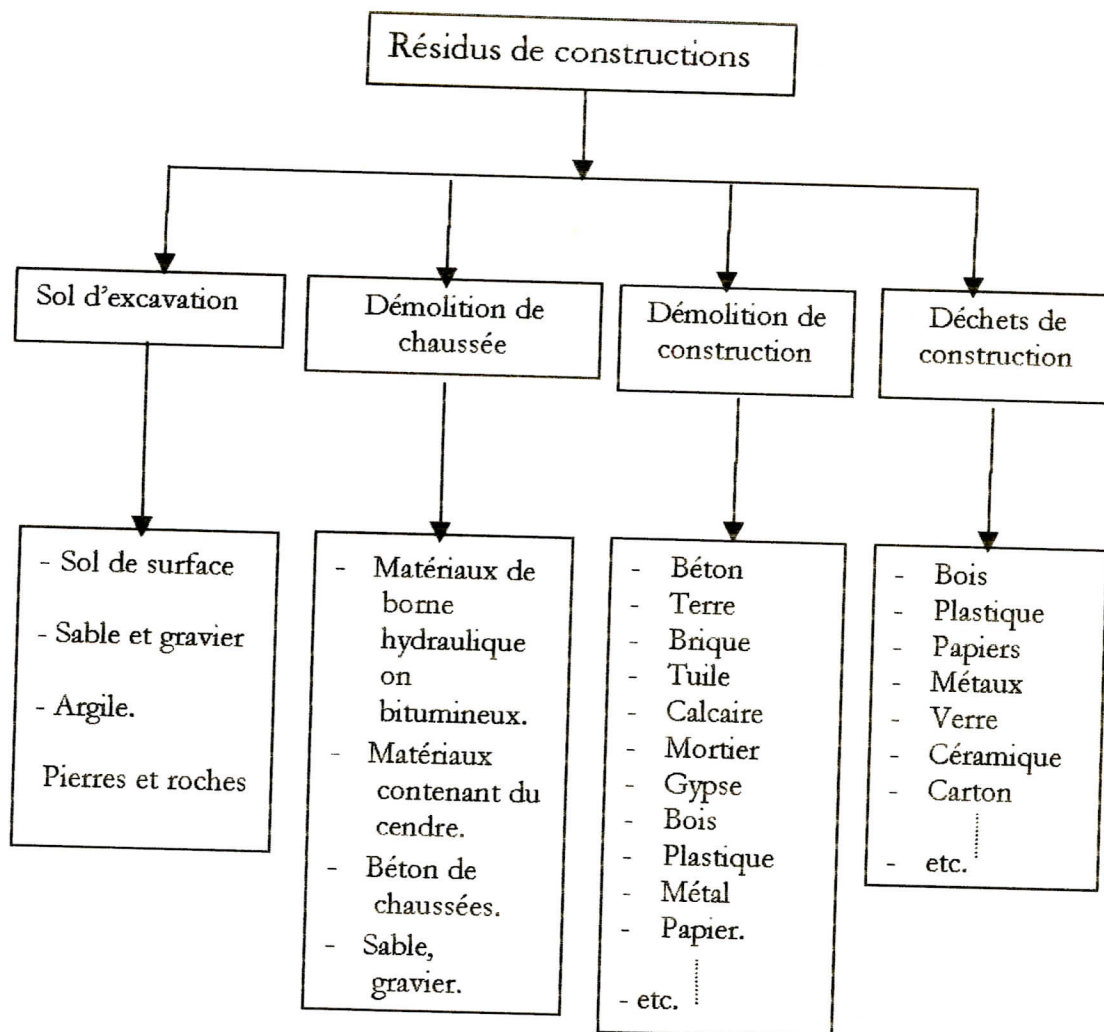


Fig. 1.5 Les différents résidus des chantiers de construction [12]

Des études récentes [13, 14], ont montré que les matériaux de démolition (chaussées et construction) après concassage, pourraient être assimilés à des granulats et utilisés pour les mêmes emplois en couches de chaussées ou en remblai. Les matériaux de démolition et les déchets de construction (béton, brique, tuile) qui contiennent plus ou moins d'impuretés et notamment du plâtre doivent faire l'objet d'une attention particulière.

De plus l'origine très particulière de ces gisements nécessite un contrôle plus fréquent de certains points comme la présence de sulfates légers et friables.

Comme pour les MIOM, leur emploi doit en l'absence de connaissances suffisantes se limiter à se substituer à des matériaux non-traités en appliquant les mêmes spécifications.

○ **les scories d'aciérie LD** (Résultant de la fabrication de l'acier par le procédé de Linz Danawitz)

Ces scories sont des sous produits de transformation de la fonte hématite en acier, traités comme les laitiers de hauts fourneaux. Ce matériau est désavantagé par une dé-ferrisation insuffisante qui conduit à une masse volumique élevée d'environ 3,3.

Des recherches avancées [11] sur ce type de déchets, ont montré la possibilité de leur utilisation comme granulats pour couches de chaussées, à la condition de s'assurer, par un traitement approprié, de l'absence du risque de gonflement dû à la présence de chaux libre non hydratés. Dans ces conditions, les scories LD pourraient être utilisées (malgré leur forte densité) dans les mêmes conditions que le MIOM et les matériaux de démolitions en appliquant les spécifications courantes de granulats.

○ **Les schistes houillers**

L'industrie minière en général et les houillères en particulier produisent des quantités considérables de matériaux stériles. Une petite partie de ces matériaux est utilisée en remblayage souterrain, mais la plus grande partie doit être stockée à l'air libre. Il y a une dizaine d'années [11], les recherches ont permis d'étendre l'utilisation de ces schistes à d'autres emplois que les remblais. Les schistes rouges peuvent être utilisés comme des granulats routiers selon les spécifications des granulats naturels.

○ **Les pneus usagés**

En France [15], les recherches ont porté d'une part sur la poudrette de caoutchouc utilisée comme liant en association avec le bitume et d'autre part sur l'utilisation des pneus découpés comme armature de remblai.

L'utilisation de la poudrette en association avec le bitume a montré l'intérêt de ces techniques en chenils ou comme liant pour enrobés spéciaux. La technique des pneus découpés en armature de remblai (procédé pneusol) est également opérationnelle en France et même dans d'autres pays Européens : elle est pratiquée sur de nombreux chantiers en s'appuyant sur les documents spécifiques du réseau technique.

○ **Les déchets plastiques**

L'utilisation de ce type de déchets a été envisagée en particulier comme constituant des bétons bitumineux. La première voie explorée dès 1972 [11] a été celle d'un mélange intime avec le drain ou le bitume ; les différents enrobés spéciaux utilisant des plastiques neufs ou de récupération existant sur le marché européen, montrent que cette technique est plus qu'opérationnelle. La seconde voie consiste en l'incorporation de plastiques divers dans les enrobés en vue d'augmenter leurs caractéristiques notamment leur résistance à l'orniérage, cette technique est opérationnelle en France.

○ **Le retraitement en place des chaussées**

Il s'agit d'une technique destinée à recréer, à partir d'une chaussée dégradée et inadaptée au trafic à supporter, une structure homogène et stable. Elle consiste à

traiter en place les matériaux existant avec apport de liant et éventuellement de matériaux complémentaires pour obtenir une nouvelle couche de base ou de fondation. Le retraitement permet d'améliorer la portance et le profil de la chaussée tout en limitant l'apport de granulats «frais» et en modifiant le moins possible les caractéristiques géométriques.

Le liant généralement utilisé est le ciment qui s'accommode le mieux avec la présence d'argile fréquente dans les anciennes chaussées et procure au matériau traité une rigidité et une résistance à l'orniérage bien supérieures. Cette technique [12] n'est pas récente puisqu'elle a fait apparition en Europe dans les années cinquante. Depuis quelques années, elle connaît un regain d'intérêt dû principalement à un net renchérissement du coût des techniques routières. Son domaine d'application est plus particulièrement dans les chaussées classiques à trafic faible ou modéré.

○ **Autres déchets en étude utilisables en génie civil**

Des études sont portées sur l'utilisation des sables de fonderies, des chaux de carbone, des déchets de carrière et minerais, des bords de stations d'épuration, et conduisent à des conclusions également positives mais à ce jour limité à des productions spécifiques.

I.5. Valorisation des déchets en ciment

Le secteur de la construction, grand consommateur de matériaux naturels, utilise déjà depuis de nombreuses années des sous produits d'autres secteurs industriels comme matériaux de substitution (cendres volantes, fumée de silice ...etc.).

Pour des raisons économiques, réglementaires et commerciales, la valorisation des déchets (industriels de construction) dans le béton, est en cours de développement ces dernières années dans plusieurs pays développés.

La valorisation, est une solution qui consiste à trouver de nouveaux usages à partir des déchets. Elle comprend le recyclage, celui-ci est différent du réemploi par le fait qu'il inclut un processus de traitement de déchets que celui-ci soit simple ou complexe.

En dehors du secteur industriel, qui reste toujours un bon producteur de déchets de valeur pour le béton (en particulier le ciment) comme le laitier, les cendres de boue, les cendres volantes, la poussière ...etc. La valorisation des déchets dans le ciment a pour souci de jouer deux rôles en même temps, d'une part remplacer une partie du ciment, et d'autre part améliorer la qualité de celle ci.

❖ Les cendres volantes

Les cendres volantes se forment généralement par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules provenant de la combustion du charbon pulvérisé et elles sont divisées en deux familles, les silico-alumineuses et les sulfo-calciques. Ces cendres contiennent principalement de la silice, de l'alumine et une très faible quantité de chaux. Des cendres volantes mélangées avec du ciment portland en pourcentage étudié, améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons, généralement par leur finesse élevée, leur forme sphérique, et leur faible masse volumique. Le temps de prise est augmenté. La résistance à la compression diminue au jeune âge, mais elle devient similaire voir même supérieure à celle du ciment sans cendre à long terme [16].

❖ Les cendres de la boue des eaux usées

Les cendres de boue utilisées dans la fabrication du ciment sont obtenues par incinération, déshydratation et broyage des résidus du traitement des eaux usées dans les stations d'épuration [17, 18, 19]. Avec la teneur d'ajouts en cendres de boue, les ciments portlands ont des temps de prise supérieurs à ceux du ciment ordinaire (CPA).

❖ Le laitier

Le laitier est un silico-aluminate de chaux qui provient de la fabrication de la fonte élaborée dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Les constituants chimiques principaux du laitier sont la chaux, la silice, l'aluminium, la magnésie ainsi que les oxydes de fer et les sulfates. Le laitier se compose de deux grandes familles, il y a le laitier de fonte THOMAS obtenue à partir des minerais traditionnels à moyenne teneur en fer, et la deuxième famille est le laitier de fonte hématite obtenue dans les installations modernes à partir de minerais à haute teneur en fer. Les ciments portlands aux laitiers se caractérisent par un accroissement lent de leur résistance pendant la période de durcissement. Ces ciments sont utilisés généralement dans les fondations, les bétons exposés aux eaux de mer et les bétons résistants aux milieux agressifs.

❖ La poussière

C'est une matière à particules fines, récupérée à la sortie des fours de cimenteries, lors de son passage avec la fumée. Sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/g . Le ciment avec ajout de la poussière, présente une résistance au gel - dégel comparable à celle du ciment ordinaire. Il présente ainsi une augmentation du temps de prise. Le retrait et le fluage sont élevés ce qui rend le problème délicat en fonction du pourcentage d'ajout [17, 19].

❖ **Fumées de silice**

Les fumées de silice, sont des sou-produits de fabrication de silicium et de ces alliages. Ce ne sont pas toujours des produits de composition constante. la finesse de la silice n'a pas de conséquence directes tant sur les propriétés granulaires que pouzzolanique. La pureté des fumées de silice (pourcentage de SiO_2) n'est pas un critère déterminant.

La fumée de silice ou "poussière de silice" comprend de la silice SiO_2 en pourcentage important dépendant de la richesse en silicium de l'alliage fabriqué pouvant aller jusqu'à 98% dans le cas du silicium pur.

Chapitre 02

Agrégats recyclés et béton
d'agrégats recyclés

II AGREGATS RECYCLES ET BETON D'AGREGATS RECYCLES

II.1 Introduction

L'idée de recycler des matériaux de démolition n'est pas nouvelle. Pendant la seconde guerre mondiale, les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient employés en grande Bretagne et en Allemagne pour la restructuration. Les granulats obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de brique compte tenu de la nature des constructions de l'époque [10, 20]. Un travail de recherche a eu lieu mondialement et a fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolé et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton.

Actuellement, la valorisation des déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation et connaît un développement assez important. Le taux de recyclage dans différents pays Européens en 1992 est résumé dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Taux de recyclage en Europe [1]

Pays	Déchets de démolition en millions de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonnes par an	Pourcentage de recyclage par rapport à la production de déchets	Pourcentage de recyclage par rapport à la production des granulats naturels
Pays-Bas	12.2	8.5	73	?
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	43 + 15	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	05	1.25	25	?
France	20 – 25	03	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	145	42	Moyenne = 31	?

II.2 Historique et expériences étrangères

Il est connu que le principe de recyclage des matériaux n'est pas nouveau car il était déjà utilisé par les romains. Le principe consistait en général en la destruction des statuts des dieux qui n'étaient pas vénérés et les matériaux récupérés servaient à en faire de nouvelles.

Devant le fait des villes sinistrées pendant et après la seconde guerre mondiale, le recyclage des matériaux s'est présenté comme une solution envisageable et a connu son début en Europe et plus précisément en Allemagne et en Grande-Bretagne.

Cette période d'après guerre est suivie d'une période assez longue passée dans les études, jusqu'à la publication par "BUCK" d'un rapport de recherche 1973 [10], puis la présentation par le même auteur d'une communication en 1976 [10, 20] sur l'étude des granulats de béton recyclé.

A partir de 1975, les premières tentatives de recyclage ont débuté aux Etats-Unis et plus précisément dans le domaine routier, où ils utilisaient les granulats recyclés provenant du concassage de béton armé et non armé dans les couches de fondation de chaussées.

La première utilisation de béton recyclé était pour les sous couches des voies de circulation en Californie et la composition comportait du béton recyclé, d'asphalte et de 8% de ciment. En 1976, la première réussite de l'utilisation d'agrégats recyclés et celle d'un ancien béton de 41 ans d'âge pour la formulation d'un nouveau béton toujours de chaussée [5].

Après la bonne réussite de 1976, les travaux de recherches dans ce domaine (recyclage de béton de chaussées) ont évolué jusqu'à 1980, où les Américains tentaient un grand projet de recyclage d'une longue chaussée en béton pour les couches de

fondation d'une nouvelle en Illinois [5]. De 1980 à 1985, plusieurs autres états ont pris l'exemple et ont utilisé le béton recyclé pour les fondations de nouvelles chaussées.

* **En Allemagne**, Schultz [5], reportait qu'en ex-RFA, il n'était pas autorisé d'utiliser les agrégats de béton recyclé à cause de la légèreté de ces derniers mais en 1985, il y avait 60 stations de recyclage avec une capacité de 10 millions de tonnes par an. En 1992, 43 millions de tonnes de matériaux de démolition ont été obtenus en ex-RFA, 35 % de ces matériaux de démolition sont recyclés. L'objectif fixé était d'arriver à 60% en 1995. Actuellement en Allemagne, les granulats recyclés sont très utilisés et bien adaptés au domaine routier, mais non pas pour le béton hydraulique, car celui-ci demande des granulats de bonne qualité et par conséquent un prix de revient élevé. Cependant l'Allemagne encourage les expériences de démolition sélective, visant ainsi une meilleure récupération des matériaux pour le recyclage.

* **Pays-Bas**

Une des actions récentes de la politique environnementale néerlandaise a été de mettre en place un plan national de mise en œuvre «déchets de chantier» basé sur la participation de l'ensemble des intéressants dans le domaine de la construction. Le recyclage des déchets de chantier, et plus particulièrement des matériaux minéraux, est l'un des objectifs principaux de ce plan, 90% des déchets de chantier devant être recyclés en 2000. Les premières installations fixes de recyclage – concassage datent du début des années 60 [2].

Dés 1986, des recommandations pour les granulats recyclés dans le béton ont été élaborées, et sont exigées si on dépasse les 20% des granulats recyclés et substitués.

En 1993, on comptait 72 installations de recyclage – concassage au Pays-Bas [2].

L'origine des matériaux de démolition provient dans 38% des déchets de chantier (dont 88% pour la démolition des bâtiments non résidentiels), et dans 33,5% des travaux routiers et hydrauliques (constructions, rénovation et démolition). (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Répartition de la production des déchets de chantiers selon l'origine en 1993 (en milliers de tonnes) [2].

Origines	Bâtiments		Travaux routiers et hydrauliques	Total déchets de chantier	Sol
	Résidentiel	Non résidentiel			
Construction	848	766	NC	-	-
Rénovation	1354	524	NC	-	-
Démolition	552	4163	NC	-	-
Total	2754	5453	4170	12377	3100

NC : Non communiqué

Pratiquement, toute la production de granulats recyclés est actuellement destinée aux travaux routiers et hydrauliques, et à peine 2% à l'industrie du béton (0.2% en 1990).

* Le Royaume – Uni (Grande Bretagne)

Dans le secteur de la construction, le gouvernement encourage la réutilisation et le recyclage des matériaux considérés comme déchets là où ils peuvent se substituer à l'emploi de minéraux naturels neufs.

En 1991 [3], les estimations des quantités des déchets dues aux activités de construction et de démolition étaient de 24 millions de tonnes par ans. La figure suivante résume la Répartition des quantités de déchets au Royaume-Uni

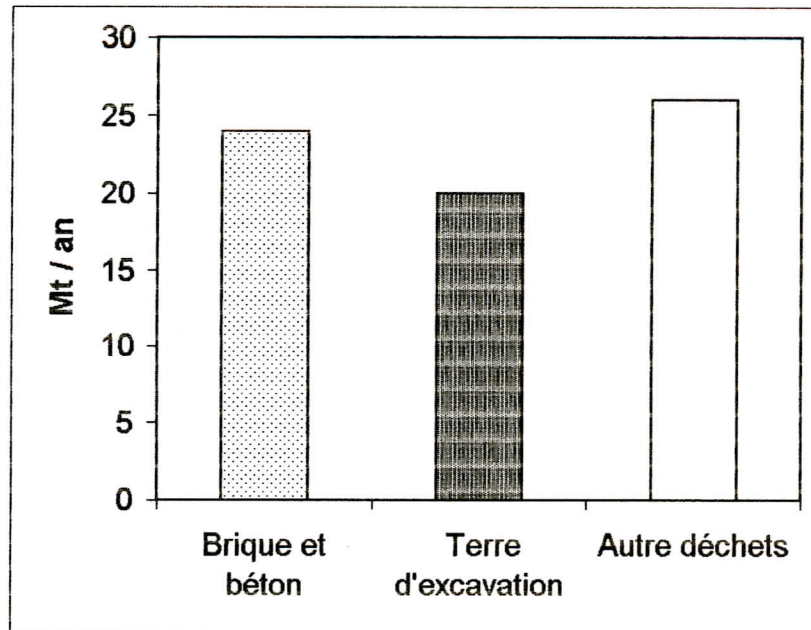


Fig. 2.1 Répartition des quantités de déchets par types en 1991 au Royaume-Uni [34]

Au Royaume-Uni [3], en 1995 il y avait 36 centres fixes [4]. Ils produisent 368 tonnes par jour de produits utilisables soit, pour 216 journées de travail, une production annuelle de 2,8 millions de tonnes. Selon les estimations d'Humphrys, les 63% de déchets de construction/démolition recyclée de 1995 pourraient atteindre 75% à l'an 2000, et les granulats recyclés passeront à 5 millions de tonnes. Au Royaume-Uni la répartition des principaux déchets de démolition/construction est la suivante :

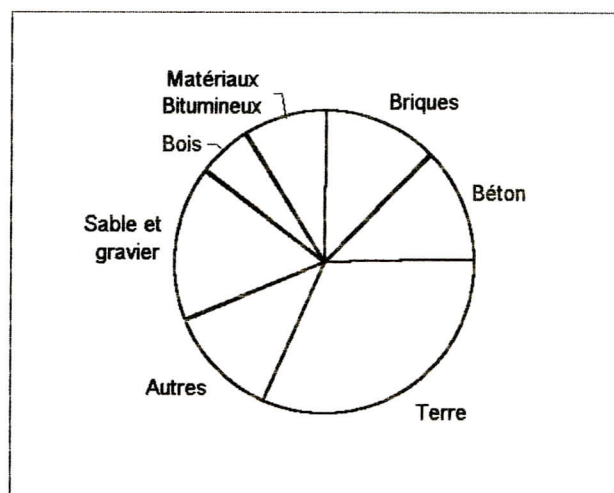


Fig. 2.2 Répartition des principaux déchets de démolition / construction en Grande-Bretagne [3]

* La Belgique

La recherche en matière de recyclage des déchets de construction et démolition a débuté en Belgique il y a plus d'une vingtaine d'années [3]. Aux années 80, un mur de soutènement a été recyclé et reconstruit plus largement au même endroit [5]. En 1987, avec l'aide du CSTB (centre Scientifique et Technique de la Construction), un projet très important avait vu le jour en Belgique pour la construction d'une nouvelle écluse à Anvers avec la démolition de 80 000 m³ de béton armé et le recyclage d'une partie de débris de béton comme agrégats employés à la fabrication du béton servant à la construction des murs de l'écluse. Depuis, une véritable industrie de recyclage a vu le jour en Belgique.

Les décrets flamands du 2 juillet 1981 et wallon du 5 juillet 1985 ainsi que l'ordonnance bruxelloise du 7 mars 1991, relatifs à la prévention et à la gestion des déchets, ont encouragé la valorisation des déchets.

La production annuelle de granulats naturels (Carriers) s'élève à 64 million de tonnes. Les déchets de démolition et de construction sont estimés à 7,5 millions par an jusqu'à l'année 1995, et environ 2,3 millions de tonnes de débris de démolition sont traités annuellement par concassage, soit 30% de la quantité totale de débris produits, ceci pour une capacité totale des installations de 4,4 millions de t/an [3].

Les granulats recyclés provenant des stations mobiles (concasseurs à mâchoires) sont principalement utilisés dans les travaux routiers pour les fondations en empierrements et comme ajout dans les bétons maigres de fondation de routes. La réutilisation du béton dans le bâtiment est encore au stade de développement.

* Le Danemark

Aujourd'hui encore, des projets de "maisons recyclées", 'c'est à dire bâtiments construits à partir de matériaux à base de granulats recyclés (béton recyclés par exemple) sont construits en Danemark.

Le recyclage a été encouragé depuis 1971 dans le domaine des emballages alimentaires, puis dès 1983, la première expérience de recyclage du béton a eu lieu : les pistes d'atterrissage de l'aéroport de Copenhague ont été reconstruites à partir de béton recyclé provenant des anciennes pistes. En 1991, 135 communes avaient élaboré une réglementation spécifique aux déchets de construction et 17 centres sur le territoire Danois [2].

En effet en 1987, le ministère de l'environnement a élaboré un plan d'action en comparaison à 1985 et qui signifie que la répartition des déchets en 2000 devrait être la suivante : 54 % recyclés, 25% incinérés et 21% seulement mise en décharge. La figure 2.3 résume le traitement des déchets de chantier en 1985 et objectifs à l'an 2000.

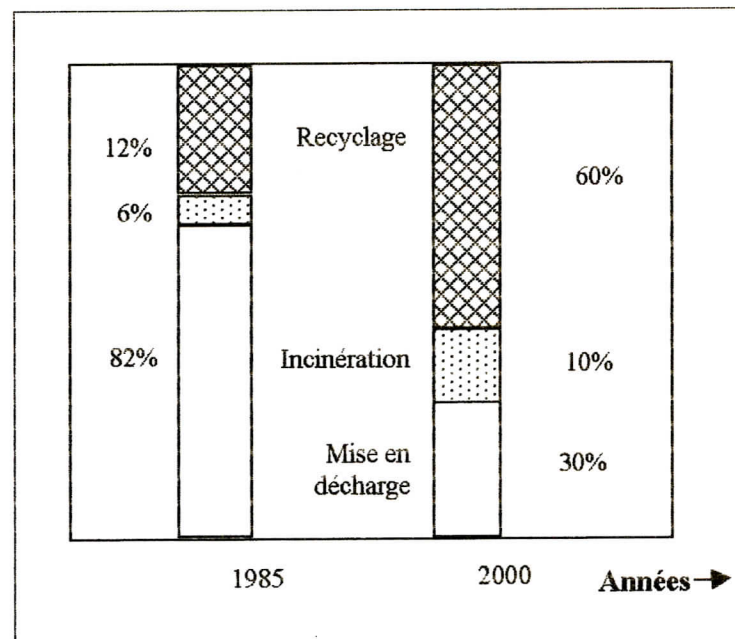


Fig. 2. 3 Traitement des déchets de chantier au Danemark jusqu'à l'an 2000 [2]

Selon le rapport PROBA publié par le ministère de l'environnement en 1990 [5], les déchets de chantier représentent environ 4,4 millions de tonnes. Leur provenance est majoritairement de la démolition, la réhabilitation et la construction neuve. Le traitement de ces déchets est résumé dans la figure 2.4 suivante :

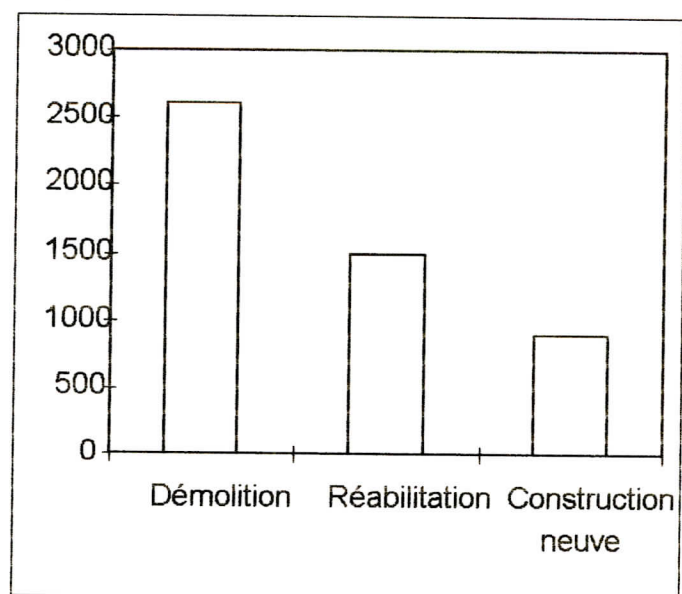


Fig. 2.4 Evaluation de l'origine des déchets de chantier au Danemark (en million de tonne) 1990 [2].

La nature des déchets de chantier est résumée dans la figure 2.5 la suivante :

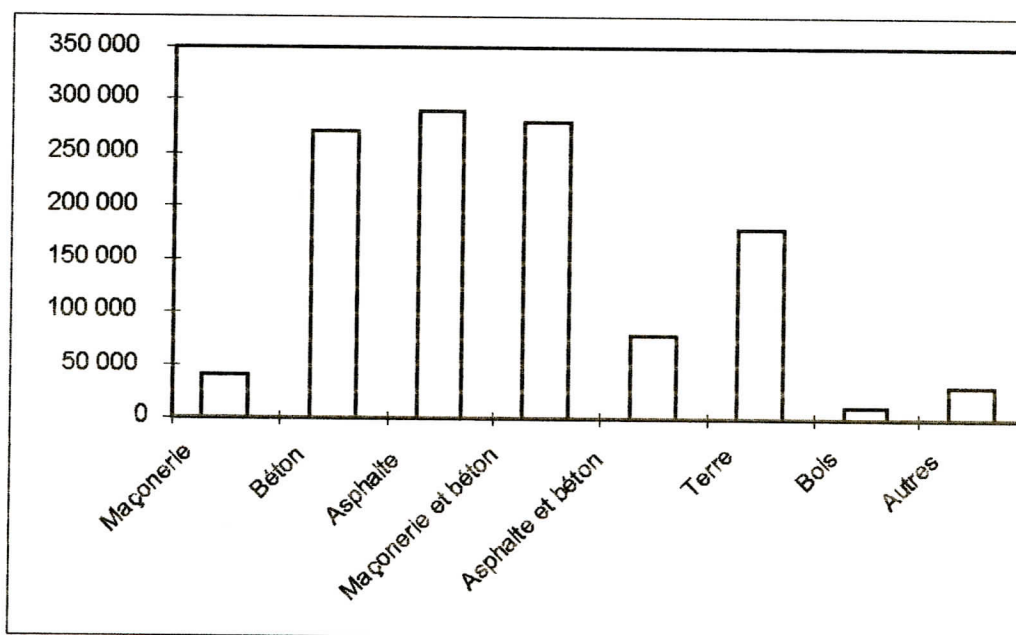


Fig. 2.5 Déchets livrés dans les centres de recyclage / concassage 1992 au Danemark [2]

La destination des déchets de chantier est résumée dans la figure 2.6

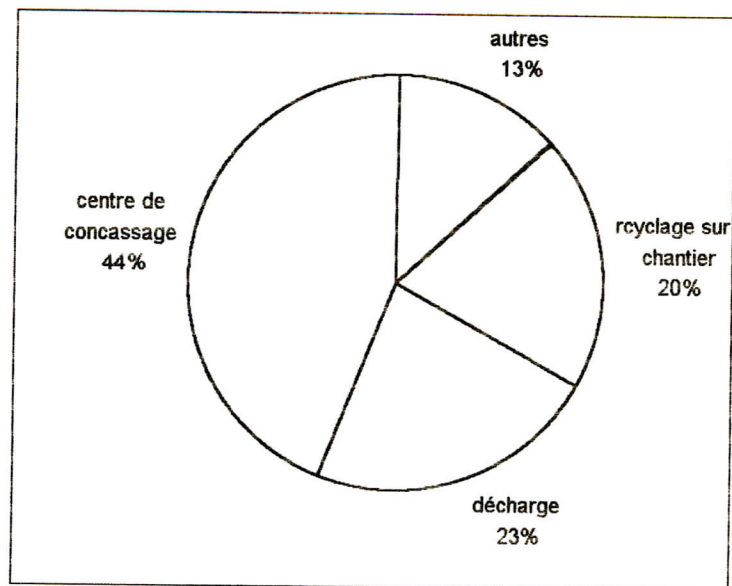


Fig. 2.6 Destination des déchets de chantier en 1992 au Danemark [2]

Jusqu'à 1992 la production des granulats recyclés au Danemark était de 30% d'asphalte suivie par celle de granulats de béton (26%) et briques mêlées au béton 22%. Les matériaux recyclés sont principalement utilisés dans les routes (75%), puis pour les terrassements 20% et enfin en tant que granulats pour béton (5%) [2].

❖ La France

L'extraction de granulats recyclés a commencé d'une façon industrielle en 1982. Cependant en 1976, la première installation mobile est née à Paris et en 1981 la première installation fixe a été créée à l'occasion de la démolition des abattoirs de la Vilette. A partir de 1985, l'activité s'est développée à raison de trois à cinq nouvelles installations créées par an. En 1991, le bilan était de vingt sociétés de recyclage [1,11].

La loi n°75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux et la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, furent modifiés par la loi

n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et aux installations classées pour la protection de l'environnement. Cette loi interdit à partir de l'année 2002 la mise dans les centres d'enfouissement techniques (C.E.T) de tous les déchets considérés comme étant «non ultime ».

La production annuelle en granulats recyclés est comprise entre 3 et 4 millions de tonnes, ce qui représente 20 à 30 % du potentiel de matériaux de démolition inertes estimé recyclable (10 à 15 millions de tonnes) [1]. L'île de France, le Nord, l'Alsace est la région de Rhône-Alpes sont les principales productrices. Les granulats recyclés représentent moins de 1% de la consommation totale en granulats et 25 % de la production de granulat non issus de carrière, contre 15 % en 1987.

❖ L'ex URSS

Des stations de recyclage de 720.000 m³/an sont couramment en opération [5]. Les gros agrégats recyclés sont utilisés dans les fondations et pour la production de nouveau bétons de structure avec une résistance caractéristique de 20 MPa et les agrégats fins sont utilisés comme filer dans l'asphalte.

❖ Le Japon

Jusqu'à 1985, les agrégats recyclés été utilisés uniquement dans la construction routière à cause des autorités Japonaises qui n'avait pas encore approuvé la réglementation pour l'utilisation d'agrégats recyclés et béton d'agrégats recyclés. A partir de cette année, l'activité de recyclage s'est développée en arrivant dans ces dernières années à raison de cinq fois plus de nouvelles installations de concassage. Aujourd'hui, le Japon est le pays qui utilise le plus d'agrégats recyclés après les Pays-Bas, l'Allemagne et la Belgique [5, 21].

II.3 L'Algérie par rapport aux autres pays Européens

En Algérie, des bâtiments publics, des immeubles et des ponts sont démolis après des sinistres naturels comme le séisme et les crues ou par le vieillissement et les actions de bombes. Les matériaux de démolition sont, pour l'instant, rarement recyclés. L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets (briques et béton en particulier) qui sont rarement valorisés. Les quantités générées par la démolition et les déchets de chantier restent inconnus. Cependant, l'Algérie connaît un déficit important en matériaux de construction et en particulier les agrégats et le ciment. Le déficit entre l'offre et la demande en granulats est de l'ordre de 10 % ces dernières années, et dépassera les 20 % de la production en l'an 2000. Selon les mêmes projections, la production passera jusqu'à 38.5 millions de m³ d'ici l'an 2000 alors que la demande grimpera jusqu'à 53.5 millions de m³ durant la même période [22].

Au cours de la deuxième moitié de ce siècle et en 1980, la ville algérienne d'El-Asnam (Chlef actuellement), a été secouée par deux tremblements de terre intenses qui l'ont quasiment réduit en un énorme tas de gravats. En 1981, l'expérience acquise par la Belgique en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition, a permis au CSTC (Centre scientifique et Technique de la construction) de proposer aux autorités algériennes d'effectuer une étude sur les possibilités de recyclage des décombres de la ville. Alors, face à quelques milliers de bâtiments (38% des bâtiments) qui devaient être démolis et par suite l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de tonnes de débris, l'opération pilote de recyclage menée par la recherche du CSTC, a démontré qu'il a été possible de recycler les débris en blocs de construction de qualité convenables [22].

Il faut aussi noter le manque de politique de gestion des déchets en général et les déchets non ultimes en particulier et de leur valorisation. Selon les informations disponibles, aucune étude de valorisation des déchets de construction ou de démolition comme agrégats en béton n'a été réalisée à ce jour en Algérie.

II.4 Spécifications unifiées et normes actuelles

Des spécifications sont en préparation par le comité Européen de Normalisation (CEN) et la majorité des pays Européens possédant leurs propres guides et normes dans le domaine des granulats recyclés.

Ainsi, le Danemark s'appuie sur la norme DS411 (Danish standard) du 1990 [2], le Belgique sur les circulaires 225/91 0402 et 03 de 1991 [3], les USA sur l'ASTM C33-82 parag 8.1 de 1982 [5], le Royaume Uni sur le guide 6543, use of industrially product and waste materials in building and civil engineering de 1986 [3], les Pays-Bas sur les normes CROW 12, CUR-5 et CROW 16 de 1995 [2], le Japon sur les normes SURA et RAC de 1985 [5] et finalement la Russie sur « Recommendations on the recycling of sub-standard concrete and reinforced products » de 1984 [5].

Au Pays-Bas, il est fait référence pour les granulats recyclés à la norme NEN 5950 relative aux exigences de béton (VBT 1986). Les granulats de béton qui satisfont aux recommandations de la norme CUR-5 peuvent être utilisés pour toutes les classes de résistance de béton. Dans le cas où un maximum de 20% (m/m) des graviers naturels seraient remplacés, aucune mesure particulière n'est exigée au-delà de 20%, il convient d'augmenter les quantités de ciment ou de sur-dimensionner. Dans le cas où 100% des graviers seraient des granulats recyclés, il est nécessaire de sur-dimensionner d'environ 10% dans les cas où la flèche calculée est le critère limite. Selon cette même norme (NEN 5950) les granulats de maçonnerie peuvent être utilisés dans le béton pour les classes de résistance inférieure ou égales à B25.

II.5 Sources et production d'agrégats recyclés

II.5.1 Sources d'agrégats recyclés

En Europe, on estime que la durée de vie moyenne d'une habitation est de cinquante ans ; les bâtiments industriels et les ouvrages d'art ont une durée de vie encore supérieure [1]. La figure suivante (fig.2.7) illustre en gros les sources des granulats recyclés

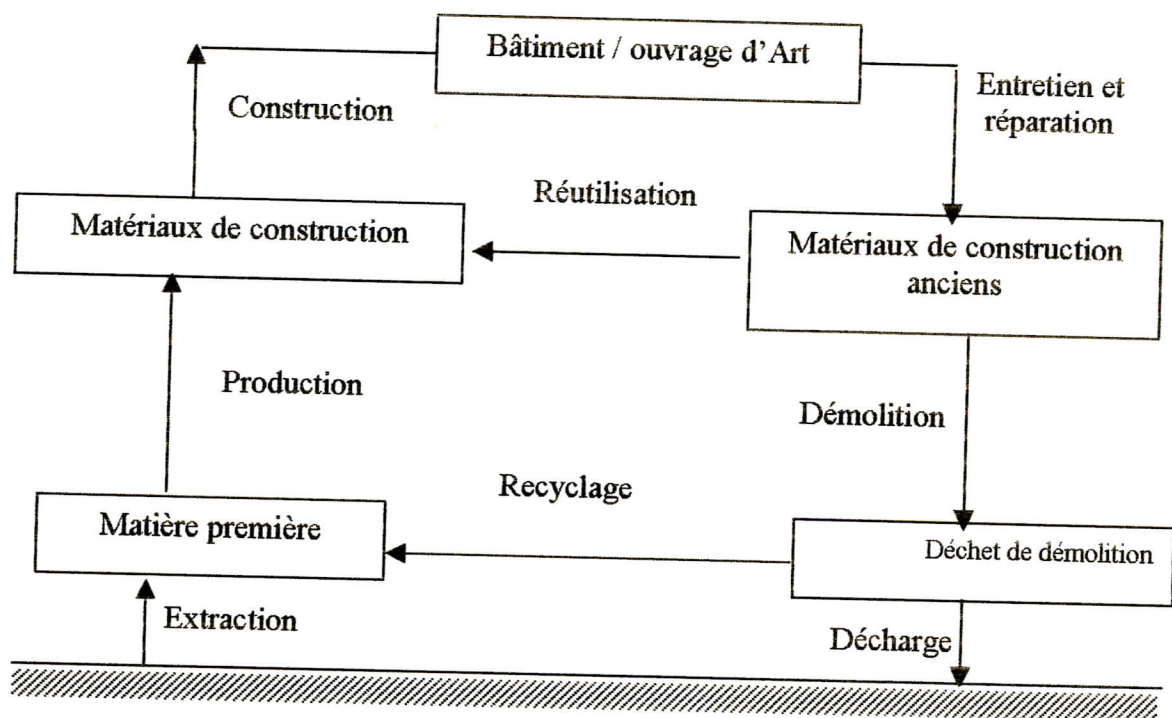


Fig. 2.7 Modèle du cycle de vie d'un Bâtiment ou d'un Ouvrage d'Art

La composition des produits de démolition varie selon la nature des ouvrages démolis (bâtiment industriel, bâtiment résidentiel, ouvrage d'art, etc.) et leur date de construction. Ainsi une construction du XIX^{ème} siècle repose sur un gros œuvre en pierre, en brique et en métal mais une construction de la deuxième moitié du XX^e siècle est principalement en béton.

Dans le passé, la quasi totalité des déchets de démolition provenait de bâtiments industriels. Actuellement, le rapport entre les bâtiments industriels et les

bâtiments résidentiels démolis est de 5/1 [1]. Dans l'avenir, les déchets de démolitions seront composés de plus en plus de substances légères et de matériaux composites.

De la démolition à l'élaboration de d'agrégats recyclés, l'industrie de recyclage des déchets de construction démolition avaient comme deux générations de matériels de traitement qui ne diffèrent pas trop des matériels de concassage utilisé pour la production d'agrégats naturels. Il incorpore divers types de concasseurs, écrans, équipement de transfère et dispositifs pour l'enlèvement de matière étrangère. La première génération comportait deux système : un ouvert et l'autre fermé, les deux systèmes sont généralement dans la réhabilitation de chaussées et projets de recyclage.

II.5.2 Matériel de production

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

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

Le traitement des déchets de construction / démolition est résumé dans la figures suivante (Fig. 2.8) :

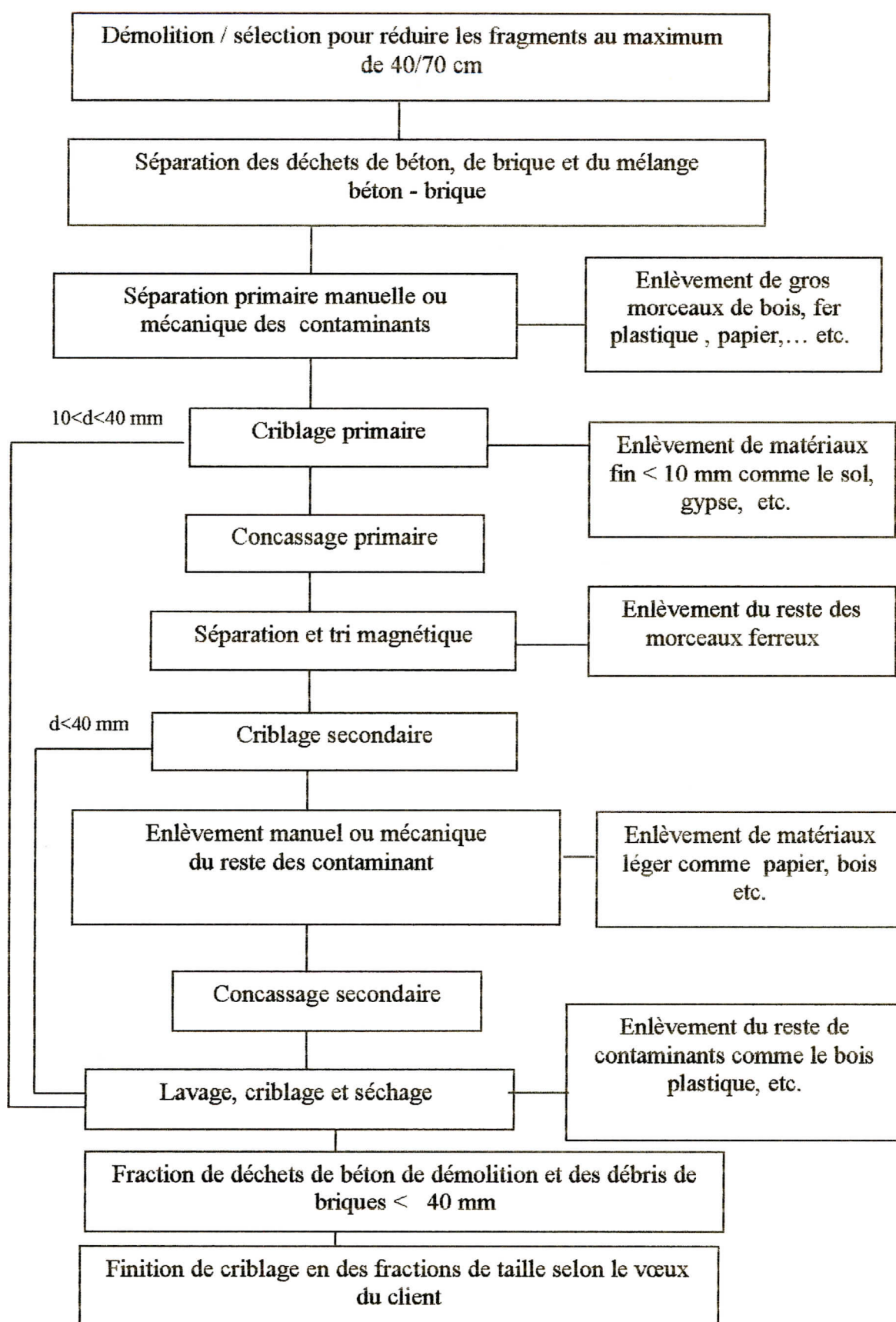


Fig. 2.8 Procédure de traitement des déchets de construction / démolition [2]

Pour une centrale de recyclage - concassage type, les différents équipements sont donnés ci après :

a) Les concasseurs

Pour la fragmentation des déchets, différents types de concasseurs peuvent être envisagés.

Concasseurs à mâchoires

Avec ce type de concasseurs, le matériau est cassé par pression entre les deux machines, une fixe et l'autre en mouvement. Ces concasseurs ont tendance à produire des agrégats de forme plate (surtout pour la maçonnerie). Ils sont, de ce fait, peu indiqués comme concasseur secondaire par contre c'est ce type de concasseur qui produit le moins de particules fines (de l'ordre de 10 % max).

Concasseurs à marteaux

Il réalise la fragmentation des matériaux par percussion sur des matériaux articulés sur un ou deux rotors tournant à grande vitesse. Lorsqu'il est utilisé comme concasseur primaire, la hauteur entre la courroie d'alimentation et l'axe de rotor est réglable. Cela permet, en régulant de plus la vitesse du rotor, une très importante réduction de la dimension des matériaux. La forme des matériaux a une influence sur la dimension et l'indice de forme des granulats obtenus. Le niveau de fragmentation est difficilement maîtrisable, la consommation énergétique de l'équipement est plus rapide que pour les concasseurs à mâchoires. Par contre, la séparation de l'acier du béton est meilleure.

□ *Concasseurs à percussion*

Un rotor équipé d'un certain nombre de barres d'impact, projette les matériaux à grande vitesse contre les parois de la chambre de broyage garnie latéralement des plaques d'usure et de deux encolures en acier haute résistance. Les agrégats sont produits par choc et éclatement, ils sont de ce fait très dur et de faible calibre avec une importante quantité de fins (jusqu'à 40 % de particules <6 mm).

□ *Concasseur giratoire*

Le concasseur opère par écrasement du matériau entre un cône giratoire. Le mouvement à l'intérieure de la chambre de broyage est commandé par un arbre excentrique, ce qui rapproche par le dessous de la machine. La dimension maximale du matériau est limitée à 200 mm environs. Sans métal ni bois, cet équipement peut être utilisé comme concasseur primaire et produit des agrégats de forme cubique et une quantité moyenne de fins (< 20%).

□ *Concasseur à cône*

Ce concasseur fonctionne selon le même principe que le concasseur giratoire. Ici un cône tronqué se met autour d'un axe excentrique dans un matériau qui a la forme d'un cône tronqué inversé, de telle sorte que l'espace n'agrandit à nouveau, les petits morceaux tombent par la fente. Ici également, le matériau à concasser doit être exempt d'acier.

b) Les systèmes de criblage

Les granulats sont mieux séparés sur des cribles inclinés vibrants à basses fréquences, au contraire des matériaux fins qui sont séparés plus efficacement sur des cribles horizontaux vibrants à hautes fréquences.

c) les méthodes de séparation des impuretés **Alimentateur grizzly (scalpage)**

On peut déjà au départ, enlever une grande partie des matières terreuses et des fins contaminantes en alimentant le concasseur primaire à partir d'un grizzly crible transporteur vibrant. Cet alimentateur qui est plus efficace lorsqu'il travaille par étage.

 Séparateur magnétique

Un très puissant aimant permanent enjambe la courroie transporteuse. Il est équipé d'une courroie à lattes contre lesquelles se plaquent les métaux ferreux qui sont ainsi écartés de la voie du concasseur pour tomber à côté de l'installation lorsqu'ils quittent le champ magnétique de l'aimant. Ce système ne fonctionne que pour les métaux ferreux.

 Séparation manuelle

Elle a l'avantage majeur de pouvoir éliminer les éléments indésirables qui ne sont pas facilement séparables par d'autres moyens, il s'agit notamment du verre, des morceaux d'isolants plats, du feutre bitumé, les fils électriques gainés, etc. Par contre,

elle nécessite du personnel en permanence et le rythme de production doit être adapté à leur vitesse de travail (par exemple, arrêt momentané de la bande transporteuse si trop d'éléments indésirables passent en même temps).

Séparation du bois

Un crible spécial destiné à enlever le bois peut être placé entre le concasseur primaire et le premier crible. Ce séparateur possède des trous perpendiculaires aux flux de matériaux et vu la forme des particules de bois concassés, celles-ci restent sur le crible tandis que les matériaux ferreux tombent à travers les trous. Cet équipement permet d'éliminer environ 70 % du bois se trouvant dans les agrégats.

Séparation par aspiration

Tous les matériaux légers (tels que bois, textile, plastique de faible densité, etc.) sont aspirés dans un système placé à l'extrémité du premier crible, tandis que les matériaux pierreux plus lourds, passent en travers. Son efficacité est notamment améliorée lorsqu'on ne peut l'utiliser que pour une fraction granulométrique bien définie. Dans ce cas, il permet jusqu'à 95% des éléments indispensables.

Séparateur par gravité

La méthode est basée sur la différence de masse volumique des différents composants. Pour pouvoir exploiter la différence de masse volumique, il faut s'intéresser à des volumes comparables et donc de sélectionner une granulométrie limitée. En général, la séparation s'opère en deux niveaux : un étage supérieur pour la fonction 50-150 mm et un étage inférieur pour 20-50 mm.

□ *Séparation par décantation*

Les granulats traversent une distance avec renfile d'eau. Les matériaux légers flottent tandis que les matériaux pierreux plus tard, tombent au fond. Les éléments indésirables flottant sont raclés en surface tandis que les agrégats propres continuent le circuit. Ce procédé a l'avantage d'éliminer la grande majorité des éléments indésirables ou de fournir un granulats très propre. Par contre il produit une grande quantité de boue qui doit être traitée.

□ *Séparation par lavage*

Il s'agit d'une courroie transporteuse sur laquelle est maintenu un niveau d'eau dans le sens opposé à son avancement. Les matériaux légers flottent et sont éjectés par le débit d'eau alors que les matériaux plus lourds continuent le circuit. Ce procédé présente les mêmes avantages et inconvénients que le système de séparation par décantation.

La figure suivante (Fig. 2.9) résume le fonctionnement d'une centrale de concassage :

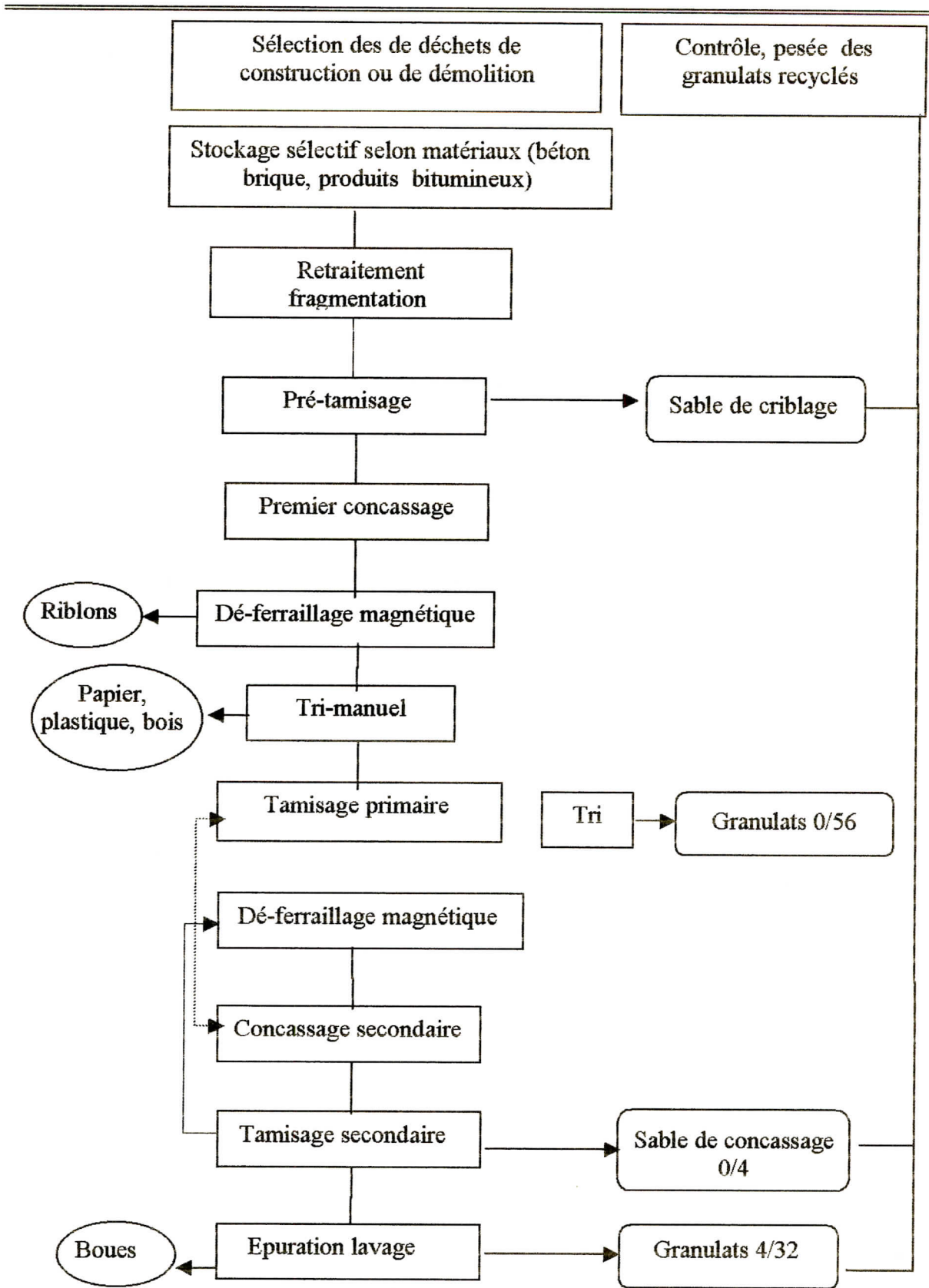


Fig. 2.9 Schémas de fonctionnement d'une centrale de recyclage / concassage [3]

II.5.3 L'élaboration du produit finis

Les matériaux (0/80) issus du concassage secondaire et du lavage sont criblés et concassés. Avant leur passage dans l'installation, les bétons démolis subissent une préparation qui consiste à augmenter les plus gros blocs à l'aide d'un brise roche et à enlever les ferrailles les plus importants par découpage au chalumeau. Le concasseur primaire est volontairement sur-dimensionné afin de faciliter le passage des blocs de béton et de leurs armatures. L'opération de broyage dé-ferraillage proprement dite est réalisée par un double concassage (deux concasseurs à percussion avec scalpage intercalé à 60 mm) et un double dé-ferraillage obtenu par un tri magnétique après chaque concasseur. Les granulats 0/150 sortants du concasseur secondaire sont criblés et séparés en trois fractions 0/6, 6/80, et 80/150. Seule la fraction 6/80 est soumise à un nettoyage par passage dans un système de lavage de type «Aquamotor » qui sépare les éléments par différence de densité. A ce niveau la plus grande partie des éléments indésirables légers (bois matières plastique ...) est éliminé. La fraction 0/6 qui est relativement plus homogène court-circuit l'appareil de nettoyage, quant au 80/150, elle se réintroduit dans l'installation après cassage.

II.6 Caractéristique des granulats recyclés

II.6.1 Granulation, forme de particules et texture de surface d'agrégats recyclés

Avec un bon ajustement des ouvertures du concasseur, il est facile de produire raisonnablement une bonne granulométrie de gros agrégats recyclés.

Des granulats recyclés ont été obtenus en passant une seule fois dans le concasseur avec une granulométrie des gros agrégats recyclés (5/25) très proche des limites admissibles préconisées par la norme ASTM C-33. Par contre, la partie fine des agrégats recyclés (<4 mm), présentait une granulométrie assez différente de celle des limites admissibles tolérées par la norme comme le montre la figure suivante (Fig. 2.10).

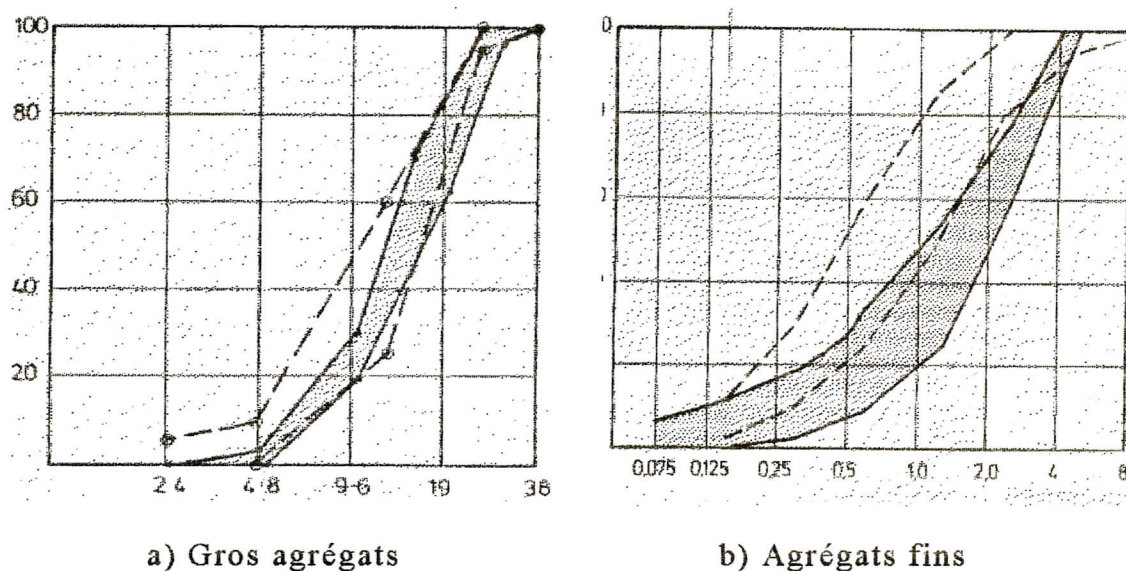


Fig. 2. 10 Granulométrie d'agrégats recyclés produits par concasseur à mâchoires
En un seul passage [4]

Les particules fines ($<75 \mu\text{m}$) sont selon différents chercheurs [5], dans l'ordre de 0.3 à 6.6% dans les gros granulats et de 4 à 6.6% dans les agrégats fins en comparaison au pourcentage traité par la norme ASTM C-33 qui est de 1.5 à 5% respectivement pour gros et fins granulats.

II.6.2 La Densité

La masse volumique des granulats naturels, varie généralement de 2100 à 2500 kg/m^3 pour les gros granulats et de 1970 à 2200 kg/m^3 pour les granulats fins [23]. La densité d'agréats de béton recyclé est inférieure de l'ordre de 5 à 10% à celle d'agréats naturels [4, 24, 25]. Cette baisse est due relativement à la densité faible d'ancien mortier attaché aux particules d'agréats du béton recyclé

Hansen et Narud, reportaient [5] que la densité des gros agrégats recyclés est de l'ordre de 2340 kg/m^3 pour les agrégats 4/8 mm et de 2490 kg/m^3 pour les agrégats 16/32 mm, indépendamment de la qualité du béton original dont les densités de gros et fins agrégats étaient de 2500 kg/m^3 et 2610 kg/m^3 respectivement. Par contre les valeurs de 2430 kg/m^3 pour les gros agrégats recyclés (5/25 mm), et 2310 kg/m^3 pour les agrégats recyclés fin ($<5\text{mm}$) ont été reportés par Hasaba et autres dont la densité originale des agrégats était de 2700 kg/m^3 et de 2500 kg/m^3 pour les gros et fins granulats respectivement [5].

II.6.3 Résistance mécanique (Los Angles)

Les agrégats acceptables pour la production du béton doivent avoir un coefficient de Los Angles $<$ à 50% selon la norme américaine ASTM C-33 et de 30 à 45% selon la norme Britannique BS 882, 1201, partie 2.

Le tableau suivant (Tableau 2.2), résume les travaux de Hansen et Narud [5] sur des agrégats à base de béton à différent rapport E / C.

Tableau 2.3 Los Angeles des agrégats à base de béton à différent rapport E / C [1].

Type d'agréats	Taille (mm)	Los - Angles (%)
Gravier naturel	4/8	25.9
	8/16	22.7
	16/32	18.8
Agréats recyclés (E/C=0.40)	4/8	30.1
	8/16	26.7
	16/32	22.4
Agréats recyclés (E/C=0.70)	4/8	32.6
	8/16	29.2
	16/32	25.4
Agréats recyclés (E/C=1.20)	4/8	41.4
	8/16	37.0
	16/32	31.5
Agréats recyclés (E/C=0.40)	<5	-

On remarque que Los Angeles pour les agrégats recyclés varie de 22 à 40%. D'autres chercheurs [26, 27, 28] ont reporté un Los Angeles des agrégats du même ordre de grandeur de 20 à 35%.

Hasaba et autres [5], ont trouvé que le coefficient de Los - Angles des agrégats recyclés 5/25 mm varie de 23.0 % pour les agrégats issus d'un béton original à grande résistance jusqu'à 24.6 % pour agrégats issus d'un béton original à faible résistance. Donc on peut dire que les granulats recyclés ont un coefficient Los Angles acceptable pour la confection du béton.

II.6.4 La Porosité

La proportion importante de grains de mortier attachée aux granulats recyclés, conduit à des teneurs en eau plus importantes et par conséquent à une porosité élevée.

Selon Kazuyuki et autres [5], la porosité des granulats recyclés issues d'une même source d'agrégats naturels mais de structures différentes était la suivante :

	Agrégats Fins			Gros Agrégats		
	Sable naturel	Chaussé	Structure	Gravier naturel	Chaussé	Structure
Porosité (%)	1.3	7.8	10.9	0.8	5.4	5.9

Le tableau suivant résume le coefficient d'absorption trouvé par quelques chercheurs :

Tableau 2.4 Le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés [5]

		Agrégats naturels	Agrégats recyclés
Hansen	4/8	3.7%	8.7%
	16/32	0.8%	3.7%
Hasaba	5/25	7%	11%
Narud	fin	/	9.8%

On voit clairement la différence dans le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés en comparaison aux agrégats naturels, et donc il convient de réaliser un pré-mouillage comparable à celui utilisé pour les granulats poreux et les granulats légers.

II.6.5 Mortier de liaison

le pourcentage de vieux mortier attaché aux particules de gravier naturel dans les agrégats recyclés, croit en fonction de la résistance du béton original.

La présence de ce mortier a été mise en évidence par des chercheurs par un essai simple, qui consiste à mettre les agrégats recyclés avec un ciment coloré rouge dans un coffrage cubique. Après durcissement, le cube est coupé en tranches puis cirer. Le mortier attaché aux particules de gravier naturel dans les agrégats recyclés peut être distingué clairement entre les particules de gravier originales et la matrice de ciment rouge [5].

Le pourcentage de mortier attaché aux particules de graviers naturels est estimé entre 25 à 35 % pour les agrégats recyclés 16/32 mm, autour de 40% pour 8/16 mm et de 60% pour le reste de 4/8 mm [29].

Selon d'autres chercheurs, par exemple Hasaba et autres [4], ce mortier est de 35.5, 36.7 et 38.4% respectivement pour un béton original de résistance à la compression de 24, 41 et 51 MPa.

II.6.6 Résistance aux sulfates

La norme américaine ASTM C-33 limite le pourcentage de perte de résistance due à la présence des sulfates de magnésium pour les gros granulats à 18% et à 15% pour les agrégats fins, et le pourcentage de sulfate de sodium de 10 et 12% respectivement. Cependant, des travaux menés au Japon [5], ont montré que la perte était de 18.4 à 58.9% pour les gros agrégats recyclés issus de 15 bétons originaux de différente résistance à la compression et concassé dans différents concasseurs. D'autres chercheurs ont trouvés des pertes moins importantes, cette perte de résistance aux sulfates de magnésium était de 0.9 à 2% pour les gros agrégats et de 6.8 à 8.8 % pour les agrégats fins, issus de béton original à base de gros et fins agrégats de perte de 3.9 et 7% respectivement [30].

II.6.7 Homogénéité et contamination

Les granulats des bétons concassés sont composés essentiellement de deux éléments de natures très différentes : des granulats entrant dans la fabrication des bétons (alluvions silico - calcaires) et des grains de mortier concassé. De plus, malgré les éliminations intervenant dans la chaîne de concassage criblage, il reste quelques déchets mélangés aux granulats élaboré comme le bitume, le gypse, les substances organiques, des chlorures, des métaux, du verre, des particules endommagé par le feu ou les intempéries, etc. Ces impuretés sont nuisibles à la qualité du béton.

Le projet de normes japonaises impose les limites suivantes sur la présence de ces impuretés dans les granulats recyclés [Tableau 2.5].

Tableau 2.5 Les quantités maximums d'impuretés nuisibles permises dans les agrégats de béton recyclé selon le projet de normes japonaises [5].

Type d'agrégats	Plâtre, morceaux d'argile et d'autres impuretés de densité < 1950 kg/m ³	Asphalte, plastique, papier, tissus, bois et d'autres impuretés de densité < 1200 kg/m ³
Gros agrégats recyclés	10 kg/m ³	2 kg/m ³
Agrégats recyclés fins	10 kg/m ³	2 kg/m ³

La présence d'asphalte dans les agrégats recyclés réduit la résistance du béton d'agrégats recyclés. Le tableau suivant (Tableau 2.6), résume l'effet de présence du bitume sur la résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés.

Tableau 2.6 Réduction de la résistance à la compression du béton d'agrégats recyclés en fonction du pourcentage d'ajout en sulfate [4, 30].

Pourcentage de béton bitumineux en volume dans les gros agrégats recyclés	Pourcentage de béton bitumineux en volume dans les agrégats recyclés fins	Résistance à la compression (MPa)	Réduction de la résistance à la compression (%)
0	0	49.10	0
17	0	13.90	10.6
21.7	0	41.30	15.8
30.8	0	41.30	15.8
30.8	30.8	31.10	36.6
100	100	11.00	77.5

Economiquement, il est avantageux de recycler les bétons bitumineux séparément des autres bétons dans des équipements d'asphalte pour se débarrasser du gros pourcentage d'asphalte possible. Il n'est donc pas avantageux d'utiliser de béton bitumineux recyclé pour la production du béton.

Le contenu en sulfate dans les agrégats ordinaires est limité généralement à 0.5 % par poids des deux fractions d'agrégats (gros et fins) ou à 4% par poids de ciment. Il est donc suggéré d'appliquer les mêmes limites aux agrégats recyclés. De plus, il est recommandé d'utiliser du ciment portland résistant aux sulfates pour la production de béton d'agrégats recyclés où les agrégats recyclés sont contaminés par du gypse. Car la présence de gypse peut conduire à un gonflement (expansion de sulfate).

Concernant les matières organiques comme le bois, le tissu, le papier, le plastique, la peinture, il est raisonnable de limiter à 2 kg/m^3 (0.15% de particules organiques par poids d'agrégats) le contenu de particules dont la masse volumique est inférieure à 1200 kg/m^3 . Les chlorures dans le béton armé peuvent conduire à la corrosion des armatures.

Le ACI limite le contenu en chlorure dans le béton ordinaire à :

- 0.06 % pour le béton précontraint ;
- 0.10 % pour le béton armé conventionnel dans un environnement humide exposé au chlorure ;
- 0.15% pour le béton armé conventionnel dans un environnement humide et non exposé au chlorure

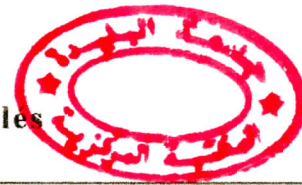
Et ces mêmes limites peuvent être appliquées pour les agrégats recyclés et béton d'agréats recyclés.

L'utilisation de plastifiants entraîneurs d'air et retardateurs de prise n'ont pas d'effet significatif sur l'affaissement (Slump), le quantité d'air, ou le temps de prise du béton d'agréats recyclés frais.

Le béton démolit est fréquemment contaminé par la terre organique ou l'argile. Il n'a y a pas raison de croire que les d'agréats recyclés contaminés par la terre ne présentent aucun effets dans le béton d'agréats recyclés, mais un bon lavage peut éliminer le problème. Les mêmes limites d'impureté pour les agrégats naturels sont recommandées pour les agrégats recyclés.

Les débris de construction comportent généralement une quantité assez considérable des déchets de conduites en fer, de fermes ou de fixations en métal. Cependant, il n'est pas avantageux d'avoir une quantité significative de fer ou d'autres métaux dans la fraction d'agréats recyclés. Ce type de déchets est dangereux en premier lieu sur le matériel de concassage et en second lieu ces débris causent des problèmes néfastes comme la corrosion, le gonflement et la fissuration du béton d'agréats recyclés.

Le béton de démolition est souvent contaminé par les déchets de verre des fenêtres et autres. La présence de ce type de contamination dans les agrégats recyclés prend part dans la réaction alcali-silice, ce qui est dangereux sur le béton d'agréats



recyclés à réaliser. Cependant, il est recommandé de faire une sélection de ce type de contamination avant la démolition car ce dernier est très difficile à s'en débarrasser.

II.6.8 Classification des granulats recyclés selon RILEM

Généralement, les granulats recyclés produits dans les installations de concassage sont de différents types. A titre d'exemple, au Pays-Bas la production jusqu'à 1992 été comme le montre la figure suivante :

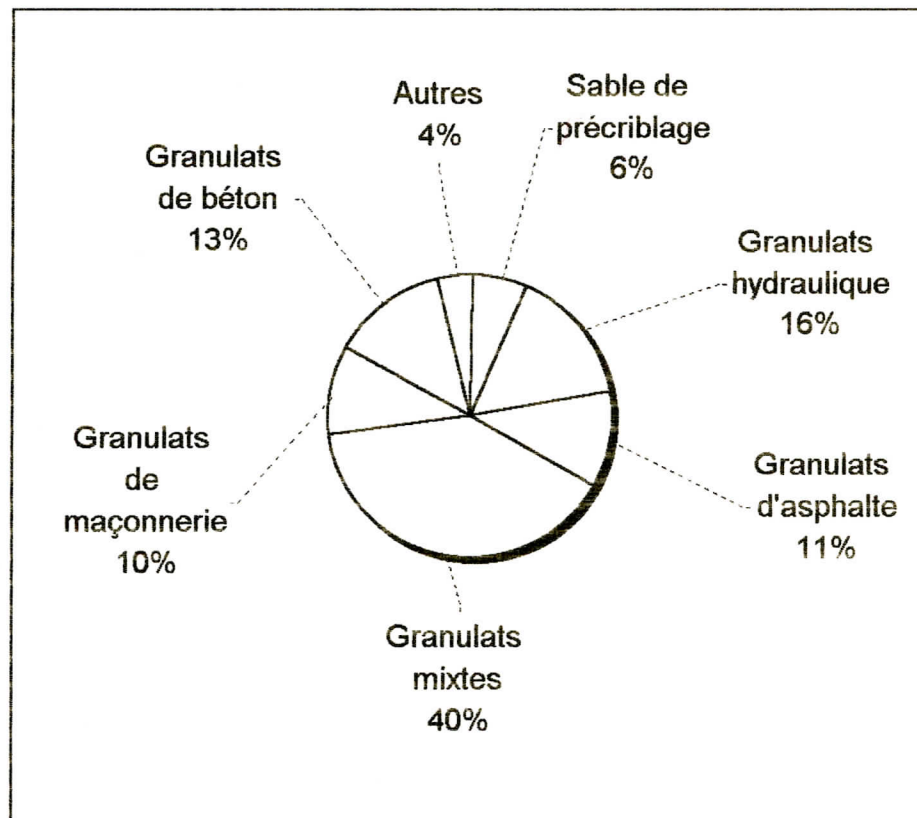


Fig.2.11 Répartition de la production en granulats recyclés au Pays-Bas en 1992 [2]

Parmi les différentes définitions et classifications d'agrégats recyclées, la classification du comité technique (TC 121) de la RILEM lors du 3^{ème} congrès sur la démolition et la réutilisation du béton et de la maçonnerie au Danemark (Odense) 1993 [15], paraît être une des plus convenables pour une application pratique. La RILEM recommandait de classifier les gros granulats recyclés en trois types [Tableau 2.7] dans

chacun serait sujet de limites spéciales en impuretés en plus des limites imposées par les normes européennes accordées comme le montre le tableau suivant :

Tableau 2.7 Composition des différents types d'agrégats recyclés proposés par le RILEM [31, 32].

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

Les limites proposées sur ces granulats sont résumés au tableau 2.8 suivant:

Tableau 2.8 Les différentes limites proposées par le RILEM sur les trois classes du béton recyclés [32].

Exigences mandataires	Type I	Type II	Type III
Densité sèche minimum (kg/m^3)	1800	2200	2400
Absorption d'eau max. (%)	15	5	3
Teneur maximale de matériaux à densité sèche $< 2200 \text{ kg/m}^3$ (%)	-	10	10
Teneur maximale de matériaux à densité sèche $< 1000 \text{ kg/m}^3$ (%)	10	1	1
Teneur maximale on matériaux à densité sèche $< 1200 \text{ kg/m}^3$ (%)	2	0.5	0.5
Teneur maximale on matériaux non minéraux (%)	1	1	1
Teneur maximale on matériaux organiques (%)	0.5	0.5	0.5
Teneur maximale en élément fins ($< 0.80 \text{ mm}$) (%)	3	3	2
Teneur maximal en sable ($< 1 \text{ mm}$) (%)	3	3	3
Teneur maximale en chlorure (%)	0.06	0.06	0.06
Teneur maximale en sulfate (%)	1	1	1
Teneur maximale en matières étrangères (verre, métal, ... etc.) (%)	5	1	1

Les classes de résistance du béton à base des granulats recyclés recommandés par la RILEM, sont résumés dans le tableau 2.9 suivant:

Tableau 2.9 classe du béton recyclés [32]

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

Aucune limite n'est donnée pour le type III.

Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons d'agréats naturels proposé par la RILEM, sont comme suit :

Tableau 2.10 Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons ordinaire [32].

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

II.7 Propriétés et dosage du béton frais à base d'agrégats recyclés

II.7.1 Ouvrabilité

La masse du mortier d'un béton ancien qui recouvre la surface des gros agrégats recyclés et leurs angularités, sont deux facteurs critiques qui influencent considérablement la consistance du béton recyclé. Toute fois, la confection, la mise en œuvre et l'aspect des bétons de recyclage sont très comparables à ceux des bétons ordinaires.

Logiquement, compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces agrégats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui du béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont trouvé ~~que~~ une ouvrabilité comparable à celle du béton d'agrégats naturels si uniquement les gros granulats sont recyclés. Par contre, l'introduction de granulats fins recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité.

Selon certains travaux [5, 26], la demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5% pour le de gros granulats recyclés et jusqu'à 15% pour le béton à base de gros et fins granulats recyclés.

Une augmentation de 21% en eau de gâchage est reportée pour un béton à gros et fins granulats recyclés dont l'absorption est de 25% [33]. Si les gros et fins agrégats recyclés sont de la brique cuite, la demande en eau supplémentaire peut atteindre 20% [34, 35, 36]

II.7.2 La Compacité

Les masses volumiques des bétons recyclés sont toujours nettement plus basses que celles des bétons témoins [37], ce qui est logique puisque les granulats de base

sont plus légers ; il en résulte que les bétons recyclés ont des performances physiques et mécaniques différentes de celles des bétons originaux.

Plusieurs chercheurs [4, 34] affirment que la densité du béton recyclé à l'état frais est inférieure d'environ 15% et que le pourcentage d'air occlus augmente jusqu'à 0.6% par rapport au béton d'agréats naturels.

II.8 Propriétés mécaniques du béton durci

II.8.1 Résistance à la compression

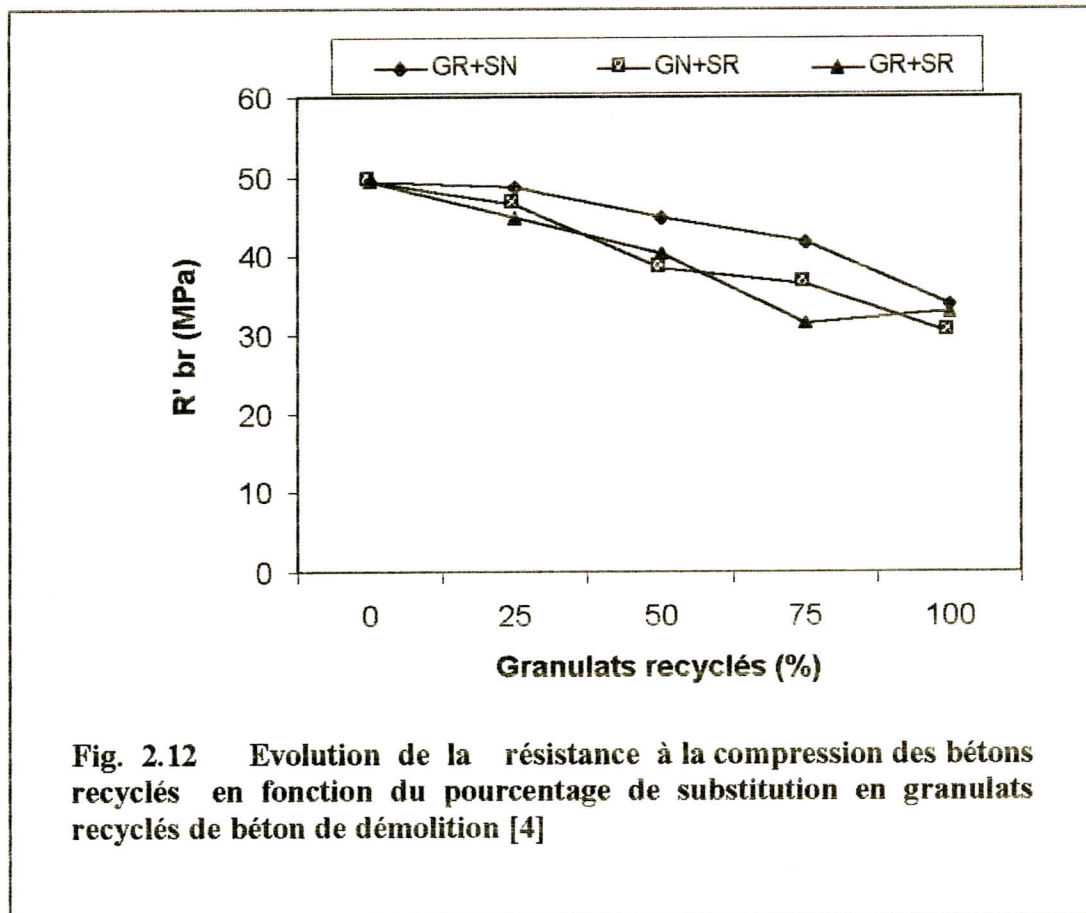
Il est connu que le béton à base d'agréats recyclés a une résistance à la compression plus faible que celle du béton témoin fabriqué avec des granulats naturels et ayant la même ouvrabilité. En général, il y a une perte de résistance de 20 à 40% par rapport à un béton à granulats naturels [5, 26, 33].

Selon d'autres chercheurs [5, 26, 33, 38] et pour une même plasticité du béton frais, la résistance à la compression du béton recyclé à base de gros agréats recyclés et sable naturel est inférieure de l'ordre de 14 à 30% que celle du béton original. Cependant lorsqu'il s'agit de béton à base de granulats fins recyclés, la résistance à la compression ne chute que de 15 à 25% par rapport à celle du béton original, et lorsque le béton recyclé est composé des deux types d'agréats recyclés (gros et fins), la chute de résistance à la compression arrivera jusqu'à 40% par rapport à celle du béton témoin comme le montre la figure suivante [Fig. 2.12].

On désignera par :

GN : Gravier naturel SN : Sable naturel

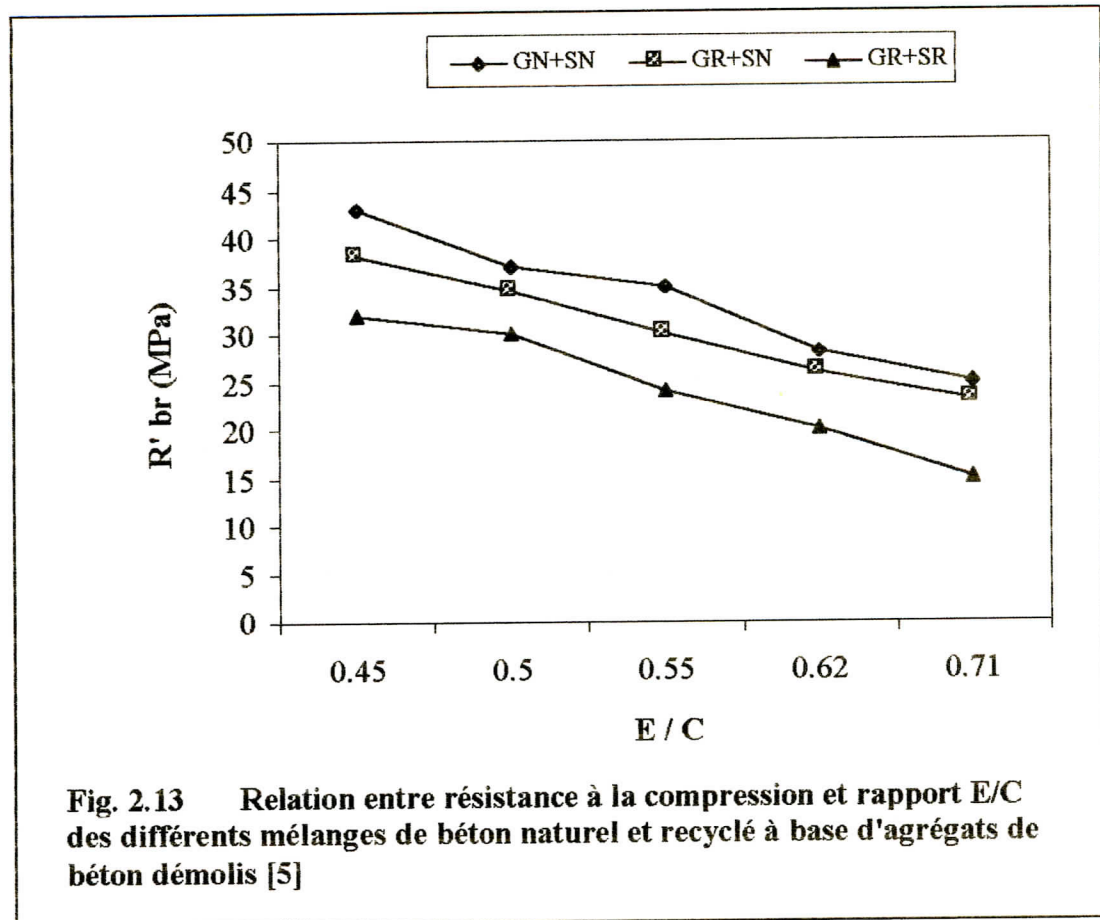
GR : Gravier recyclé SR : Sable recyclé



Les chutes de résistances rapportées par Coquillat [37] sur le béton de gros granulats recyclés était de 30% pour béton de brique et béton de parpaings, 10% pour béton de béton démolit et 20% pour béton de brique et béton démolit.

La résistance à la compression du béton recyclé dépend en général de la résistance du béton original et de son rapport E/C . lorsque le rapport E/C du béton original est inférieur ou égal à celui du béton recyclé, la résistance à la compression de ce dernier devient comparable à celle du béton original.

La résistance à l'abrasion et l'absorption d'eau des agrégats recyclés influent aussi sur la chute de résistance du béton de gros agrégats recyclés par rapport au béton original et cela à cause de la mauvaise adhérence entre le nouveau mortier et les granulats recyclés [26].



II.8.2 Résistance à la traction

Comme pour la compression, la résistance à la traction du béton recyclé est plus faible que celle du béton d'agréats naturels ayant la même ouvrabilité. La résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage d'agréats recyclés (gros et fins) intervenant dans la composition du béton et chute d'environ 10% par rapport à celle du béton original lorsqu'on n'utilise que les gros agrégats recyclés et environ 20% lorsqu'on utilise des gros et des fins agrégats recyclés [33](voir fig.2.14).

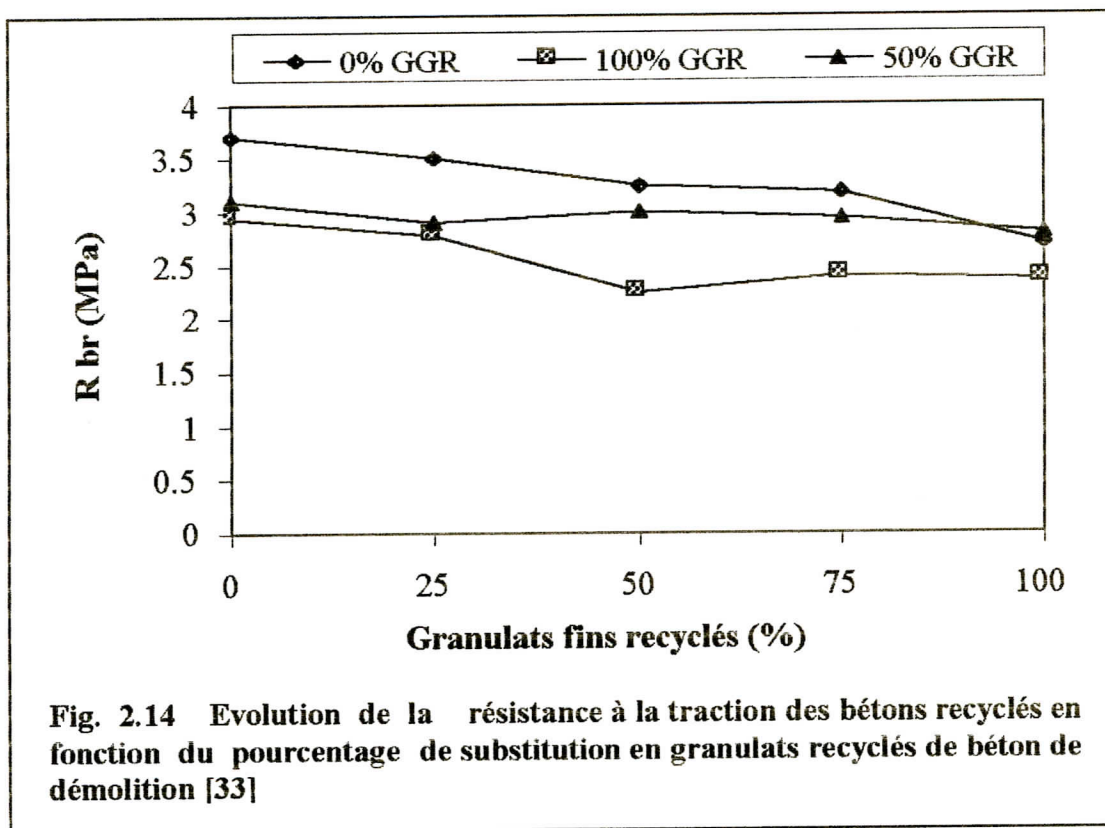
La résistance à la traction par flexion du béton d'agréats recyclés dépend en général du rapport E/C et de la période de malaxage [39]. La nature des agrégats

recyclés (béton de structure ou de chaussée) influe considérablement sur le taux de chute de cette résistance par rapport à celle du béton ordinaire. La résistance à la traction du béton recyclé est comme celle du béton ordinaire de l'ordre de 1/5 à 1/8 par rapport à celle de la compression [5, 26]. Le ACI recommande la relation suivante :

$$R_t = 0.62 (R_c)^{1/2} \quad (\text{code ACI point 318}^5 \text{ [39]}) \quad (3)$$

R_t : résistance à la traction

R_c : résistance à la compression

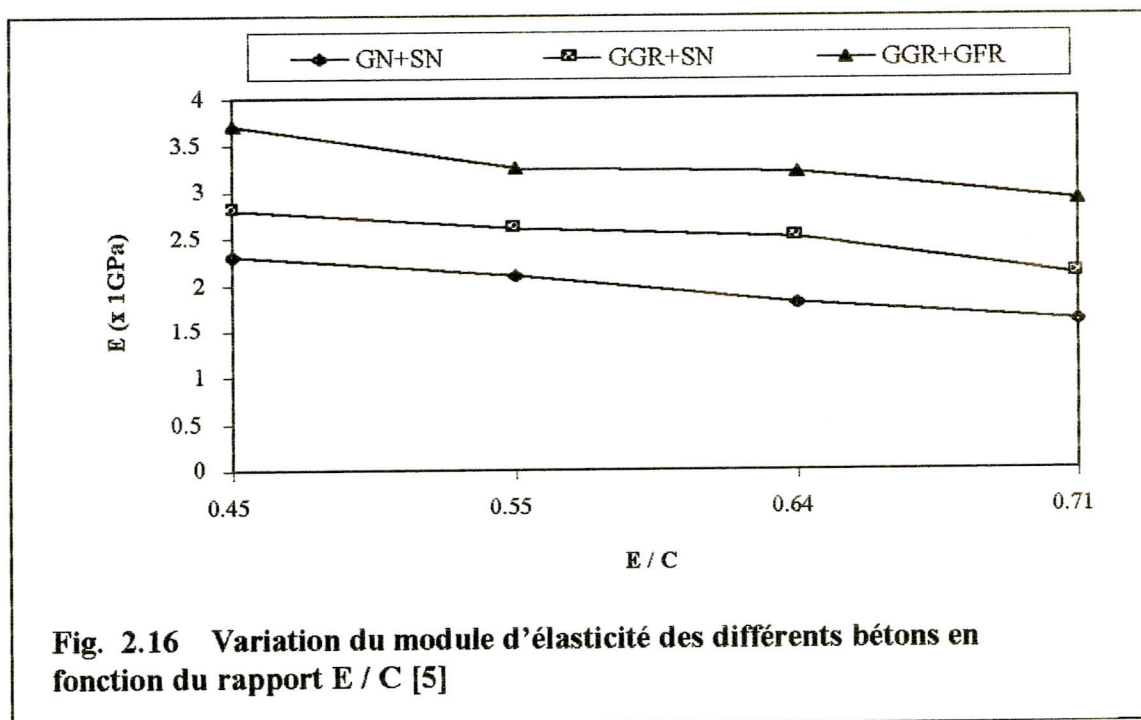
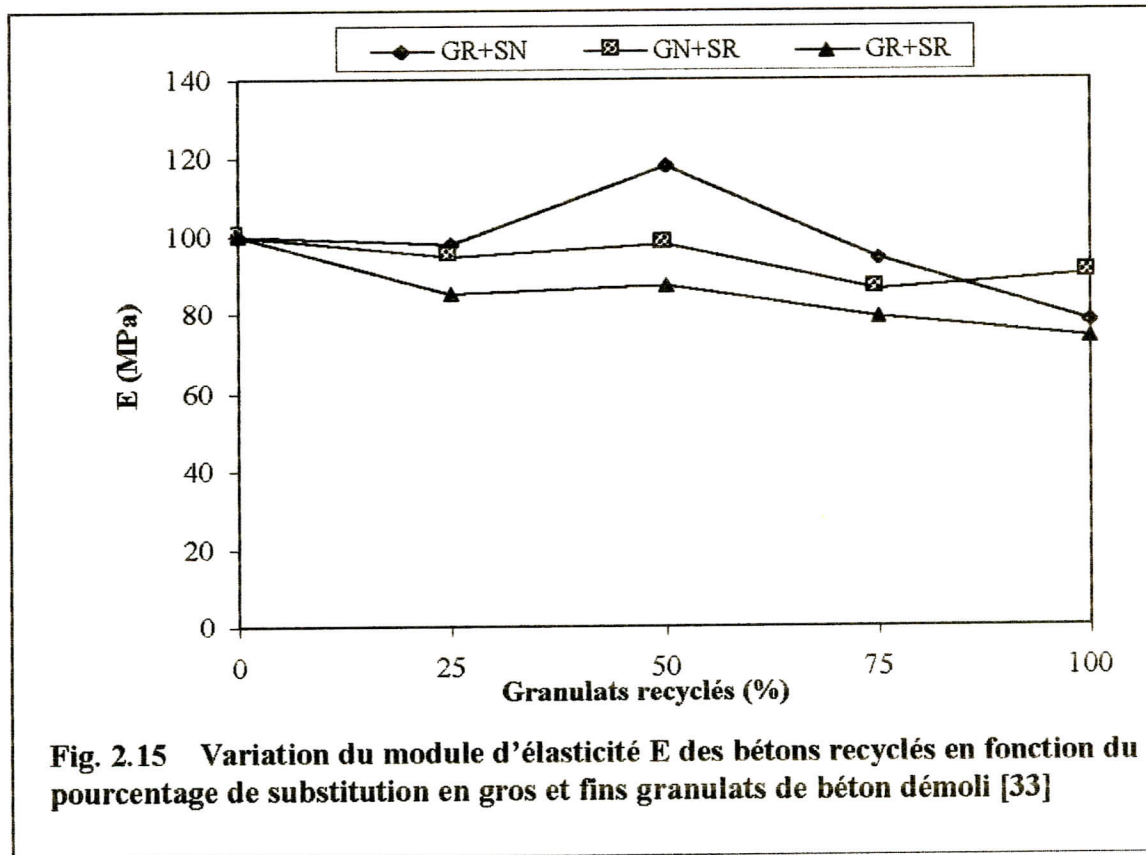


II.8.3 Le Module d'élasticité

Les bétons de recyclage, compte tenu de leur légèreté, ont toujours des modules d'élasticité inférieures de 20 à 40% que celui d'un béton comparable comportant des granulats naturels [Fig.2.15 et Fig. 2.16].

Les modules d'élasticités trouvés par Coquillat [37], sont de 29 GPa pour le béton recyclé de granulats de béton démolis, de 25 GPa pour le béton de brique et de

24 GPa pour le béton de brique et béton démolis en comparaison à un module d'élasticité de 40 GPa pour le béton témoin.

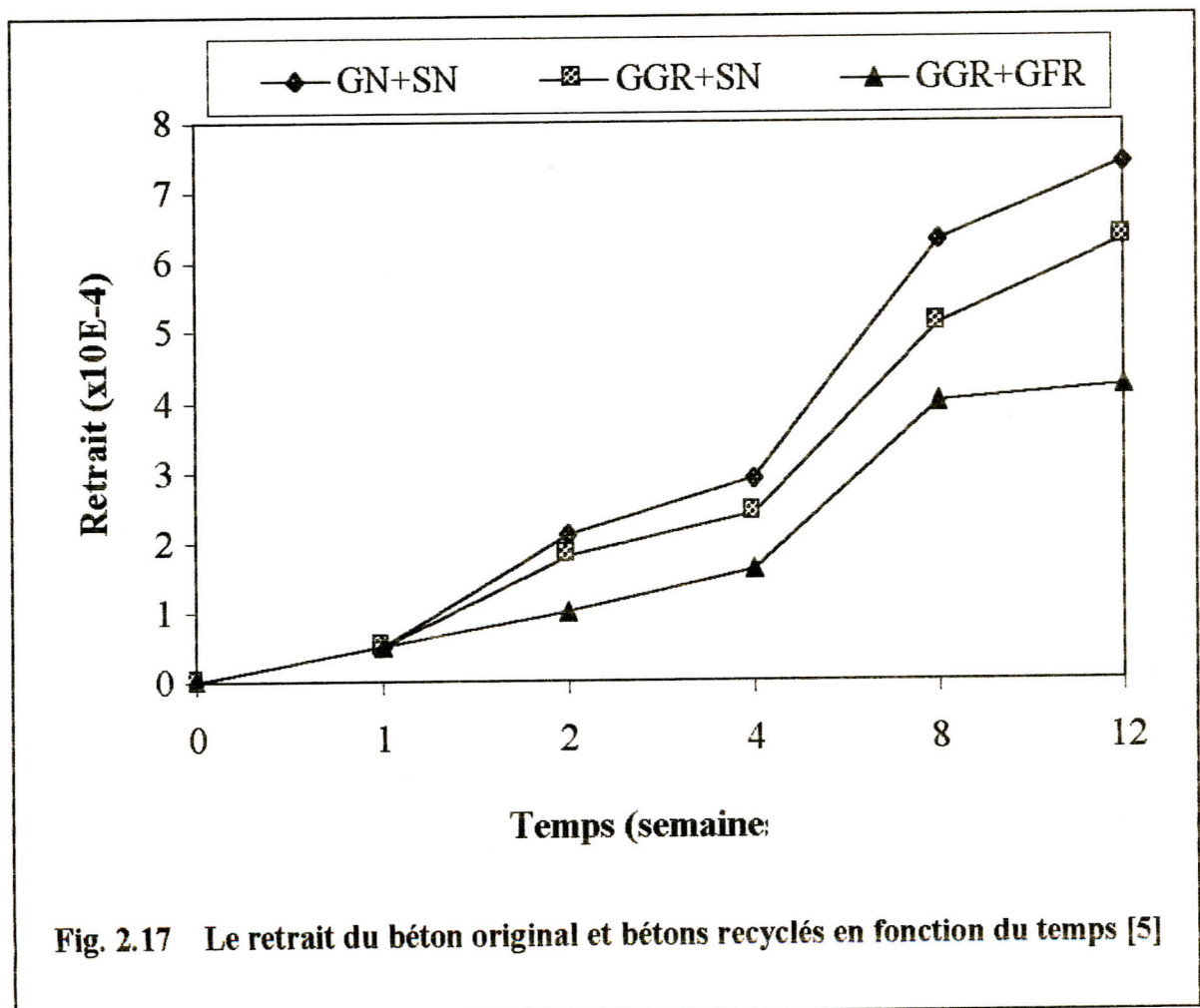


II.9 Propriétés physiques

II.9.1 Le retrait plastique

Les retraits en air sec des bétons recyclés sont toujours nettement plus importants que ceux des bétons témoins (de granulats naturels). L'augmentation du retrait est de l'ordre de 10 à 30% pour les bétons de concassé de béton démolé, de 40 à 60% pour les bétons de brique concassée et arrive jusqu'à 80% pour un béton de mélange concassée de brique et béton démolé [1, 26, 37] (voir fig. 2.19).

A ouvrabilité constante, d'autres chercheurs [5, 26, 378, 4] ont trouvé que le retrait plastique du béton de gros agrégats recyclés est supérieur de 50% que celui du béton original et de l'ordre de 70% pour le béton de gros et fins agrégats recyclés.



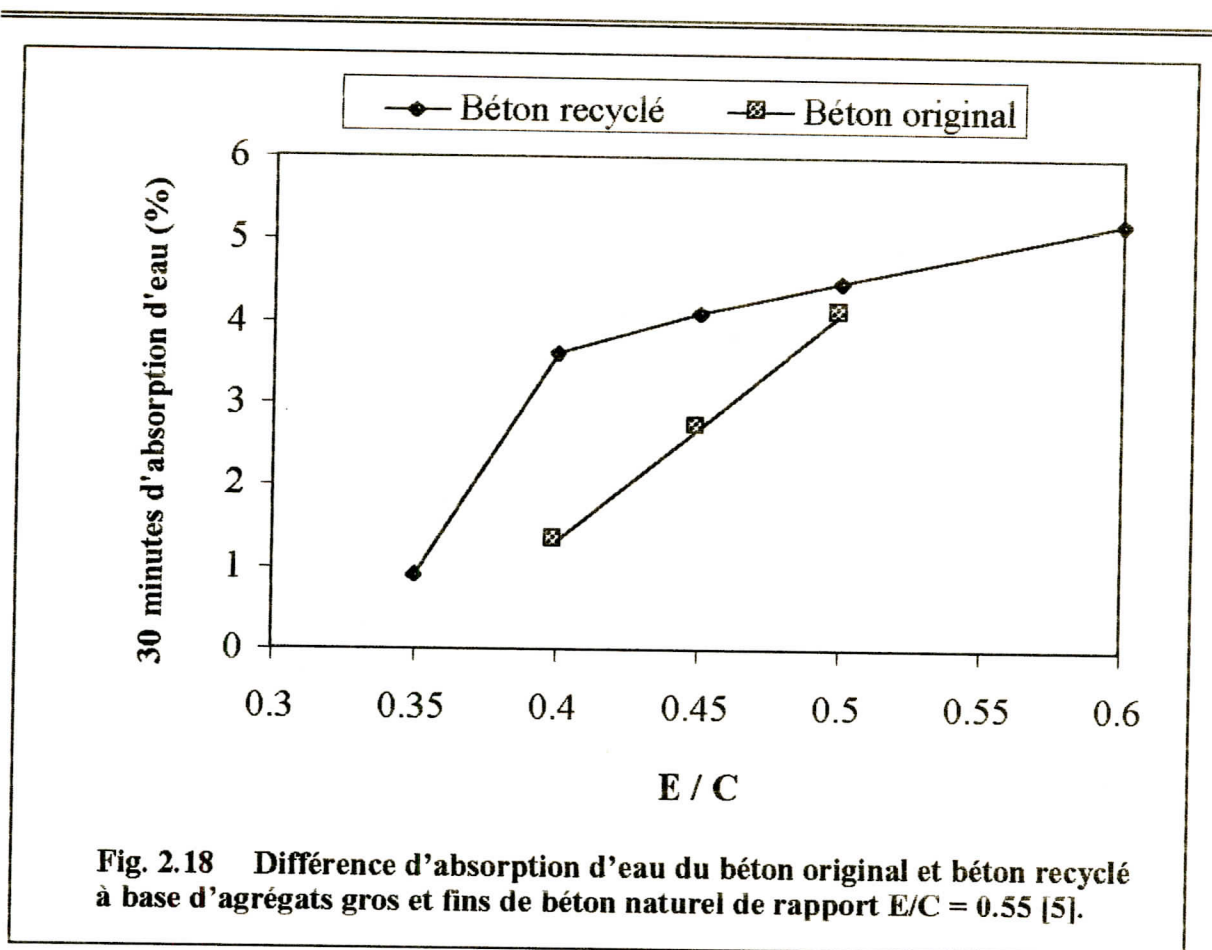
II.9.2 Le Fluage

La présence d'ancien mortier qui recouvre à 50% les agrégats recyclés, augmente le fluage du béton recyclé par rapport au béton original. Selon plusieurs chercheurs, cette augmentation de fluage du béton à base de gros et fins agrégats recyclés a été trouvée de l'ordre de 30 à 60% supérieure à celui du béton original d'agréats naturels et qu'elle plus importante lorsque les gros et fins agrégats sont utilisés [5].

II.9.3 La Perméabilité et l'absorption d'eau

L'introduction de matériaux recyclés dans la composition du béton, provoque une légère diminution de la densité accompagnée d'une augmentation de la porosité et de la perméabilité entraînant des conséquences néfastes sur la durabilité du béton.

L'augmentation de la perméabilité et de l'absorption de l'eau du béton recyclé par rapport au béton d'agréats naturels, est due en générale à la présence du mortier d'ancien béton collé aux granulats recyclés et à la résistance du béton recyclé [Fig.2.18]. Le béton original à résistance à la compression élevé, produit toujours des agrégats recyclés nécessitants un rapport E/C assez comparable au béton à granulats naturels, et par conséquent un degré d'absorption d'eau moins important.



II.9.4 Le Gel – dégel

La résistance au gel et dégel du béton recyclé est en général comparable à celle du béton d'agrégats naturels, à condition que les deux bétons à l'état frais, possèdent des coefficients d'air occlus comparables [5].

Une réduction en masse du béton recyclé d'environ 1% au plus par rapport à celle du béton original d'agrégats naturels a été rapportée par certains travaux [40].

Chapitre 03

Matériaux, Expérimentation et Essais

III. MATERIAUX, EXPERIMENTATION ET ESSAIS

III.1. Matériaux utilisés

III.1.1. Le ciment

Le ciment utilisé est un CPA 35 de la cimenterie de Meftah. Les propriétés physico-chimiques ont été étudiées conformément aux normes françaises AFNOR.

A) Composition chimique et minéralogique

L'analyse chimique du ciment a été effectuée par la méthode classique au laboratoire des ponts et chaussé (LTPC) de H.Dey (Alger) selon la norme NF P 15-472 (mars 1990) [41]. Les moyens dont dispose le laboratoire de LTPC ne permettent pas de faire une analyse minéralogique du ciment. Pour cela elle a été calculée par la méthode de Bogue [23].

$$C_3S = 4.071 (CaO) - [7.6 (SiO_2) + 6.718(Al_2O_3) + 1.430(Fe_2O_3) + 2.852(SO_3)]$$

$$C_2S = 2.867(SiO_2) - 0.7544(C_3S)$$

$$C_3A = 2.650 (Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.043 Fe_2O_3$$

Les résultats obtenus semblent d'être acceptables et caractérisent les propriétés du ciment portland ordinaire. Ces résultats sont résumés dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

Elément	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
%	21.89	1.70	6.30	64.46	2.57	0.20
	Pertes au Feu	B.C.P	CaO Libre	Insolubles	CaCO ₃	
	1.99	99.11	0.056	5.93.	3.57	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
	50.71	24.50	13.82	5.17		

B) Essais physiques

Le tableau 3.2 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé :

❖ La finesse

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme NF P 15-476 (mars 1990) [42].

La surface spécifique de Blaine est donnée par la formule suivante :

$$SSB = \frac{KM}{m} \sqrt{t} \quad (3.1)$$

t = temps de passage de l'air dans la poudre

K = constante de l'appareil (K = 21.66)

M = coefficient qui dépend de la température et de l'épaisseur de la couche de la poudre.

❖ La consistance normale

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme NF P 15-431 (mars 1990) [43].

❖ Le temps de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P 15-473 (mars 1990) [44].

❖ Essai d'expansion à chaud

Le but principal de cet essai est de déterminer de quelle manière le mortier fabriqué, réagit sous l'effet de la magnésie qui est un corps susceptible de provoquer son expansion. L'essai est effectué sur mortier à l'aide des aiguilles de Le Chaletier selon la norme NF P 15-432 [45]. D'après le tableau 3.2, il semble que le ciment utilisé est conforme aux limites préconisées par les normes.

Tableau 3.2 Essais physiques sur ciment

Essais	Finesse SSB (cm ² /g)	Consistance normale (%)	Temps de début de prise (heures)	Temps de fin de prise (heures)	Expansion à chaud (mm)
Résultat	3160	26	2h13'	3h08'	0.5
Norme	2700 ÷ 3500	/	≥ 1h30'	/	≤ 3

C) Essais mécaniques sur le ciment

Les essais ont été effectués conformément à la norme NF P 15-471 (mars 1990)[46] sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge

Ages (jours)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
2	18.5	3.1
7	28.5	6.1
14	39.3	7.0
28	41.3	7.2

III.1.2. Les granulats (naturels et recyclés)

Pour le besoin de l'étude, on a jugé important d'utiliser trois types de granulats (Photo 1) :

- Les granulats de types 0 qui sont le gravier naturel (GN) 5/15 et le sable naturel (SN) 0/4 provenant de BOUGHAZOUL.
- Les granulats de type I qui sont le gravier recyclé (GBC) 5/15 et le sable recyclé (SBC) 0/5 produits par le concassage de la brique cuite de la briqueterie de Médéa.
- Les granulats de type II qui sont le gravier recyclé (GR) 5/15 et le sable recyclé (SR) 0/5 produits par le concassage de petites dalles de (1 x 1 x 0.1m) de béton original (Photo 2) composé de gravier et de sable de type 0 fabriquées en laboratoire.

Le concassage des deux types de granulats I et II est réalisé par un petit concasseur à marteau (photo 3) du laboratoire central des ponts et chaussées de H.dey à Alger.

Les essais effectués sur granulats, ont été réalisés aux laboratoires de CNERIB (Souidania), à l'LTPC d'Alger, et aussi à la SETAM (Médéa).

III.1.2.1. Granulométrie et forme de grains

L'étude granulométrie a été réalisée conformément à la norme NF P 18-560 (sept 1990) [47] où le gravier et le sable passent à travers une série de maille décroissante dont on pèse le refus pour chaque tamis. Les courbes granulométriques des gros et

fins granulats utilisés sont présentés dans les figures 3.1 et 3.2. Nous remarquons d'après ces courbes granulométriques que le sable recyclé de béton ou de brique concassée est un sable grossier et par conséquent son pourcentage de substitution dans le béton à réalisé risque de produire un phénomène de ségrégation pour ce dernier.

Le module de finesse est de 2.71, 3.25 et 3.91 respectivement pour le sable naturel (SN), le sable recyclé (SR) et le sable recyclé (SBC). On remarque que les différents sables utilisés sont acceptable pour la confection d'un béton hydraulique sauf que le sable de béton concassé (SR) et le sable de brique concassée (SBC) sont plus ou moins gros et peuvent entraîner par la suite un risque de ségrégation du béton. La forme de grains est plus ou moins ronde (roulé) pour le gravier de béton concassé et angulaire aiguë avec environ 30% (en poids) en forme de bâtonnés pour le gravier de brique concassée. La texture des particules de gros granulats recyclés de béton concassé est englobée par une couche non négligeable de mortier de ciment d'ancien béton.

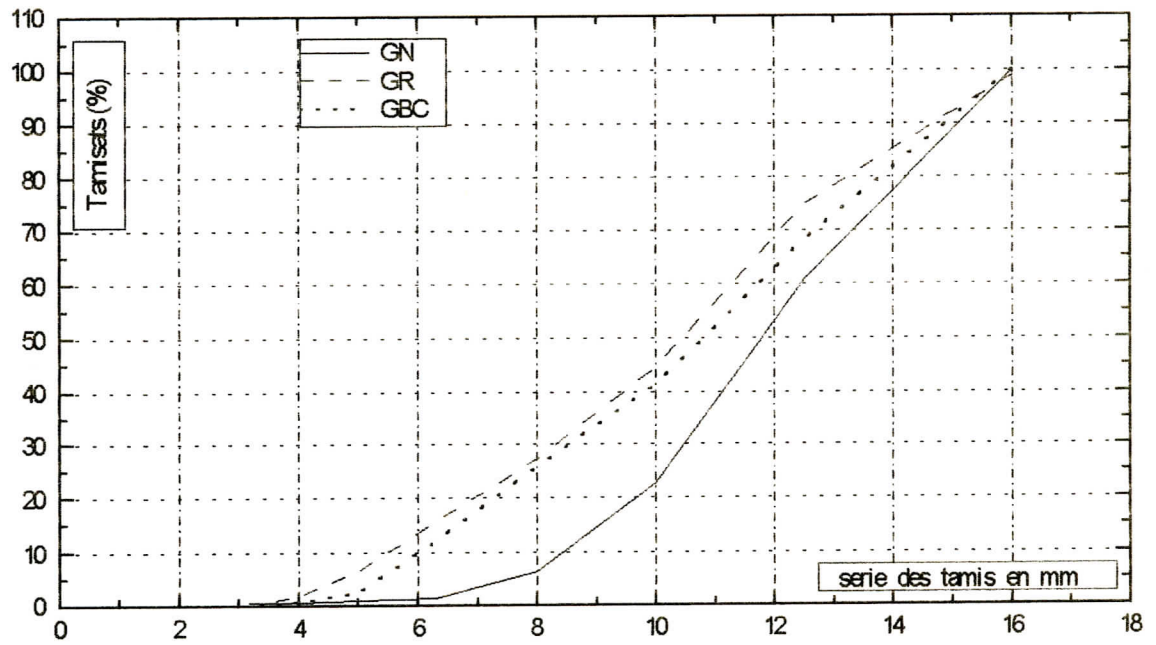


Fig. 3.1 Analyse granulométrique des gros granulats

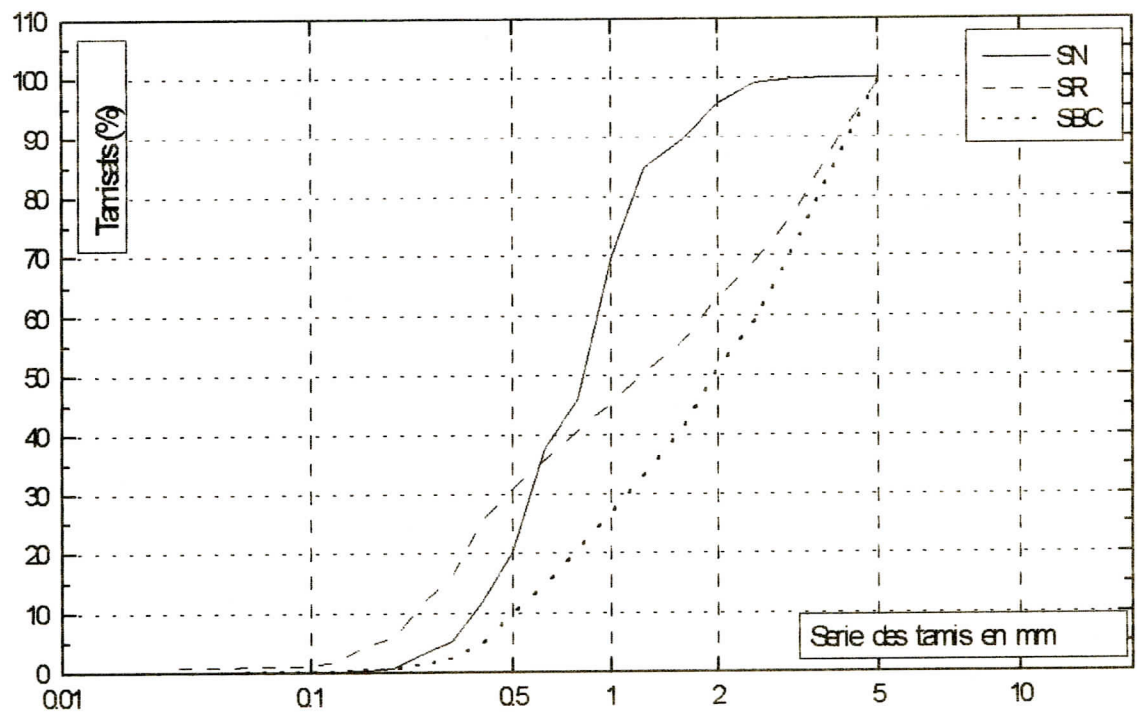


Fig. 3.2 Analyse granulométrique des granulats fins

III.1.2.2. Masse volumique

Les masses volumiques apparente et spécifique des différents granulats utilisés sont calculées d'après la norme NF P 18-554 et 555 (déc. 1990) [48, 49] et les résultats sont résumés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Masse volumique des granulats utilisés

	GN	SN	GR	SR	GBC	SBC
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1695	1847	1165	1290	1924	1010
Masse volumique spécifique (kg/m ³)	2822	2987	2505	2533	2232	2496

On remarque que la masse volumique des granulats recyclés est nettement plus faible que celle des granulats naturels, ce qui est conforme avec les résultats trouvés par d'autres chercheurs [5, 34, 37] où en moyenne une chute de 10% de la masse volumique des granulats de béton concassé et de 18% pour les granulats de brique concassée par rapport au granulats originaux a été observée. Cette chute de masse volumique des agrégats de béton concassé est relativement due à la masse d'ancien mortier qui recouvre les particules et principalement à sa faible densité. Pour les granulats de la brique concassée cette chute est encore plus importante et ses granulats peuvent ainsi être considérés comme granulats légers.

III.1.2.3. Absorption d'eau

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 18-554 (déc. 1990) [48] qui exige une valeur limitée d'absorption de 5.5%. Les résultats obtenus de cet essai sont présentés dans le tableau 3.5:

Tableau 3.5 Pourcentages d'absorption d'eau des granulats utilisés

	GN	SN	GR	SR	GBC	SBC
Abs (%)	1.5	1	3.5	5	11.5	14
Abs(%) selon [26]	0.8	1.3	5.4	7.2	-	-
Abs(%) selon [5]	0.8	8.3	3.6	12.1	-	-

Abs : Absorption d'eau

Nous remarquons que les granulats recyclés absorbent beaucoup plus d'eau que les granulats naturels. Cela est dû à la présence d'ancien mortier dans les granulats de béton concassé. Par contre, il semble que pour les granulats de brique cela est dû à la porosité élevée de ces derniers, et par conséquent ces granulats doivent être pré-mouillés. Les valeurs d'absorption d'eau des granulats de béton concassé restent tolérés vis à vis la limite exigée par la norme. Des valeurs comparables ont été reportées par d'autres chercheurs [Tableau 3.5].

III.1.2.4. Propreté des gros granulats (Impureté)

Nous entendons par propreté, le pourcentage de vase, de limon, d'argile et de matières solubles et non pas les impuretés telles que le charbon, le mica, le gypse, les bouts de bois et autres qui sont absolument proscrites pour un béton de qualité.

Le pourcentage des impuretés à ne pas dépasser est fixé à 3 % selon la norme NF P 18-591(sep 1990) [50]. Les résultats obtenus de cet essai sont les suivants :

Tableau 3.6 Pourcentage d'impureté des gros granulats utilisés

Types de granulats	GN	GR	GBC
% d'impureté	3.31	4.2	0.79

Pour le gravier naturel (GN), les impuretés sont en général un mélange de poussière, de petites particules d'argiles et des insolubles. Par contre celles du gravier

recyclé de béton concassé (GR), ce sont en totalité une masse d'ancien mortier de béton original et de la poussière issue du concassage. Par contre, pour le gravier de la brique concassée (GBC) ce n'est que de la poussière due au concassage de la brique collée aux particules des gros granulats ce qui explique le pourcentage faible des impuretés.

III.1.2.5. Résistance mécanique : dureté (Los-Angeles)

La dureté des granulats utilisés a été effectuée par la mesure de dureté par l'essai de dureté (Los-Angeles) conformément à la norme NF P 18-573 (déc. 1990) [51] qui stipule la valeur spécifique limite de 40% à ne pas dépasser [23], et l'essai Micro-Deval d'usure selon la norme NF P 18-572 (déc. 1990) [52]. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.7:

Tableau 3.7 Caractéristiques mécaniques

	GN		GR		GBC	
Los-Angeles (%)	36.3		50.4		31.6	
Usure	Humide	sec	humide	sec	humide	sec
Micro-Deval (%)	39.6	19.0	56.6	23.4	34.2	13.0

On remarque une chute de dureté d'environ 30% par rapport aux granulats naturels. Ces résultats confirment les résultats d'autres chercheurs [5, 26, 37, 40] où la chute était de 45%. Il faut noter que la patte de ciment d'ancien mortier qui recouvre la surface des granulats recyclés peuvent être à l'origine de cette différence de dureté entre ces granulats et les granulats naturels.

III.1.2.6. Equivalent du sable (propreté)

Le but de cet essai est de mettre en évidence la propreté du sable. L'essai a été fait conformément à la norme NF P 18-598 (oct. 1991) [53] et les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau 3.8 :

Tableau 3.8 Pourcentage d'impuretés dans les granulats fins

	SN	SR	SBC	Critères de la norme
Equivalent de sable (ESP)	69.29	78.05	84.02	≥ 70 (65 et 60 pour sable concassé ou broyé)

On remarque une augmentation de l'équivalent de sable des bétons recyclés de 10 à 15% respectivement pour les sables (SR) et (SBC) par rapport à celui du sable naturel, ceci est due sans doute à la poussière de concassage collée aux particules de grains recyclés. Ces résultats confirment celles d'autres chercheurs [5, 36, 40] où l'augmentation était de 10% pour les sables recyclés de béton démolis et de 18 à 20% pour les sables recyclés de la brique concassée.

III.1.2.7. Compacité et porosité des granulats fins

La compacité est le volume plein du matériau sur le volume apparent. Par contre la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité (C). $P = 1 - C$. L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-555 (déc. 1990) [49] et consiste à mettre en évidence le pourcentage de porosité des sables utilisés. Le tableau 3.9 résume les résultats trouvés par l'essai :

Tableau 3.9 Compacité et porosité des granulats recyclés

	SN	SR	SBC
Compacité (%) $c = \frac{MVA}{MS}$	61.18	50.92	40.46
Porosité (%) : $P = 1 - C$	38.82	49.08	59.54

MVA : Masse volumique apparente
MS : Masse volumique spécifique

La diminution de compacité par rapport au sable naturel est de l'ordre de 18%, pour le sable de béton concassé (SR) et de l'ordre de 34% pour le sable de la brique concassée (SBC).

La compacité du sable pour béton hydraulique selon Dreux [23] doit être entre 60 et 70%. Les résultats ci dessous montrent que les sables recyclés (SR et SBC) sont assez peu compacts et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au sable naturel ce qui peut engendrer une ségrégation du béton.

III.1.2.8. Analyse chimique des granulats

Le but principal de l'analyse chimique des granulats, est la recherche des matières nuisibles à la qualité du béton. Le tableau 3.10 résume les différents résultats de l'analyse chimique des granulats utilisés :

Tableau 3.10 Analyse chimique des granulats utilisés

		Agrégats de béton recyclé			
Constituants (%)		GN	SN	GR	SR
		5/15	0/5	5/15	0/5
C O M P O S I T I O N	SiO ₂	40.26	68.58	40.26	48.20
	Oxyde de fer et d'Alumine (R ₂ O ₃)	1.10	4.00	6.17	7.17
	Gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	trace	trace	2.06	1.08
	Chlorure (NaCl)	0.12	0.35	0.12	0.12
	Perte au feu (PF)	25.57	12.70	22.64	19.72
	Eau de constituant (H ₂ O)	0.43	2.10	0.64	0.87
	Carbonates (Ca CO ₃)	57.14	24.10	50.00	42.85
	Anhydride carbonique (CO ₂)	25.14	10.60	22.00	18.85
Bilan chimique (%)		99.05	99.13	99.25	101.1

Agrégats de Brique concassée		
	GBC	
C O M P O S I T I O N	Silice (SiO ₂)	55.74
	Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	7.20
	Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	14.00
	Chaux totale (Ca O)	16.80
	Magnésie (Mg O)	2.69
	Anhydride sulfurique(SO ₃)	2.57
	Perte au feu à 1050° c (PF)	0.83
	Carbonates (Ca O ₃)	0.89
	Anhydride carbonique (CO ₂)	0.39
	Chlorure (Na cl)	0.12
	Insolubles	56.00
<i>Bilan chimique (%)</i>		99.95

Les résultats de cette analyse chimique n'ont décelé aucune matière. Les pourcentages des constituants sont normales hormis celui du sulfate est en excès dans les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, cela est dû probablement à l'enduit d'ancien béton qui englobe toute la surface des granulats recyclés.

III.1.2.9. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé pour la confection des différents bétons est l'eau potable du robinet exempt d'impuretés.

III.2. La composition du béton

La méthode de Dreux Goriss'' appliquée au béton où le diamètre maximal des granulats est de 20 mm a été utilisée pour le calcul de la composition du béton à base d'agrégats naturels ou recyclés. Pour le béton d'agrégats naturels, un Slump de 60 à 90 mm et une résistance de 25 MPa ont été ciblés.

Pour la confection des éprouvettes, les essais de correction ont décelé la composition optimale suivante (Tableau 3.11) :

Tableau 3.11 Composition optimale d'un m³ de béton pour la confection des éprouvettes

Constituants	Poids (kg)	Volume (l)
Gravier 5/15	1119	245
Sable 0/5	730	397
Ciment	350	113
Eau	197	197
E / C	0.56	
Slump	70 mm	
La densité théorique du béton frais est de 2396 kg/m ³		

III.3. Confection et cure des éprouvettes

Des moules cubiques (10x10x10 cm) ont été utilisés par les essais de compression, des prismes (7x7x28 cm) et des cylindres (16x32 cm) pour les essais de traction du retrait ainsi que la perméabilité (Photo 4). La confection des éprouvettes est réalisée conformément au modalité des normes NF P 18-404 et 405 (déc. 1981) [54]. La conservation des éprouvettes a été à l'air mais couverts par du polyane afin d'éviter l'évaporation de l'eau de gâchage. Après démoulage des éprouvettes à 24 h, la

conservation se fait dans l'eau (20°C) sauf pour les éprouvettes destinées aux essais de retrait et d'absorption capillaire qui sont conservés à l'air libre (20 à 30°C et 50 à 60% H.R) à l'intérieur du laboratoire.

III.4. Modalité des essais. Programme principal

III.4.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité a été mesurée par le Slump-Test conformément à la norme NF P 18-451 (déc. 1981) [55]. Tous les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité constante pour faciliter la comparaison entre eux.

III.4.2. Essai de rupture par compression

L'essai s'effectue sur machine à compression conformément à la norme NF P 18-406 [56]. La résistance à la compression est déduite par la moyenne d'écrasement de trois éprouvettes cubiques de 10 cm d'arête pour chaque béton et pour chaque âge

III.4.3. Essai de rupture par flexion

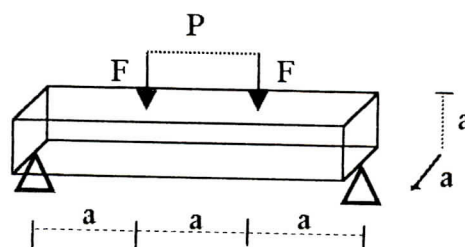
La résistance à la traction est mesurée par la méthode de traction par flexion conformément à la norme NF P 18-407 (déc. 1981) [57]. L'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvette prismatique (7x7x28 cm) à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque âge et pour chaque béton.

$$R_t = \frac{3.6M}{a^3} \text{ (MPa)}; \quad M = P.a \quad ; \quad P = 2F \quad (3.2)$$

P : la charge de rupture (en Newtons)

a : le côté de la base en mm

R_t : résistance à la traction en MPa



III.4.4. Essai de retrait

En l'absence de tout charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les granulats recyclés absorbent une quantité importante d'eau de gâchage provoquant ainsi des retraits importants lors du durcissement ; d'où l'intérêt de l'étude du retrait.

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) conformément à la norme NF P 18-432 [58]. Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un rétractomètre (photo 5) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment. La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C, et une humidité relative entre 60 et 70%.

III.4.5. Essai de module d'élasticité

Afin de calculer le module d'élasticité du béton recyclé on a utilisé un extensomètre mécanique (photo 6), un coffret électronique (J2P), une table traçante et les jauges électriques à béton. L'essai consiste à tracer la courbe contrainte-déformation à l'aide de la table traçante commandée par le coffret électronique (J2P) sous l'effet de la déformation linéaire de la jauge

collée à l'une des facettes de l'éprouvette cubique de 100 mm d'arête. L'essai est réalisé par l'écrasement de deux éprouvettes âgé de 28 jours et conservé dans une chambre humide (20°C et 100% HR) et cela pour chaque composition. Il est généralement conseillé de calculer le module d'élasticité de 15 à 50% de la contrainte de rupture [23], dans notre cas il a été calculé à 30%.

III.4.6. Essai de capillarité et d'absorption d'eau par immersion

La capillarité est l'effet buvard du béton, celle-ci monte lentement sous l'effet de forces capillaires. Si l'on pèse l'éprouvette à intervalles réguliers et que l'on détermine le poids de l'eau absorbée e ; on trouve une relation qui se rapproche de la forme $e=k\sqrt{t}$; où k est un coefficient d'absorption capillaire. Cette Ascension est due à une force appelée " Succion " [18]. L'essai est toujours effectué sur des éprouvettes (7x7x28 cm) sèches jusqu'à poids constant et le principe consiste à poser les éprouvettes de béton sur leurs bases 7x7 cm; en les séparants d'au moins 1 cm, de maintenir le niveau d'eau constant (2cm) pendant tout l'essai et de peser à des temps réguliers les éprouvettes. L'essai est réalisé dans une durée de temps de 1h30mn à 5mn d'intervalles conformément à la norme NF P 10-502 [60].

L'absorption par immersion consiste à mettre les éprouvettes du béton dans l'étuve et de les peser jusqu'à poids constant, ensuite les immergé totalement dans l'eau à 20° C pendant une durée de 24h (c'est à dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du béton recyclé.

$$\text{Porosité} = \frac{\gamma_w (Ma - Ms)}{V_t} \cdot 100 \quad (3.3)$$

M_s : masse de l'éprouvette sèche

M_a : masse de l'éprouvette après saturation

V_t : volume de l'éprouvette

III.4.7. Essai de dureté superficielle par rebondissement. (Scléromètre)

(NF P 18-417. Déc. 1989) [61]

L'essai consiste à mesurer la hauteur de rebondissement d'une bille d'acier projetée sur la surface de l'éprouvette du béton et donc en fonction de la hauteur de rebondissement il nous est possible d'en déduire la résistance à la compression (photo 7). L'essai a été réalisé uniquement à l'âge de 28 jours sur les éprouvettes avant l'essai de compression par écrasement à la presse. La résistance à la compression est estimée soit par la formule empirique suivante[21] :

$$R_c = \frac{I^2}{3} - 2I \quad (3.4)$$

R_c : la résistance à la compression

I : indice sclérométrique

Soit à l'aide du graphe [23] (fig.1 -Annexe1), qui donne la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique.

Le but de cet essai est de déduire une corrélation entre la résistance à la compression et cet essai non destructif.

III.4.8. Essai d'Auscultation dynamique (Sonique)

(NF P 18-418. déc. 1989) [62]

L'essai consiste à émettre une onde longitudinale dans une éprouvette et mesurer le temps qu'elle met pour le parcourir d'une face à l'autre parallèlement, et connaissant la distance parcourue ($d=10$ cm), on peut en déduire facilement la vitesse et enfin déduire graphiquement la résistance à la compression [23] (fig. 2 -Annexe2). (photo 8)

$$V = \frac{d}{t} \quad (3.5)$$

V : vitesse de propagation de l'onde (m/s)

d : distance entre faces de l'éprouvette (d=10 cm)

t : temps mis pour parcourir d

L'essai est réalisé uniquement à l'âge de 28 jours.

III.4.9. Essai de perméabilité. Etanchéité

La qualité du béton ne peut être appréciée par la mesure des propriétés mécaniques et il faut mesurer d'autres propriétés telles que la perméabilité. La durabilité du béton et sa résistance aux environnements agressive peut être obtenue par la mesure de sa perméabilité à l'eau. L'essai réalisé dans le cadre de ce travail est l'essai de pénétration de l'eau sur des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm. Une pression dynamique d'eau est appliquée en trois paliers pendant 24 heures et ensuite réaliser l'essai de fendage (traction indirecte) et mesurer la distance de pénétration d'eau.

III.5. Variables étudiées

Les paramètres de l'étude sont récapitulés dans les tableaux suivants 3.12 et 3.13 :

Tableau 3.12 la composition des différents bétons étudiés

	E/C	GN	GR	GBC	SN	SR	SBC	Remarque
B_{0/0}	0.61	100	-	-	100	-	-	-
B_{25/0}	0.62	75	25	-	100	0	-	+Adj : 1%
B_{50/0}	0.64	50	50	-	100	0	-	
B_{75/0}	0.66	25	75	-	100	0	-	
B_{100/0}	0.67	0	100	-	100	0	-	
B_{0/25}	0.63	100	0	-	75	25	-	
B_{0/50}	0.66	100	0	-	50	50	-	
B_{0/75}	0.69	100	0	-	25	75	-	
B_{0/100}	0.72	100	0	-	0	100	-	
B_{50/50}	0.65	50	50	-	50	50	-	
B_{100/100}	0.77	0	100	-	0	100	-	
B_{100/100} + Adj	0.74	0	100	-	0	100	-	
B_{75/25}	0.68	25	75	-	75	25	-	
B_{100/50}	0.73	0	100	-	50	50	-	
B_{25/75}	0.68	75	25	-	25	75	-	
B_{100/50}	0.75	0	100	-	50	50	-	
C_{25/0}	0.60	75	-	25	100	-	0	Pré-mouillage des gros agrégats à 100% 24 heures avant le gâchage
C_{50/0}	0.59	50	-	50	100	-	0	
C_{75/0}	0.58	25	-	75	100	-	0	
C_{100/0}	0.57	0	-	100	100	-	0	
C_{0/25}	0.69	100	-	0	75	-	25	
C_{0/50}	0.77	100	-	0	50	-	50	
C_{0/75}	0.85	100	-	0	25	-	75	
C_{0/100}	0.93	100	-	0	0	-	100	
C_{50/50}	0.75	50	-	50	50	-	50	
C_{100/100}	0.89	0	-	100	0	-	100	
C_{100/100} + Adj	0.86	0	-	100	0	-	100	
C_{75/25}	0.66	25	-	75	75	-	25	
C_{100/50}	0.72	0	-	100	50	-	50	
C_{25/75}	0.85	75	-	25	25	-	75	
C_{100/50}	1.08	0	-	100	50	-	50	
D₁	0.77	25	50	25	25	50	25	
D₂	0.78	0	50	50	0	75	25	
D₃	0.75	0	75	25	50	25	25	
D₄	0.73	0	50	50	50	25	25	

$B_{G/S}$, $C_{G/S}$ et $D_{G/S}$: la première lettre (B, C ou D) indique le type de béton réaliser et les deux autres lettres (G et S) indiquent le pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés.



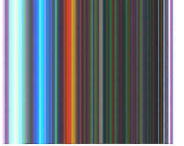
B : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de béton

C : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de brique

D : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de brique et béton

Tableau 3.13 Les différents essais utilisés

	Type d'essai	Norme [Réf]	Âge (Jours)
Ciment	Analyse chimique	41	-
	La finesse	42	-
	La consistance normale	43	-
	Le temps de prise	44	-
	Expansion à chaud	45	-
	Résistance à la compression	46	28
	Résistance à la traction	46	28
Agrégats	Granulométrie	47	-
	Densité	48, 49	-
	Absorption d'eau	48	-
	Propreté	50	-
	Los-Angeles	51	-
	Equivalent de sable	52	-
	Compacité et porosité	49	-
Béton	Slump Test	55	Avant coulage
	Compression	56	3, 7, 28 et 90
	Traction par flexion	57	7, 28 et 90
	Retrait	58	Jusqu'à 90
	Module d'Elasticité	59	28
	Scléromètre	61	28
	Auscultation dynamique	62	28
	Perméabilité	-	90
	Absorption capillaire	60	60



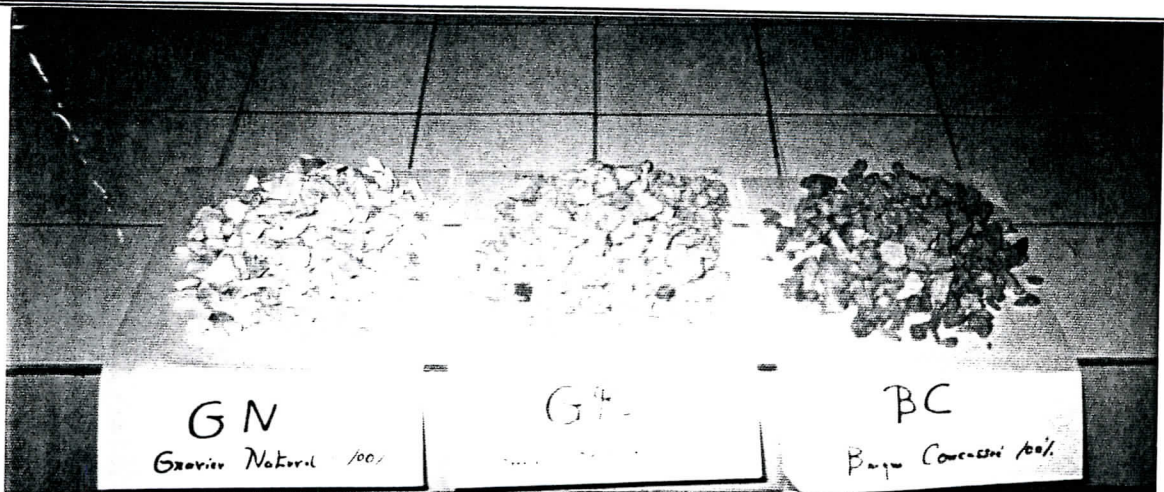


Photo 1: Les Gros Granulats Utilisés (naturels et recyclés)



Photo 1: Les Granulats Fins Utilisés (naturels et recyclés)

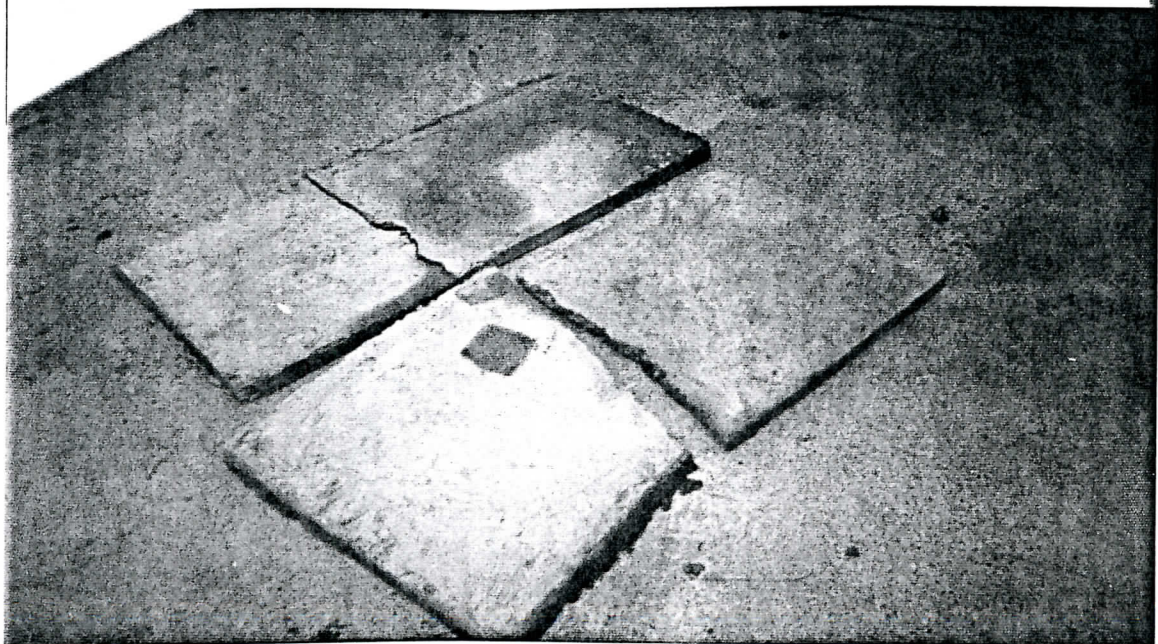


Photo 2: Les dalles de béton ordinaire avant démolition

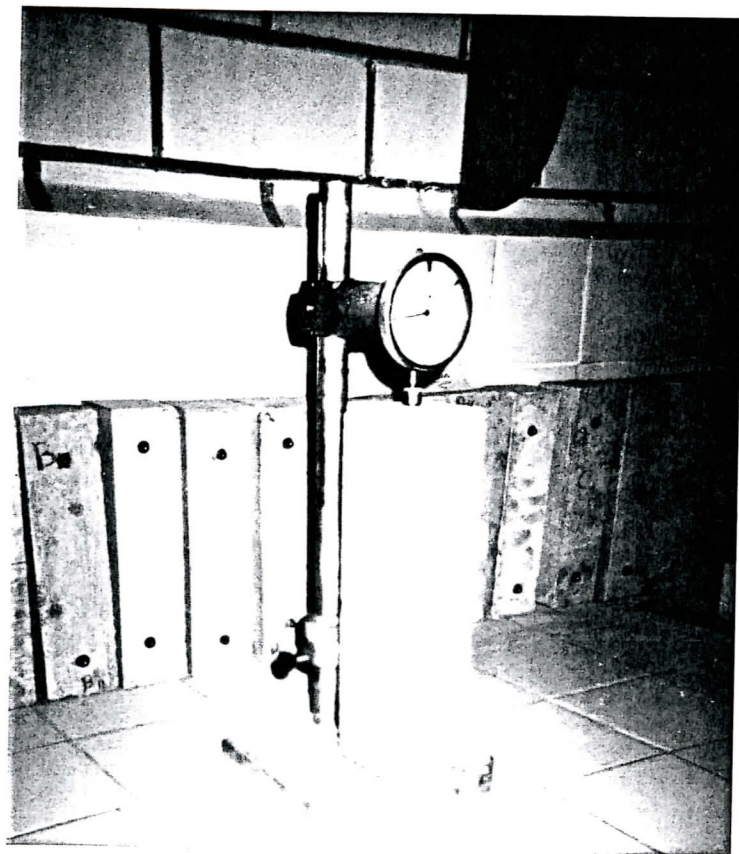


Photo 5 : Appareil de mesure du Retrait

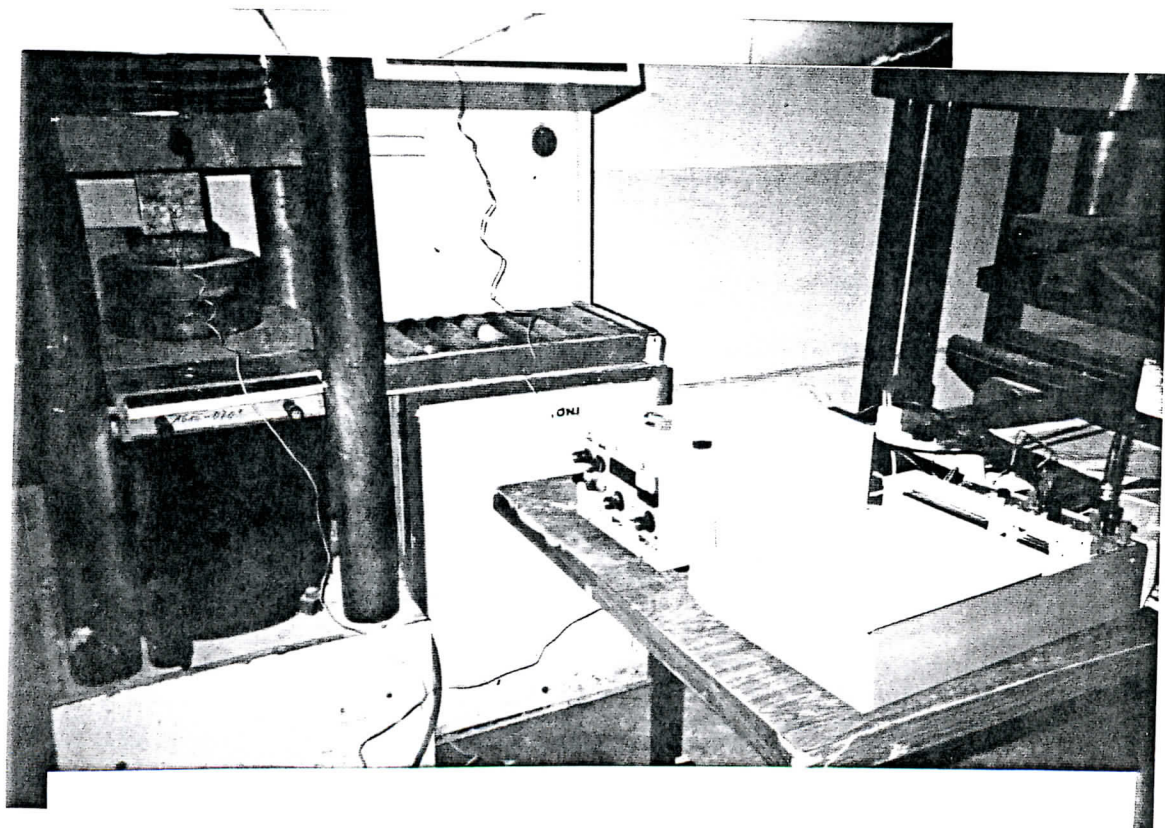


Photo 6 : Appareil de mesure du Module d'Elasticité



Photo 7: Mesure de la résistance à la compression par le Scléromètre

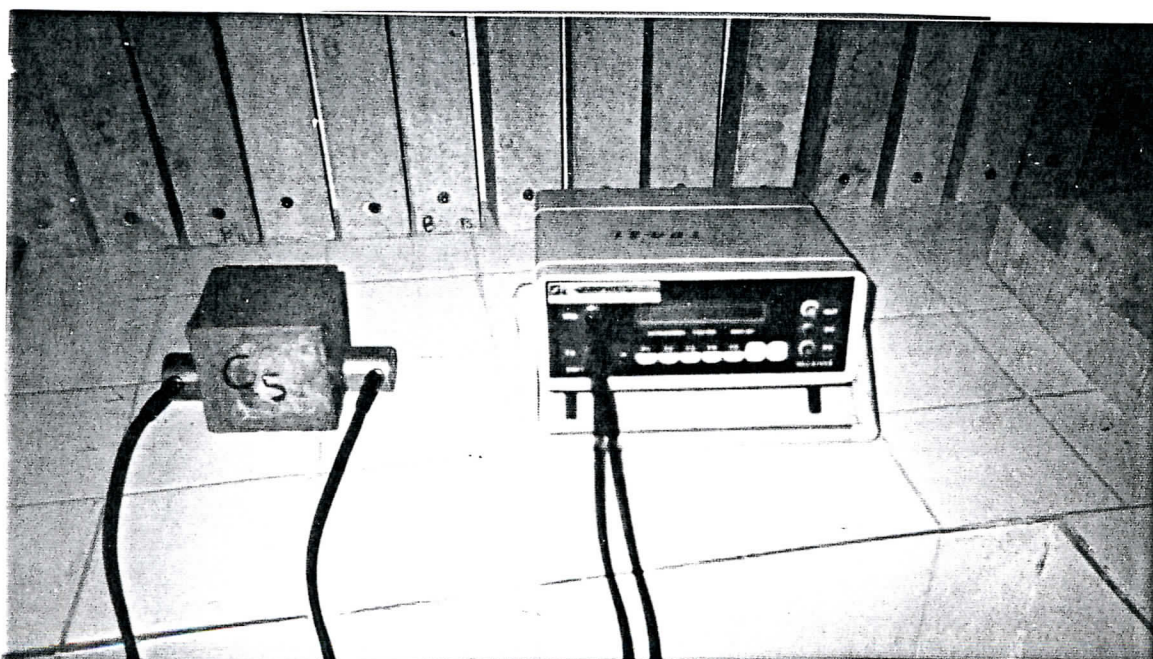


Photo 8: Mesure de la résistance à la compression par la vitesse du son

Chapitre 04

Analyse et discussion des résultats

IV. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. Béton frais

IV.1.1. Consistance des bétons frais

La composition des bétons a été faite de façon à avoir un affaissement constant au cône d'Abrams de l'ordre de 70 mm de la fourchette de consistance des bétons plastiques (50 à 90 mm) que l'on tentait toujours d'y approcher.

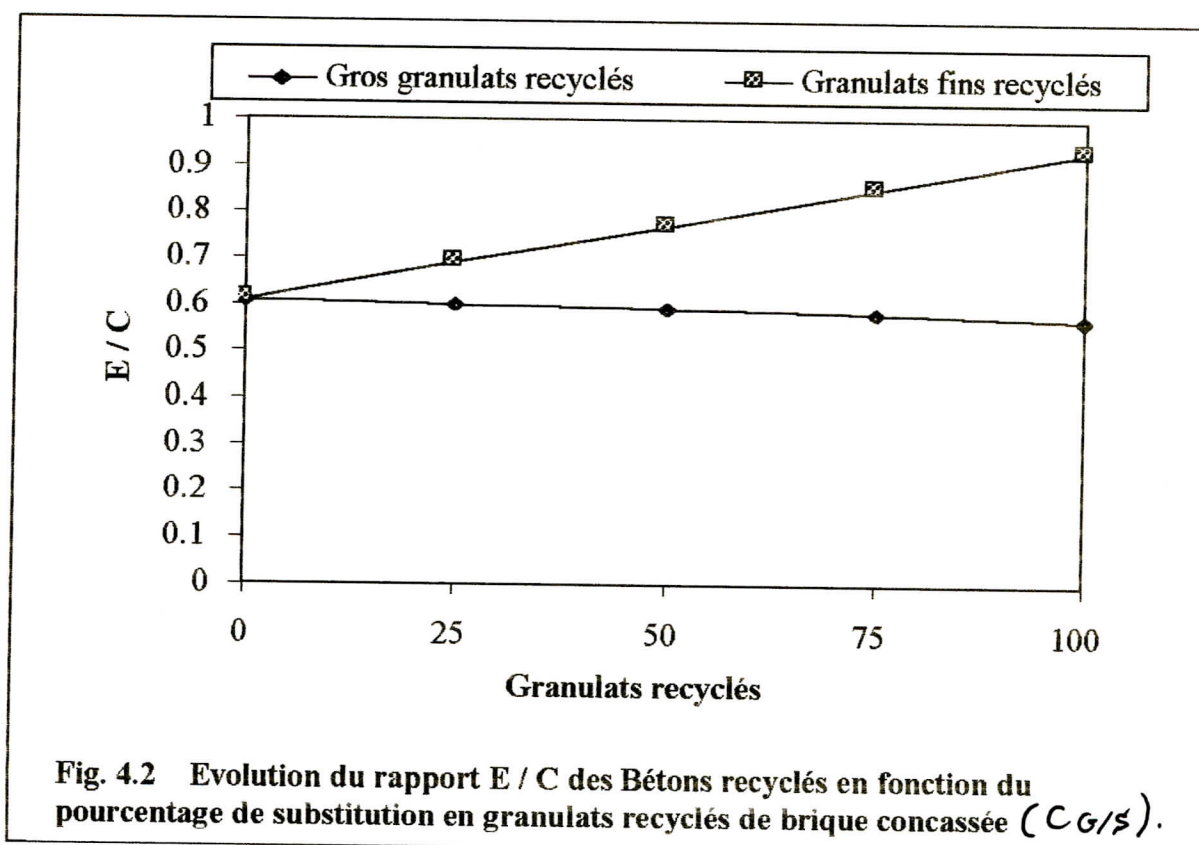
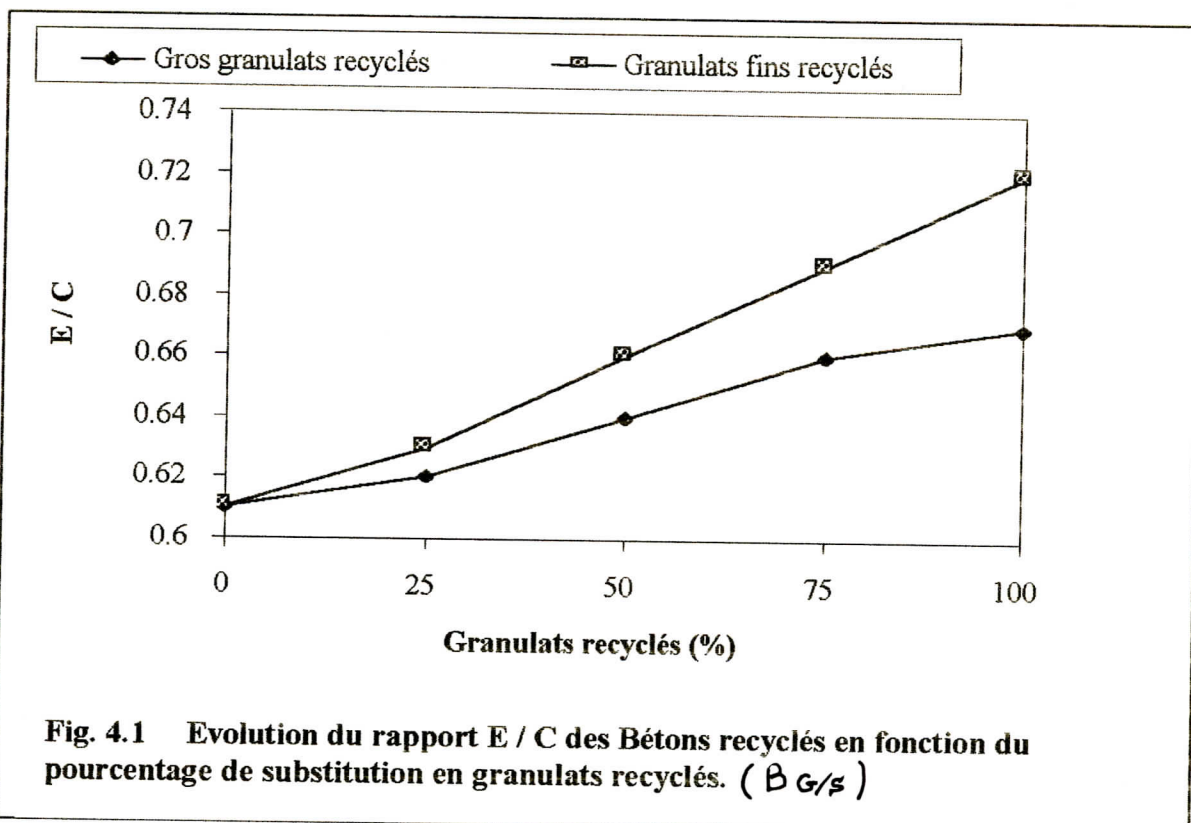
Le tableau suivant 4.1, donne les quantités d'eau réellement utilisées et les quantités effectivement ajoutées (compte tenu du pourcentage élevé d'absorption d'eau de granulats recyclés) ainsi que la fluidité réelle mesurée. Parallèlement, relative à la fluidité idéale, sont repris les quantités d'eau ajoutées par rapport à la quantité d'eau de gâchage de $B_{0/0}$ nécessaire pour avoir un affaissement de 70 mm au cône d'Abrams. Sur cette base, on tentait de tirer une loi générale liant les pourcentages de granulats recyclés à la quantité d'eau nécessaire au mélange pour obtenir une fluidité constante (eau de gâchage + eau contenu dans les matériaux).

$$E = E \text{ réel} + (\% \text{ d'Absorption d'eau des granulats recyclés})$$

D'après les figures 4.1 à 4.4, nous remarquons que pour obtenir une fluidité constante, il faut augmenter la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage des bétons de granulats recyclés. Ceci est logique car les granulats recyclés sont poreux et absorbent beaucoup d'eau (3.5% pour GR, 5% pour SR et 14% pour SBC).

Il faut noter que les gros granulats de brique concassée n'entre pas en jeu car ils sont trempés (pré-mouillés) dans l'eau pendant 24 heures avant leur utilisation et par conséquent la quantité d'eau nécessaire au gâchage diminue avec le pourcentage de substitution de ces granulats dans le béton, par contre lorsque le concassé est tout à fait sec (concassé de béton), la quantité d'eau nécessaire est alors à l'environ de 2% du

pois des granulats recyclés. Les granulats fins recyclés (de béton ou de brique concassée) influent beaucoup plus la quantité d'eau de gâchage que les gros granulats recyclés.



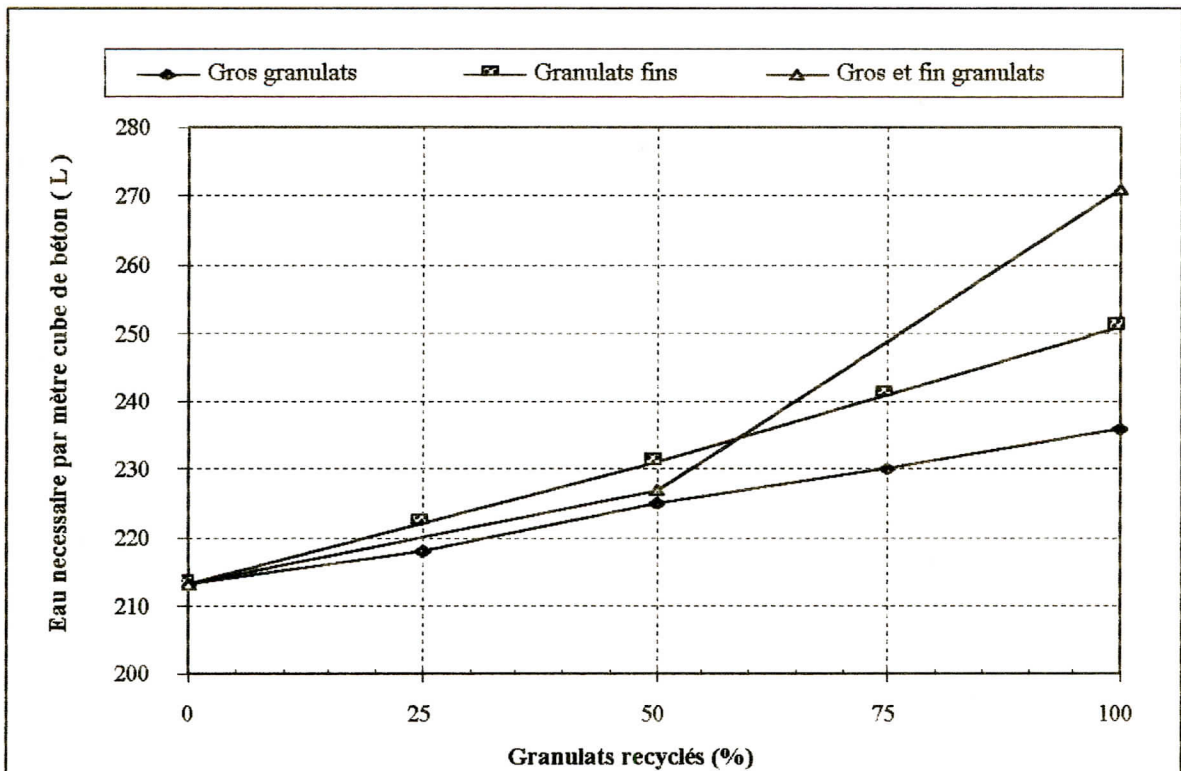


Fig. 4.3 La quantité d'eau nécessaire pour obtenir un Slump constant d'environ 70 mm des béton partiellement recyclés à base d'agrégats de béton démolé.

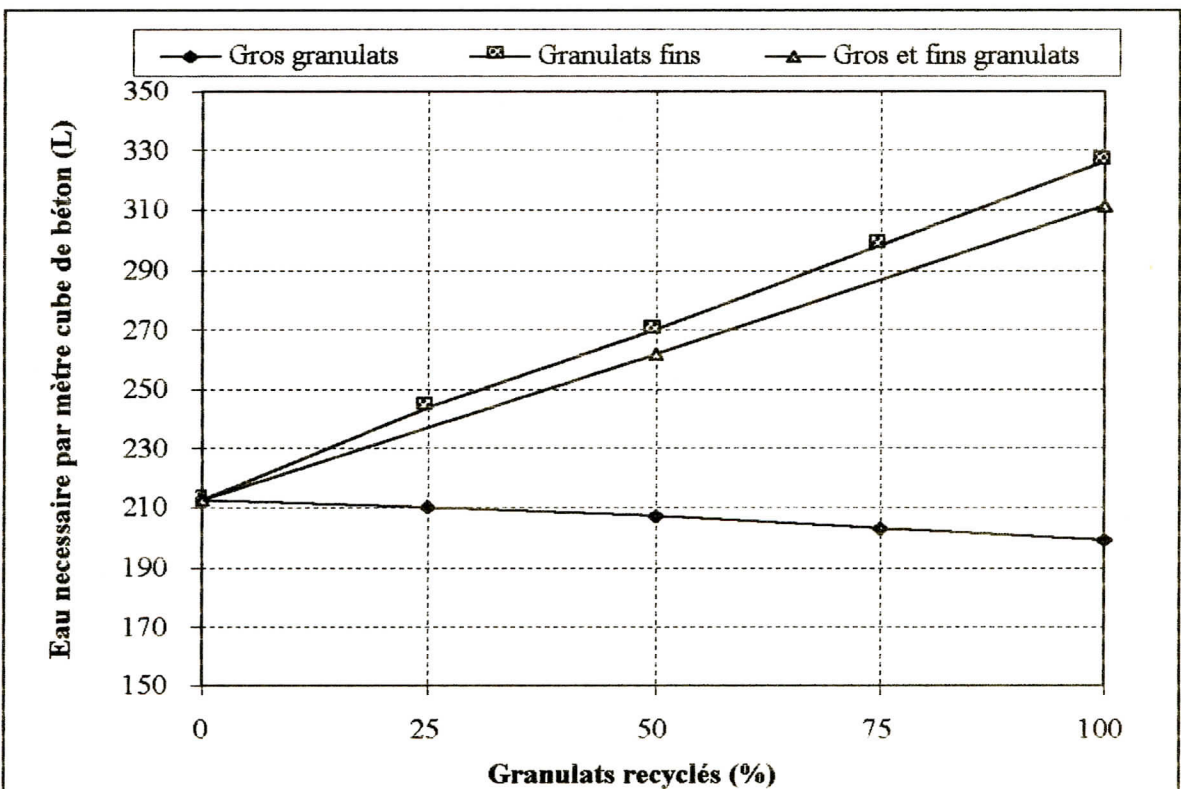


Fig. 4.4 La quantité d'eau nécessaire pour obtenir un Slump constant d'environ 70 mm des béton partiellement recyclés à base d'agrégats de brique concassée.

Tableau 4.1 Quantités d'eau réelles et effectivement ajoutées ainsi que le Slump pour chaque mélange

Types de béton	E / C	Quantité d'eau réellement utilisée pour le mélange (l/m ³)	Slump mesuré (cm)	Slump Idéal (cm)	Quantité d'eau de gâchage ajouter nécessaire pour obtenir la fluidité idéale (l/m ³)	
B0/0	0.61	213	7	7	0	
B 25/0	0.6	218	7.3		6	
B 50/0	0.59	225	7.3		12	
B 75/0	0.58	230	6.8		17	
B 100/0	0.57	236	6.5		23	
B 0/25	0.69	222	7		9	
B 0/50	0.77	231	8		18	
B 0/75	0.85	241	7.5		28	
B 0/100	0.93	251	8		38	
B 50/50	0.75	227	8.3		14	
B 100/100	0.89	271	6.9		58	
B 100/100 + Adj	0.86	260	8.2		47	
B 75/25	0.66	240	7.9		27	
B 100/50	0.72	254	8.3		41	
B 25/75	0.85	240	6.7		27	
B 50/100	1.08	261	6.4		48	
C 25/0	0.6	210	7.7		7	\
C 50/0	0.59	207	7.2		7	\
C 75/0	0.58	203	8.3		7	\
C 100/0	0.57	200	7.5		7	\
C 0/25	0.69	244	6.3		7	31
C 0/50	0.77	270	6.8		7	57
C 0/75	0.85	298	6.2		7	85
C 0/100	0.93	326	6.6		7	113
C 50/50	0.75	262	7.3		7	49
C 100/100	0.89	311	6.4		7	98
C 100/100 + ADJ	0.86	300	7.6		7	87
C 75/25	0.66	231	7.4		7	18
C 100/50	0.72	254	8.3		7	41
C 25/75	0.89	297	8.8		7	84
C 50/100	1.08	381	7.9		7	168
D1	0.77	269	6.3		7	56
D2	0.78	273	6.9		7	60
D3	0.75	264	7.3	7	51	
D4	0.73	255	6.2	7	42	



Photo 1: Les Gros Granulats Utilisés (naturels et recyclés)



Photo 1: Les Granulats Fins Utilisés (naturels et recyclés)



Photo 2 : Les dalles de béton ordinaire avant démolition

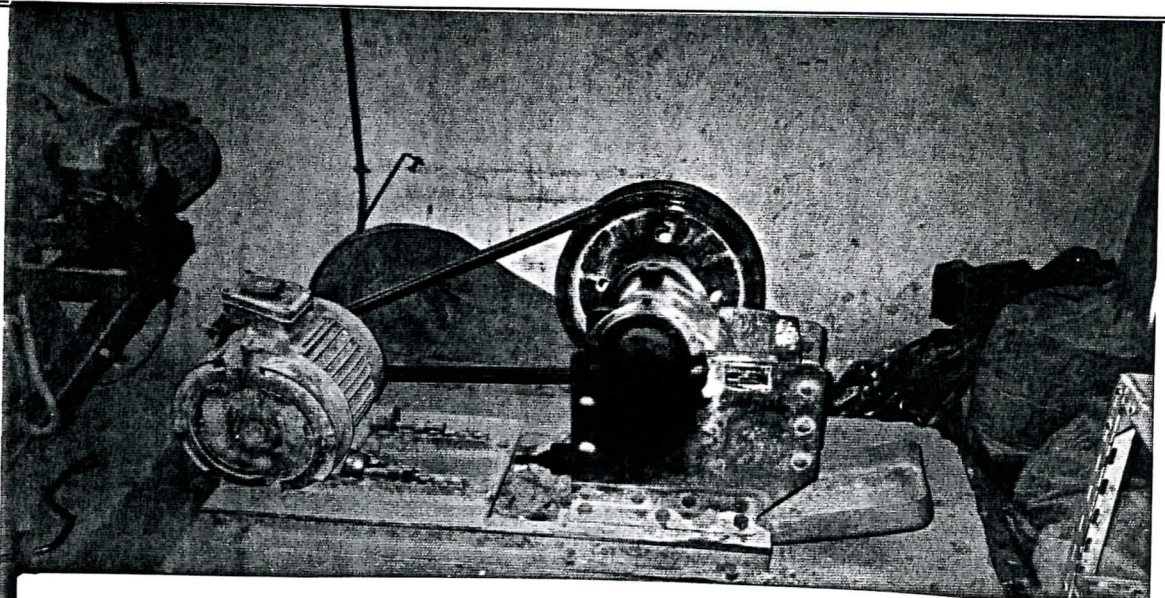


Photo 3: Concasseur à Marteau

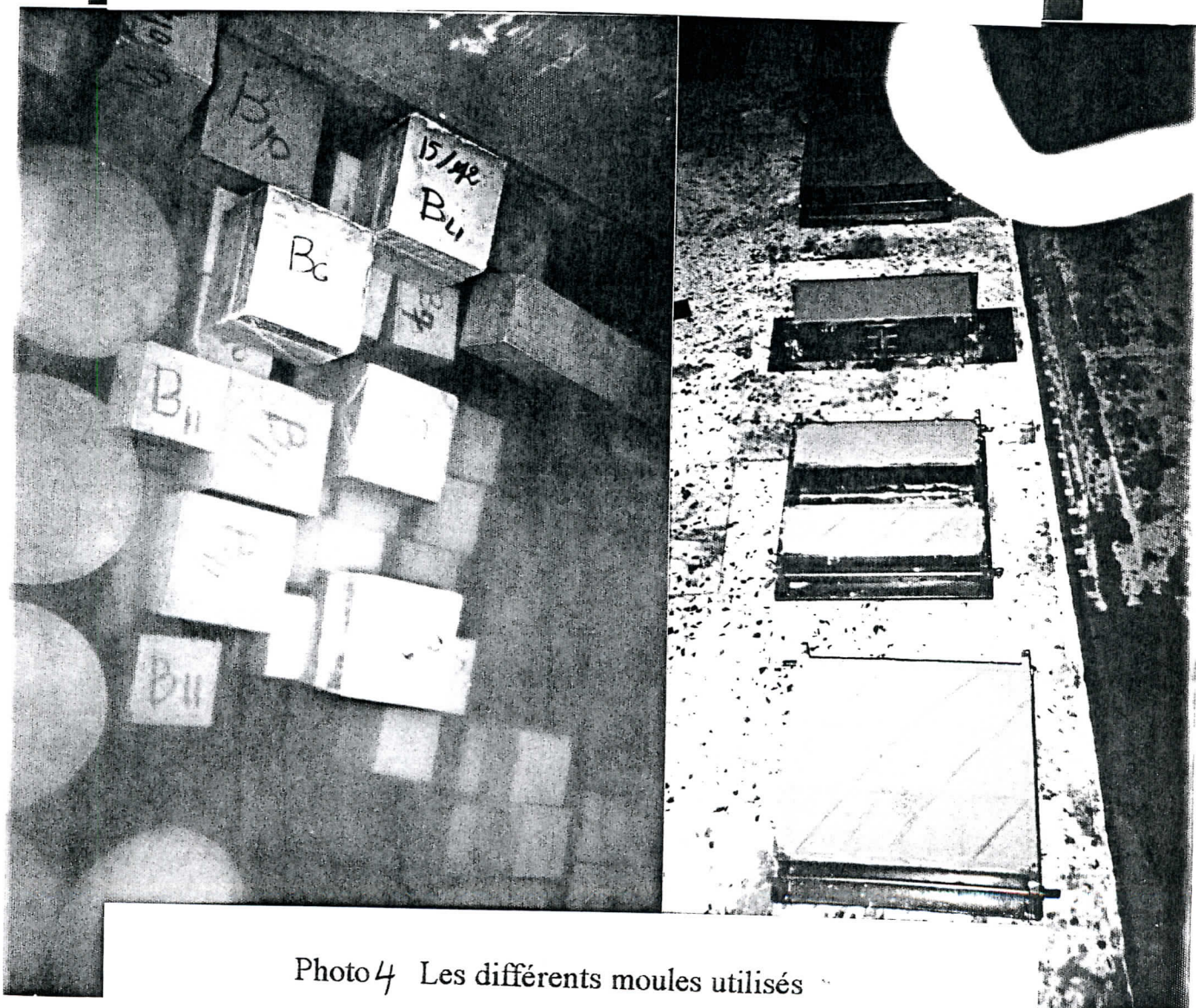


Photo 4 Les différents moules utilisés

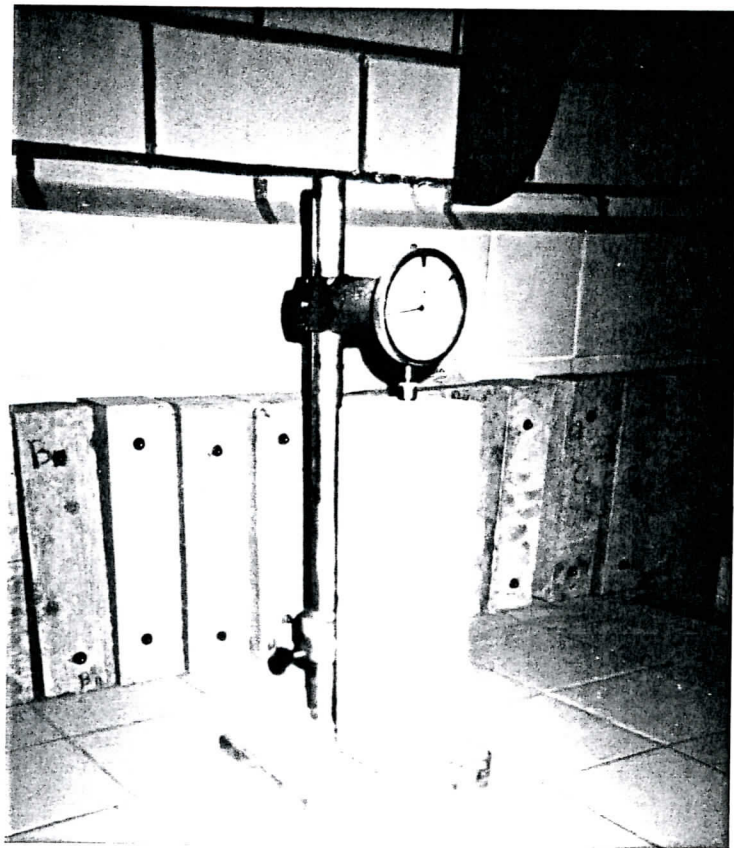


Photo 5 : Appareil de mesure du Retrait

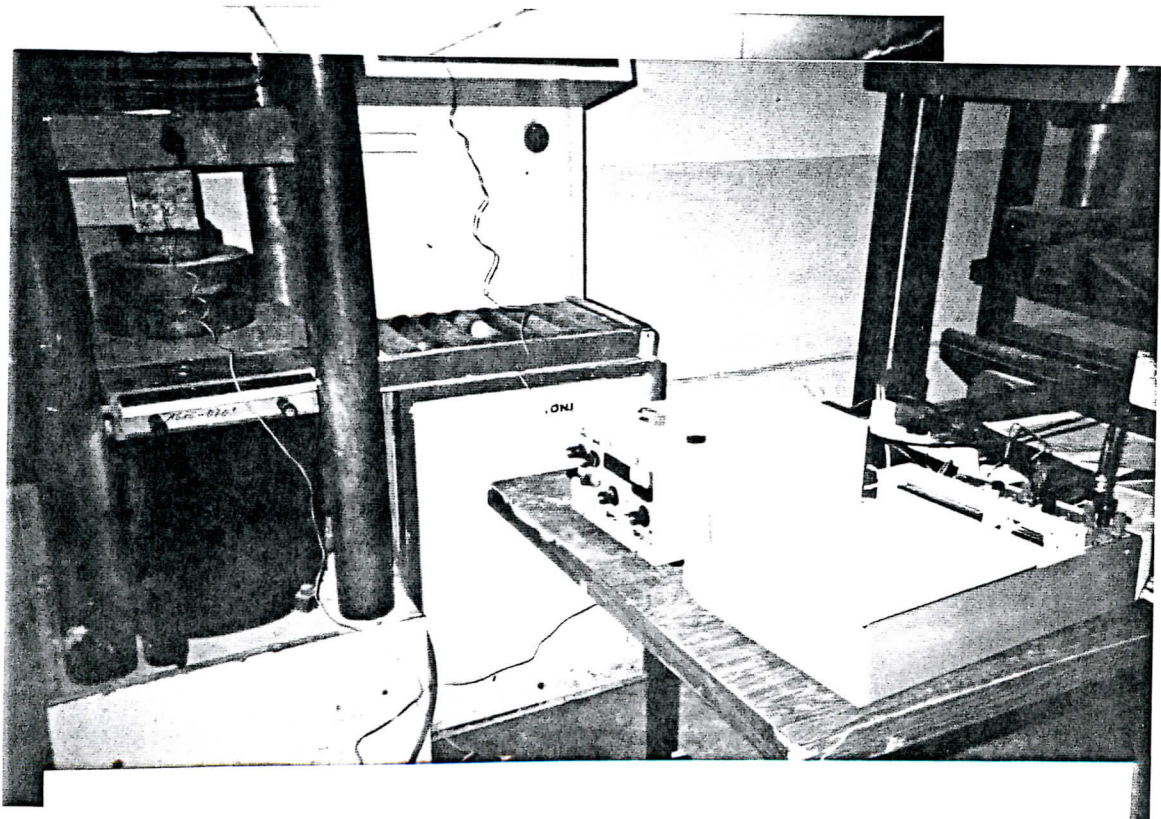


Photo 6 : Appareil de mesure du Module d'Elasticité



Photo 7: Mesure de la résistance à la compression par le Scléromètre

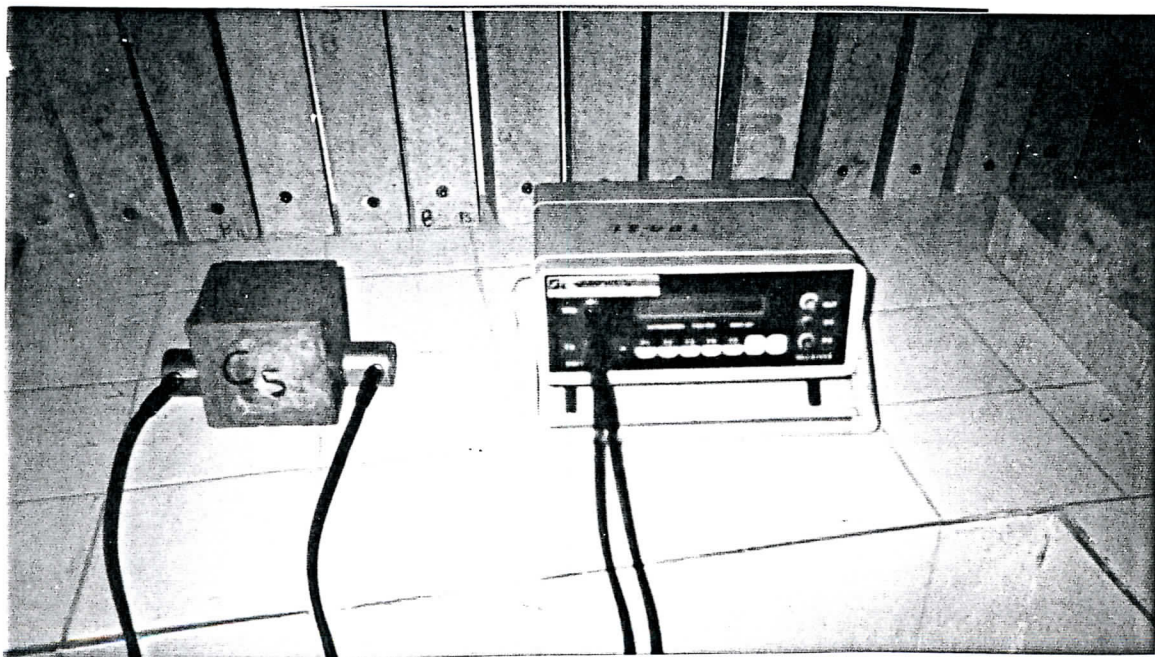


Photo 8: Mesure de la résistance à la compression par la vitesse du son

Chapitre 04

Analyse et discussion des résultats

IV. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. Béton frais

IV.1.1. Consistance des bétons frais

La composition des bétons a été faite de façon à avoir un affaissement constant au cône d'Abrams de l'ordre de 70 mm de la fourchette de consistance des bétons plastiques (50 à 90 mm) que l'on tentait toujours d'y approcher.

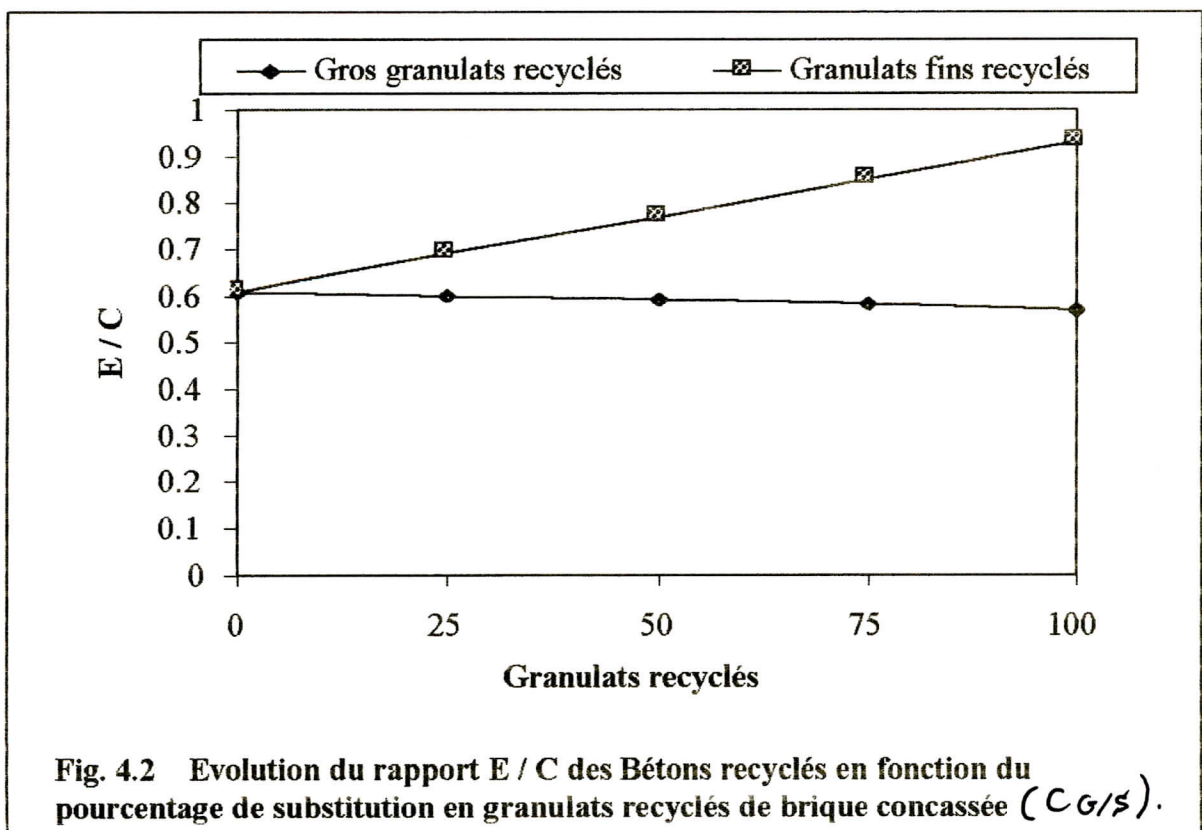
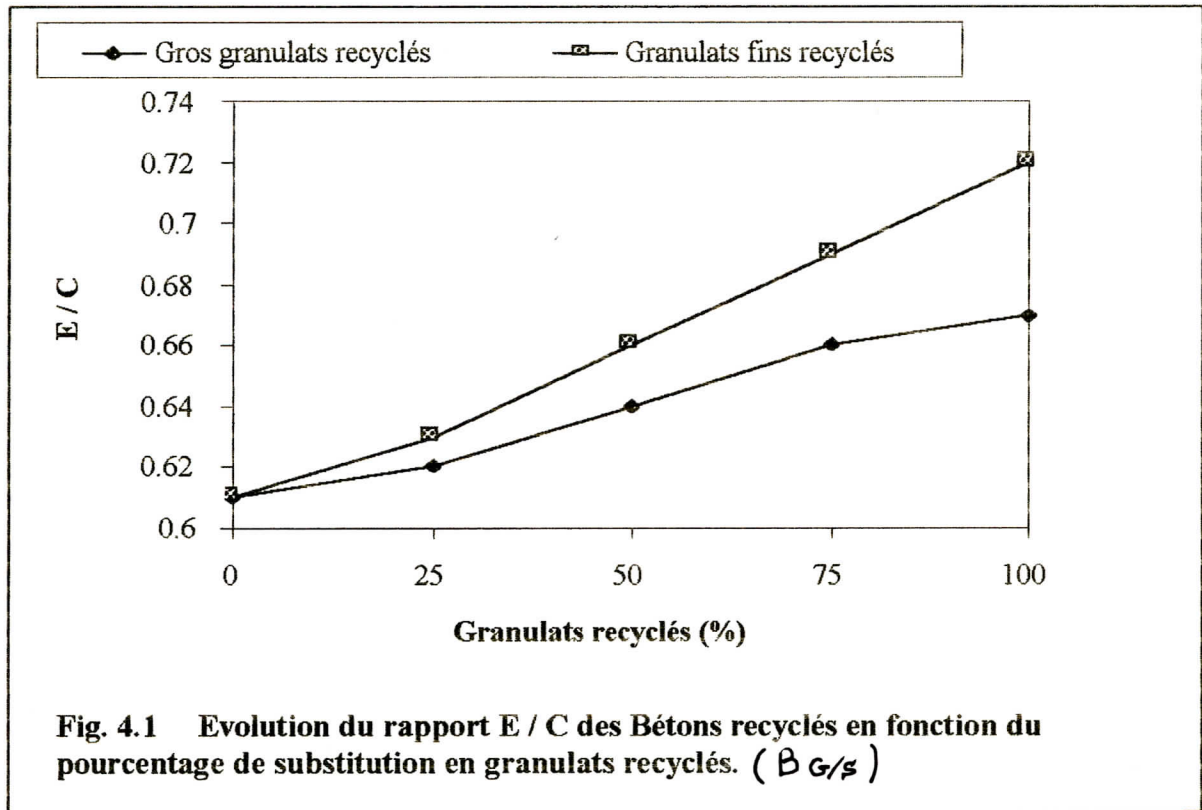
Le tableau suivant 4.1, donne les quantités d'eau réellement utilisées et les quantités effectivement ajoutées (compte tenu du pourcentage élevé d'absorption d'eau de granulats recyclés) ainsi que la fluidité réelle mesurée. Parallèlement, relative à la fluidité idéale, sont repris les quantités d'eau ajoutées par rapport à la quantité d'eau de gâchage de $B_{0/0}$ nécessaire pour avoir un affaissement de 70 mm au cône d'Abrams. Sur cette base, on tentait de tirer une loi générale liant les pourcentages de granulats recyclés à la quantité d'eau nécessaire au mélange pour obtenir une fluidité constante (eau de gâchage + eau contenu dans les matériaux).

$$E = E \text{ réel} + (\% \text{ d'Absorption d'eau des granulats recyclés})$$

D'après les figures 4.1 à 4.4, nous remarquons que pour obtenir une fluidité constante, il faut augmenter la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage des bétons de granulats recyclés. Ceci est logique car les granulats recyclés sont poreux et absorbent beaucoup d'eau (3.5% pour GR, 5% pour SR et 14% pour SBC).

Il faut noter que les gros granulats de brique concassée n'entre pas en jeu car ils sont trempés (pré-mouillés) dans l'eau pendant 24 heures avant leurs utilisation et par conséquent la quantité d'eau nécessaire au gâchage diminue avec le pourcentage de substitution de ces granulats dans le béton, par contre lorsque le concassé est tout à fait sec (concassé de béton), la quantité d'eau nécessaire est alors à l'environ de 2% du

pois des granulats recyclés. Les granulats fins recyclés (de béton ou de brique concassée) influent beaucoup plus la quantité d'eau de gâchage que les gros granulats recyclés.



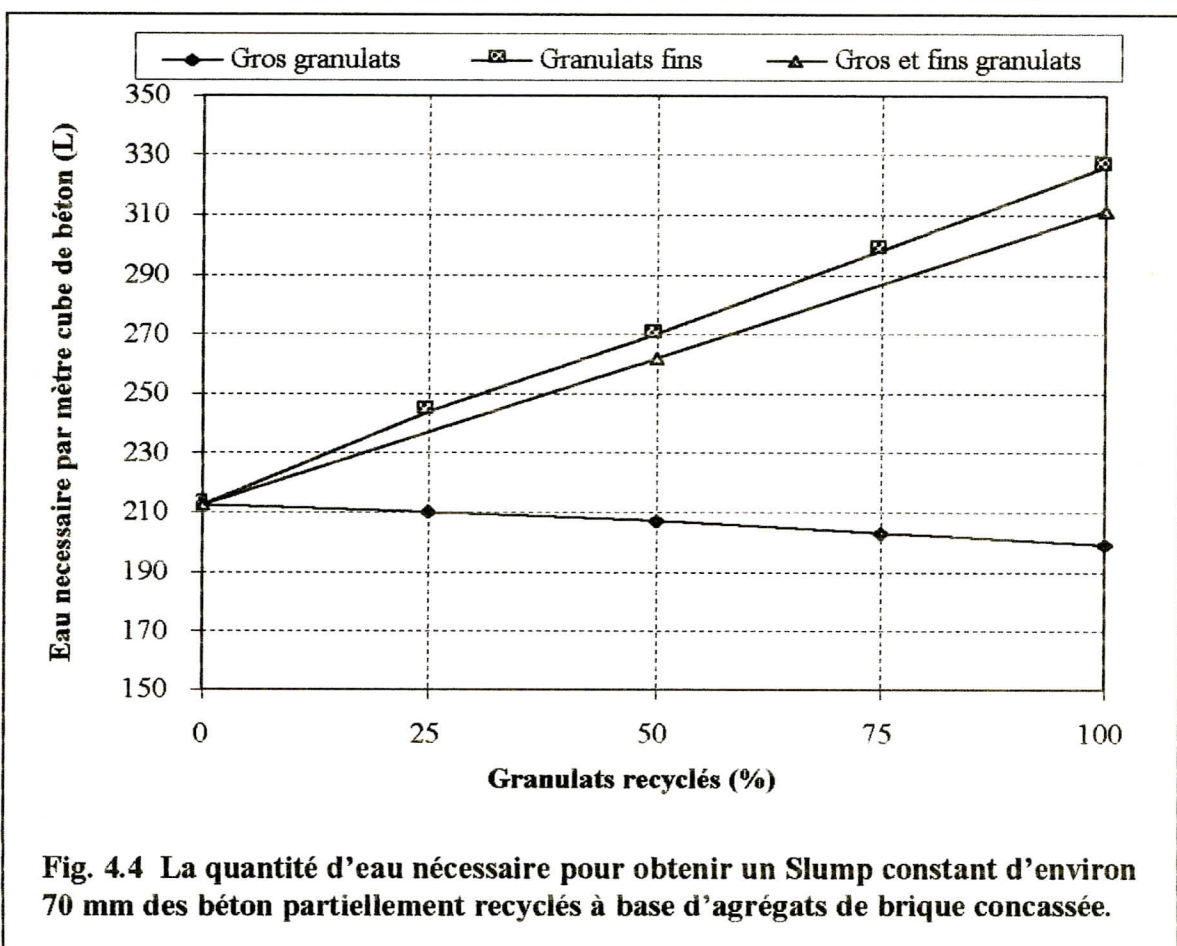
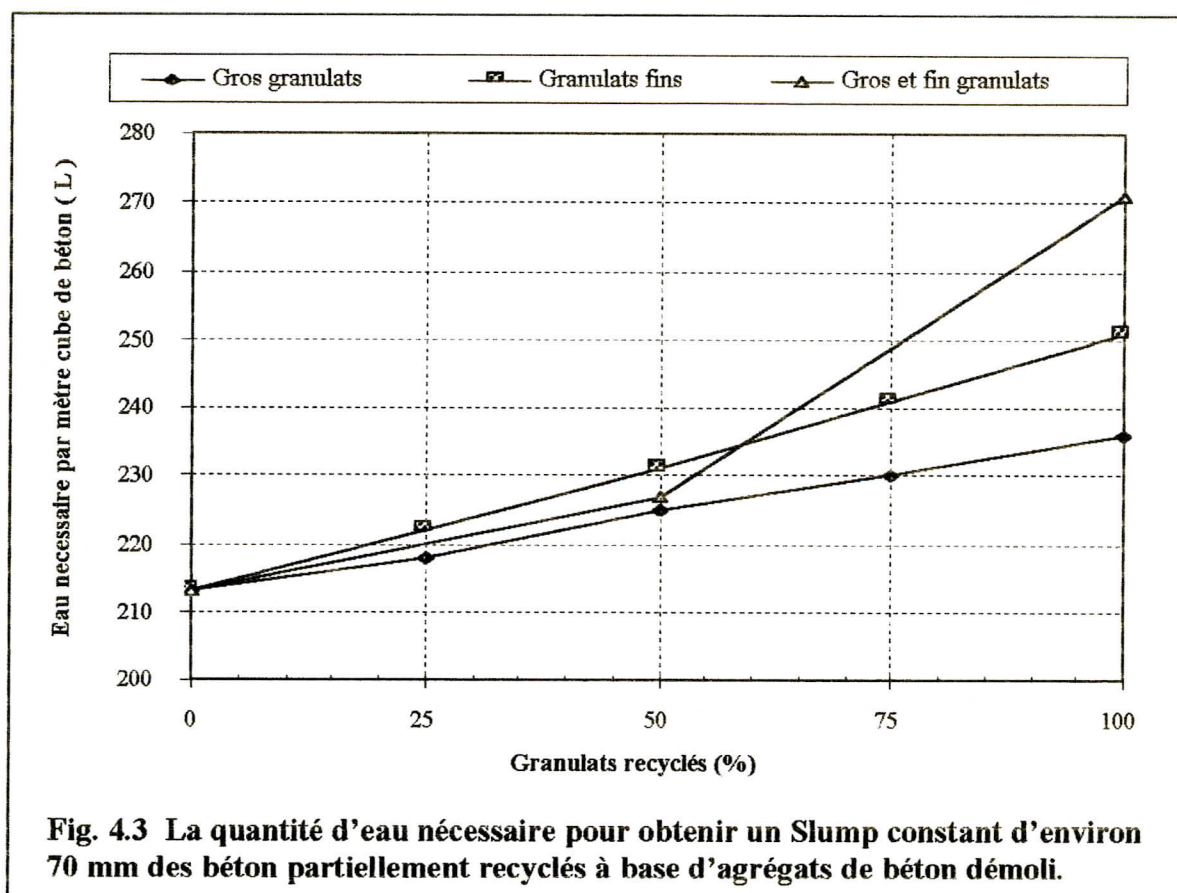


Tableau 4.1 Quantités d'eau réelles et effectivement ajoutées ainsi que le Slump pour chaque mélange

Types de béton	E / C	Quantité d'eau réellement utilisée pour le mélange (l/m ³)	Slump mesuré (cm)	Slump Idéal (cm)	Quantité d'eau de gâchage ajouter nécessaire pour obtenir la fluidité idéale (l/m ³)	
B0/0	0.61	213	7	7	0	
B 25/0	0.6	218	7.3		6	
B 50/0	0.59	225	7.3		12	
B 75/0	0.58	230	6.8		17	
B 100/0	0.57	236	6.5		23	
B 0/25	0.69	222	7		9	
B 0/50	0.77	231	8		18	
B 0/75	0.85	241	7.5		28	
B 0/100	0.93	251	8		38	
B 50/50	0.75	227	8.3		14	
B 100/100	0.89	271	6.9		58	
B 100/100 + Adj	0.86	260	8.2		47	
B 75/25	0.66	240	7.9		27	
B 100/50	0.72	254	8.3		41	
B 25/75	0.85	240	6.7		27	
B 50/100	1.08	261	6.4		48	
C 25/0	0.6	210	7.7		7	\
C 50/0	0.59	207	7.2		\	
C 75/0	0.58	203	8.3		\	
C 100/0	0.57	200	7.5		\	
C 0/25	0.69	244	6.3		31	
C 0/50	0.77	270	6.8		57	
C 0/75	0.85	298	6.2		85	
C 0/100	0.93	326	6.6		113	
C 50/50	0.75	262	7.3		49	
C 100/100	0.89	311	6.4		98	
C 100/100 + ADJ	0.86	300	7.6		87	
C 75/25	0.66	231	7.4		18	
C 100/50	0.72	254	8.3		41	
C 25/75	0.89	297	8.8		84	
C 50/100	1.08	381	7.9		168	
D1	0.77	269	6.3		56	
D2	0.78	273	6.9	60		
D3	0.75	264	7.3	51		
D4	0.73	255	6.2	42		

$B_{G/S}$, $C_{G/S}$ et $D_{G/S}$: la première lettre (B, C ou D) indique le type de béton réaliser et les deux autres lettres (G et S) indiquent le pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés.

B : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de béton

C : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de brique

D : béton recyclé à base d'agrégats de concassé de brique et béton

IV.1.2. Densité des bétons recyclés frais et mise en œuvre

L'introduction des matériaux recyclés dans la composition de béton provoque une légère diminution de la densité du béton frais (tableau 4.2). Le pourcentage d'air occlus est d'autant plus élevé que le pourcentage de substitution en granulats recyclés augmente. Une augmentation d'environ 0.6% d'air occlus pour le béton de concassé de béton de démolition allant jusqu'à 2% ou plus pour le béton recyclé à base de concassé de brique cuite.

Il est quasiment important de signaler ici que sur la base de ces résultats, le béton recyclé est peu compacte par rapport au béton témoin, ce qui influe négativement sur les propriétés mécaniques de ce type de béton. Alors, s'il l'on veut avoir un béton recyclé comparable avec celui du béton original, il est indispensable de faire une bonne vibration.

Tableau 4.2 Valeurs de l'air occlus et de la densité du béton frais des différents compositions utilisées.

Types de béton	E / c	Air occlus (%)	Densité du béton frais (Kg/m ²)
B0/0	0.61	1.6	2410
B 25/0	0.6	2.1	2373
B 50/0	0.59	2.1	2331
B 75/0	0.58	2.2	2290
B 100/0	0.57	2.8	2239
B 0/25	0.69	2.1	2384
B 0/50	0.77	2.2	2343
B 0/75	0.85	2.8	2302
B 0/100	0.93	2.8	2235
B 50/50	0.75	2	2308
B 100/100	0.89	2	2225
B 100/100 + ADJ	0.86	1.8	2227
B 75/25	0.66	2.2	2277
B 100/50	0.72	1.9	2240
B 25/75	0.85	1.8	2291
B 50/100	1.08	1.8	2230
C 25/0	0.6	2.2	2308
C 50/0	0.59	2.2	2235
C 75/0	0.58	2.7	2210
C 100/0	0.57	2.5	2137
C 0/25	0.69	2.3	2356
C 0/50	0.77	2.5	2332
C 0/75	0.85	2.5	2317
C 0/100	0.93	2.7	2283
C 50/50	0.75	2.7	2211
C 100/100	0.89	3.6	1992
C 100/100 + ADJ	0.86	3.4	2004
C 75/25	0.66	2.6	2206
C 100/50	0.72	2.7	2147
C 25/75	0.89	2.3	2298
C 50/100	1.08	3	2226
D1	0.77	2.1	2238
D2	0.78	2.5	2221
D3	0.75	2.4	2235
D4	0.73	2.2	2229

IV.2. Béton durci

IV.2.1. Couleur et aspects extérieurs des bétons recyclés

La confection, la mise en œuvre et l'aspect des bétons de recyclage sont très comparables à ceux du béton témoin (original).

Notons que le béton recyclé à base de concassé de béton est de couleur (grise) normale et qu'elle converge vers le gris foncé au fur et à mesure du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Pour le béton recyclé à base d'agrégats de brique concassé, la couleur du gris pour un faible pourcentage de substitution en granulats recyclés, converge vers la couleur grenat pour de pourcentage élevé de substitution en granulats recyclés.

Il est important de noter que le béton avec 100% de gros et fins granulats de brique présente un phénomène de ségrégation non négligeable et que le décoffrage des moules (cubiques, prismatiques ou cylindriques) est retardé de préférence jusqu'à 56 heures après le coulage.

IV.2.2. Densité et homogénéité

L'homogénéité des bétons recyclés semble être en tout point comparable à celle du béton original (témoin). Par contre, La densité du béton recyclé durci est nettement inférieure à celle du béton ordinaire (tableau 4.3). l'air occlus est d'autant plus élevé que le pourcentage de substitution en agrégats recyclés est croissant. Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [40, 63, 64].

Il est à noter que les bétons de briques présentent des densités plus basses que celles des bétons d'agrégats concassé comme le montre le tableau 4.3. Cependant, le béton de brique peut être classé comme béton léger (densité $< 2024 \text{ kg/m}^3$). Ces résultats confirment ceux des travaux de Coquillat [37].

Tableau 4.3 Valeurs de l'air occlus et densité du béton durci des différents compositions utilisées.

Types de béton	E / C	Air occlus (%)	Densité du béton durci (Kg / m ³)
B0/0	0.61	1.6	2382
B 25/0	0.6	2.1	2334
B 50/0	0.59	2.1	2291
B 75/0	0.58	2.2	2299
B 100/0	0.57	2.8	2258
B 0/25	0.69	2.1	2326
B 0/50	0.77	2.2	2289
B 0/75	0.85	2.8	2320
B 0/100	0.93	2.8	2302
B 50/50	0.75	2	2317
B 100/100	0.89	2	2212
B 100/100 + ADJ	0.86	2.2	2264
B 75/25	0.66	2.2	2291
B 100/50	0.72	1.9	2290
B 25/75	0.85	1.8	2324
B 50/100	1.08	1.8	2283
C 25/0	0.6	2.2	2248
C 50/0	0.59	2.2	2259
C 75/0	0.58	2.7	2221
C 100/0	0.57	2.5	2151
C 0/25	0.69	2.3	2318
C 0/50	0.77	2.5	2276
C 0/75	0.85	2.5	2274
C 0/100	0.93	2.7	2202
C 50/50	0.75	2.7	2239
C 100/100	0.89	3.6	2024
C 100/100 + ADJ	0.86	3.4	2102
C 75/25	0.66	2.6	2135
C 100/50	0.72	2.7	2207
C 25/75	0.89	2.3	2266
C 50/100	1.08	3	2141
D1	0.77	2.1	2250
D2	0.78	2.5	2187
D3	0.75	2.4	2273
D4	0.73	2.2	2209

IV.2.3. Résistance à la compression

Les résultats des essais de la résistance à la compression sont résumés dans les tableaux 4.4, 4.5 et 4.6 et dans les figures 1 à 8 (voir Annexe2).

IV.2.3.1. Développement de la résistance au cours du temps

Les différents test concernant l'évolution de la résistance à la compression en fonction du facteur temps pour les différents types de béton, laissent conclure que la résistance des différents bétons recyclés réalisés (que se soit de granulats concassés de brique ou des deux à la fois), augmente avec l'âge des éprouvettes et de manière analogue que celle du béton ordinaire [figures 1 à 8 – Annexe2]. ceci explique que le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les bétons recyclés ce fait d'une manière normale et suit une augmentation avec l'âge. Par contre, le taux d'évolution de cette résistance à la compression se diffère d'un béton à l'autre en fonction de l'âge et surtout en fonction de la nature et du pourcentage de substitution en granulats recyclés.

D'après les figures 4.5 à 4.9, on remarque que l'évolution de la résistance à la compression de tout les bétons recyclés commence d'est le jeune âge (3 jours), ce qui est plus ou moins faible par rapport à celle du béton ordinaire et arrive à atteindre un décalage non négligeable à 90 Jours. Pour le béton recyclé de granulats concassés, le taux d'évolution débute en moyenne de 20% en moins (à 28 jours) par rapport au béton ordinaire et arrive jusqu'à 30% à 90 jours lorsque les gros granulats sont remplacés et de 30 à 40% lorsque les fins sont remplacés. Pour le béton de brique, le taux d'évolution commence de 30 à jeune âge et arrive jusqu'à 42% de moins à long terme que celui du béton naturel. Lorsque les granulats naturels sont remplacés par les granulats de brique et de béton concassé (cas des béton D1 à D4), le taux d'évolution est en moyenne de 35 à 42% moins que celui du béton de granulats naturels.

Tableau 4.4 Résistance à la compression des bétons recyclés à base de granulats concassés.

Types de Béton	3 jours		7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
B0/0	9.83	100	17.23	100	30.45	100	36.07	100
B 25/0	8.93	90.84	14.95	86.8	26.4	86.7	31.22	86.5
B 50/0	8.34	84.84	14.25	82.7	25.9	85	30.83	85.5
B 75/0	8.19	83.3	14.11	81.9	25.1	82.4	28.77	79.8
B 100/0	7.89	80.3	13.06	75.8	24.2	79.4	25.36	70.3
B 0/25	9.45	96.1	14.47	83.9	26.9	88.3	30.71	85.14
B 0/50	8.52	83.9	13.66	79.3	24.2	79.5	28.14	78.01
B 0/75	7.48	76.1	13.08	75.9	23	75.5	27.33	75.77
B 0/100	7.34	74.7	12.41	72.1	22.5	73.9	24.57	68.11
B 50/50	9.2	93.6	13.17	76.4	24.1	79.1	33.83	93.78
B 100/100	6.8	69.2	12.83	74.5	21.2	69.9	23.25	64.45
B 100/100 + ADJ	8.32	84.6	14.7	85.3	24.84	81.57	25.41	70.44
B 75/25	7.59	77.2	13.2	76.6	24.8	81.5	26.63	73.83
B 100/50	6.97	70.1	12.24	71	22.38	73.5	25.07	69.5
B 25/75	7.55	76.8	12.2	70.8	22.8	74.9	26.21	72.66
B 50/100	7.18	73	12.6	73.1	21.82	71.6	23.14	64.15

Note : la valeur en pourcentage (%) dans les tableaux 4.4 à 4.6 indique le rapport (%) de la résistance du béton recyclé $B_{G/S}$ sur celle du béton ordinaire $B_{0/0}$

Tableau 4.5 Résistance à la compression des bétons recyclés à base d'agrégats de briques concassées.

Types de Béton	3 jours		7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
B0/0	9.83	100	17.23	100	30.45	100	36.07	100
C 25/0	7.22	73.5	14.58	84.6	22.5	73.9	23.48	65.1
C 50/0	6.93	70.5	13.16	76.4	21.6	70.9	22.15	61.4
C 75/0	7.15	72.7	12.66	73.5	20.83	68.4	21.25	58.9
C 100/0	6.91	70.3	10.25	59.5	20.33	66.7	20.95	58.1
C 0/25	9.63	97.9	16.83	97.7	28.75	94.4	29.22	81
C 0/50	8.32	84.6	15.83	91.8	26.16	85.9	26.69	74
C 0/75	7.81	79.5	15	87	25.58	84	26.19	72.6
C 0/100	7.46	75.8	12.33	71.5	21.25	69.8	22.28	61.7
C 50/50	9.69	98.57	13.5	78.4	21.41	70.3	21.99	60.9
C 100/100	5.28	53.7	8.66	50.3	18.58	61.00	19.12	53.00
C 100/100 + ADJ	5.93	60.3	9.93	57.6	21.08	69.2	21.83	60.5
C 75/25	7.45	75.8	12.11	70.3	21.2	69.6	21.98	60.9
C 100/50	6.03	61.3	12.42	72.1	20.45	67.2	21.27	58.9
C 25/75	6.38	64.9	13.33	80.3	22.9	75.2	23.32	64.6
C 50/100	4.92	50.1	11.08	64.3	19.33	63.5	21.09	58.5

Tableau 4.6 Résistance à la compression des bétons partiellement recyclés à base d'agrégats de béton et brique concassée

Types de Béton	3 jours		7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	Mpa	%	MPa	%	MPa	%
B0/0	9.83	100	17.2	100	30.4	100	36.07	100
D1	6.4	65.1	17.7	102.9	20.5	67.4	22.38	62
D2	6.8	69.2	17.8	103.5	19.7	64.8	21.49	59.6
D3	5.8	59	17	98.8	19.8	65.1	22.7	62.9
D4	6.4	65.1	17.2	100	20.8	68.4	23.1	64

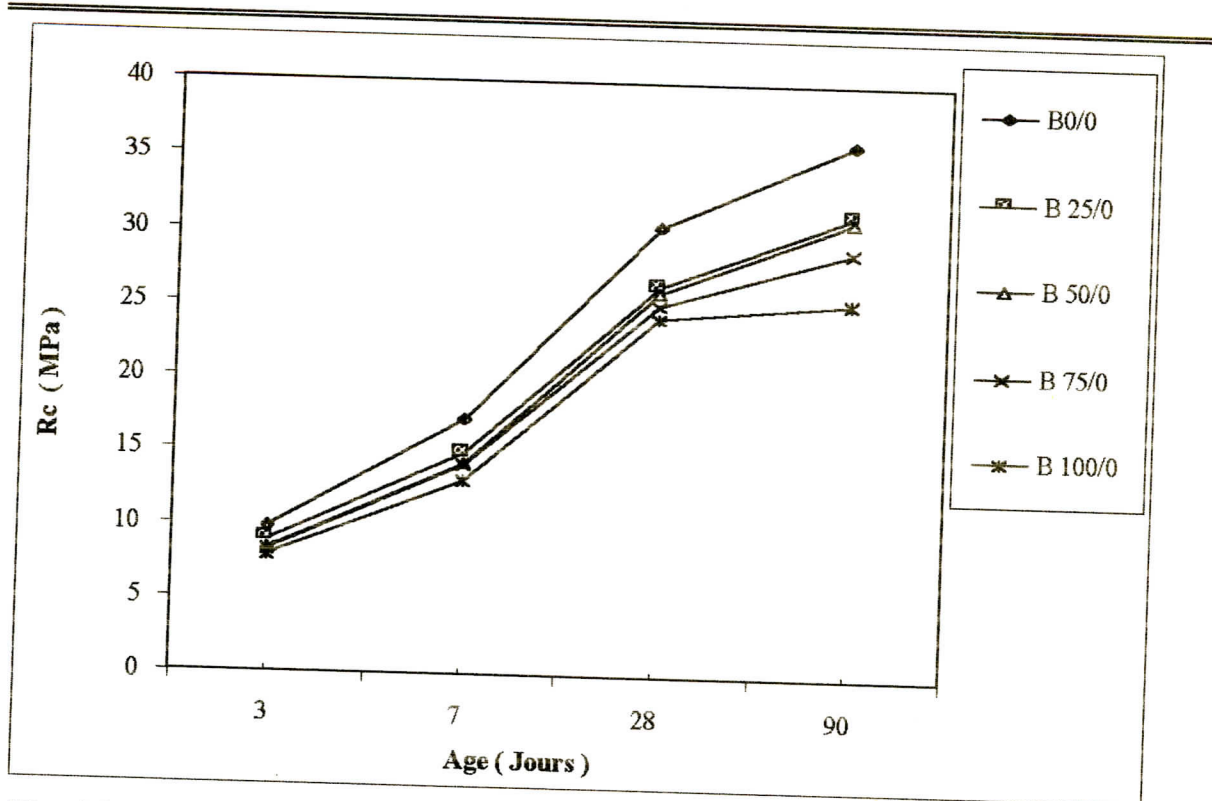


Fig. 4.5 Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de granulats concassés à 100% de granulats fins naturels.

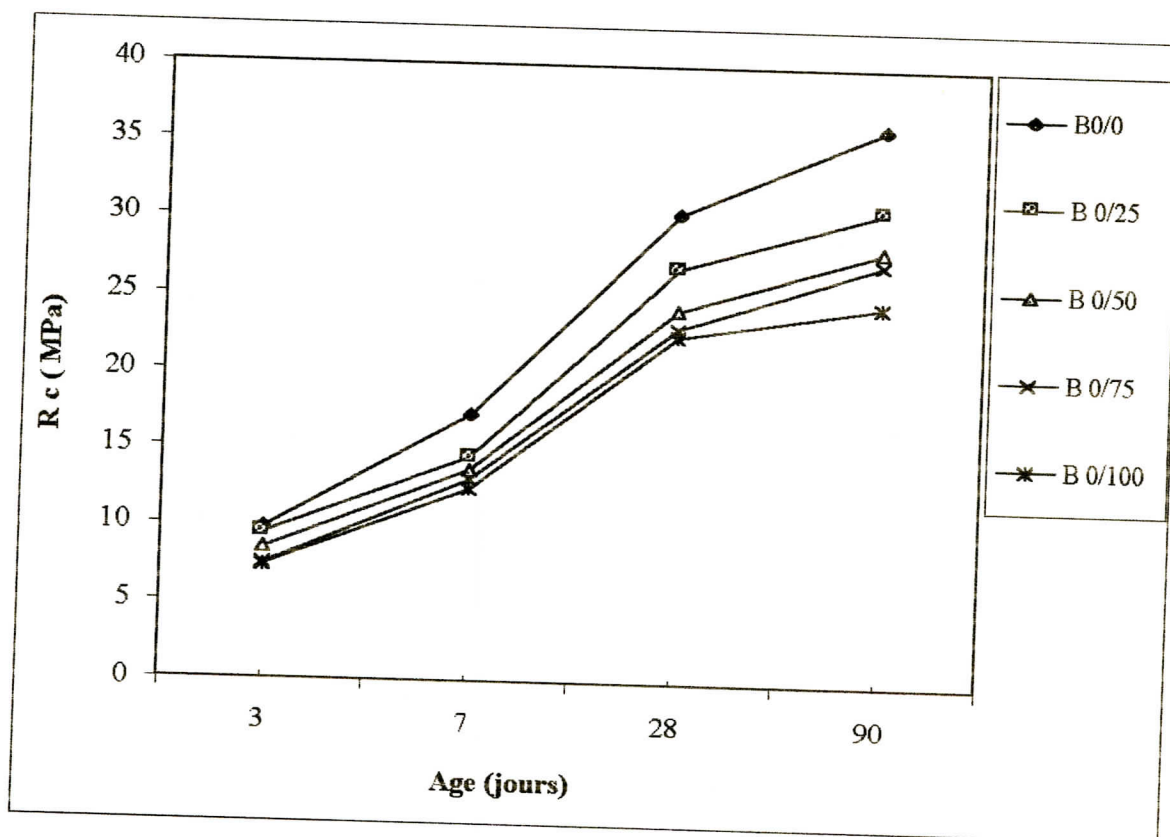


Fig. 4.6 Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de granulats concassés à 100% de gros granulats naturels.

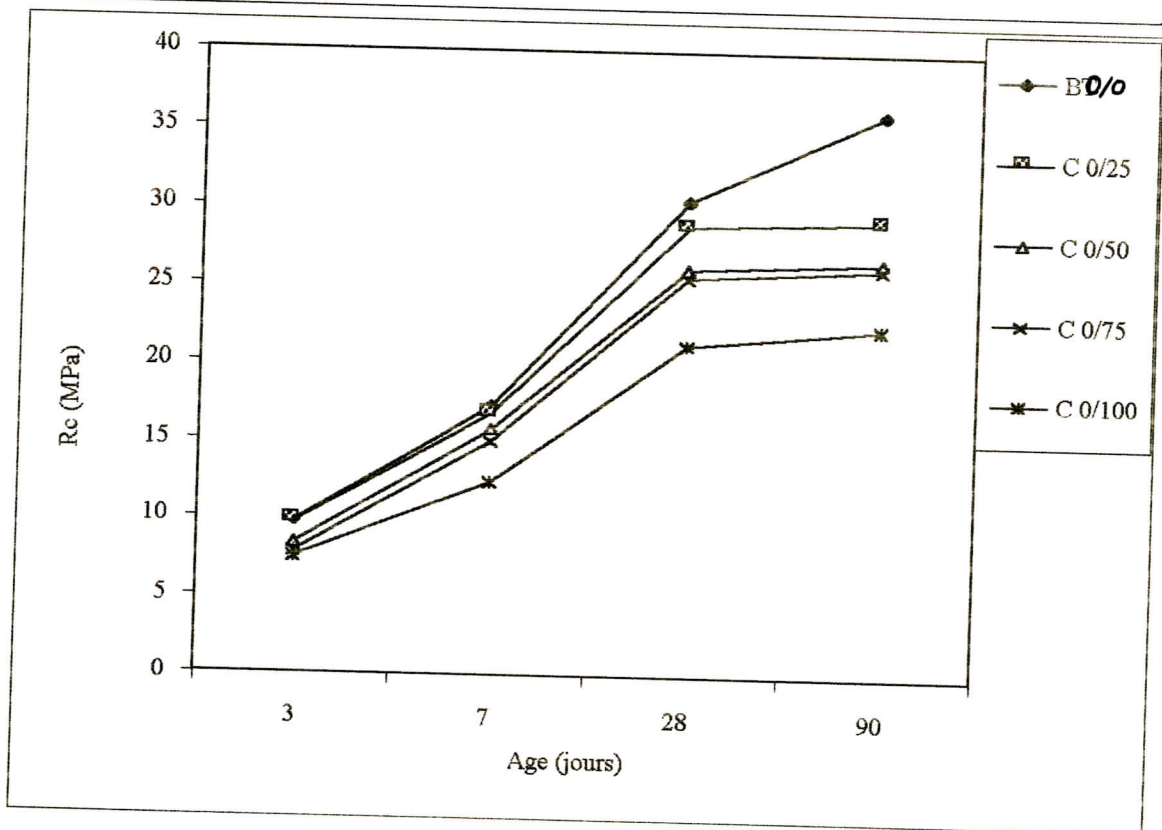
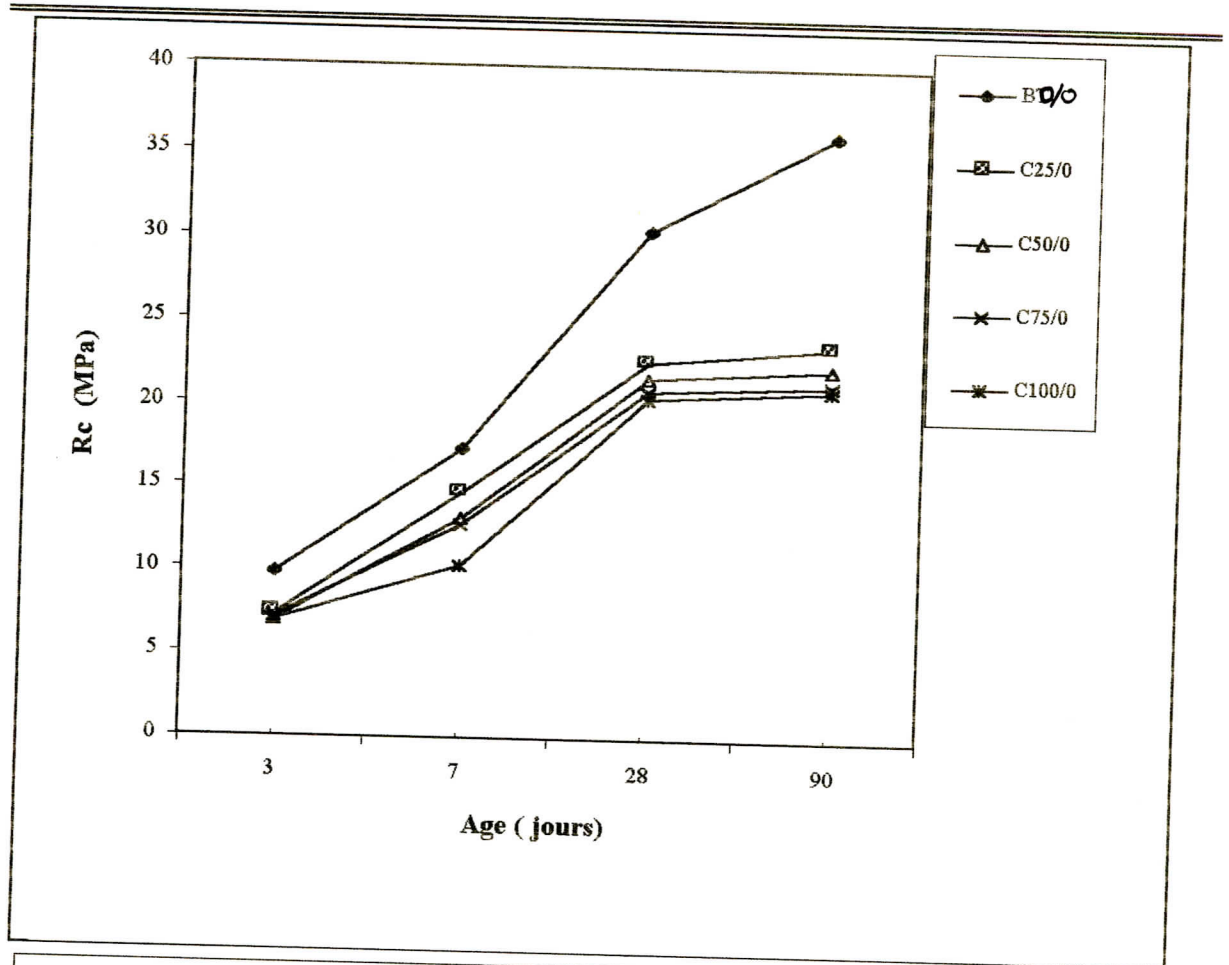


Fig. 4.8 Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés de briques concassés à 100% de gros granulats naturels.

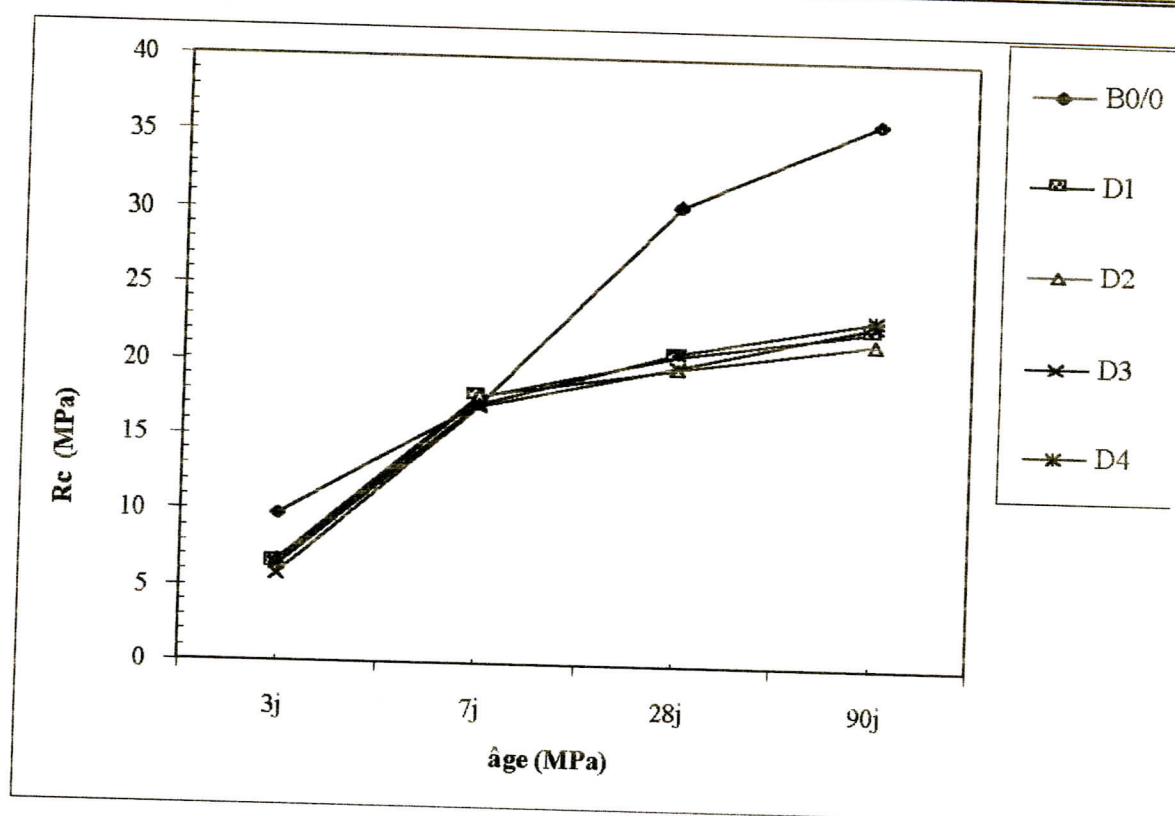
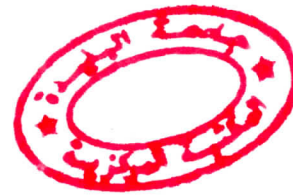


Fig. 4.9 Evolution de la résistance à la compression des bétons partiellement recyclés à base de combinaison d'agrégats de brique et béton concassée.

IV.2.3.2. Effet du pourcentage de substitution en gros granulats recyclés.

Nous remarquons d'après les figures 4.10 et 4.12 que les bétons recyclés présentent des résistances à la compression plus faibles que le béton ordinaire. Une chute de 10 à 20% à 28 jours et qui arrive jusqu'à 30% à 90 jours pour le béton de granulats concassés, par contre une autre de 10 à 35% à 28 jours concernant le béton de brique et qui s'étalent jusqu'à 40% à l'âge de 90 jours. Ces résultats sont comparables à une moyenne de 15 à 30% trouvée par d'autres chercheurs [38, 64]

Cette réduction dans la résistance à la compression est due principalement à l'effet du mortier de l'ancien béton inerte qui est attaché aux agrégats qui gêne le bon déroulement d'hydratation du ciment. Il faut noter aussi que les bétons à base



d'agrégats de démolition ont un pourcentage élevé de E / C qui se traduit par une baisse de la résistance à la compression.

IV.2.3.3. Effet du pourcentage de substitution en granulats fins recyclés.

Il semble des figures 4.11 et 4.13, que la substitution en granulats fins recyclés cause une chute plus importante dans la résistance à la compression des bétons recyclés. Cependant, on remarque une chute de 10 à 30% à 28 jours allant jusqu'à 40% pour le béton de granulats concassés. Par contre, pour le béton de brique, elle est de l'ordre de 30% à 28 jours et arrive jusqu'à 45% à 90 jours. Ces résultats confirment ceux trouvés par d'autres chercheurs [26, 37, 40 et 65] où des chutes de l'ordre de 30% et de 40% ont été observés par le béton de démolition et de la brique concassée respectivement.

IV.2.3.4. Effet combiné

Des figures 1 à 8 (Annexe2) et des tableaux 4.4 et 4.5, l'effet combiné de pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés semble d'être beaucoup plus néfaste sur la résistance à la compression du béton recyclé. ceci s'explique sans doute par le pourcentage de granulats fins recyclés qui sont beaucoup plus porteur de la poussière de concassage et de mortier inerte d'ancien béton, sans oublier le pourcentage élevé d'absorption d'eau de ces granulats (surtout les granulats fins de la brique) qui contribuent dans la chute de la résistance à la compression du béton recyclés. Conclusion confirmée par l'ensemble des chercheurs (voir II.8.1).

De la figure 4.8 et du tableau 4.7, il apparaît que la résistance à la compression des bétons recyclés à base de combinaison d'agrégats de brique et béton ($D_{G/S}$) chute avec le facteur temps et arrive jusqu'à 40% par rapport à celle du béton ordinaire à 90 jours. Cette chute de résistance est à notre avis causée par les mêmes paramètres cités au paragraphe précédente.

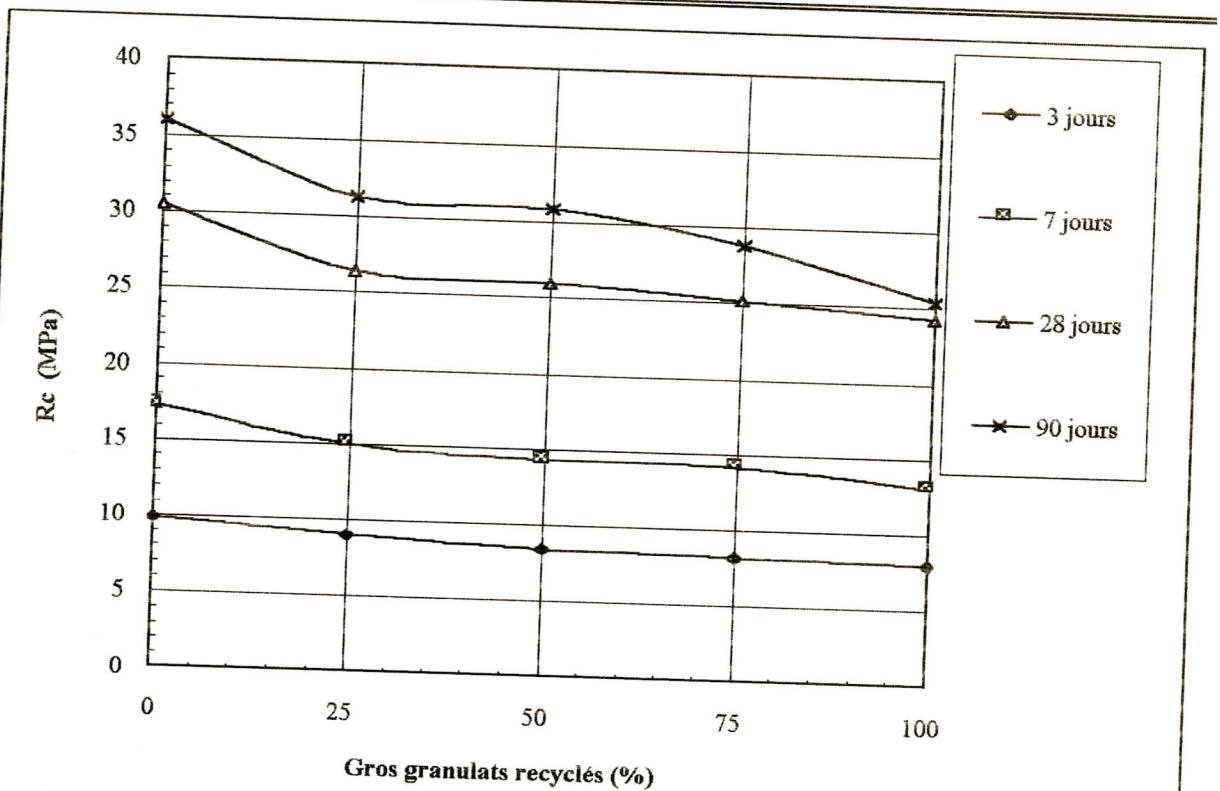


Fig. 4.10 Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats de béton concassé.

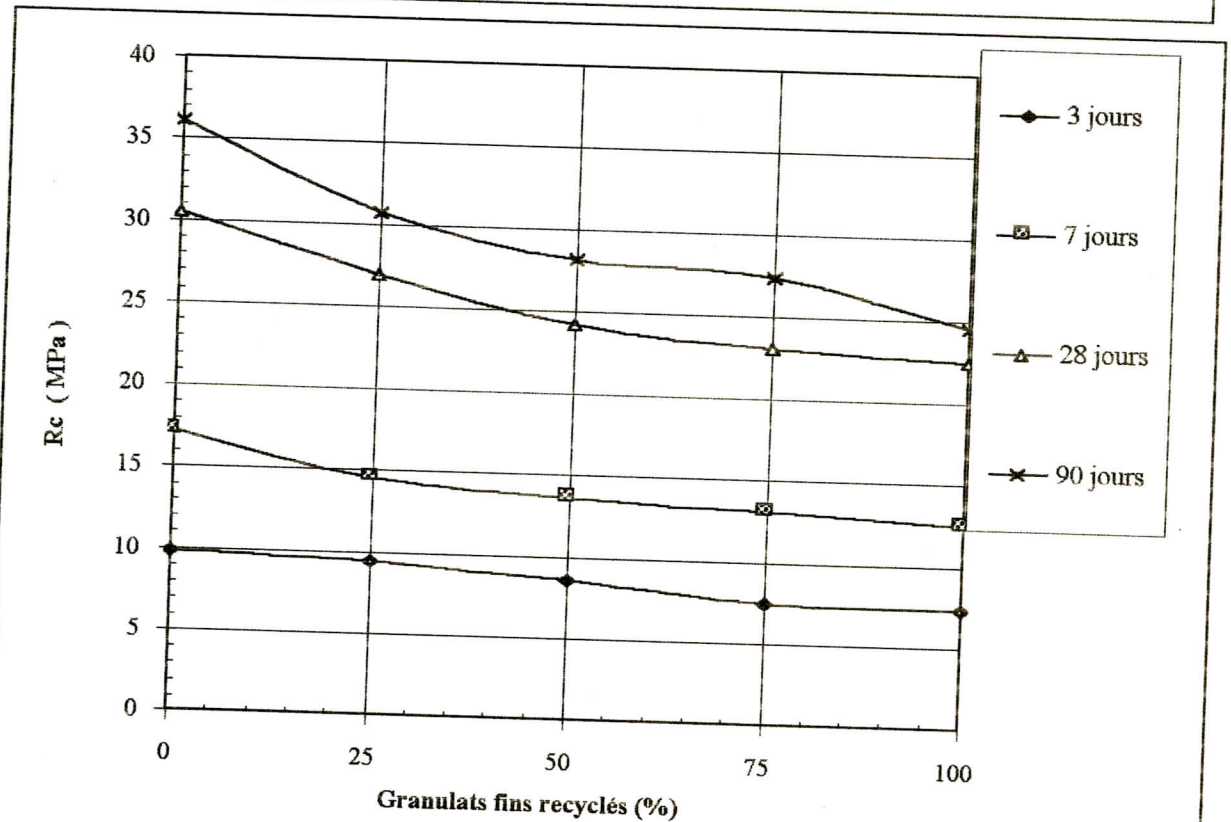


Fig. 4.11 Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins de béton concassé.

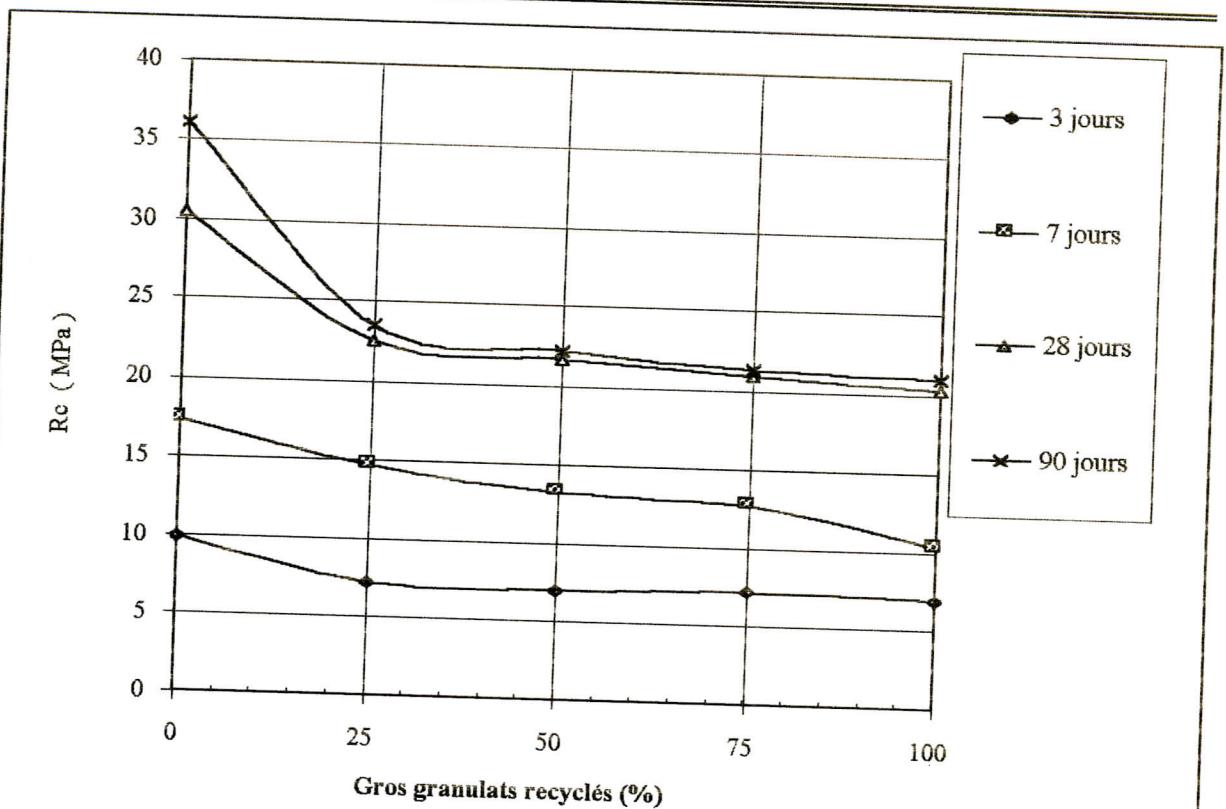


Fig. 4.12 Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats de brique concassé.

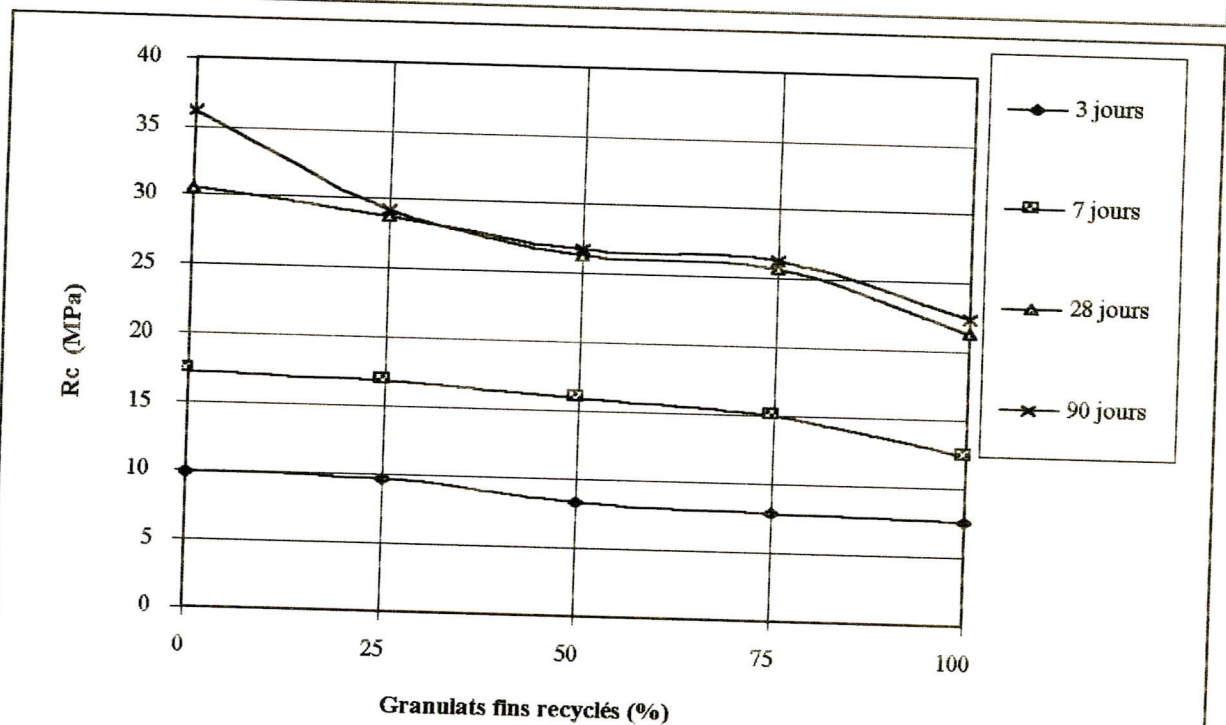


Fig. 4.13 Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins de brique concassé.

IV.2.3.5. Loi de régression

Afin de tirer une loi expérimentale à partir de cet essai, nous avons calculé les droites de régression de la résistance à la compression des différents compositions à l'âge de 28 jours (figures 4.14 à 4.21).

Nous constatons des figures 4.14 à 4.19, que la dispersion des résultats par rapport à la droite de régression est plus importante pour les bétons à base de gros granulats recyclés. Alors, afin d'éviter une chute considérable (>30%) de la résistance à la compression du béton recyclés par rapport à celle d'un béton ordinaire, il est préférable de limiter le pourcentage de substitution à environ 75% en gros granulats recyclés et 50% en granulats fins recyclés, pour le béton B_{G/S} et à 25% et 50% respectivement pour le béton C_{G/S}.

De la figure 4.20 et 4.21, il semble que la loi de régression la plus proche de la réalité de la chute de résistance à la compression des bétons recyclés (comme exemple : B_{G/0} et C_{G/0}), est la droite de second régression qui peut être estimée par une formule polynomiale du type:

$$Y = a x^3 + b x^2 + c x + d$$

x: est la variable

	Béton de granulats concassés	Béton de brique
a	-0.00006	-0.000012
b	0.01185	0.02347
c	-0.75114	-1.49110
d	99.81429	99.67286

Les données à l'origine de la droite de régression sont alors calculées après avoir tracer cette dernière sur le graphe.

Analyse et discussion des résultats

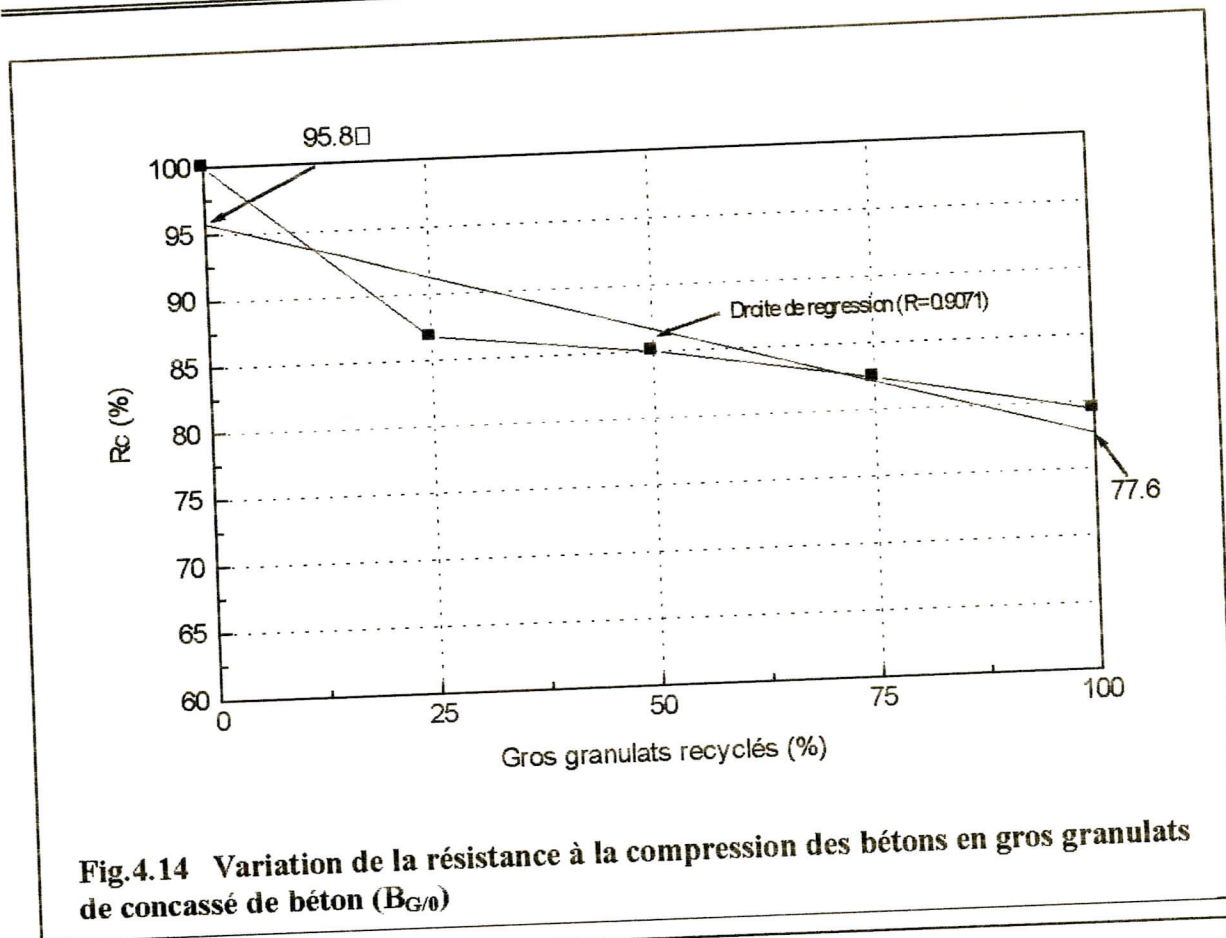


Fig.4.14 Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de béton ($B_{G/0}$)

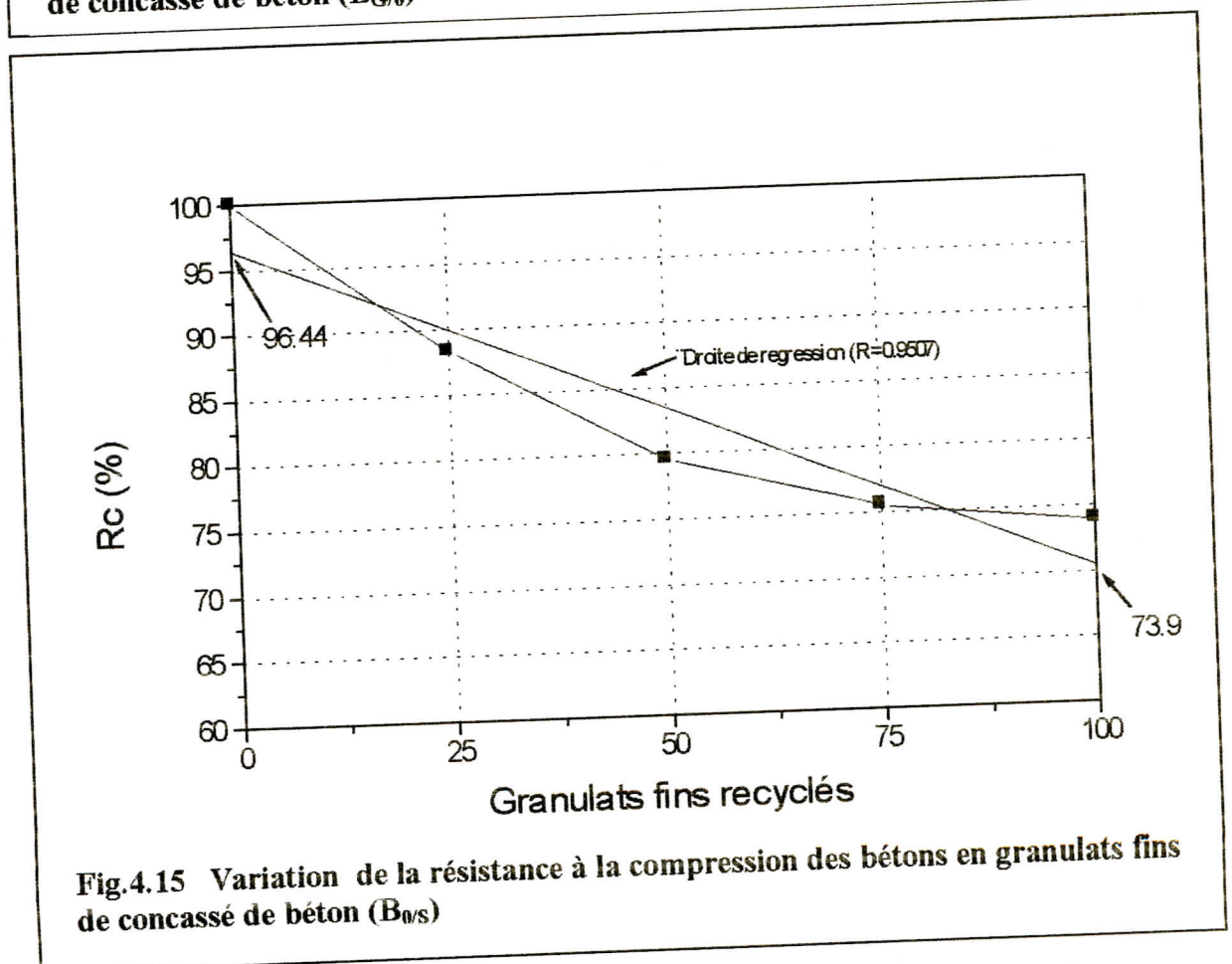


Fig.4.15 Variation de la résistance à la compression des bétons en granulats fins de concassé de béton ($B_{0/S}$)

Analyse et discussion des résultats

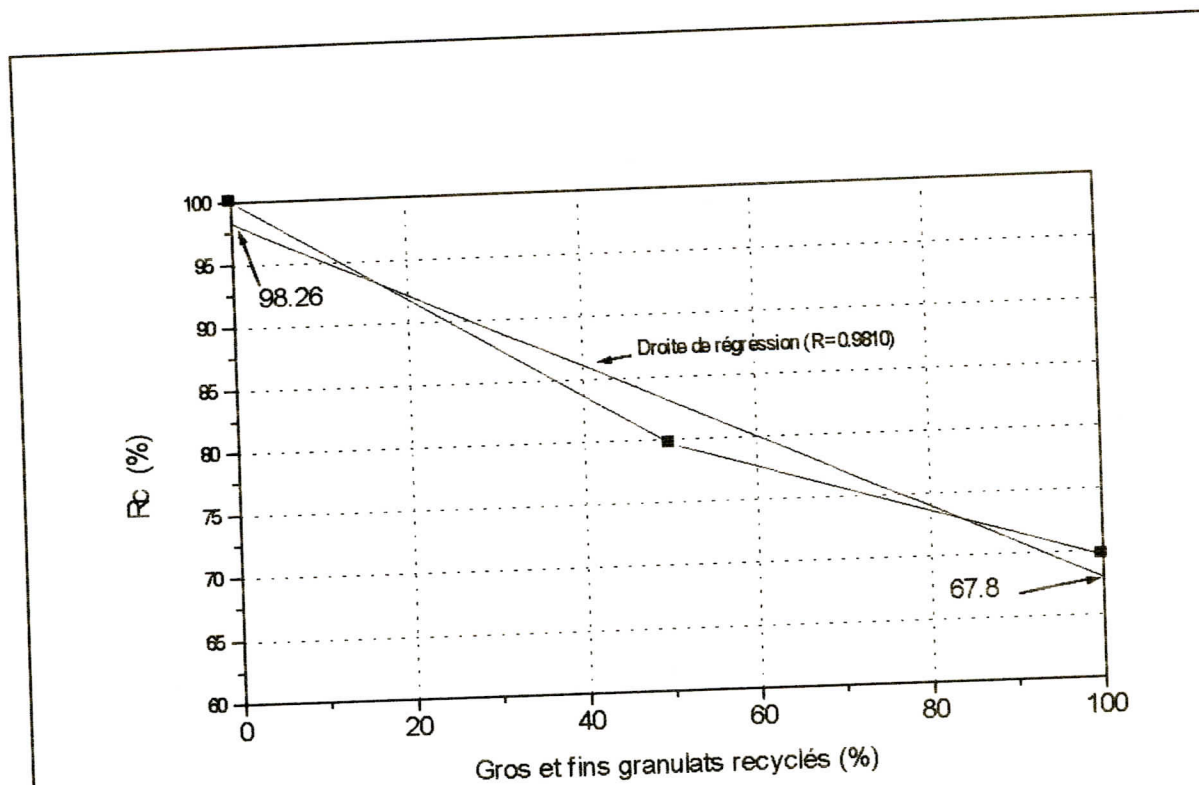


Fig.4.16 Variation de la résistance à la compression des bétons en gros et fins granulats de concassé de béton ($B_{G/S}$)

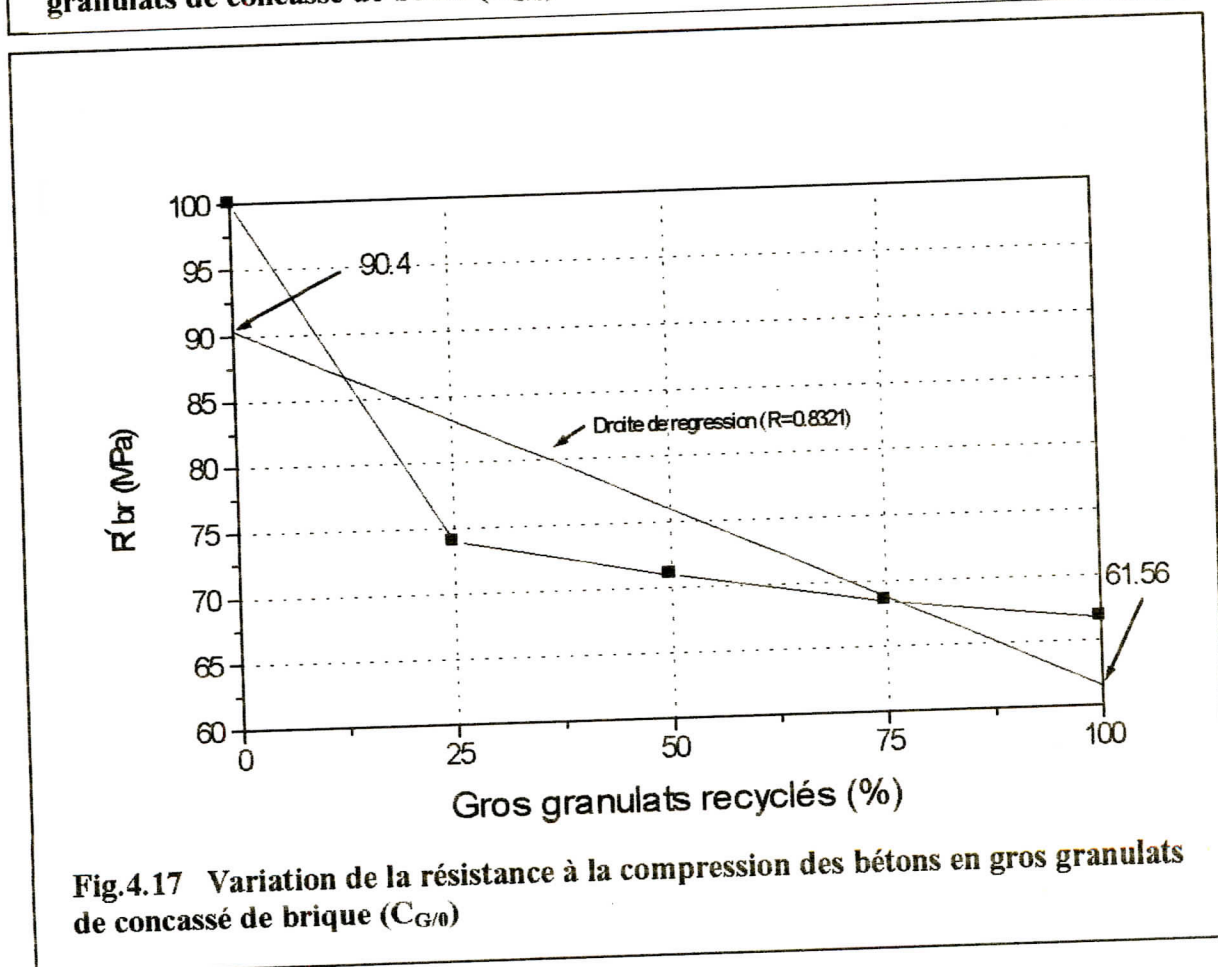
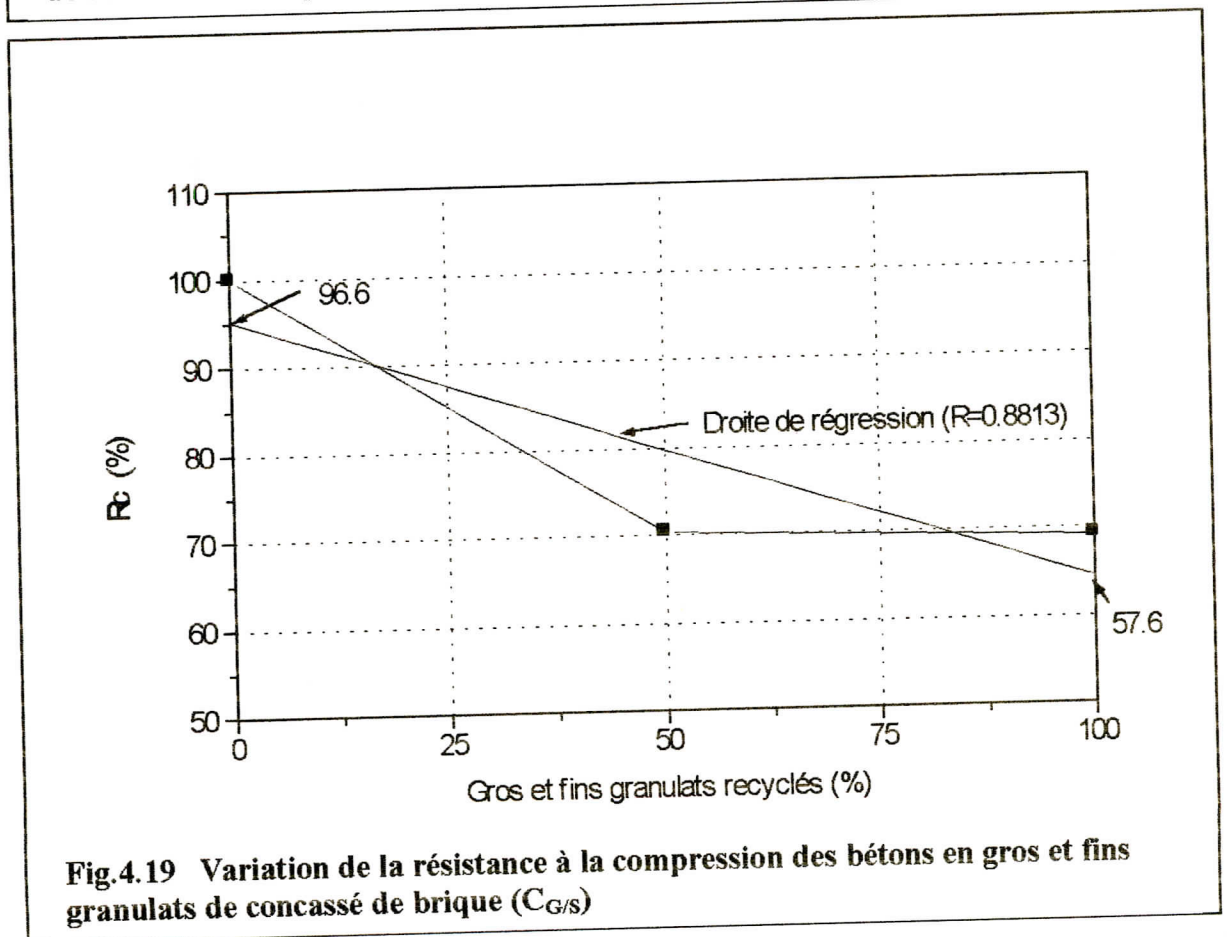
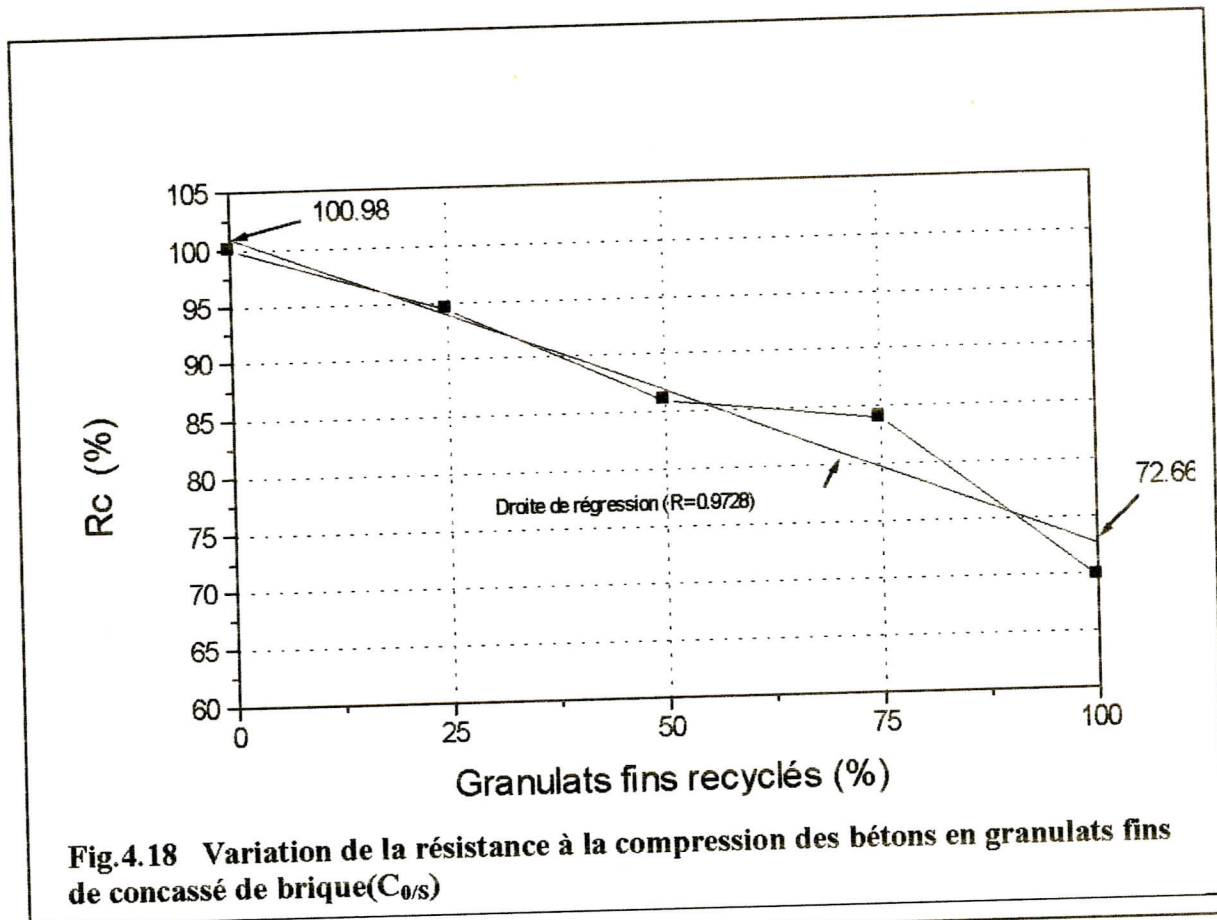
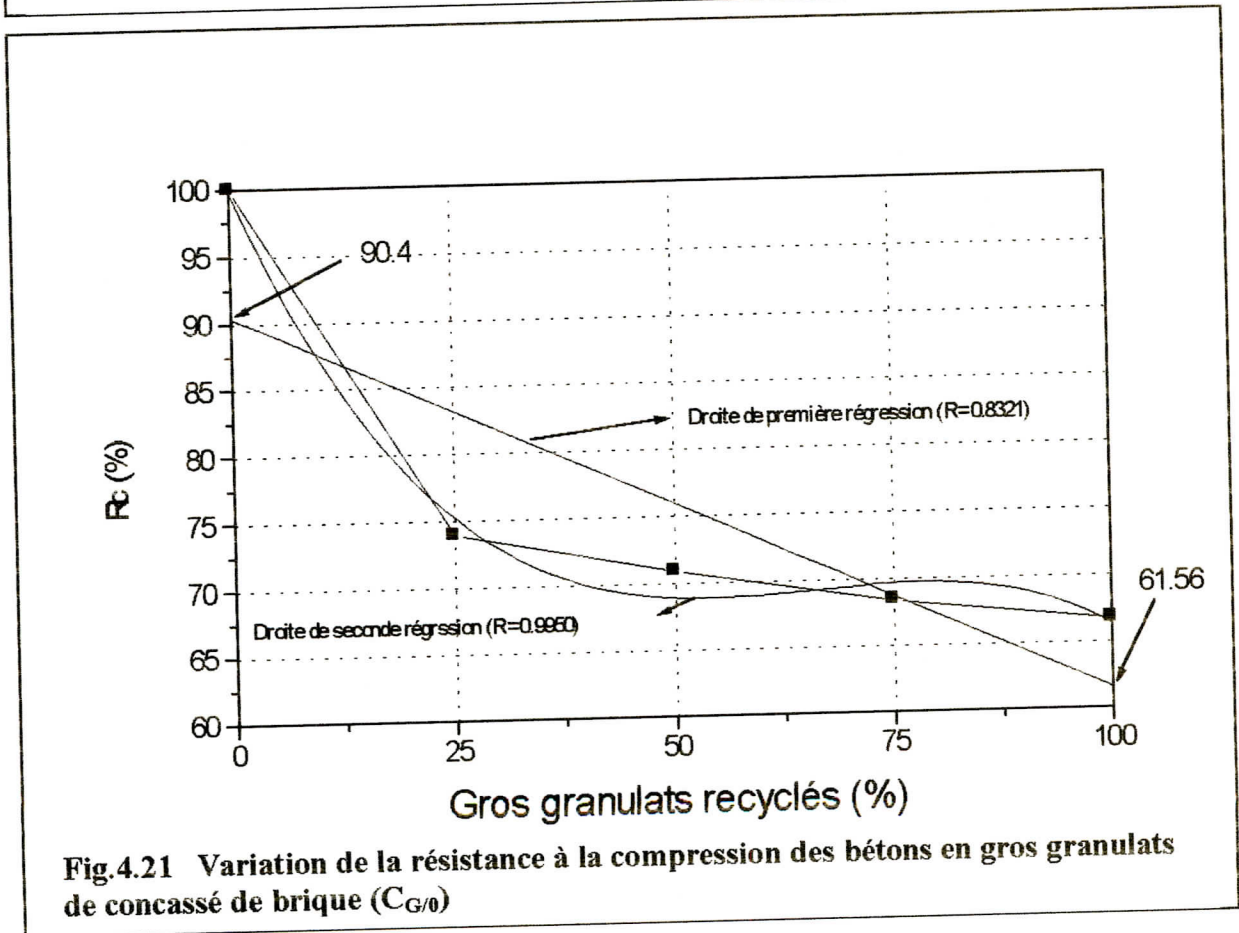
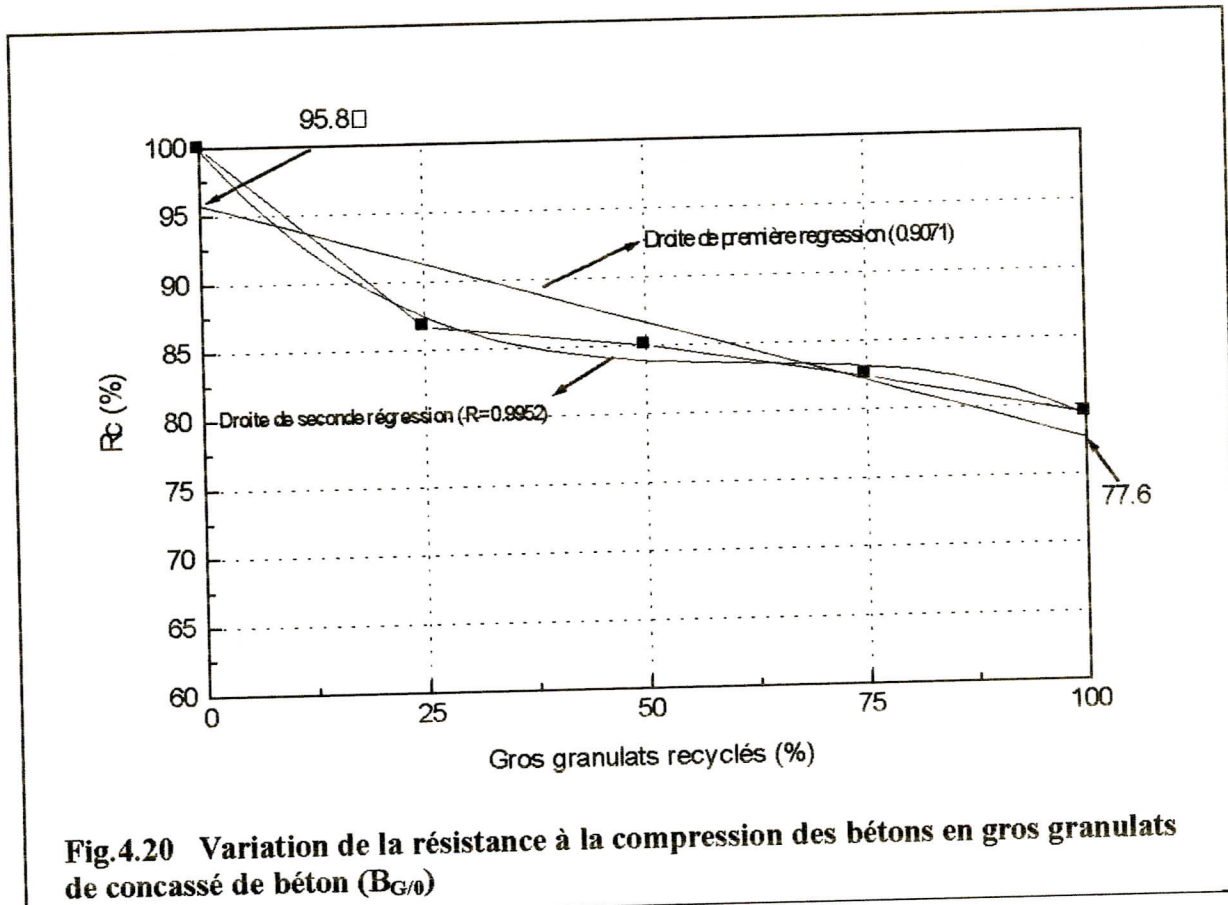


Fig.4.17 Variation de la résistance à la compression des bétons en gros granulats de concassé de brique ($C_{G/0}$)





IV.2.3.6. Relation entre Rc à jeune âge et Rc à long terme

Pour le béton d'agrégats naturel, la résistance à la compression à long terme est fonction de celle à jeune âge d'après la formule de Dreux [23]:

$$\frac{R_{c j}}{R_{c 7}} = 2.92 - \frac{1.77}{\sqrt{\log j}} \quad (4.1)$$

une formule similaire est proposée par le BAEL 91 :

$$R_{c j} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} R_{c 28} \quad (4.2)$$

Conformément aux formules 4.1 et 4.2, la résistance à la compression du béton ordinaire ($B_{0/0}$) à 28 jours est estimée à :

$$R_{c 7} = 0.69 R_{c 28} \quad \text{d'après 4.1}$$

$$R_{c 7} = 0.66 R_{c 28} \quad \text{d'après 4.2}$$

Pour les différents bétons réalisés on a :

Type de béton	R _{c7} / R _{c28}	
	Résultats trouvés	d'après Coquillat[37]
Béton témoin d'agrégats naturels	0.57	/
béton recyclé de concassé de béton B _{100/100}	0.60	0.59
béton recyclé de concassé de brique C _{100/100}	0.52	0.61
béton recyclé de concassé de brique et béton D ₄	0.82	0.58

D'après les résultats ci-dessus, il semble que la formule 4.2 est la plus proche pour estimer la résistance à la compression du béton recyclé B_{G/S} et C_{G/S}.

IV.2.3.7. Relation Résistance à la compression et densité

Nous remarquons d'après le tableau 4.3 et figures 1 à 8 (Annexe2), que, comme prévu, la résistance à la compression est proportionnelle à la densité du béton recyclé. Ceci s'explique par le fait que le béton recyclé se compose comme un béton léger vis à vis la quantité d'eau de gâchage élevé qui demande, et par la suite le risque de porosité surestimée. Il semble que ces deux paramètres clés sont à l'origine de la chute de densité et par la suite la résistance à la compression du béton recyclé. Des résultats comparables ont été observés par Coquillat [37].

IV.2.3.8. Rapport résistance à la compression indice sclérométrique

Le tableau 4.7 donne la résistance à la compression par essai direct (écrasement) et essai indirect (scléromètre).

De la figure 4.22, on remarque qu'une réduction de la résistance à la compression est aussi décelée par l'essai sclérométrique lorsque les granulats naturels sont substitués par des granulats de béton démolé ou de brique concassée. Du tableau 4.7, on constate que le taux de réduction entre les différentes valeurs trouvées par l'essai d'écrasement et celui du scléromètre, varient entre 4 et 8%. Cependant, comme pour un béton ordinaire, on peut dire que l'estimation de la résistance à la compression du béton recyclé par l'essai indirecte (scléromètre) est possible.

Tableau 4.7 Résistance à la compression par essais indirecte au scléromètre et à l'ultrason à 28 jours

Types de béton	Rc	Rc (I sc)	Rc (V son)
	(MPa)	(MPa)	(Mpa)
B _{0/0}	30.45	27.83	29.33
B _{25/0}	26.40	24.21	25.66
B _{50/0}	25.90	25.20	26.20
B _{75/0}	25.10	23.36	26.83
B _{100/0}	24.20	22.51	23.33
B _{0/25}	26.90	27.33	27.33
B _{0/50}	24.20	24.91	23.93
B _{0/75}	23.00	23.93	22.50
B _{0/100}	22.50	21.68	23.10
B _{50/50}	24.10	21.95	25.16
B _{100/100}	21.20	19.27	20.83
B _{100/100} + Adj	24.84	25.96	23.96
B _{75/25}	24.80	22.23	24.00
B _{100/50}	22.38	23.62	23.16
B _{25/75}	22.80	22.52	23.18
B _{100/50}	21.82	23.87	20.86
C _{25/0}	22.50	24.87	23.83
C _{50/0}	21.60	19.27	22.83
C _{75/0}	20.83	20.11	19.83
C _{100/0}	20.33	22.02	20.03
C _{0/25}	28.75	23.64	27.93
C _{0/50}	26.16	27.23	26.66
C _{0/75}	25.58	21.95	24.16
C _{0/100}	21.25	21.62	18.66
C _{50/50}	21.41	18.51	19.83
C _{100/100}	18.58	18.20	15.33
C _{100/100} + Adj	21.08	17.11	17.5
C _{75/25}	21.20	18.00	19.66
C _{100/50}	20.45	17.50	18.82
C _{25/75}	22.90	18.01	18.83
C _{100/50}	19.33	17.03	15.16
D ₁	20.50	19.02	21.16
D ₂	19.70	15.83	15.33
D ₃	19.80	15.60	15.21
D ₄	20.80	18.51	17.93

Rc (I sc) : Résistance à la compression estimée par l'indice sclérométrique

Rc : Résistance à la compression par essai directe

Rc (V son) : Résistance à la compression estimée par la vitesse du son

A titre de rappel pour les pourcentages des compositions de type D, voir le chapitre 3, page 80, tableau 3.12.

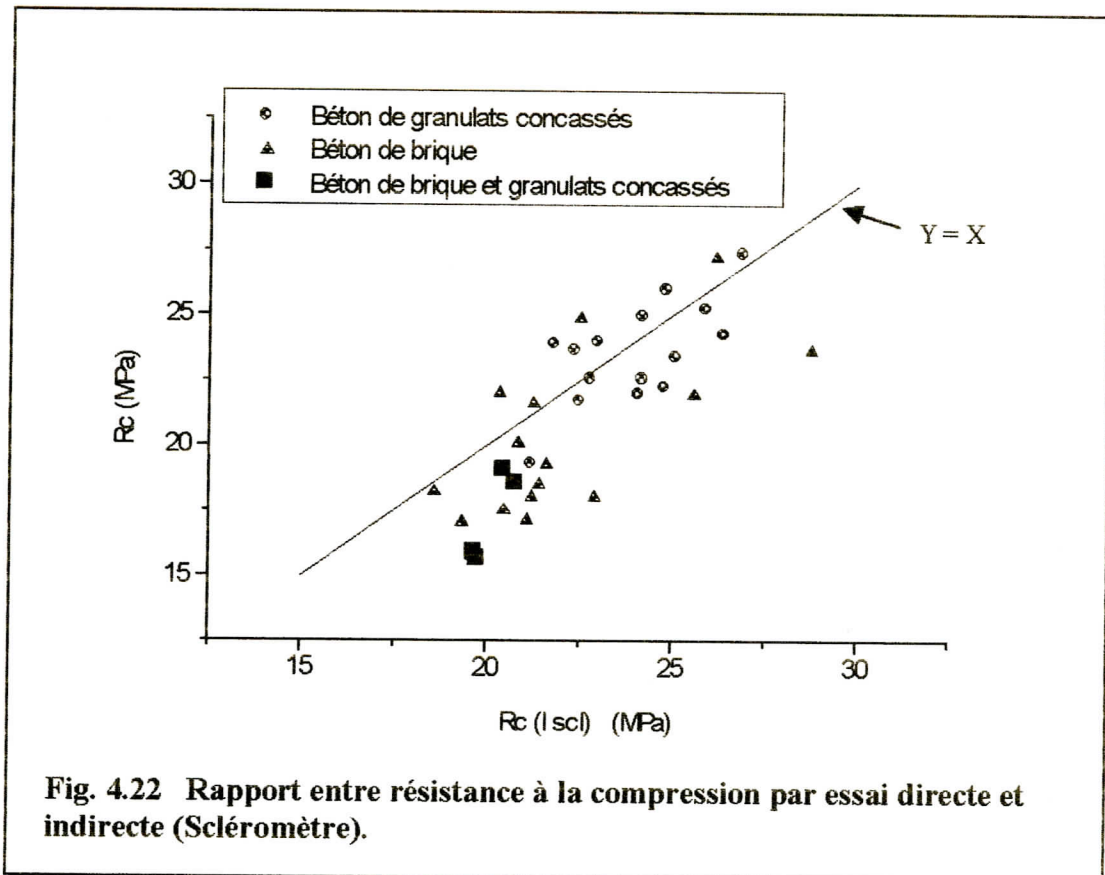


Fig. 4.22 Rapport entre résistance à la compression par essai directe et indirecte (Scléromètre).

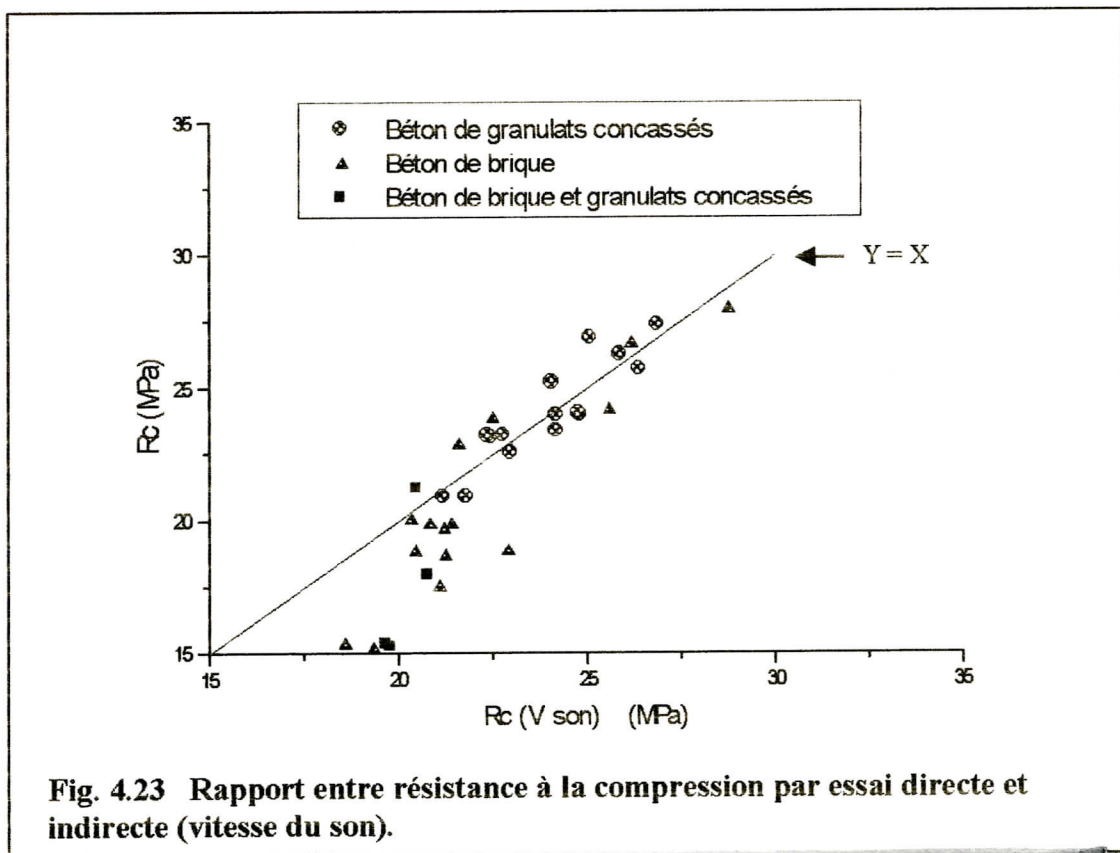
R_c : Résistance à la compression

R_c (I scl) : Résistance à la compression mesurée par indice sclérométrique

IV.2.3.9. Rapport résistance à la compression et la vitesse du son

Du tableau 4.7 et de la figure 4.23, il semble que la mesure par vitesse du son donne une meilleure estimation de la résistance à la compression qu'avec le scléromètre. L'écart maximum entre les deux résistances est évalué pour le béton recyclé de béton concassé à 6% (1.73 MPa) lors de substitution uniquement en gros granulats recyclés, à 3% (0.6 MPa) pour le béton de granulats fins recyclés et au environ de 4% (1.06 MPa) pour le béton de gros et fins granulats recyclés. De la même façon pour le béton recyclé de concassée de brique, les pourcentages d'écart sont de 5% (1.33 MPa) pour béton de gros granulats recyclés, 12% (2.5 MPa) pour le béton de granulats fins recyclés et arrive à 21% lorsqu'il s'agit de béton de gros et fins granulats recyclés. Pour le béton recyclé à base de gros et fins agrégats de brique et béton concassé, l'écart est de 23% (4.6 MPa). Cependant, l'écart est plus élevé avec

l'augmentation du pourcentage de substitution en granulats fins recyclés de la brique concassée. Cette écart peut s'expliquer par la porosité élevée de ce béton contenant des granulats ayant un module de finesse élevé et la ségrégation importante du béton frais et qui donne naissance à plusieurs poches vides (pores capillaires) à l'intérieur du béton durci. Ces pores sont la cause primaire dans l'élévation du temps de parcours de l'onde émis à l'une des facettes de l'éprouvette et recevez à l'autre facette et par la suite l'abaissement de la vitesse du parcours.



R_c : Résistance à la compression

$R_c (V \text{ son})$: Résistance à la compression mesurée par la vitesse du son

IV.2.4. Résistance à la traction

IV.2.4.1. Effet du pourcentage de substitution sur la résistance à la traction

Le tableau 4.8 résume les résultats de la résistance à la traction pour les différents bétons à l'âge de 7, 28 et 90 jours.

La résistance à la traction décroît avec l'augmentation du pourcentage de substitution en granulats recyclés d'une manière analogue à celle observée pour la résistance à la compression.

Les figures 4.24 à 4.27 montrent la chute de résistance à la traction du béton de granulats concassés à différents âges par rapport à celle du béton ordinaire. Cette chute est de l'ordre de 20% à 28 jours mais pouvant atteindre 70% à 90 jours. Par contre on remarque une chute de 20% à 28 jours et qui arrive au maximum de 30% à 90 jours pour le béton de granulats fins recyclés. Pour le béton de concassé de brique, ce n'est pas le cas, la résistance chute avec le temps et avec le pourcentage de substitution en granulats recyclés (gros et fins).

En comparaison avec la résistance à la traction du béton naturel, le béton recyclé présente une chute en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés et surtout en granulats fins [fig.25 et 27]. Torai et Hendriqus [5] ont trouvé des chutes de résistance à la traction comparables ; de 10% si uniquement les gros granulats sont substitués et arrive jusqu'à 20% si les gros et fins sont substitués.

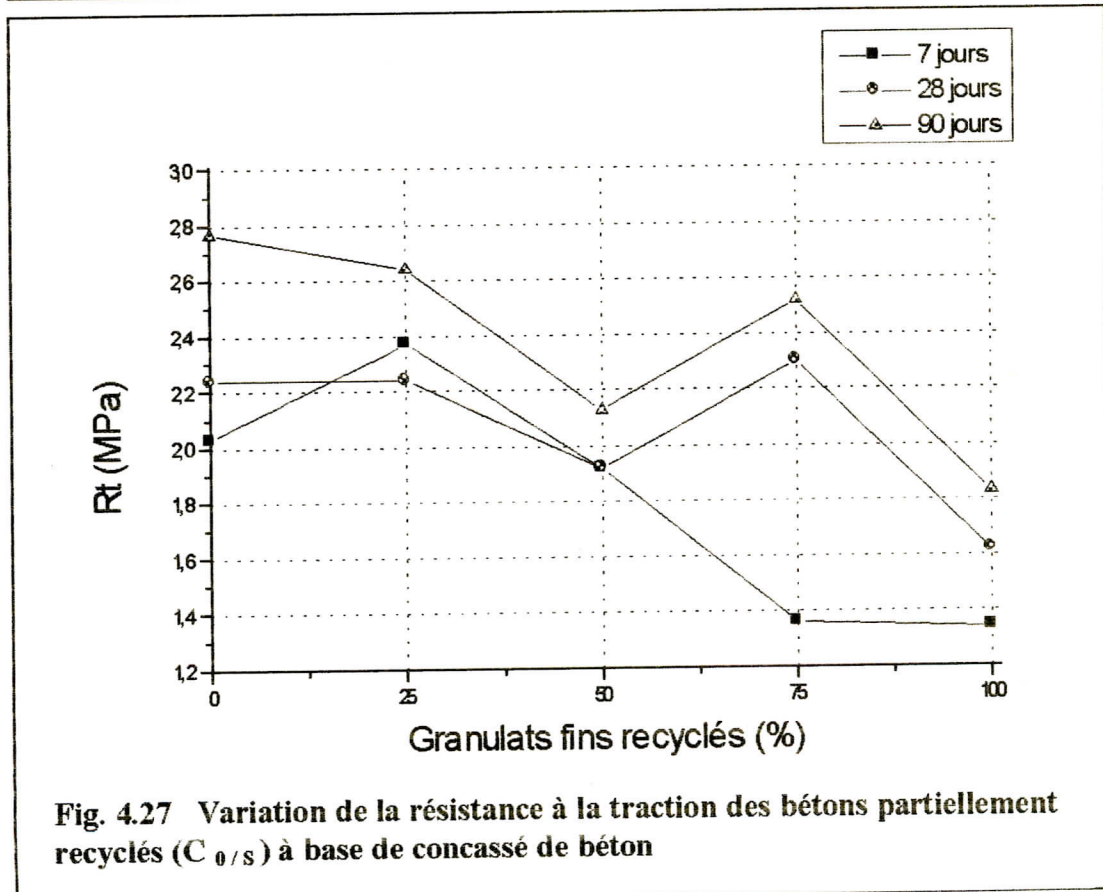
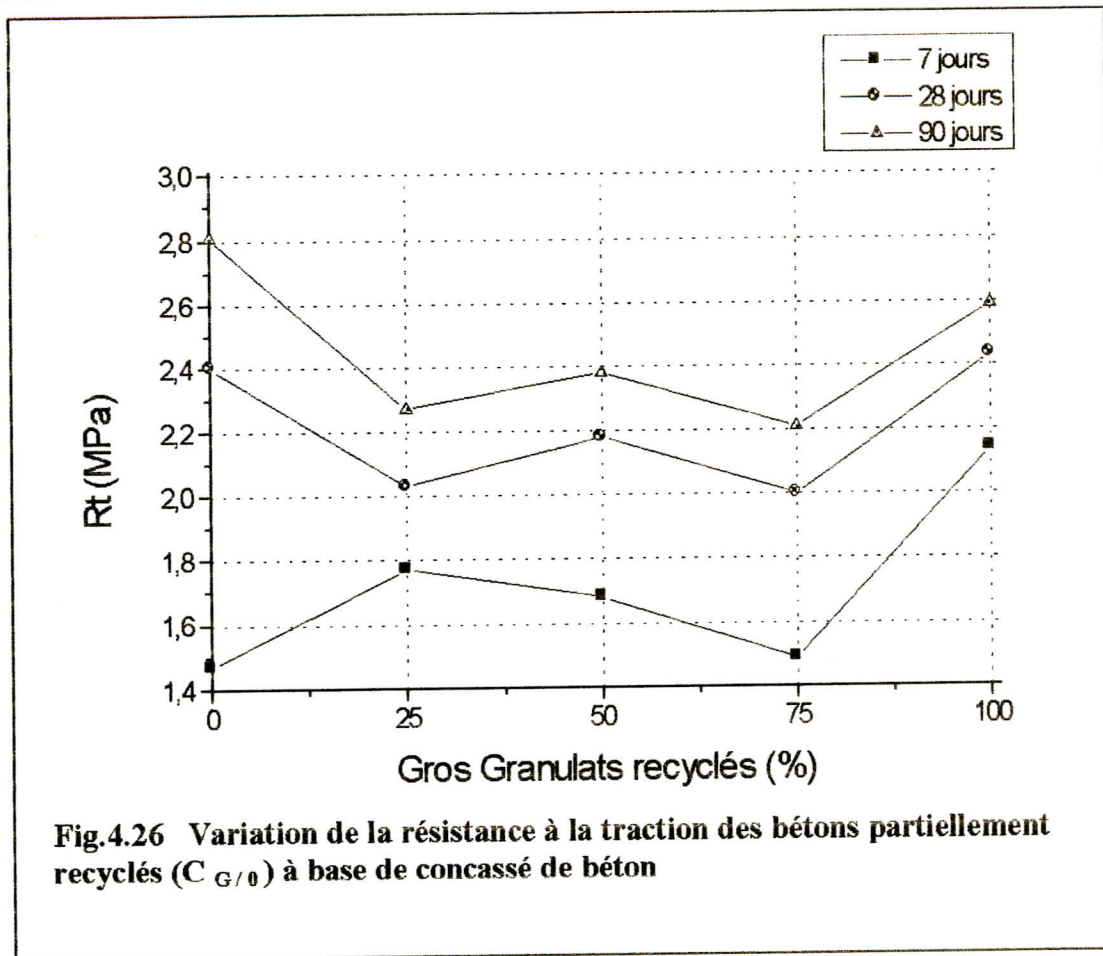
Le rapport $\frac{R_{t7}}{R_{t28}}$ varie entre 0.52 et 0.86 pour le béton de granulats concassés et de 0.54 à 0.90 pour le béton de brique. Pour le béton à base de granulats naturels ce rapport est en moyenne égale à 0.75 [23].

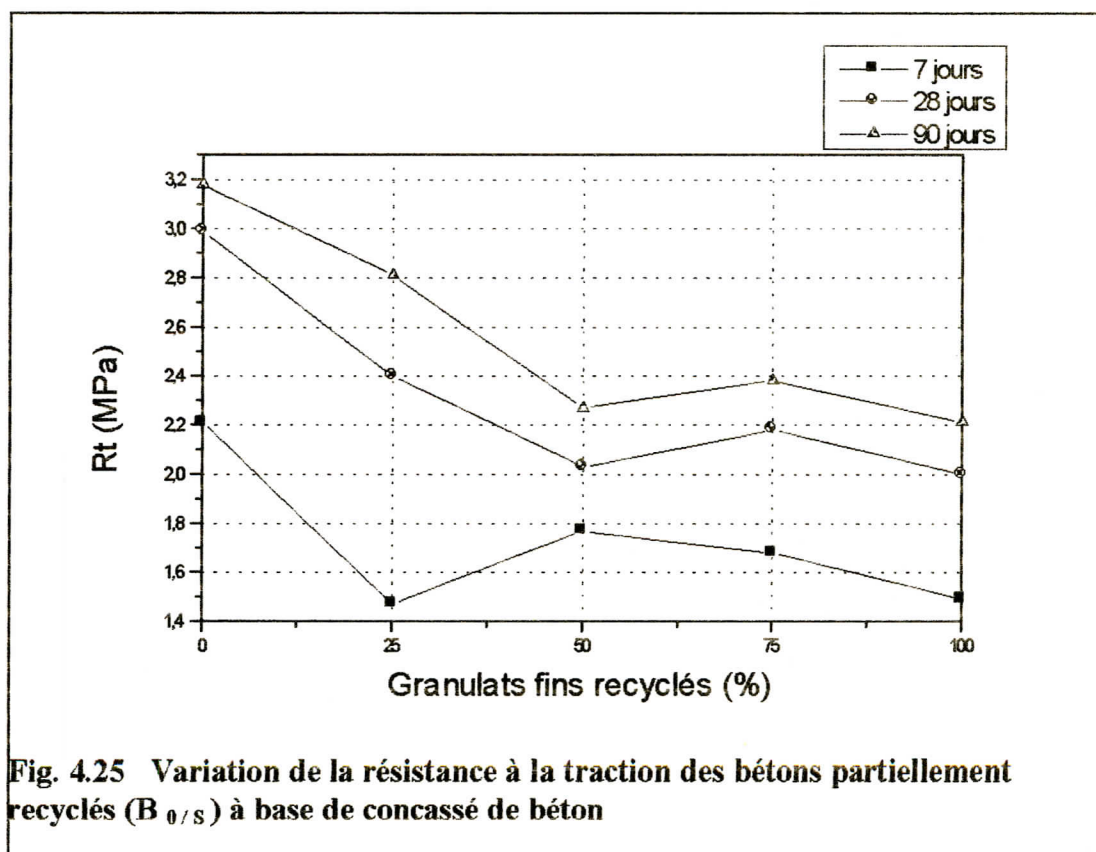
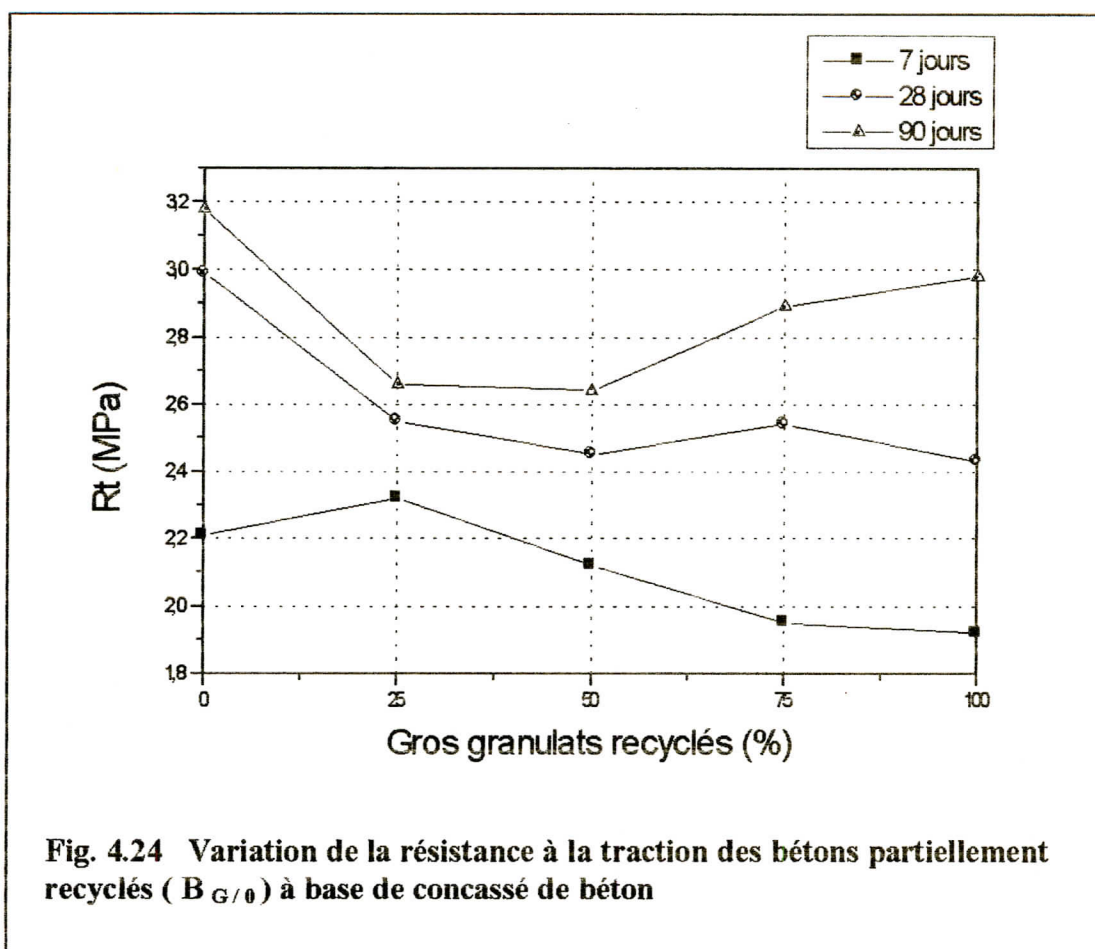
Du tableau 4.8, il semble que le pourcentage optimal à prendre en compte des différents bétons réalisés est de : 75% en gros et 25% en fins granulats recyclés pour le béton de granulats concassés, 25% en gros et 75% en fins granulats recyclés pour le béton de brique et au environ de la composition D1 (voir Chapitre 3, page 80, tableau 3.12) pour le béton de brique et béton de granulats concassés.

Tableau 4.8 Résistance à la traction des différents bétons recyclés.

Bétons recyclés	7 jours		28 jours		90 jours	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
B _{0/0}	2.21	100	2.99	100	3.18	100
B _{25/0}	2.32	104.9	2.55	98.6	2.66	83.6
B _{50/0}	2.12	95.9	2.45	81.9	2.64	83
B _{75/0}	1.95	88.2	2.54	81.9	2.89	90.8
B _{100/0}	1.92	86.8	2.43	81.2	2.98	93.7
B _{0/25}	2.18	98.6	2.97	99.3	2.95	92.76
B _{0/50}	1.87	84.6	2.61	87.3	2.65	83.33
B _{0/75}	1.81	81.9	2.53	84.6	2.70	84.90
B _{0/100}	1.63	73.7	2.42	80.9	2.32	72.95
B _{50/50}	2.00	90.5	2.80	93.6	2.85	89.62
B _{100/100}	1.24	56.1	2.09	69.9	2.26	71.07
B _{100/100} + Adj	1.57	71.0	2.98	99.6	2.93	92.14
B _{75/25}	1.89	85.5	2.95	98.6	2.96	93.08
B _{100/50}	1.74	78.7	2.23	74.6	2.31	72.64
B _{25/75}	1.97	89.1	2.49	81.3	2.39	75.15
B _{50/100}	1.64	74.2	2.51	83.9	2.49	78.30
C _{25/0}	1.47	78.7	2.40	80.3	2.81	88.38
C _{50/0}	1.77	80.0	2.03	67.9	2.27	71.4
C _{75/0}	1.68	76.0	2.18	72.9	2.38	74.8
C _{100/0}	1.49	67.4	2.00	66.8	2.21	69.5
C _{0/25}	2.14	96.8	2.43	81.3	2.59	81.4
C _{0/50}	2.03	91.8	2.24	74.9	2.77	87.1
C _{0/75}	2.37	107.2	2.24	74.9	2.64	83.0
C _{0/100}	1.92	86.8	1.92	64.2	2.13	66.9
C _{50/50}	1.36	61.5	2.30	76.9	2.52	79.2
C _{100/100}	1.34	60.6	1.62	54.2	1.83	57.5
C _{100/100} + Adj	1.55	70.1	2.87	95.9	2.91	91.5
C _{75/25}	1.74	78.7	2.11	70.6	2.45	77.0
C _{100/50}	1.31	59.3	2.04	68.2	2.38	74.8
C _{25/75}	1.84	83.2	2.91	97.3	2.98	93.7
C _{50/100}	1.61	72.8	1.81	60.5	2.17	68.2
D1	2.36	106.8	2.55	85.3	2.68	84.3
D2	1.81	81.9	1.91	63.9	2.19	68.8
D3	1.46	66.1	1.53	51.2	2.03	63.8
D4	1.53	69.2	1.63	54.5	1.92	60.4

Note : la valeur en pourcentage (%) indique le rapport de la résistance à la traction du béton recyclé sur celle du béton ordinaire B_{0/0}.





IV.2.4.2. Relation résistance à la traction et celle à la compression

En général, d'après le tableau 4.9 et la figure 4.28, le rapport R_c/R_t à 28 jours, varie de 8.4 à 10.57 pour le béton de granulats concassés, de 8.07 à 11.83 pour le béton de brique et de 8 à 13 pour le béton de brique et béton d'agrégats concassés.

Plusieurs formules sont utilisées dans la littérature pour le calcul de résistance à la traction à partir de celle à la compression :

$$\text{Dreux [23]} : \quad \frac{R_{c j}}{R_{t j}} = 9 + 1.3 \frac{R_{c j}}{100} \quad (4.3)$$

$R_{c j}$: résistance à la compression à j jours

$R_{t j}$: résistance à la traction à j jours

$$\text{BAEL 91, article A2, 1.12:} \quad R_{t j} = 0.6 + 0.06 R_{c j} \quad (4.4)$$

$$\text{ACI, article 318} \quad R_{t j} = 0.5 (R_c)^{0.5} \quad (4.5)$$

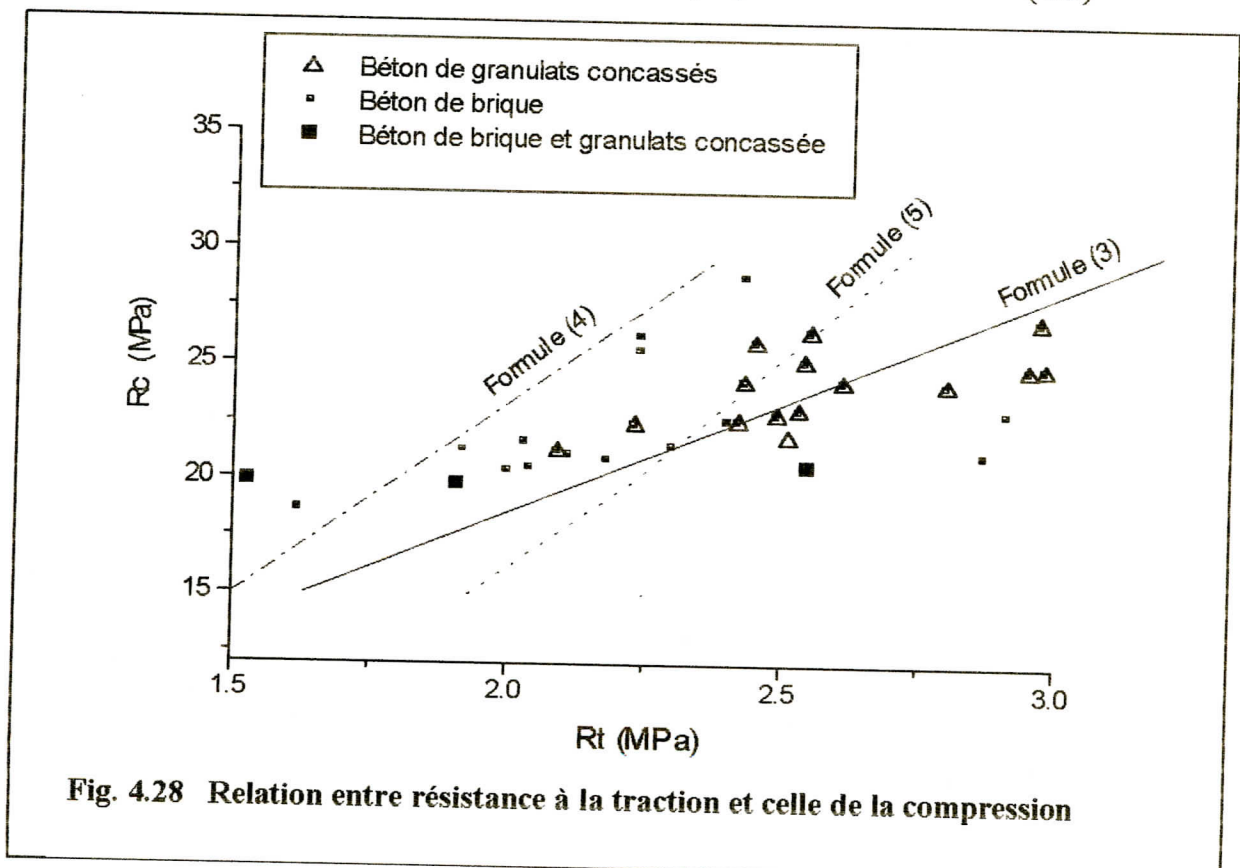


Fig. 4.28 Relation entre résistance à la traction et celle de la compression

D'après la figure 4.28, nous remarquons que la relation (4.3) est la plus proche pour prédire nos résultats expérimentaux.

Tableau 4.9 Rapport entre la résistance à compression et celle de la traction à l'âge de 28 jours.

Types de béton	Rc (Mpa)	Rt (Mpa)	$\frac{R_c}{R_t}$
			28
B _{0/0}	30.45	2.99	10.18
B _{25/0}	26.40	2.55	8.95
B _{50/0}	25.90	2.45	10.57
B _{75/0}	25.10	2.54	9.88
B _{100/0}	24.20	2.43	9.95
B _{0/25}	26.90	2.97	9.11
B _{0/50}	24.20	2.61	9.27
B _{0/75}	23.00	2.53	9.09
B _{0/100}	22.50	2.42	9.29
B _{50/50}	24.10	2.80	8.60
B _{100/100}	21.20	2.09	10.14
B _{100/100} + Adj	24.84	2.98	8.33
B _{75/25}	24.80	2.95	8.40
B _{100/50}	22.38	2.23	10.30
B _{25/75}	22.80	2.49	9.38
B _{50/100}	21.82	2.51	8.69
C _{25/0}	22.50	2.40	9.37
C _{50/0}	21.60	2.03	10.64
C _{75/0}	20.83	2.18	9.55
C _{100/0}	20.33	2.00	10.16
C _{0/25}	28.75	2.43	11.83
C _{0/50}	26.16	2.24	11.67
C _{0/75}	25.58	2.24	11.42
C _{0/100}	21.25	1.92	11.06
C _{50/50}	21.41	2.30	9.31
C _{100/100}	18.58	1.62	8.07
C _{100/100} + Adj	21.08	2.87	7.34
C _{75/25}	21.02	2.11	9.96
C _{100/50}	20.45	2.04	10.02
C _{25/75}	22.90	2.91	7.80
C _{100/50}	19.23	1.81	10.62
D1	20.5	2.55	8.04
D2	19.7	1.91	10.31
D3	19.8	1.53	12.94
D4	20.8	1.63	12.7

IV.2.5. Influence de l'adjuvant sur les propriétés mécaniques

Afin d'améliorer le comportement du béton frais et durci à base de granulats recyclés, un programme expérimental limité a été initié pour connaître l'effet d'incorporation d'un adjuvant plastifiant du type médaplaste 2000 (Granitex) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. Le dosage était de 2% en poids de ciment dans un béton à base de 100% de granulats recyclés gros et fins.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.10 :

Tableau 4.10 Propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé avec ajout fluidifiant

	B 100 / 100		C 100 / 100	
	sans adj	Avec adj	sans adj	Avec adj
Slump (mm)	69	82	64	76
Eau de gâchage (l)	271	260	311	300
Densité du béton frais (kg/m ³)	2225	2227	1992	2004
Densité du béton durci (kg/m ³)	2212	2264	2024	2102
Module d'élasticité (MPa)	15698	19829	14328	16238
Résistance à la compression (MPa)	21.2	24.84	18.58	21.08
Résistance à la traction (MPa)	2.09	2.98	1.62	2.87

Nous remarquons d'après ces résultats que l'adjuvant influe favorablement sur les propriétés du béton recyclé. Avec le même dosage de constituants, nous avons obtenus un meilleur slump avec une quantité d'eau plus faible d'environ 4%. Une légère amélioration de la résistance à compression est aussi observée ; elle est de 17% pour le béton à base de granulats concassé et au environ de 13% pour le béton de brique. La résistance à la traction est aussi améliorée. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par les autres chercheurs comme Merlet et Pimienta [40], qui trouvaient une amélioration de la résistance à la compression de 11% et celle de la traction de

13% pour le béton recyclé à base d'agrégats (gros et fins) de béton de démolition sans maçonnerie.

IV.2.6. Module d'élasticité

Les résultats obtenus sont résumés sur le tableau 4.11 et dans les figures (4.29 à 4.32).

On comparant ces résultats à celles du béton ordinaire d'agrégats naturels, on trouve que le module d'élasticité du béton recyclé est plus faible. On y constate une diminution de la valeur du module d'élasticité en fonction de la présence croissante de granulats recyclés (gros et fins). Ceci nous mène à dire que le module d'élasticité suit une relation similaire que la résistance à la compression.

La diminution du module d'élasticité du béton à base de granulats recyclés par rapport au béton à base de granulats naturels est d'environ 30%, 40% et 50% pour les bétons de gros granulats recyclés, granulats fins recyclés et gros et fins granulats recyclés respectivement. Cette chute de résistance n'est que d'environ 25% lorsqu'un mélange de gros et fins de béton et de brique concassée sont utilisés ensemble. Des valeurs similaires ont été reportées par d'autres chercheurs comme Coquillat [37] qui a trouvé une diminution du module d'élasticité de 28%, 50% et 40% pour respectivement les bétons de granulats concassés, de granulats de briques et du mélange des deux. Dans les projets de normes, on propose un coefficient multiplicateur de 0.7 à 0.8 pour prendre en considération le faible module d'élasticité du béton recyclé [38].

La relation semi-empirique liant le module d'élasticité à la résistance à la compression selon le règlement BAEL 91 est :

$$E_{ij} = 10\,000 \sqrt[3]{R_{Cj}} \quad (4.6)$$

D'après le tableau 4.11, la relation 4.6 surestime le module d'élasticité.

Tableau 4.11 Module d'élasticité du béton recyclé à 28 jours

Bétons recyclés	E Théorique (MPa)	E expérimental (MPa)	
		MPa	%
		B _{0/0}	31244
B _{25/0}	29776	27074	94
B _{50/0}	29587	25349	88
B _{75/0}	29279	22188	77
B _{100/0}	28925	20408	71
B _{0/25}	29963	27309	95
B _{0/50}	28925	22873	79
B _{0/75}	28438	19979	69
B _{0/100}	28231	17568	61
B _{50/50}	28885	18977	66
B _{100/100}	27676	15698	54
B _{100/100} + Adj	29177	19829	69
B _{75/25}	29177	23217	81
B _{100/50}	28181	21088	73
B _{25/75}	28356	19691	68
B _{50/100}	27945	16381	57
C _{25/0}	28231	24308	84
C _{50/0}	27849	23119	80
C _{75/0}	27514	21971	76
C _{100/0}	27293	19274	67
C _{0/25}	30635	27432	95
C _{0/50}	29686	25993	90
C _{0/75}	29464	23089	80
C _{0/100}	27698	20324	70
C _{50/50}	27767	16331	57
C _{100/100}	26486	14328	49
C _{100/100} + Adj	27624	16238	56
C _{75/25}	27676	17231	59
C _{100/50}	27346	17489	61
C _{25/75}	28397	23208	80
C _{50/100}	26837	16455	57
D1	27368	21099	73
D2	27007	22382	77
D3	27053	21489	74
D4	27501	21997	76

A titre de rappel pour les pourcentages des compositions de type D, voir le chapitre 3, page 80, tableau 3.12.

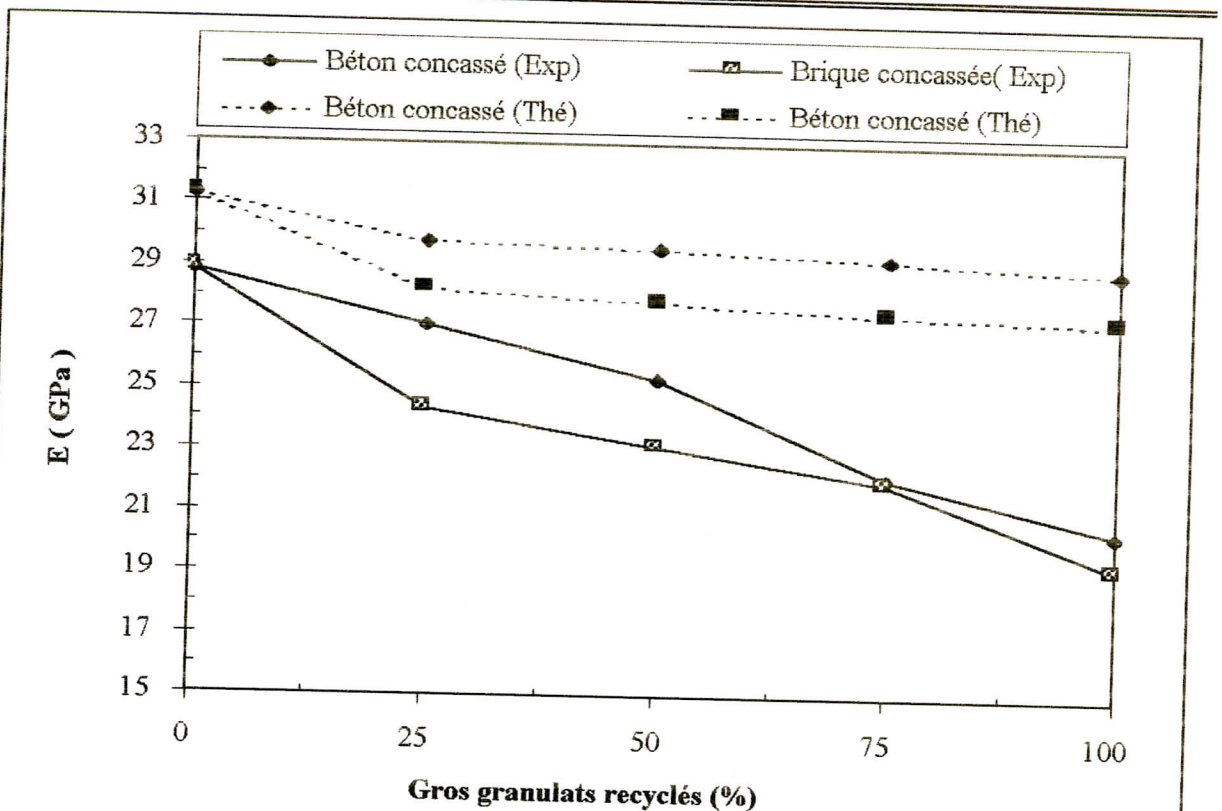


Fig. 4.29 Variation du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en gros granulats recyclés

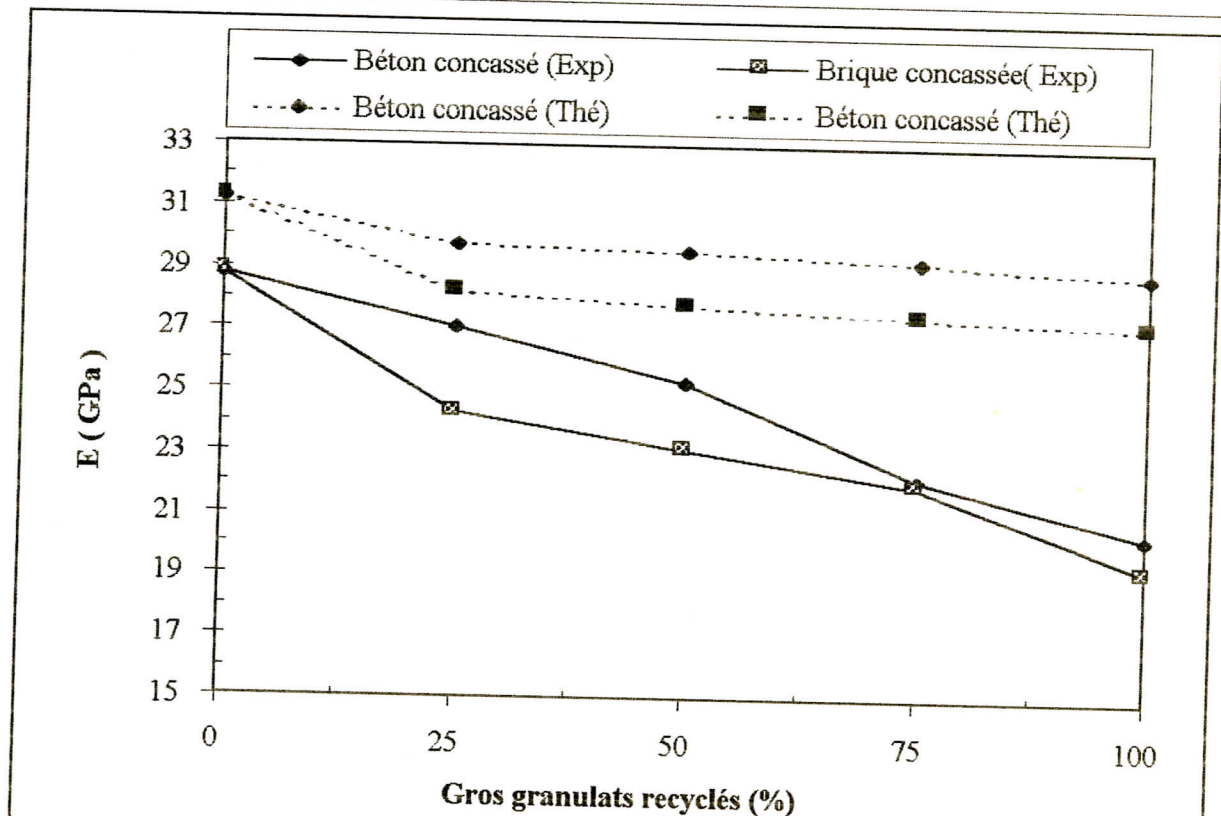
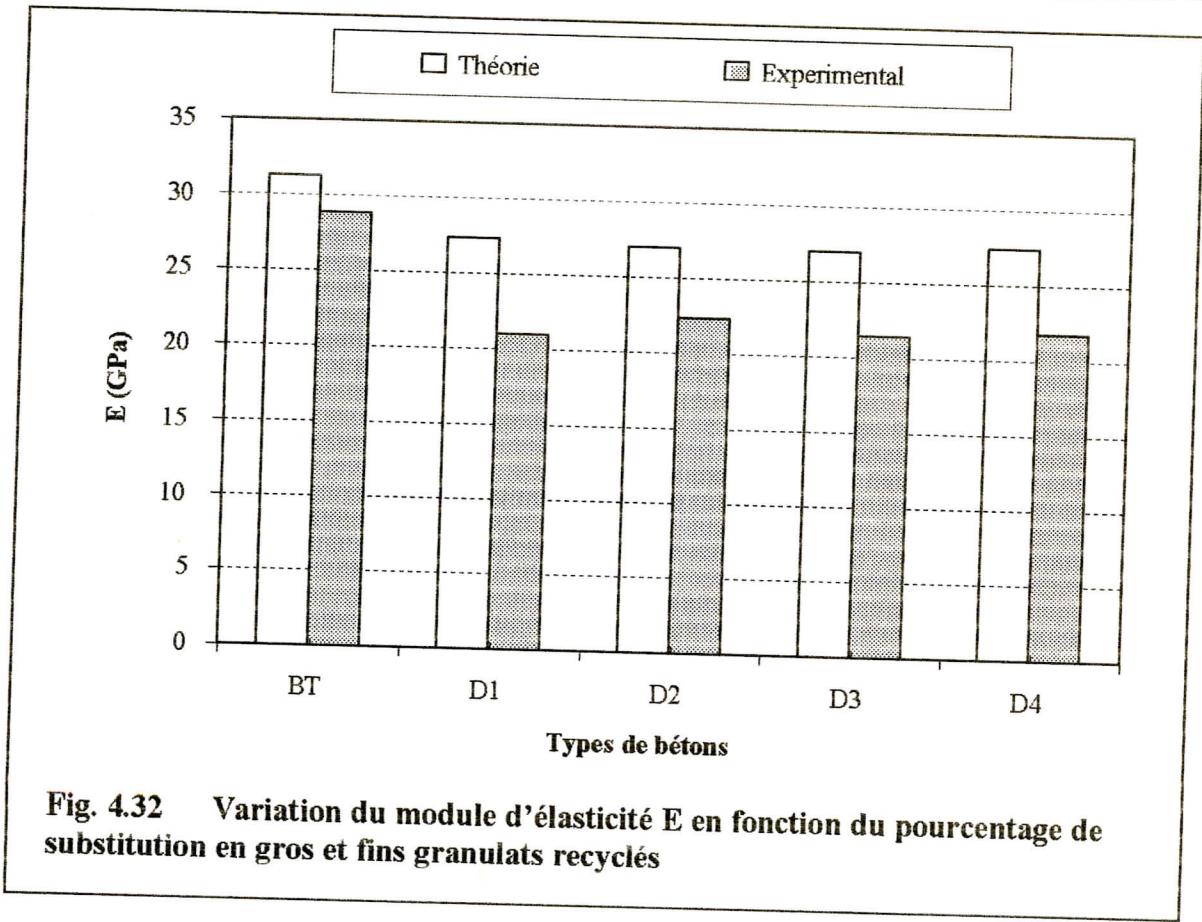
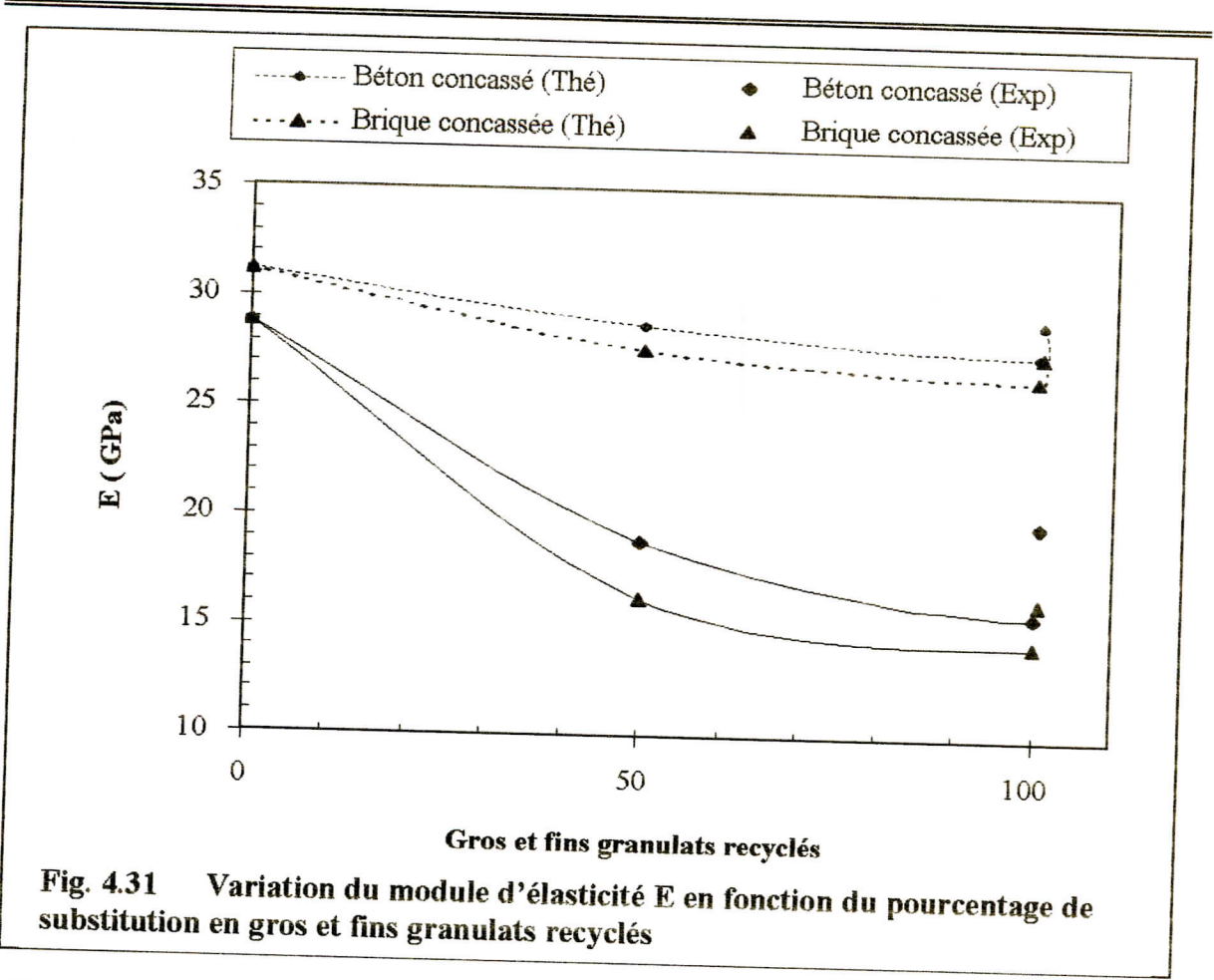


Fig. 4.30 Variation du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de substitution en granulats fins recyclés



IV.2.7. Retrait

D'après les figures (4.33 à 4.41), on remarque qu'en générale les retraits en air libre des bétons recyclés sont nettement plus importants que ceux du béton témoin.

Pour le béton recyclé à base de concassé de béton, on y observe que le retrait du béton de gros granulats recyclés n'est pas loin de celui du béton témoin (plus grand de 30%) jusqu'à 28 jours (voir figure 4.33) puis au-delà il accélère pour arriver à 70% à 90 jours. Pour le béton de granulats fins recyclé, le retrait est plus grand d'environ 25% dès le jeune âge (à 2 jours) [fig. 4.34] et atteint 40% à 90 jours. Pour ce qui est du béton de gros et fins granulats recyclés, le retrait est plus grand que celui du béton témoin d'environ 20% jusqu'à l'âge de 7 jours, mais au delà, il finira par atteindre une augmentation de 85% à l'âge de 90 jours [fig 4.36].

Pour le béton recyclé à base de brique concassé, l'évolution est différente ; le béton de gros granulats recyclés présentent un retrait retardé par rapport au béton témoin [fig 4.37] jusqu'à 28 jours puis au-delà il y a une augmentation brusque qui dépasse celui du témoin pour arriver au environ 80% à 90 jours. Pour le béton de granulats fins recyclés [fig. 4.38], le retrait au jeune âge, est presque six fois plus que celui du béton témoin et arrive à 90 jours presque avec le même taux d'augmentation. Par contre lorsque on utilise les gros et les fins concassés de brique, le retrait du béton recyclé se stabilise à jeune âge (jusqu'à 7 jours) est comparable avec celui du béton témoin, mais au delà il est plus important et peut atteindre une différence d'augmentation de 95% à 90 jours [fig. 4.40].

Le béton de gros et fins granulats de brique et béton concassé, présente en générale un retrait plus grand que celui du béton témoin (Fig. 4.41) dès le jeune âge avec une augmentation en moyenne de 50% qui peut atteindre 70% à 90 jours.

Le retrait élevé du béton à base d'agrégats concassés est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi que le degré important d'absorption d'eau du mortier d'ancien béton qui recouvre ces granulats recyclés.

Pour le retrait du béton recyclé de gros granulats concassés de brique, il est retarder au début et qui relance après un certain temps. Ceci est dû principalement au pré-mouillage des ces gros agrégats avant le malaxage du béton recyclé. Par conséquent, le retrait ne commence qu'après évaporation totale de la quantité d'eau emmagasinée à l'intérieur de ces granulats.

Des résultats similaires ont été trouvés par Coquillat [37] où une augmentation de retrait par rapport à celui d'un béton d'agrégats naturels d'environ 80% ou plus pour les bétons de brique, de béton démolé ou du mélange des deux a été observée.

L'incorporation d'un adjuvant plastifiant réduit la quantité d'eau de malaxage et par conséquent le retrait est plus faible par rapport au mélange sans adjuvant mais reste supérieur au cas du béton à agrégats naturels. Un choix judicieux de type et pourcentage du fluidifiant peut conduire à un retrait comparable à celui du béton à base d'agrégats naturels [Fig. 4.35 et 4.39].

En pratique, cette augmentation du retrait du béton recyclé peut être préjudiciable à son utilisation dans des structures vulnérables à des fissurations de retrait comme les dalles et voiles en climat chaud. Pour cela, il est probablement préférable de limiter le pourcentage de substitution en granulats recyclés et en particulier les granulats fins qui engendrent un retrait élevé à jeune âge c'est à dire à un âge où le risque de fissuration est élevé car la résistance à la traction du béton est faible.

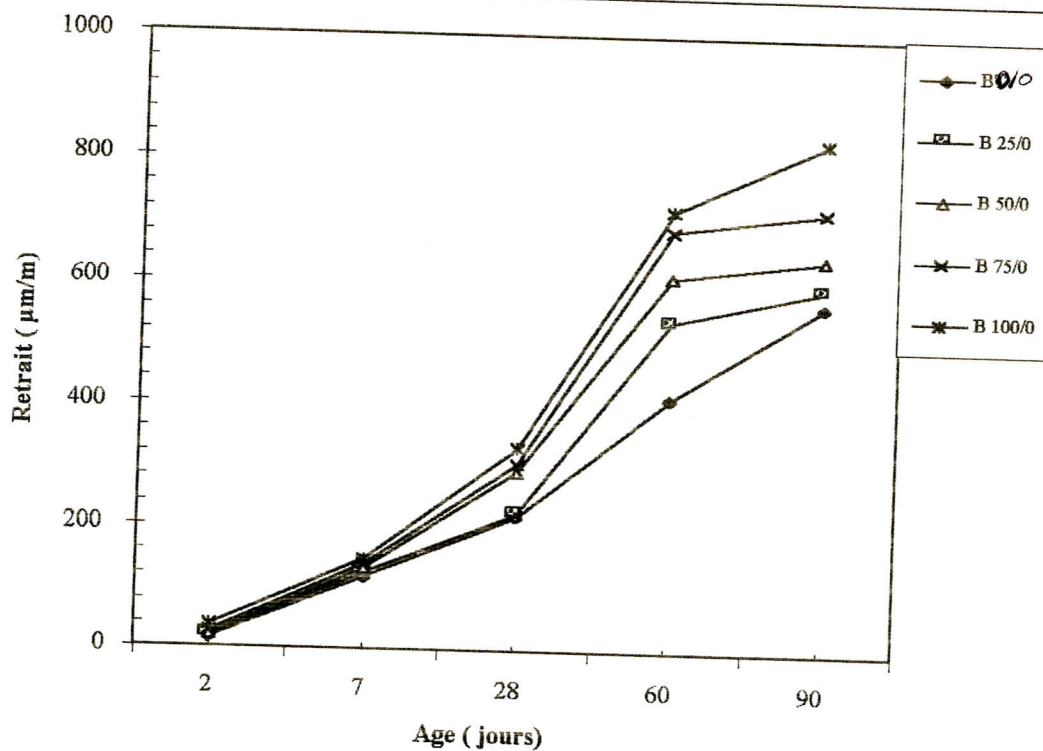


Fig. 4.33 Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros granulats de concassé de béton ($B_{G/\theta}$)

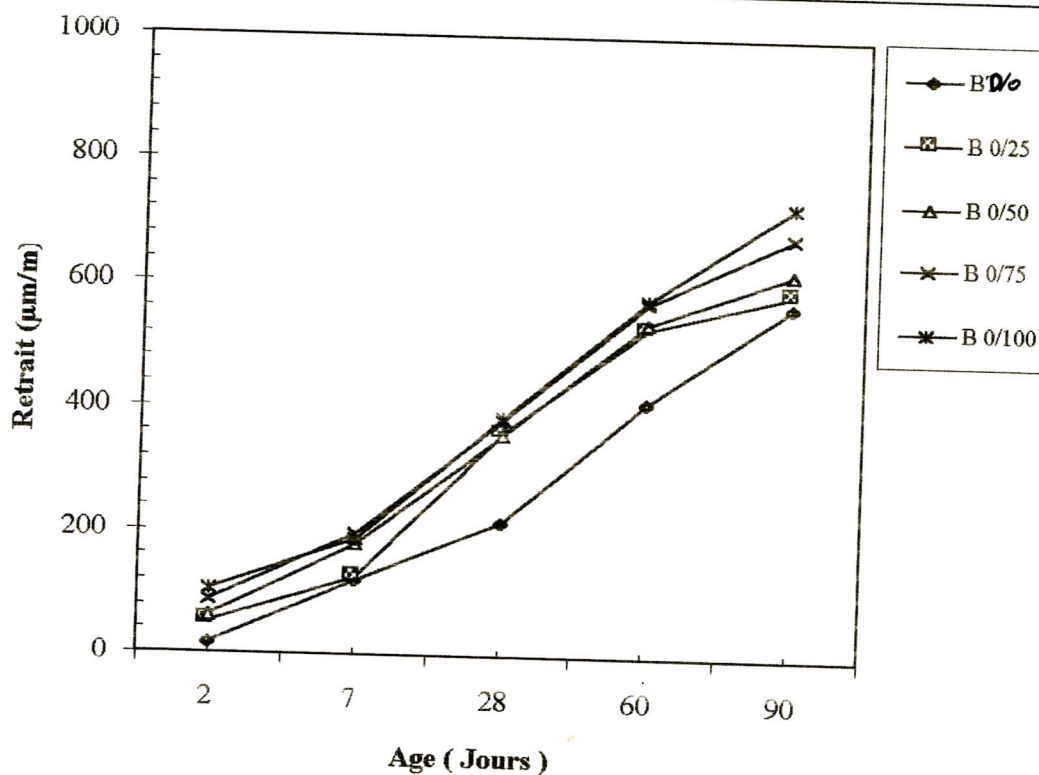
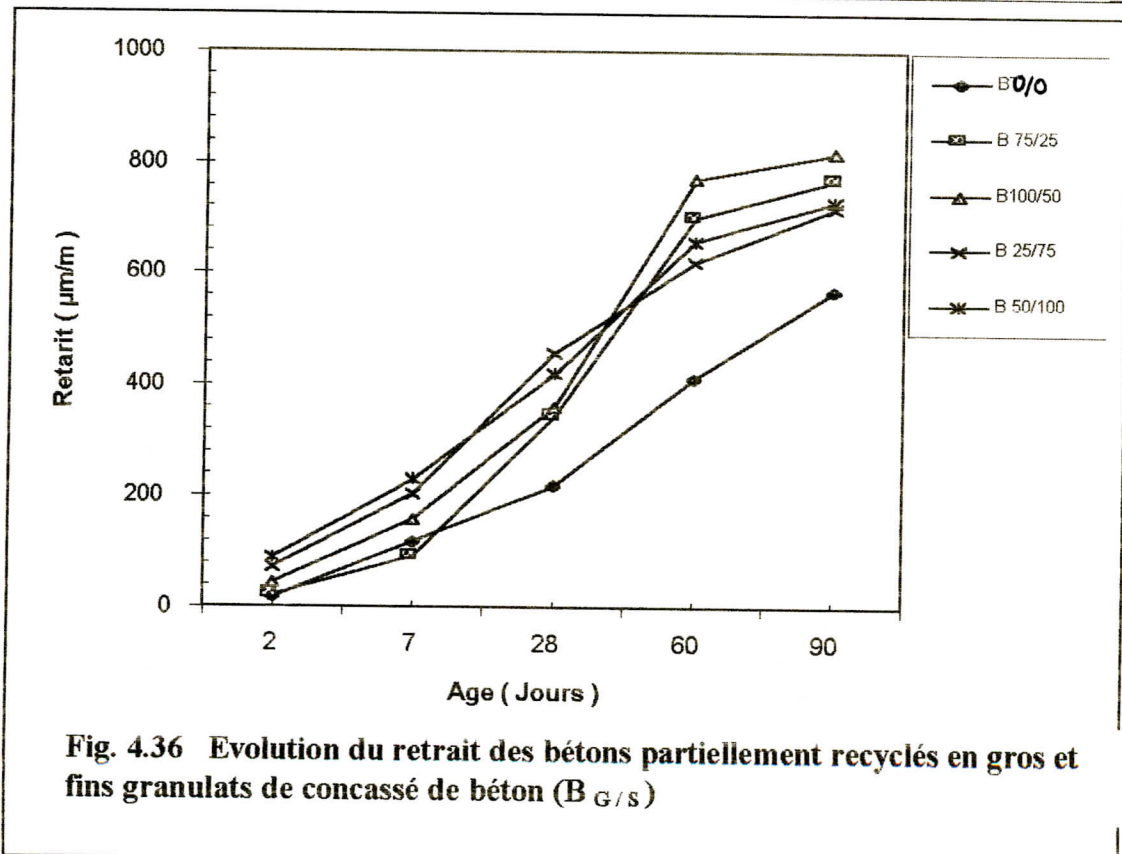
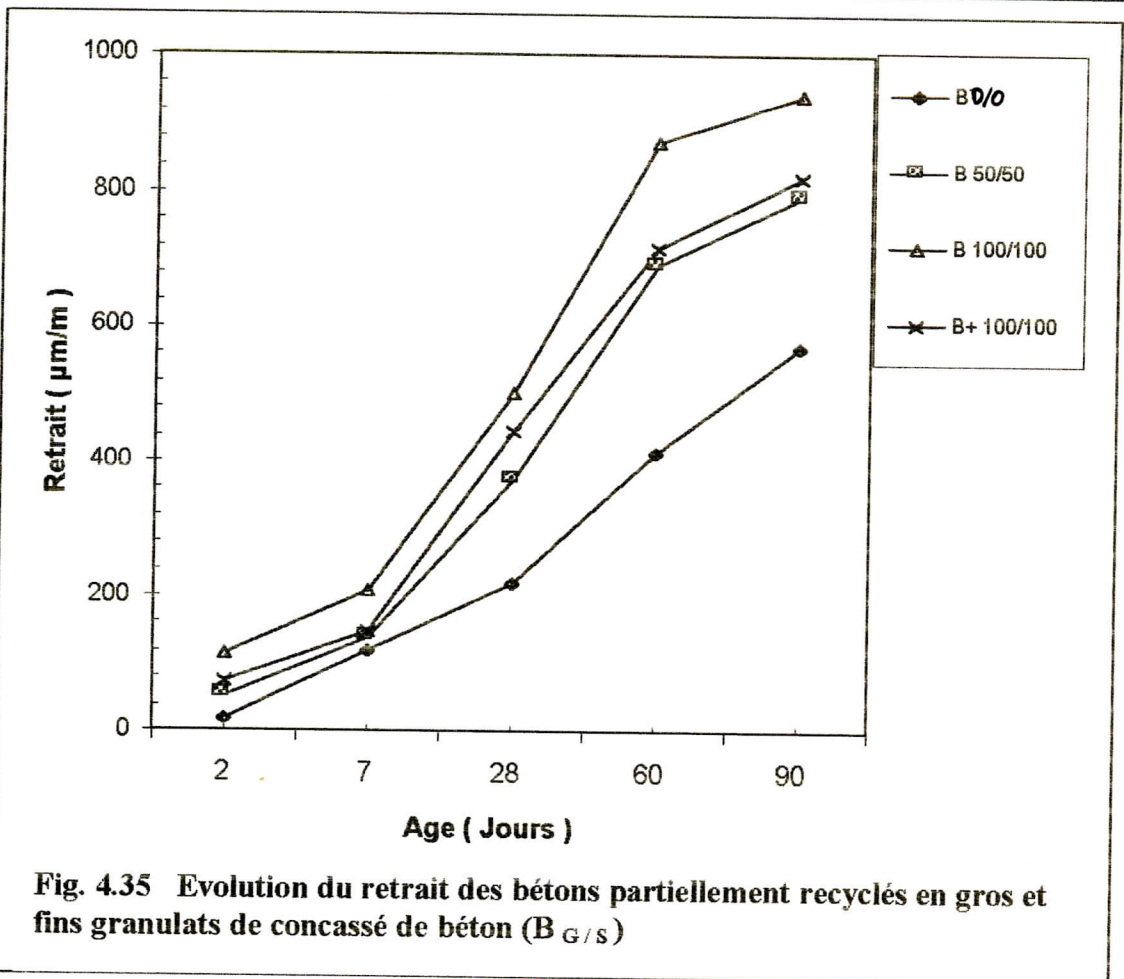


Fig. 4.34 Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés granulates fins de concassé de béton ($B_{\theta/S}$)



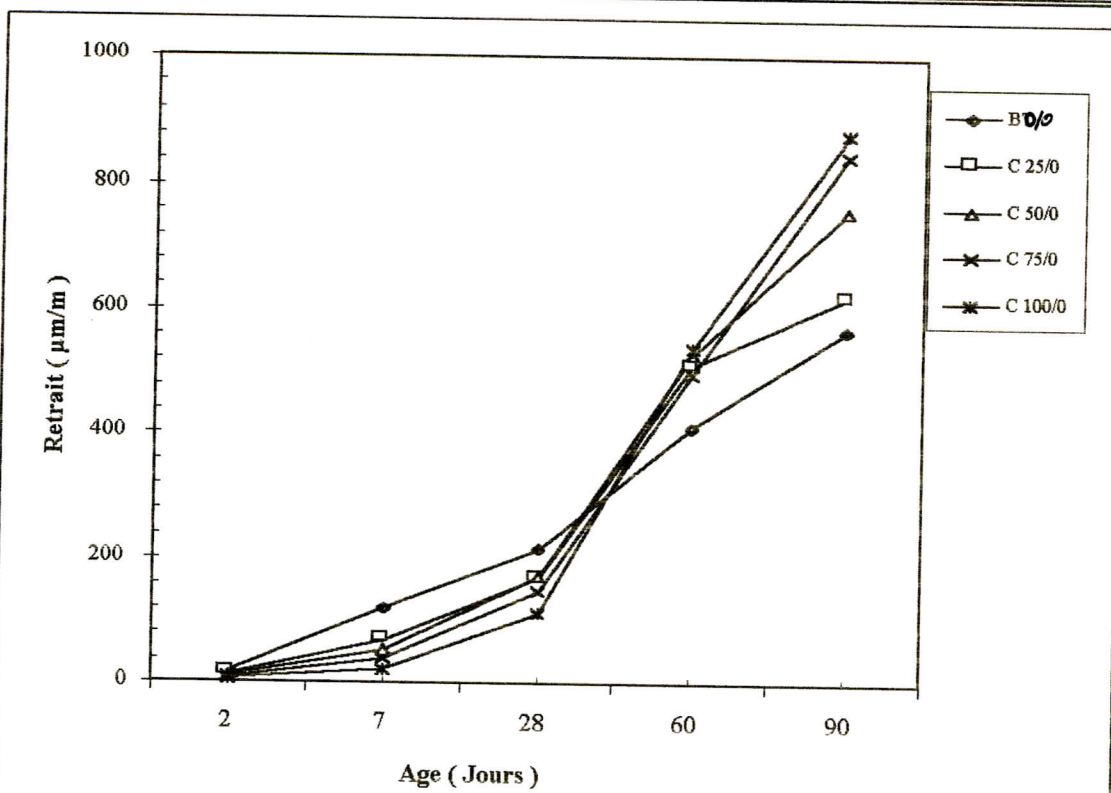


Fig. 4.37 Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros granulats de concassé de brique ($C_{G/0}$)

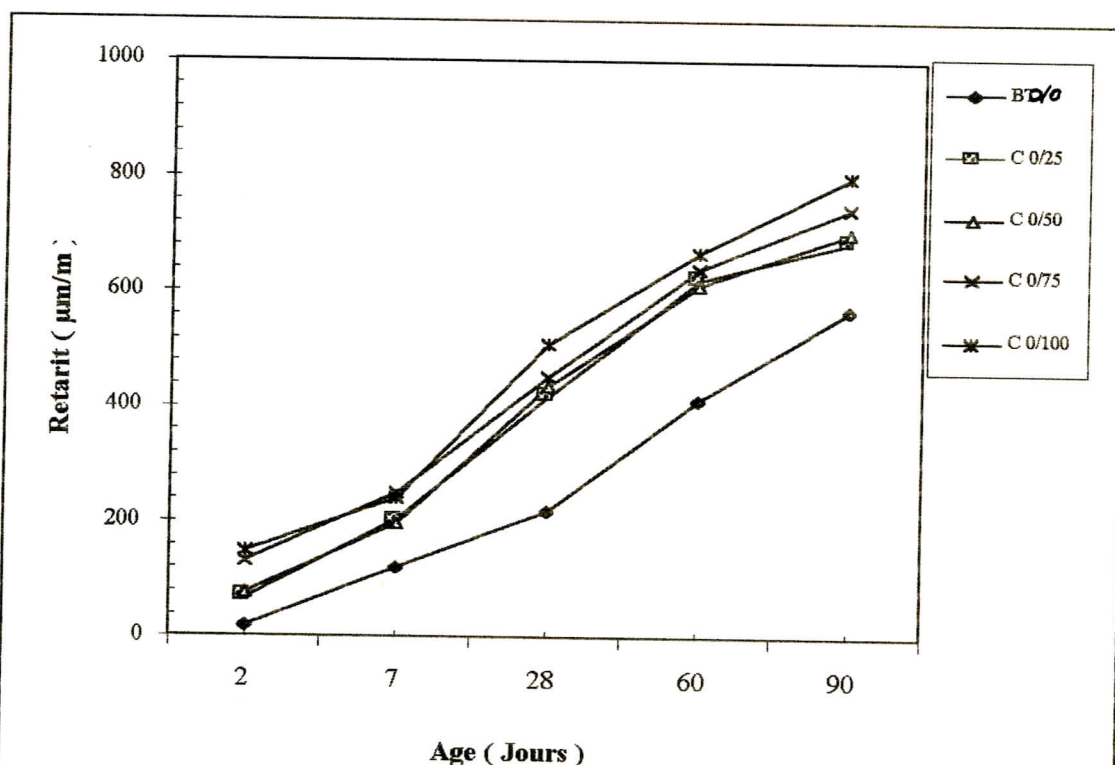
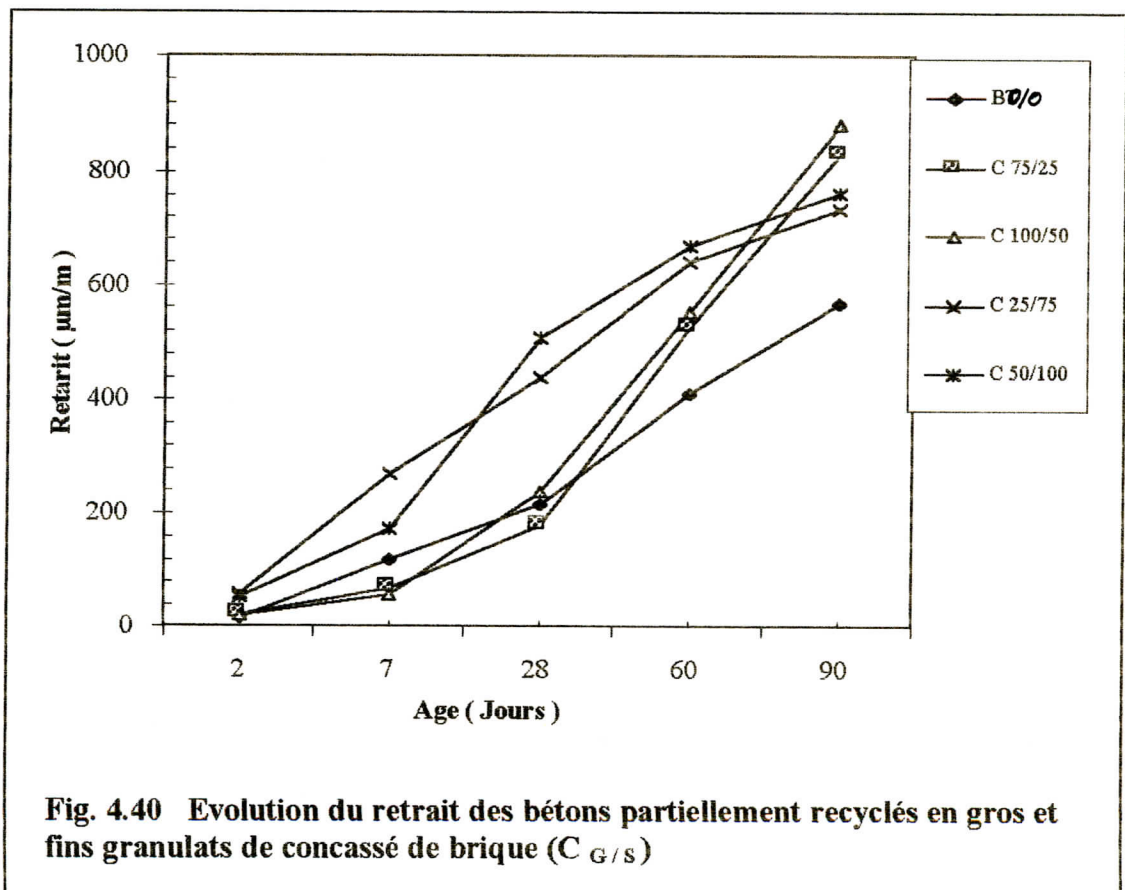
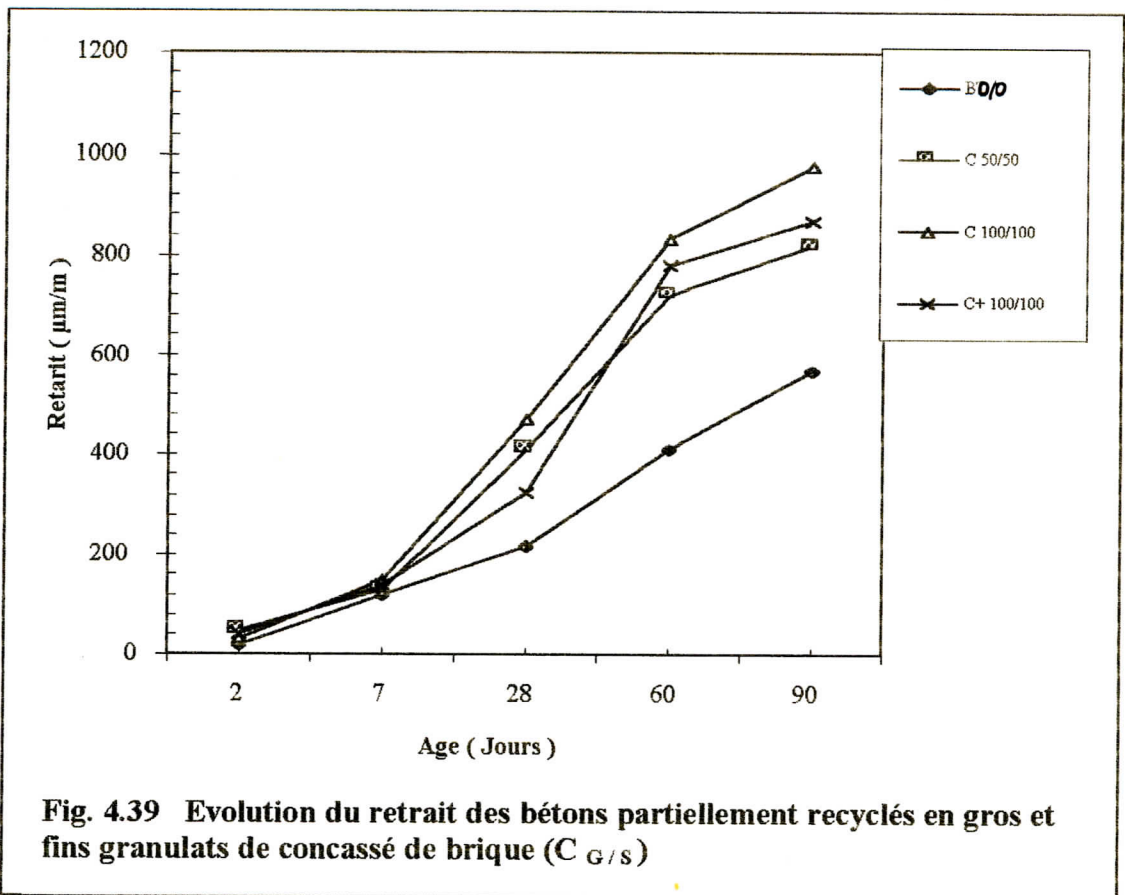


Fig. 4.38 Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en granulats fins de concassé de brique ($C_{0/S}$)



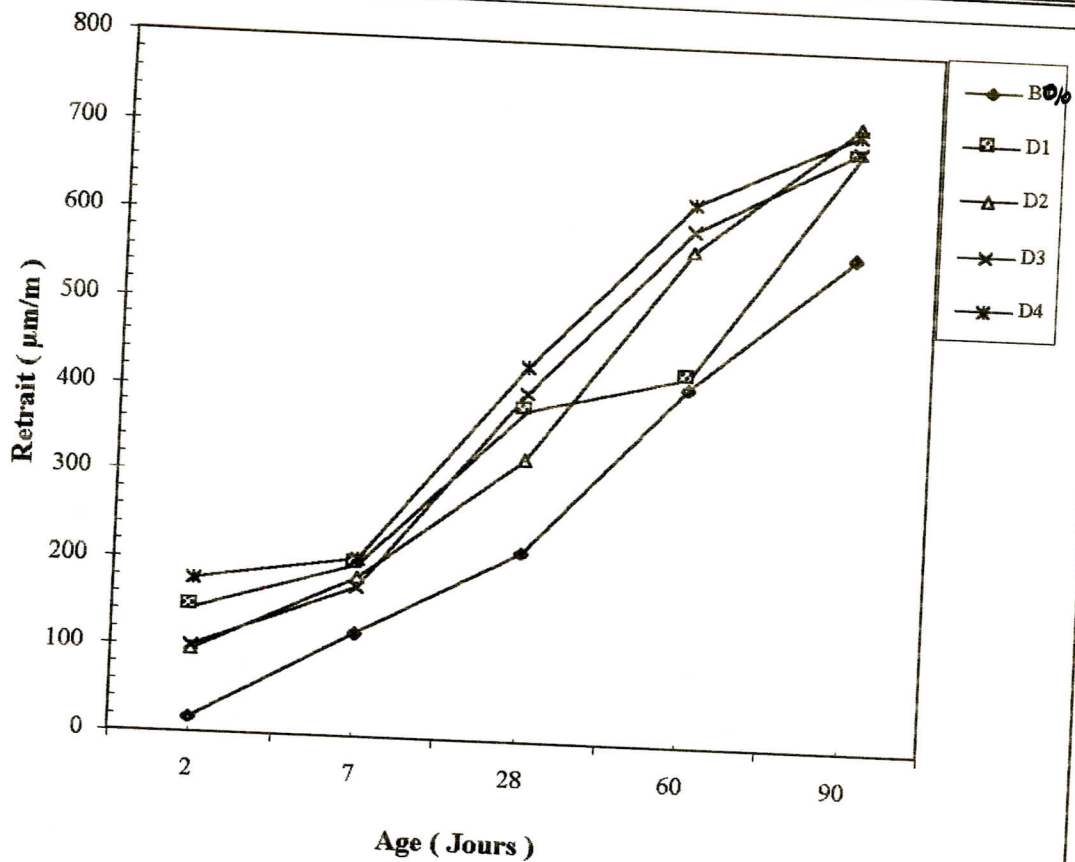


Fig. 4.41 Evolution du retrait des bétons partiellement recyclés en gros et fins granulats de concassé de brique ($D_{G/S}$)

IV.2.8. Capillarité et absorption d'eau par immersion

Les résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité et par immersion sont présentés dans les figures 4.42 et 4.43 ainsi que dans les figures 1 à 6 de l'annexe 2. En comparaison avec le béton original (d'agrégats naturels), il est nettement visible que le béton recyclé est beaucoup plus poreux et absorbe plus d'eau.

Le pourcentage d'absorption d'eau des bétons recyclés après 24 heures d'immersion dans l'eau est au environ de 2.5% pour le béton de granulats naturels, de 4.46% pour le béton de granulats concassé (à 100% en gros et fins recyclés), de 7.99% pour le béton de brique (à 100% en gros et fins recyclés) et en moyenne de 6% pour le béton de combinaison de granulats de brique et béton concassé.

Le coefficient de capillarité défini par [18] :

$$C_c = \frac{100 M}{S\sqrt{t}} \quad (4.6)$$

M : masse d'eau absorbée (gr)

S : section de la base d'éprouvette (mm²)

t : temps d'absorption (second)

Le béton témoin présente un coefficient de 17.2, par contre le béton recyclé présente 29.9 pour le type B_{100/100}, 44.3 Pour C_{100/100} et en moyenne de 38.7 Pour le béton recyclé D_{G/S}. Ces résultats, semblent être comparables avec ceux de Tavakoli [39] qui conclu que la porosité du béton avec gros et fins granulats recyclés peut atteindre le double de celle du béton ordinaire.

De même, en remarque que les différences en absorption d'eau entre le béton témoin et le béton recyclé sont plus important que ceux de la résistance à la compression et surtout pour le béton de brique. L'effet négatif est plus important avec l'incorporation de 75% de gros et 25% de fins granulats recyclés pour le béton d'agrégats concassés [Fig. 4.42]. Pour le béton de brique, l'effet négatif augmente en fonction de l'augmentation en gros et fins granulats recyclés [Fig. 4.43].

L'absorption d'eau élevée (par capillarité et par immersion) est une indication de la porosité et la perméabilité élevée du béton à base d'agrégats recyclés et par conséquent cela peut avoir un effet négatif sur la durabilité de ce béton.

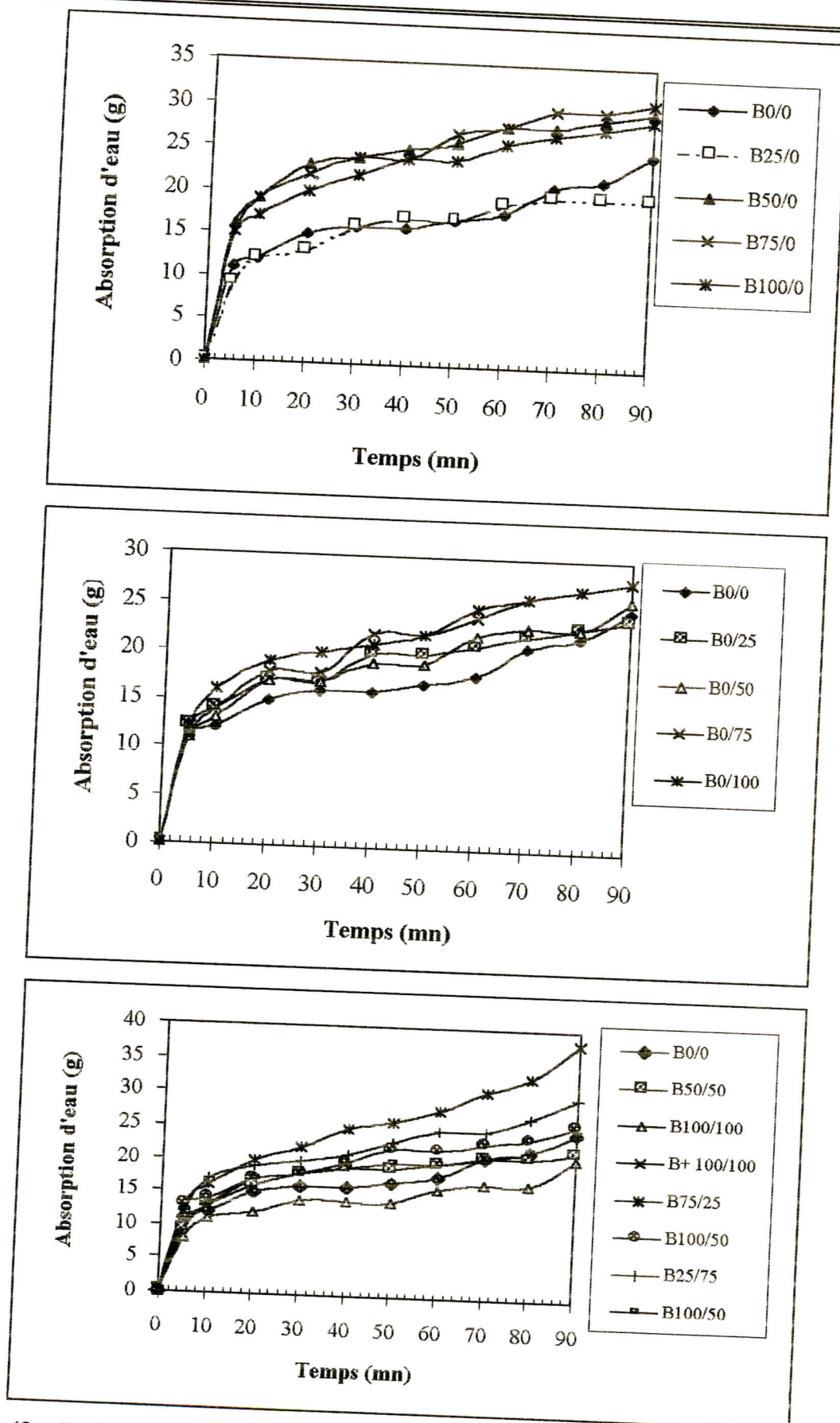


Fig.4.42 Evolution de l'absorption d'eau des bétons partiellement recyclés de béton concassé ($B_{G/S}$) en fonction du temps.

IV.2.9. Perméabilité à l'eau

Le tableau 4.12 résume les résultats des essais de la perméabilité par pénétration d'eau. La pénétration d'eau a été mesurée sur des éprouvettes cylindriques soumises à une pression constante de 1 bar pendant 24 heures et augmentée ensuite à 3 et 5 bars. On remarque que la pénétration d'eau n'est que de 60mm pour le béton à base d'agrégats naturels et commence à augmenter jusqu'à atteindre le double en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Ces résultats semblent être comparables avec ceux trouvés par Wainwright [66], qui conclut que la perméabilité du béton avec gros et fins granulats recyclés peut atteindre le double de celle du béton ordinaire (à granulats naturels).

Ces résultats trouvés confirment aussi les résultats d'absorption d'eau par capillarité et par immersion et montre que ce type de béton peut avoir des problèmes de durabilité avec une pénétration d'agents agressifs (Sulfates et Chlorures) plus rapide.

Tableau 4.12 Perméabilité des bétons recyclés

Types de béton	Poids (g)	Pénétration d'eau
		(mm)
B 0/0	9600	60
B 100/0	9600	80
B 0/100	9500	70
B 50/50	9900	130
B 100/100	9400	125
B 100/100 + Adj	9500	140
C 100/0	9100	140
C 0/100	9300	130
C 50/50	9700	140
C 100/100	9100	155
C 100/100 + Adj	9200	140
D1	9500	125
D2	9400	135
D3	9600	125
D4	9500	150

IV.3. Conclusion

La présente étude montre qu'il est possible de produire un béton de structure à base d'agrégats recyclés. Les résultats trouvés sur les propriétés physiques et mécaniques du béton recyclés, sont d'une importance louable ; pouvant servir à l'enrichissement de notre réglementation en vigueur.

L'étude paramétrique a confirmé l'effet de certains facteurs et dont leur confrontation avec d'autres recherches a été satisfaisante. En plus, certains d'autres facteurs ont été déduits, complétant mieux l'explication de certains phénomènes.

Conclusions

et

Recommandations

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

GENERALITES

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des déchets de brique et de béton de démolition comme agrégats de substitution dans la fabrication de béton de structure, une étude faisant appel à une littérature plus ou moins réduite et des récents travaux de recherches traitant cette possibilité.

De même, la démarche empruntée dans les réalisations expérimentales, à été choisie de façon à confirmer certain travaux de recherche avancée dans le domaine et d'améliorer sa maîtrise par l'apport de l'effet d'un certain nombre de facteurs tous indispensables pour sa quantification et son évaluation.

Pour cela, l'étude a porté sur trois types de bétons recyclés (béton à base de granulats de béton concassé, béton à base de brique concassée et béton de combinaison de brique et béton concassé) balayant ainsi les propriétés physiques et mécaniques d'un béton ordinaire à base de granulats naturels à savoir l'aspect rhéologique, la résistance à la compression, la résistance à la traction, le retrait plastique, le module d'élasticité, la porosité et la perméabilité.

Au vu des essais réalisés dans cette étude expérimentale, on peut conclure quant à l'intérêt (technique et économique) de l'utilisation des bétons de recyclage. L'étude expérimentale nous a conduit aux conclusions suivantes

CONCLUSIONS GENERALES

- D'après la recherche bibliographique, le matériel de production d'agrégats recyclés n'est pas très différent de celui de la production d'agrégats naturels. Le concasseur à marteaux produit une bonne distribution de forme de grain d'agrégats recyclés comparables avec celle des agrégats naturels.
- A cause d'existence d'une quantité non négligeable de mortier inerte d'ancien béton dans les agrégats recyclés (10 à 25%), la densité d'agrégats de béton concassé est au environ de 10% plus faibles et l'absorption d'eau est beaucoup plus grande que ceux des granulats recyclés.
- La confection, la mise en œuvre et l'aspect des bétons recyclés (surtout ceux d'agrégats de béton concassé) sont très comparables à ceux du béton ordinaire à base d'agrégats naturels. Le phénomène de ségrégation est beaucoup plus important pour les bétons de brique et augmente avec le pourcentage de substitution en gros et fins granulats recyclés.
- Les densités du béton frais et durci sont plus faibles que celles du béton ordinaire, et le pourcentage d'air occlus est d'autant plus élevé que celui de substitution en granulats recyclés augmente.
- La résistance à la compression des bétons recyclés chute en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés (gros et fins) et au cours du temps. A 28 jours, la chute de résistance est de l'ordre de 10 à 20% pour le béton de gros

granulats concassés, de 10 à 30% pour le béton de fins et arrive à 35% pour le béton de gros et fins. Pour le béton de brique cette chute est plus importante, elle est de l'ordre de 10 à 35% pour le béton de gros granulats recyclés, de 30 pour les fins et de 30 à 40% pour le béton de gros et fins.

- La loi de régression de la chute de la résistance à la compression des bétons recyclés par rapport à celle du béton original est proche d'une fonction polynomiale de type : $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$.
- La méthode d'estimation de la résistance à la compression du béton ordinaire par les essais indirectes (Scléromètre et Vitesse du son) semble d'être fiable pour les bétons recyclés.
- Comme pour la compression, la résistance à la flexion des bétons recyclés chute au cours du temps et en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Le rapport $\frac{R_c 28}{R_t 28}$ varie de 8.4 à 10.57 pour le béton de granulats concassé et de 8.07 à 11.83 pour le béton de brique.
- L'adjuvant plastifiant influe favorablement sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons recyclés.
- Le module d'élasticité du béton de granulat recyclés (béton et/ou brique concassé) diminue d'environ 30 à 40% et 50% pour les gros, fins et gros et fins granulats recyclés respectivement. Cette chute n'est que d'environ 25% lorsqu'un mélange de gros et fins de béton et brique concassée sont utilisés ensemble.

-
- Le retrait plastique des bétons recyclés est plus élevé par rapport à celui du béton d'agrégats naturels. Pour le béton de granulats concassés, il est moyennement comparable à jeune âge mais augmente avec le temps.
 - Le béton recyclés absorbe beaucoup d'eau (que ce soit par capillarité ou par immersion totale) par rapport au béton ordinaire. Le pourcentage d'absorption d'eau par immersion est de 4.5% pour le béton de granulats concassés et de 8% pour le béton de brique par rapport à 2.5% de celui du béton de granulats naturels.
 - La perméabilité à l'eau du béton recyclés augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés et peut atteindre le double de celle du béton ordinaire.

ce travail est une base et un élan propulseur pour l'ensemble des chercheurs dans ce domaine, quoique des recommandations restent à leurs suggérer pour mieux apprécier et approfondir cette étude :

RECOMMANDATIONS

- l'étude expérimentale réalisée dans le cadre de ce projet s'est contentée de l'utilisation de matériaux non pollués, fabriqués sans conditions contrôlées dans le laboratoire, et il souhaitable que des essais soient réalisés sur des matériaux issus de chantiers de démolition (séisme, crues, vieillissement,ect.).

-
- Cette étude a été basée sur un seul type de béton afin d'avoir une idée plus claire, il est souhaitable d'analyser d'autres classes de béton original (dosage en ciment 300, 350 et 400 Kg/m³) à différents rapports G/S dans les chantiers algériens.
 - Etude de la durabilité des bétons recyclés dans un environnement sévère tels que l'exposition aux eaux agressives et climat chaud.
 - Une recherche plus approfondie de l'influence du prémouillage des granulats recyclés vis à vis les propriétés du béton recyclé frais et durci.
 - Etude du comportement d'éléments structuraux en béton armé à base de granulats recyclés sous chargement statique et dynamique.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] QUEBAUD. M, COURTIAL. M & BUYLE-BODIN. F, "le recyclage des matériaux de démolition", Matériaux et structure, travaux, n° 721, France, juin 1996.
- [2] BUTENWIZER. I & FAVENNEC. M, "Le recyclage-concassage des matériaux minéraux issus de la démolition au Danemark et aux Pays-Bas", cahier du CSTB, n° 2794, France, Avril 1995.
- [3] CANAT. d & CHEVET. H, "Le recyclage-concassage des matériaux minéraux issus de la démolition en Belgique et au Royaume-Uni", cahier du CSTB, n° 2814, France, juin 1995.
- [4] HANSEN, TC, "Recycling aggregates and recycling aggregate concrete", second state-of-the-art report developments 1945-1985. Materials and structures 1986, vol 19, n° 111, pp. 201-246.
- [5] HANSEN. TC, "Recycling of demolished concrete and masonry", RILEM Report N° 06, LONDON, E & FN, SPON, 1992.
- [6] PIMIENTA. P & REMOND. S, "Bétons de déchets : prévenir les risques", CSTB magazine, n° 109, Novembre 1997, pp. 28-30
- [7] SCHENK. K, "Valorisation and recycling of construction demolition wastes in switzerland ", Congress Proceeding R'97, Vol 3, Geneva, Switzerland, 1997 pp199-205.
- [8] MULLER.Ch, "Requirement on mineral building materials for future recycling on example of concrete", Congress Proceeding R'99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp.214-219.
- [9] BOUCHARD. M & JOUBERT. JP, "Granulats élaborés par concassage de bétons de démolition", LCPC, Nice, 21-23, Mai 1984, pp. 150-153.
- [10] BOUCHARD. M, "Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition", Bultin liaison laboratoire Pont et Chaussée, n° 134, Réf 2852, Nov.-Déc. 1984, pp. 53-57.
- [11] JVAUTRIN. J.C, "Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière", Revue générale des routes et des aérodromes, n° 729, Mai 1995, pp. 20-22.
- [12] TOURENQ. C, DUPONT. P & PRIMEL. L, "Granulats", ENPC, France, 1993.
- [13] WERNER. R, "Concret pavement with recycled concrete aggregates ", Congress Proceeding R'97, Vol 2, Geneva, Switzerland, 1997, pp.77-81.

- [14] CANALE. S, “ The utilisation of the material from demolition in the roads construction”, Congress Pproceding R'99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp.353-357.
- [15] HOSTMANN, “ Une nouvelle gestion des déchets de chantier d'ici cinq ans ”, les cahiers techniques du batiment,n°177,France, Jan-Fev 1997.
- [16] KENAI. S, “ Le ciment, fabrication, propriétés et contrôle de qualité ”, document interne, Université de Blida.
- [17] YOUNSI. N & AMRI. M, “ Valorisation des déchets de la brique dans la fabrication du ciment portland ”, Mémoire de fin d'étude, Institut de Chimie Industriel, Université de Blida, 1997.
- [18] VENUAT. M, “ La pratique des ciments et des bétons ”, Editions du MONITEUR, France, 1976.
- [19] BENYAHIA & AIDANI, “ Contribution à l'étude de quelques additifs actifs dans la fabrication du ciment portland”, Mémoire de fin d'études, Institut de Chimie industrielle, Université de Blida,1992.
- [20] PIMIENIA. P, TRAN. T, DELMOTTE. P, VIMON. E & COLOMBARD-PROUT. M, “ Emploi des granulats recyclés pour la fabrication de blocs de construction”, Rapport du CSTB rédigé à la demande du plan Construction et Architecture, France, 1997.
- [21] YANAGIBASHI. K & YONEZAWA. T, “ Development of production process for reurnable concrete aggregate ”, Congress Pproceding R'99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp.137-142.
- [22] DEPAW. C, “ Recyclage des décombres d'une ville sinistrée ”, CSTC, Revue n° 4, Belgique, décembre 1982, pp. 12-28.
- [23] DREUX. G & FESTA. J, “ Nouveau guide du béton ”, Septième édition, EYROLLES, 1995.
- [24] RAMAMURTHY. K & GUMASTE. K.S, “ Properties of recycled aggregate concrete ”, The Indian concrete journal, January1998, pp.49-53.
- [25] HENDRIKS Ch .F, “ European standard for recycled aggregates in construction ” Congress Pproceding R'99, Vol 3, Geneva, Switzerland , 1999, pp.108-113.
- [26] TORII, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASABA. S, “ Applicability of recycled cobncrete aggregate as an aggrete for concrete pavement ”, Transaction of the Japan concrete institute, Vol 6, 1984, pp. 133-140.
- [27] VALLI. F, “ Recycling of concrete ”, Congress Proceeding R'97, Vol 2, Geneva, Switzerland, 1997, pp.71-76.

- [28] MAULTZSCH. M ,MELIMANN. G & WINKLER. H, “ The substitution of naturel aggregatesby processed building rubble for high grade concrete ”, Congress Pproceding R’99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp.199-204.
- [29] BARRA. M DE OLIVEIRA &VAZQUEZ. E , “ The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete ”, Waste management, Vol 16, Nos1-3, 1996, pp.113-117.
- [30] GALLIA. J, “ Sulfate content threshold for recycled aggregates used in concrete ”, Congress Pproceding R’99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp.161-166.
- [31] COLLINS. RJ, “ The use of recycled agrégates in concrete ”, BRE information paper p 5/94, May 1994.
- [32] RILEM, “ Unified spécifications for recycled coarse agrégates for concrete ”, RILEM TC 121-DRG, 1993.
- [33] CSTC, “ Recyclage du béton ”, CSTC, Rapport final de la biennal, Bruxelles 1979-1981.
- [34] NEWMAN. A.J, “ The utilisation of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete ”, Department of scientifique and industrial research, UK, 1995.
- [35] HOBBS.G, CILLINS R.J, BLACKWELL B.Q & ATKINSON C.J, “ Practical demonstration of the recycling on a building contract ”, Congress Pproceding R’97,Vol 2, Geneva, Switzerland, 1997, pp.47-52.
- [36] DEVENNY.A & KHALAF F.M, “ The use of creshed brick as coarse aggregatein concrete ”, Masonry international, Vol12, n°3, ,1999, pp. 81-84.
- [37] COQUILLAT. G, “ Recyclage des matériaux de démolition dans la confection des bétons ”, Annales de l’ITBTP, n° 428, France, Octobre 1984, pp. 63-71
- [38] DESSY. P & NIRONI. L, “ The mechanical and physical performance of building components made with recycled aggregates ”, Congress Pproceding R’99, Vol 3, Geneva Switzerland , 1999, pp. 209-213.
- [39] TAVAKOLI M & SOROUSHLAN. P, “ Strengths of recycled aggregate concrete made using fielct-demolished concrete as aggregate ”, ACI materials journal, March-April, 1996, pp. 182-193.
- [40] MARLET. JD et PIMIENTA. P, “ Mechanical and physico-chemical properties of concrete aggregates ”, RILEM . Procedding 23. Third International RILEM Symposium on Démolished and Reuse of Concrete and Masonry, Odens, Danemark, 24-27 Octobre, pp. 343-354.

- [41] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- Analyse chimique des ciments’, AFNOR, Paris, 1990.
- [42] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- détermination de la finesse’, AFNOR, Paris, 1990.
- [43] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- détermination de la consistance’, AFNOR, Paris, 1990.
- [44] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- détermination du temps de prise et stabilité’, AFNOR, Paris, 1990.
- [45] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- détermination de l’expansion à chaud du ciment’, AFNOR, Paris, 1990.
- [46] Norme française ; ‘Méthode d’essais des ciments- détermination des résistances mécaniques’, AFNOR, Paris, 1990.
- [47] Norme française ; ‘Granulats – Analyse granulométrique par tamisage’, AFNOR, Paris, 1990.
- [48] Norme française ; ‘Granulats – Mesure de masse volumique, de la porosité, du coefficient d’absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux’, AFNOR, Paris, 1990.
- [49] Norme française ; ‘Granulats – détermination de la masse volumique des sables’, AFNOR, Paris, 1990.
- [50] Norme française ; ‘Granulats – détermination de propreté superficielle’, AFNOR, Paris, 1990.
- [51] Norme française ; ‘Granulats – Essai de Los Angeles’, AFNOR, Paris, 1990.
- [52] Norme française ; ‘Granulats – Essai d’Usure Micro-Deval’, AFNOR, Paris, 1990.
- [53] Norme française ; ‘Granulats – Equivalent de sable’, AFNOR, Paris, 1990.
- [54] Norme française ; ‘Béton- Essais d’Etude, de convenance et de contrôle- confection des éprouvettes’, AFNOR, Paris, 1981
- [55] Norme française ; ‘Béton- Essais d’Affaissement’, AFNOR, Paris, 1981
- [56] Norme française ; ‘Béton- Essais de compression’, AFNOR, Paris, 1981
- [57] Norme française ; ‘Béton- Essais de flexion’, AFNOR, Paris, 1981
- [58] Norme française ; ‘Béton- Essais de retrait’, AFNOR, Paris, 1981

- [59] Norme française ; 'Béton- Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un Scléromètre', AFNOR, Paris, 1989.
- [60] Norme française ; 'Béton- Capillarité'', AFNOR, Paris, 1989
- [61] Norme française ; 'Béton- Auscultation sonique'', AFNOR, Paris, 1989
- [62] Norme française ; 'Béton- Auscultation sonique'', AFNOR, Paris, 1989
- [63] DE PAUW. C, 'Béton recyclé'', CSTC, Revue n° 2, Bruxelles, Juin 1980, pp. 2-15.
- [64] AMDJAD. M, TAZYEEN. A, FARRUKH. G & DEVENDRA S.R, " Variation in strength of concrete on addition of demolished waste ", The Indian concrete journal, August.1998, pp395-399.
- [65] WAINWRIGHT P. J , TREVORROW. A, YU. Y &WANG. Y, " Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled aggregate ", Materials and structures , 1994, pp. 319-330.

ANNEXES

ANNEXE 1

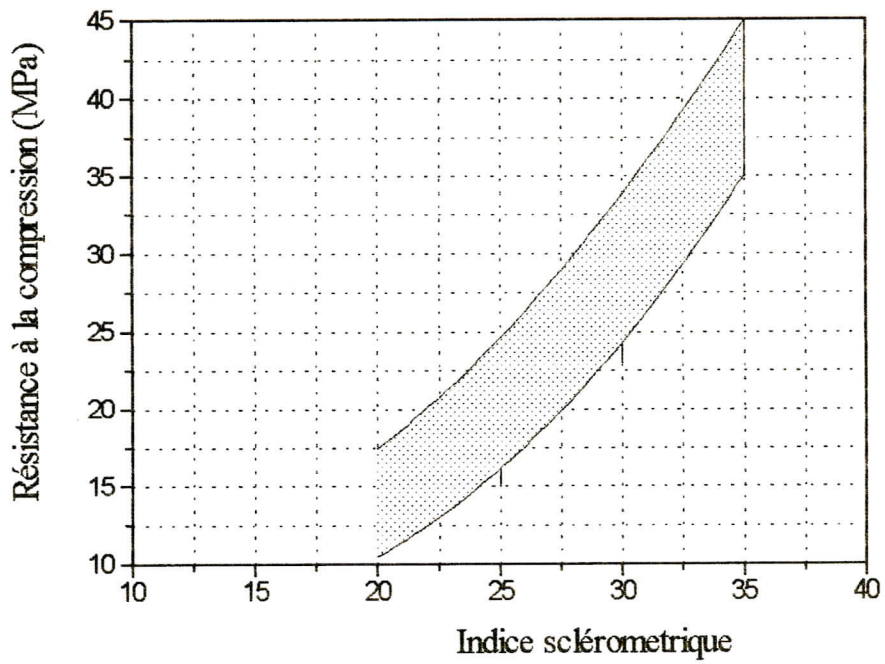


Fig. 1 Estimation de la résistance à la compression du béton en fonction de l'indice sclérométrique

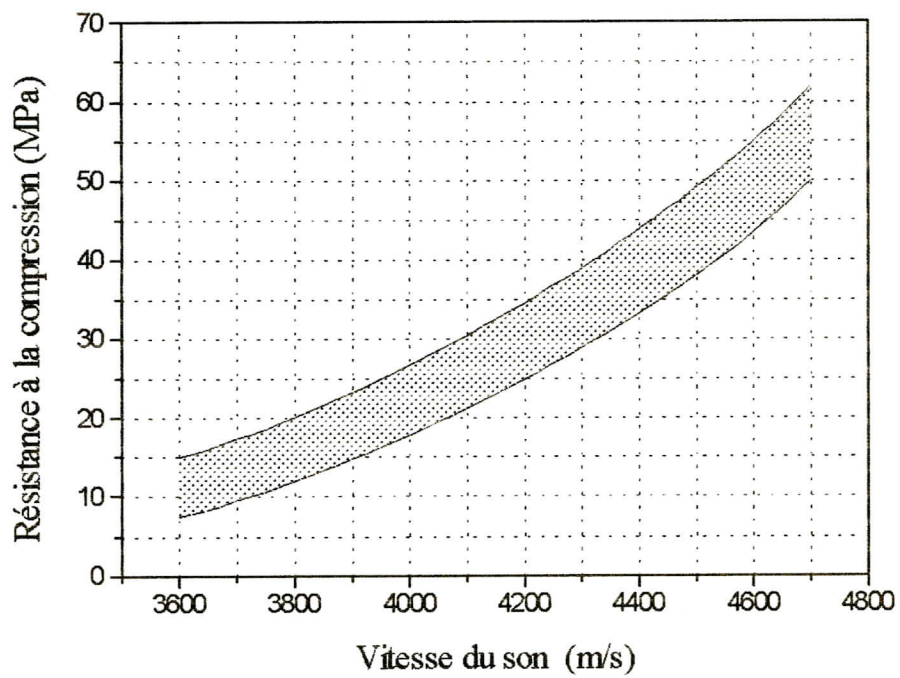
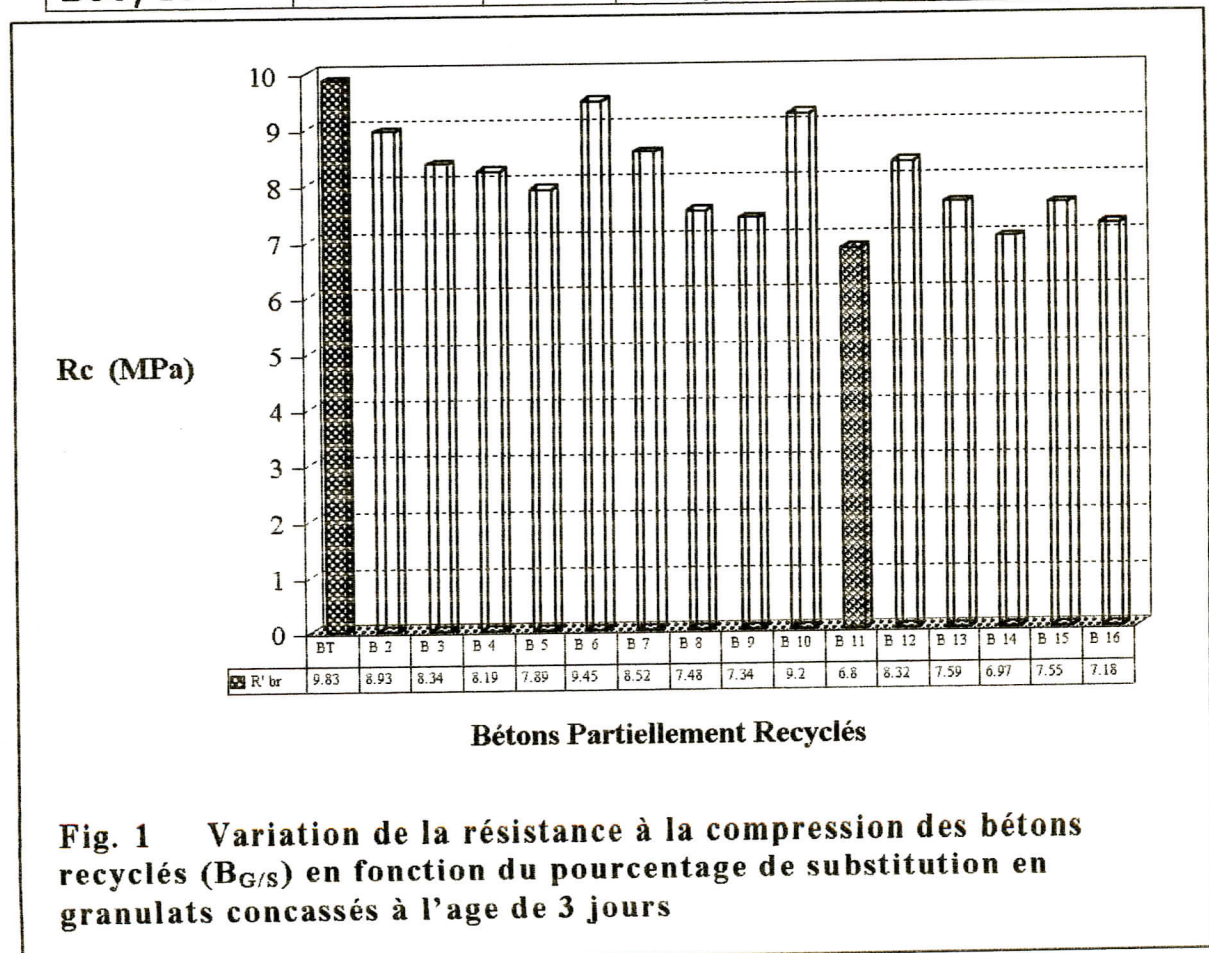


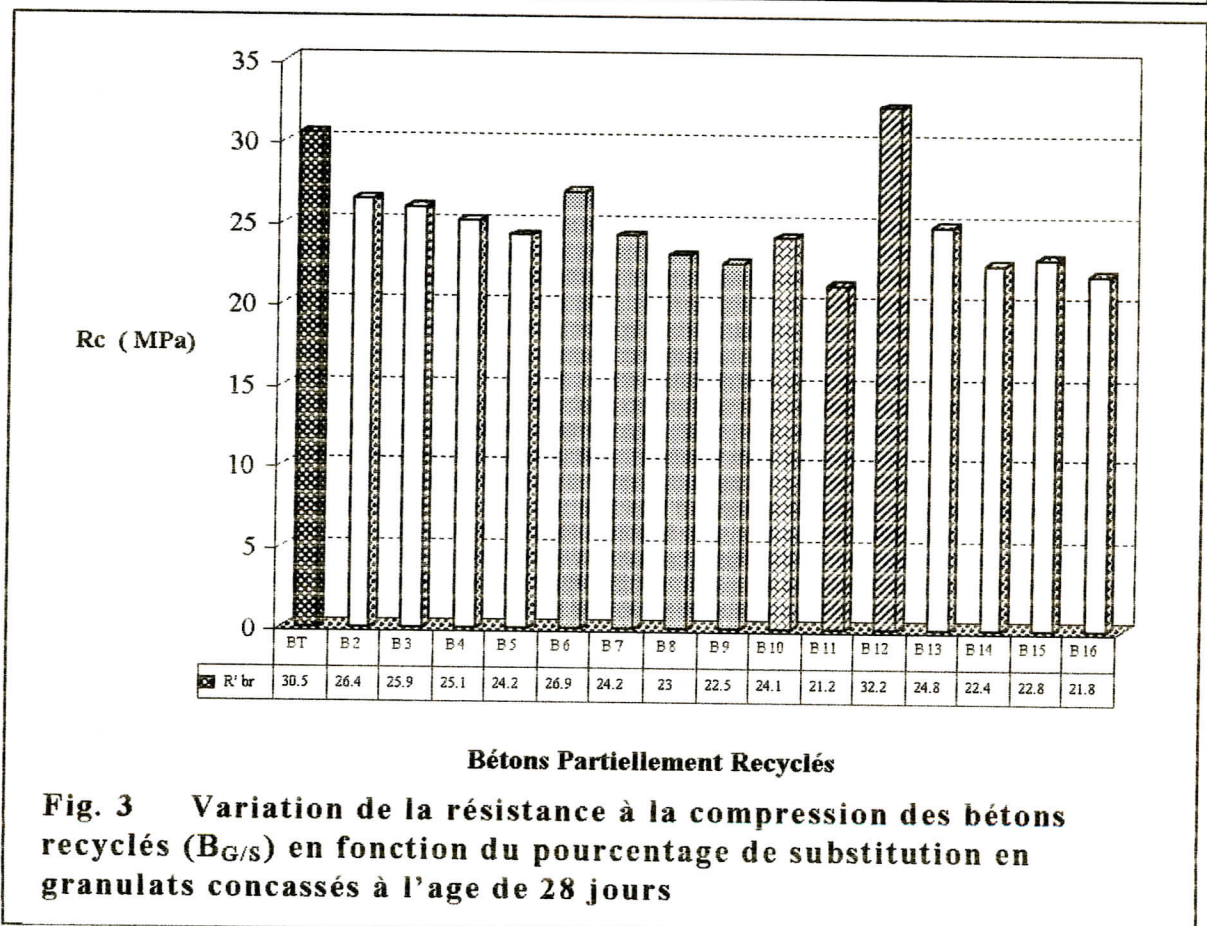
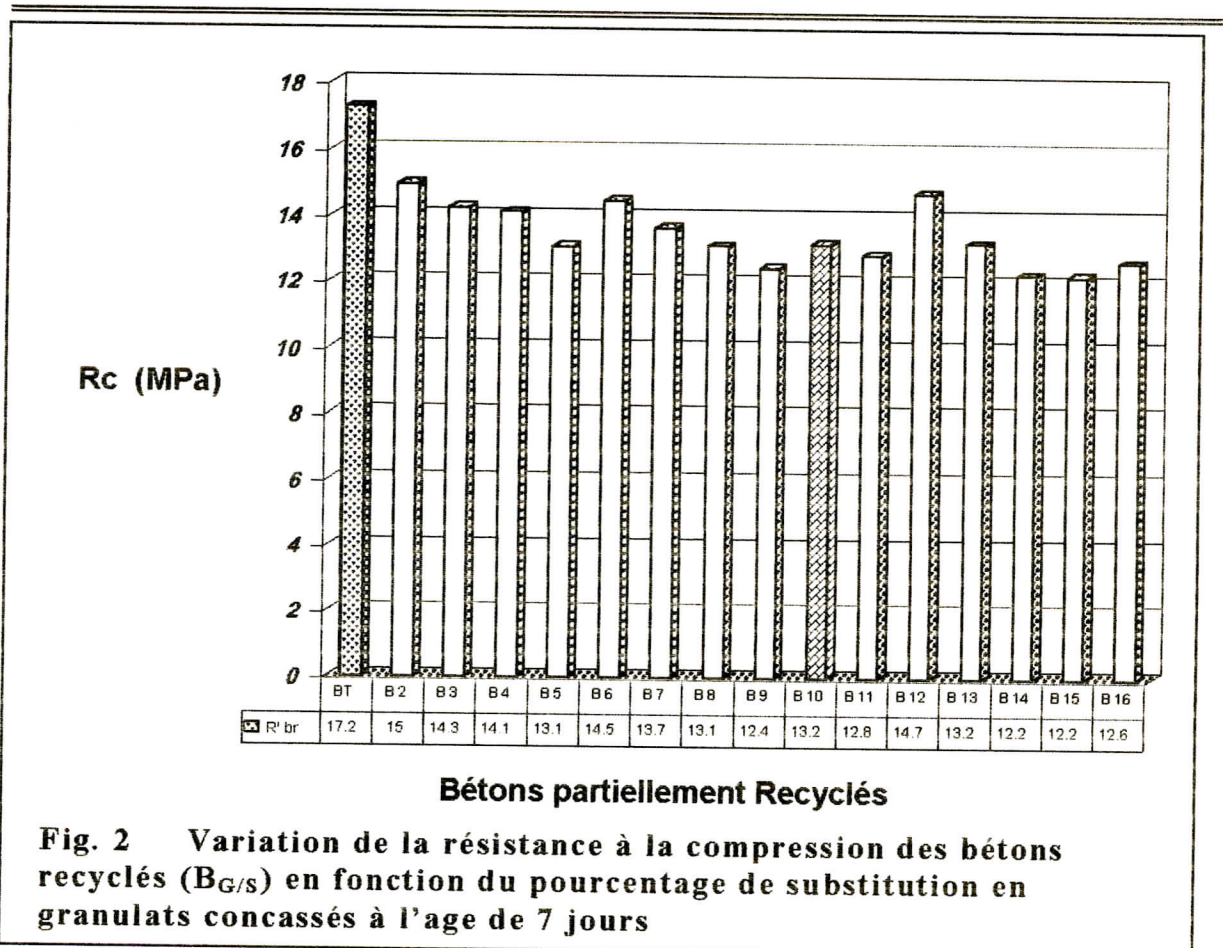
Fig. 2 Estimation de la résistance à la compression du béton en fonction de la vitesse du son

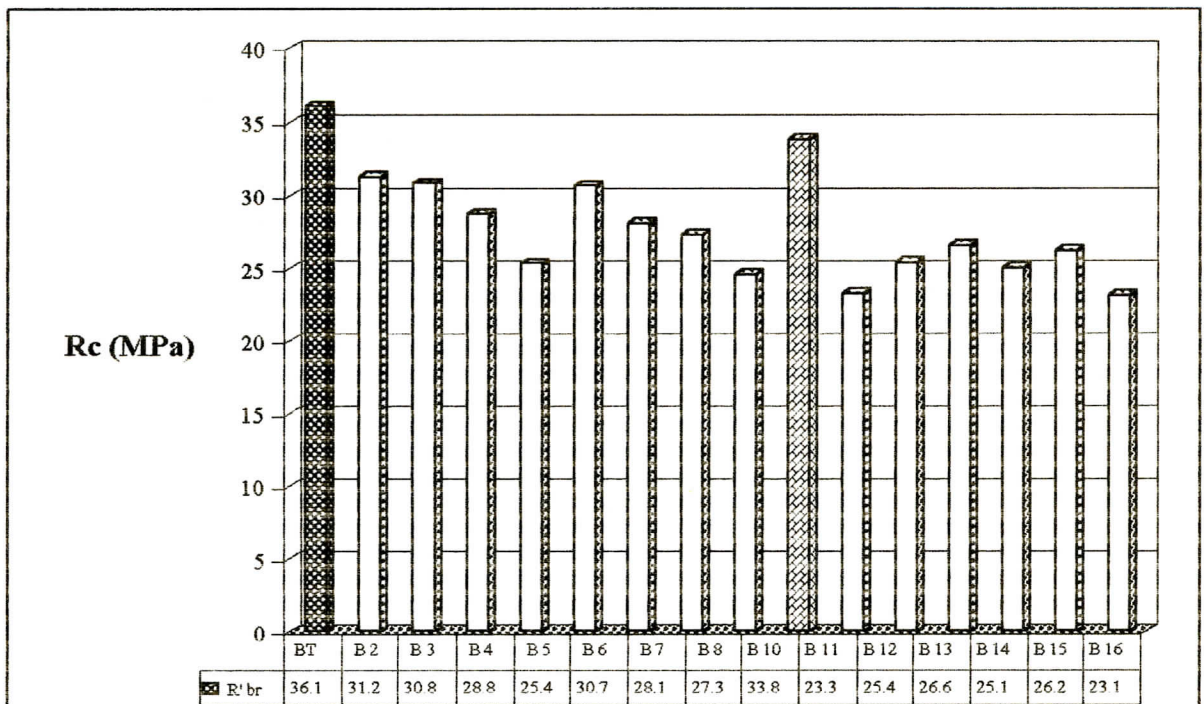
ANNEXE 2

Pour la seule raison de faire apparaître et les symboles nominatifs et les résultats des bétons recyclés sur le même graphe, nous avons jugé utile de simplifier l'appellation par le suivant :

B0/0	B1		
B25/0	B2		C25/0
B50/0	B3		C50/0
B75/0	B4		C75/0
B100/0	B5		C100/0
B0/25	B6		C0/25
B0/50	B7		C0/50
B0/75	B8		C0/75
B0/100	B9		C0/100
B50/50	B10		C50/50
B100/100	B11		C100/100
B+100/100	B12		C+100/100
B75/25	B13		C75/25
B100/50	B14		C100/50
B25/75	B15		C25/75
B50/100	B16		C50/100

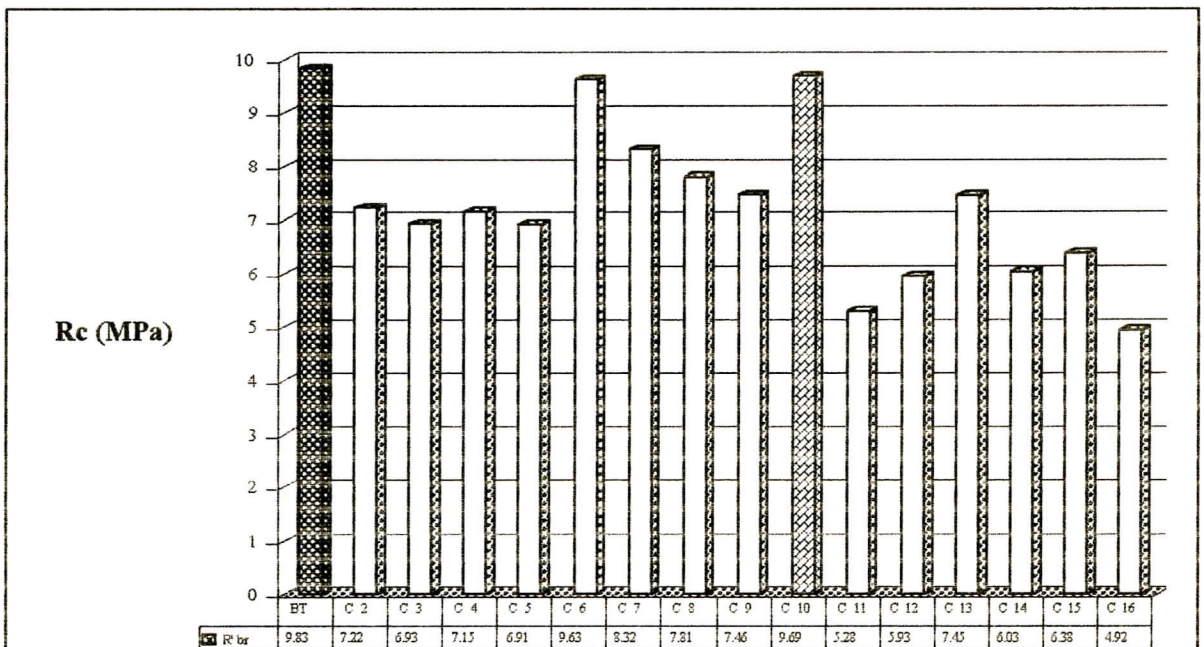






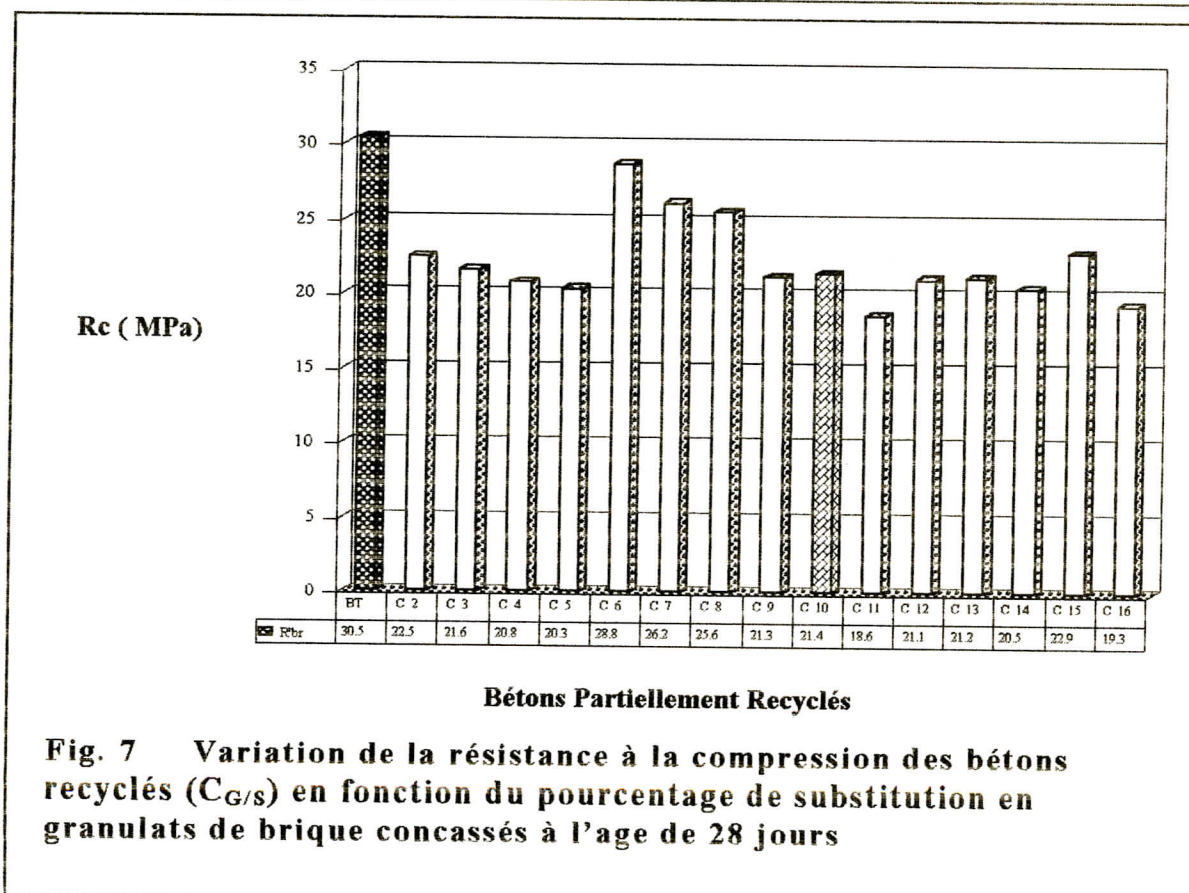
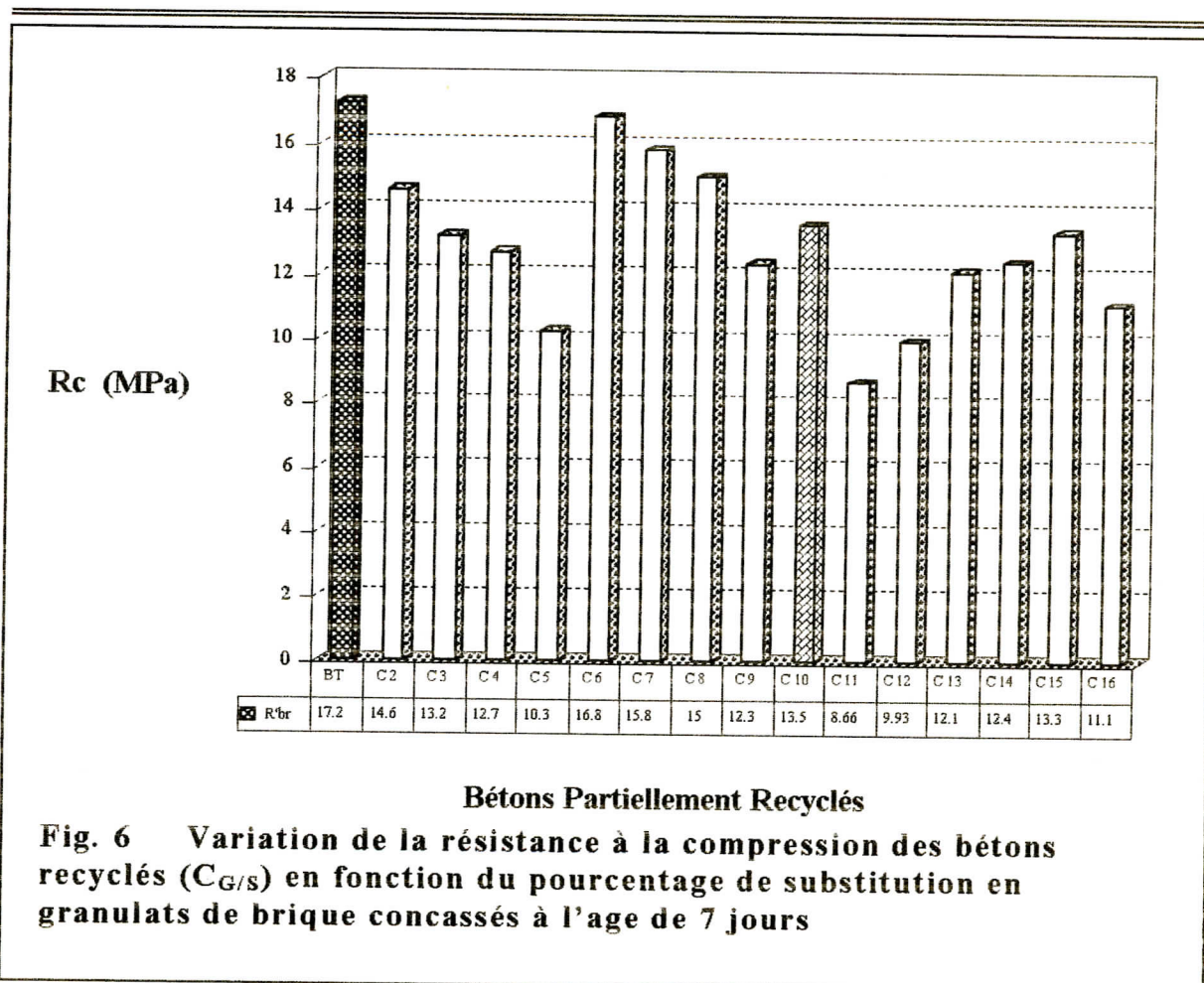
Bétons Partiellement recyclés

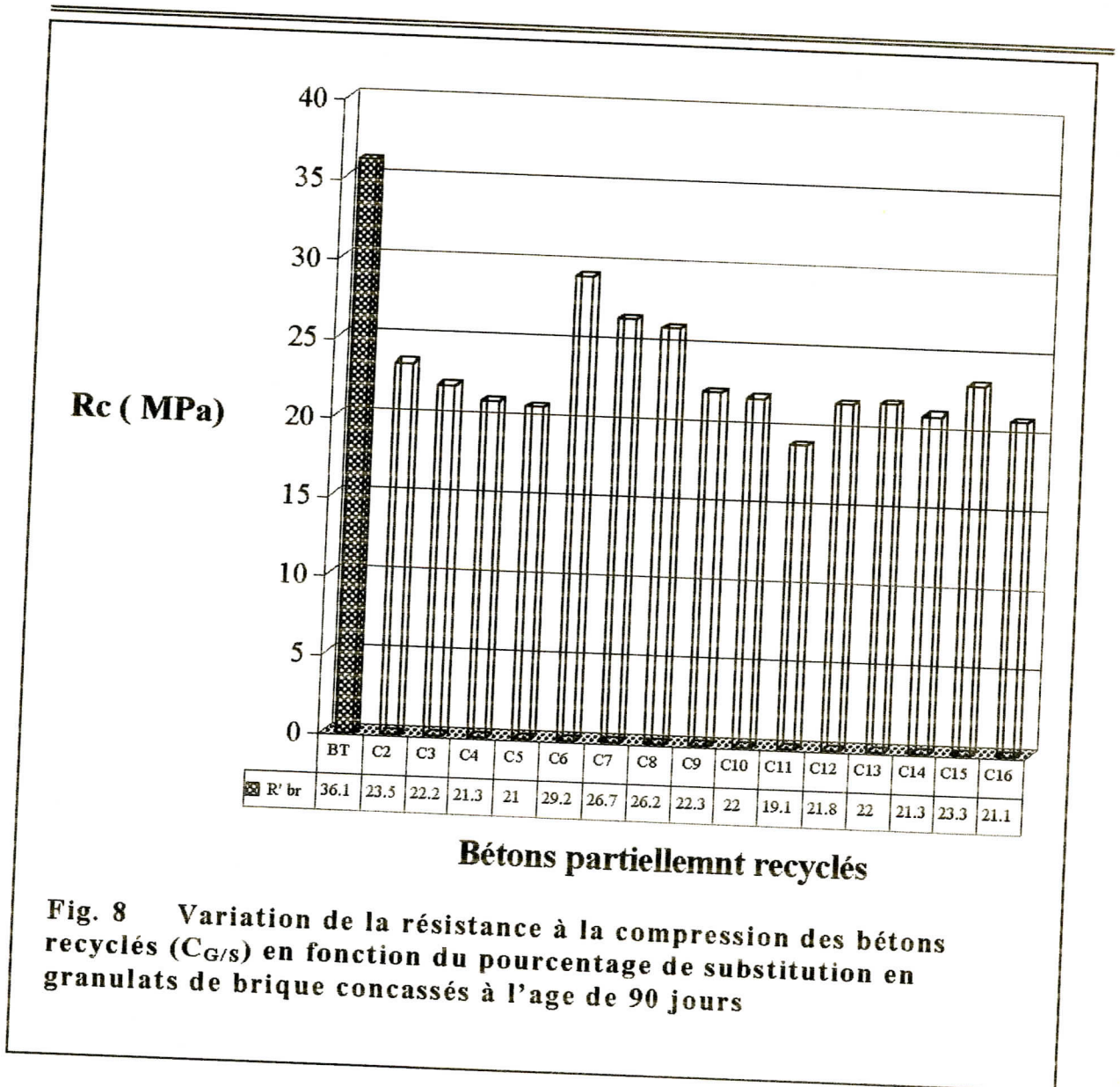
Fig. 4 Variation de la résistance à la compression des bétons recyclés ($B_{G/s}$) en fonction du pourcentage de substitution en granulats concassés à l'âge de 90 jours



Bétons Partiellement recyclés

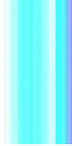
Fig. 5 Variation de la résistance à la compression des bétons recyclés ($C_{G/s}$) en fonction du pourcentage de substitution en granulats de brique concassés à l'âge de 3 jours





Note : Pour toutes les figures ci-dessus **R'br = Rc** : Résistance à la compression

ANNEXE 3



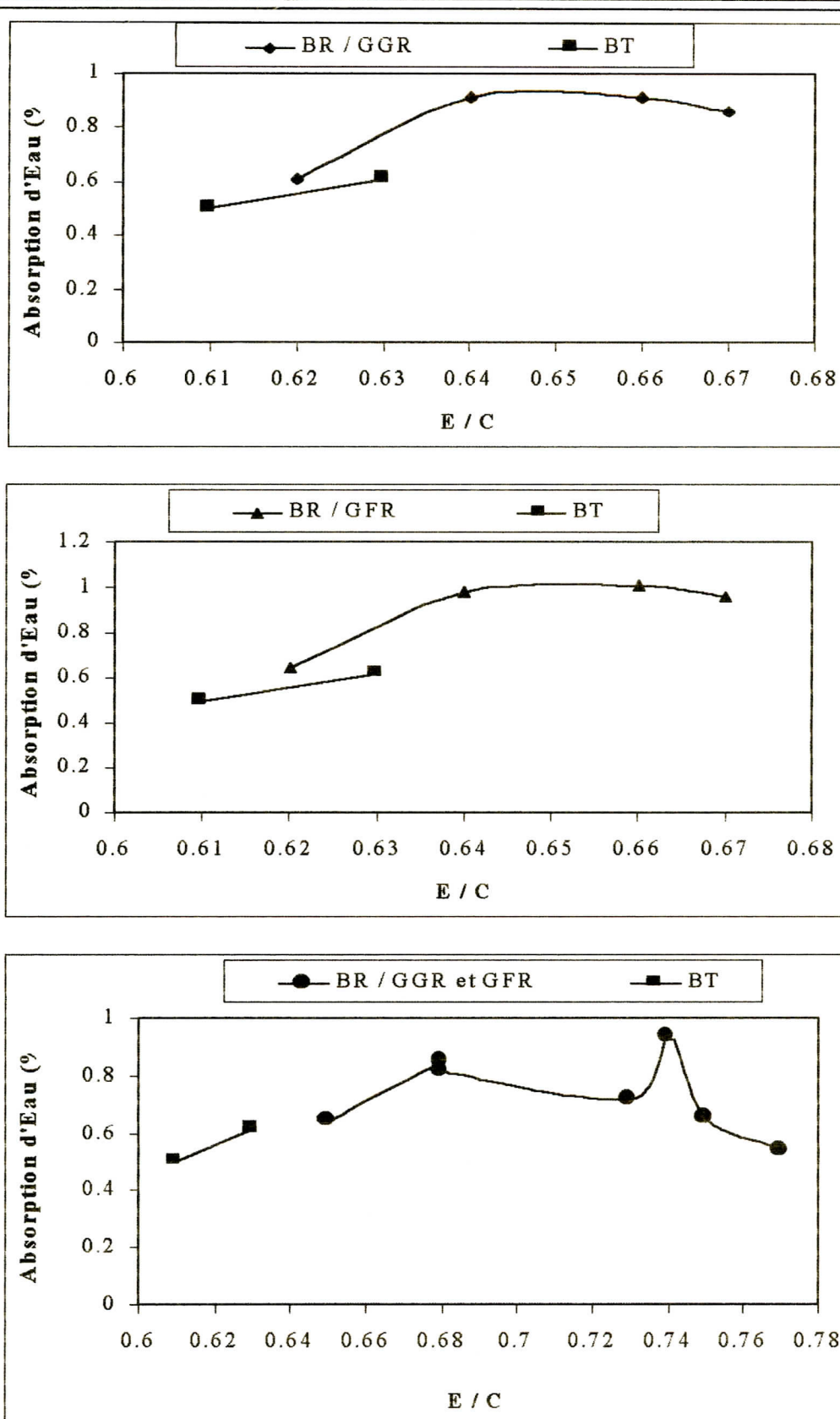


Fig. 2 60 mn d'absorption d'eau des bétons recyclés de granulats concassés (B_{G/S})

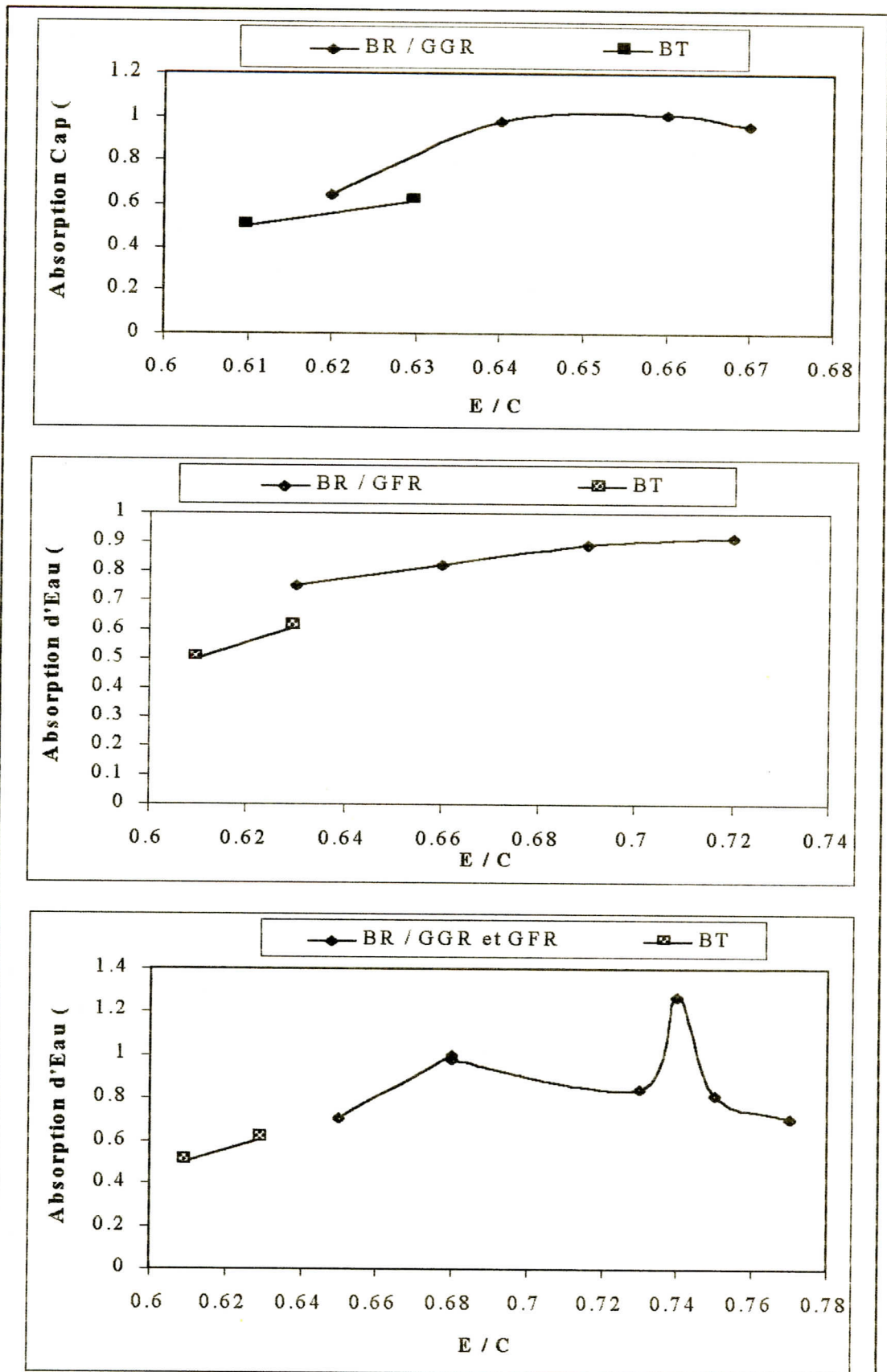


Fig. 3 90 mn d'absorption d'eau des bétons recyclés de granulats concassés (B_{G/S})

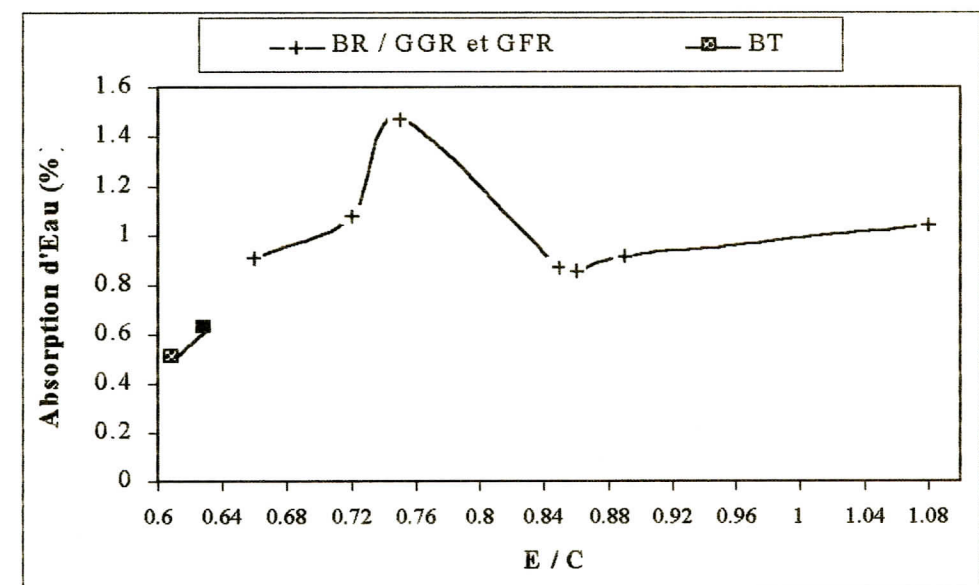
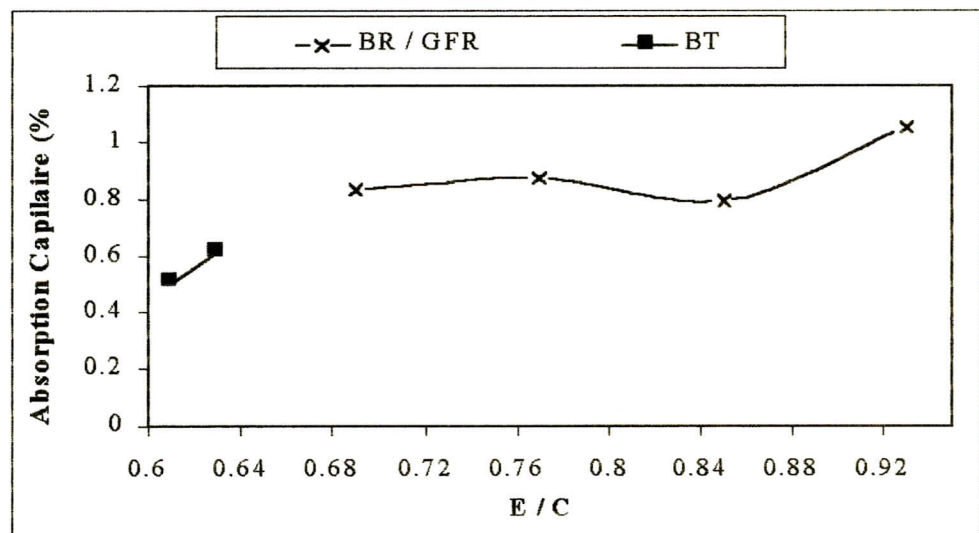
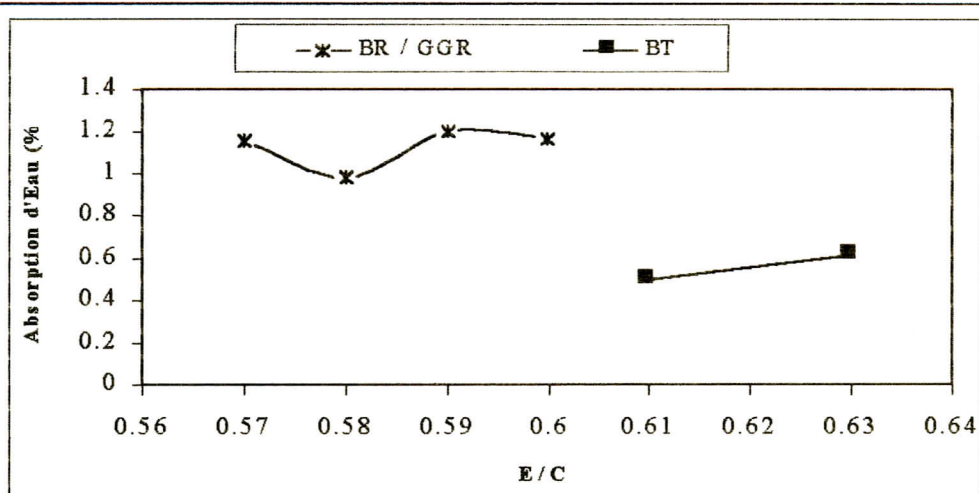


Fig. 4 30 mn d'absorption d'eau des bétons recyclés de brique concassée ($C_{G/s}$)

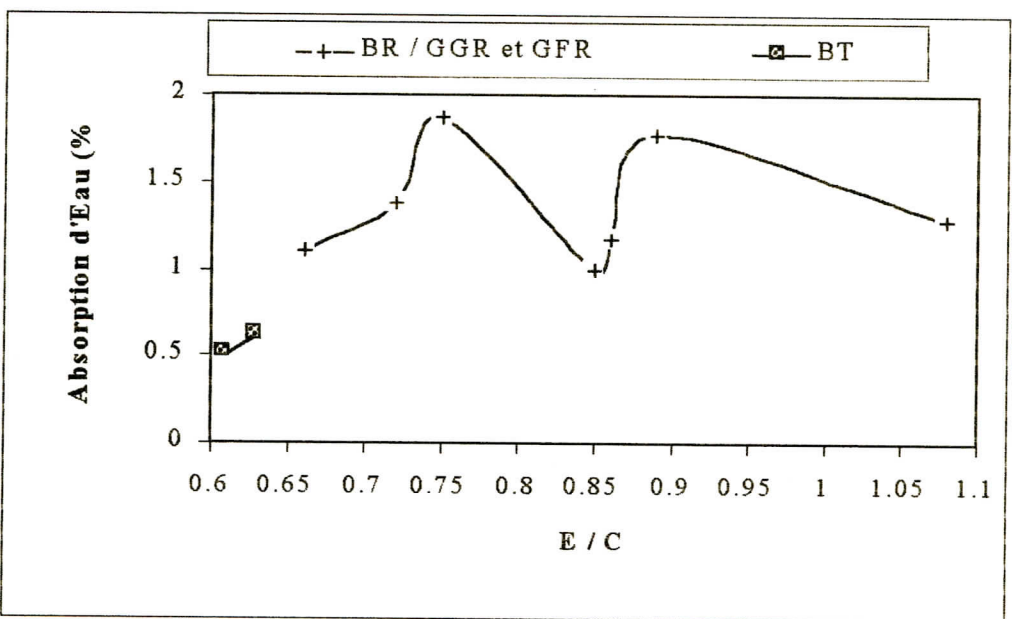
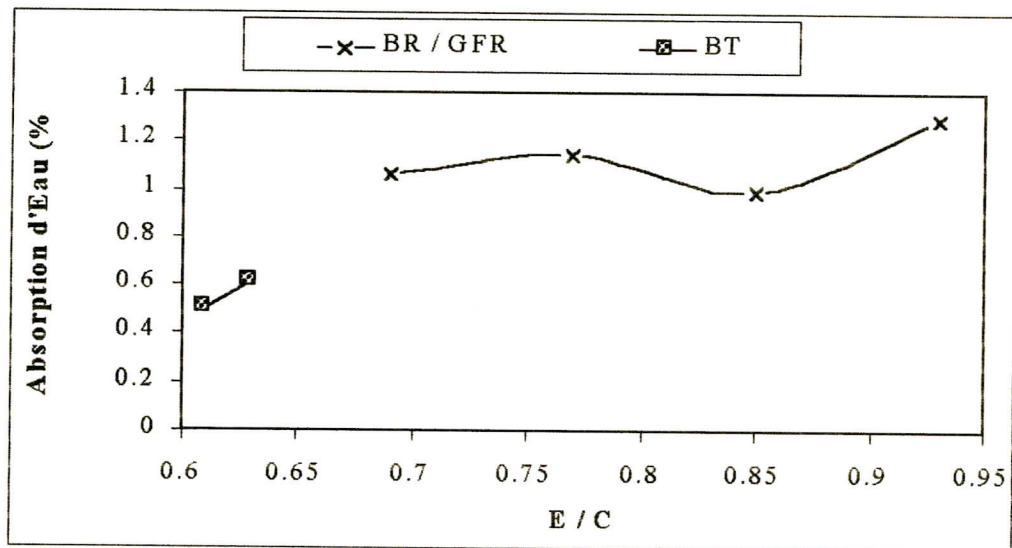
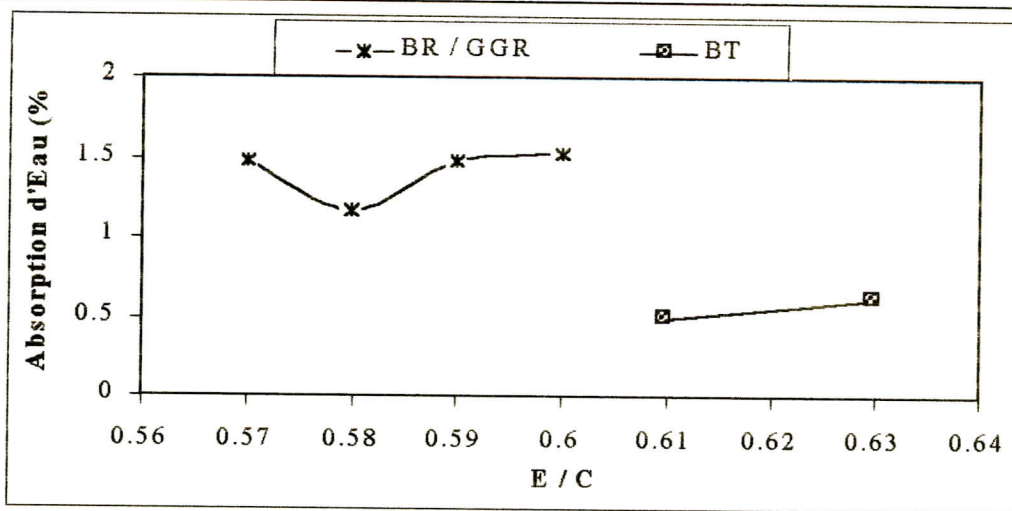


Fig. 5 60 mn d'absorption d'eau des bétons recyclés de brique concassée (C G/s)

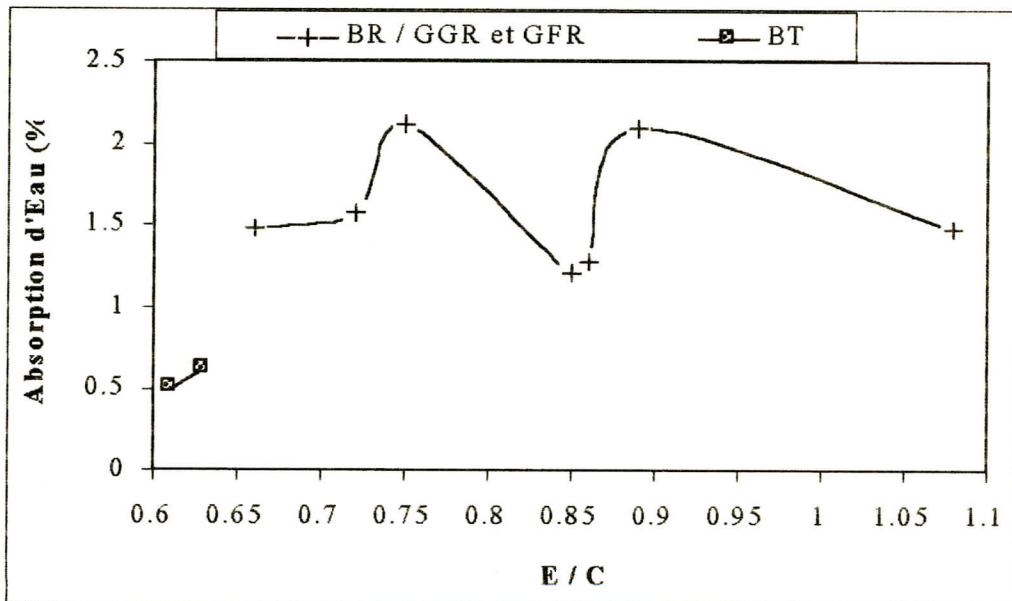
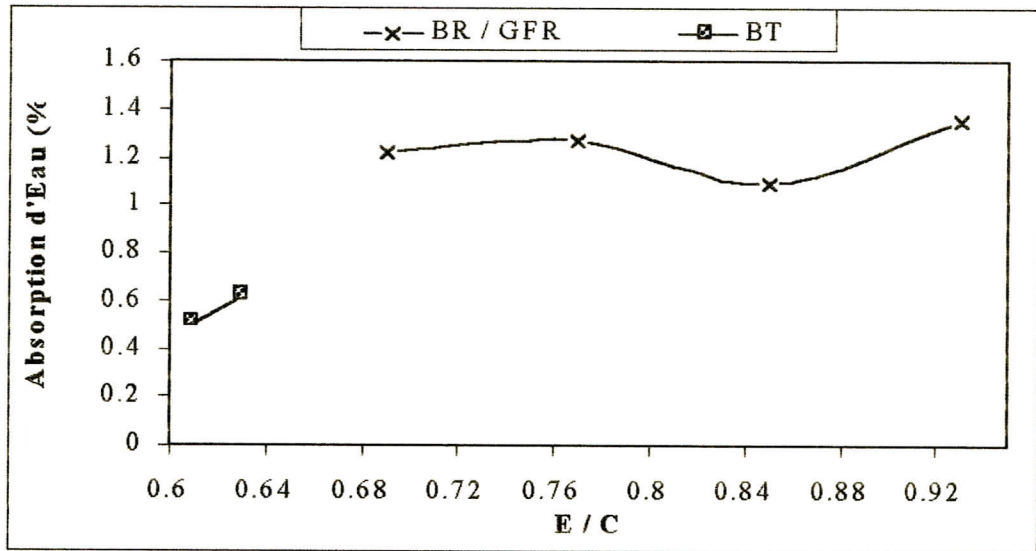
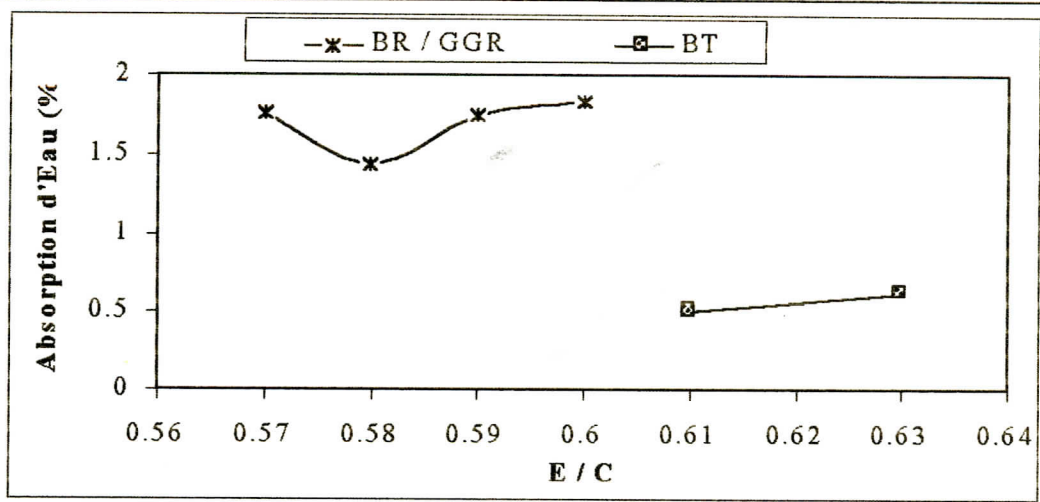
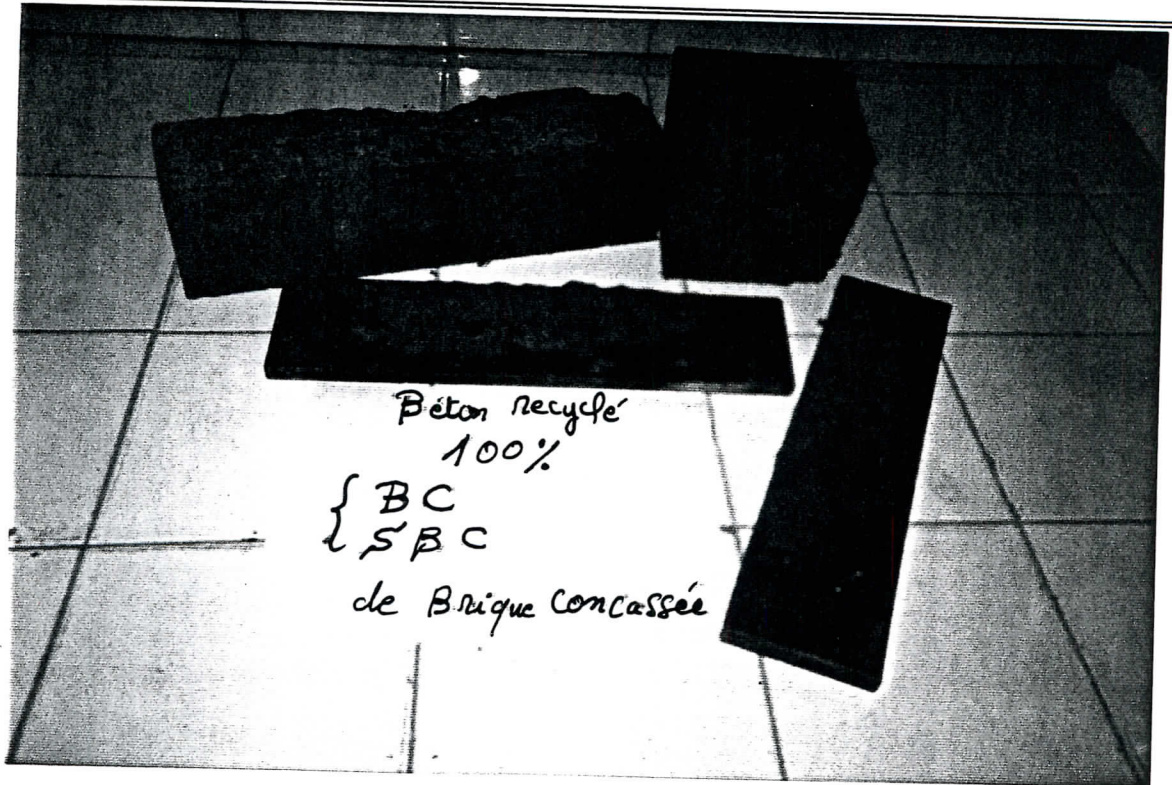
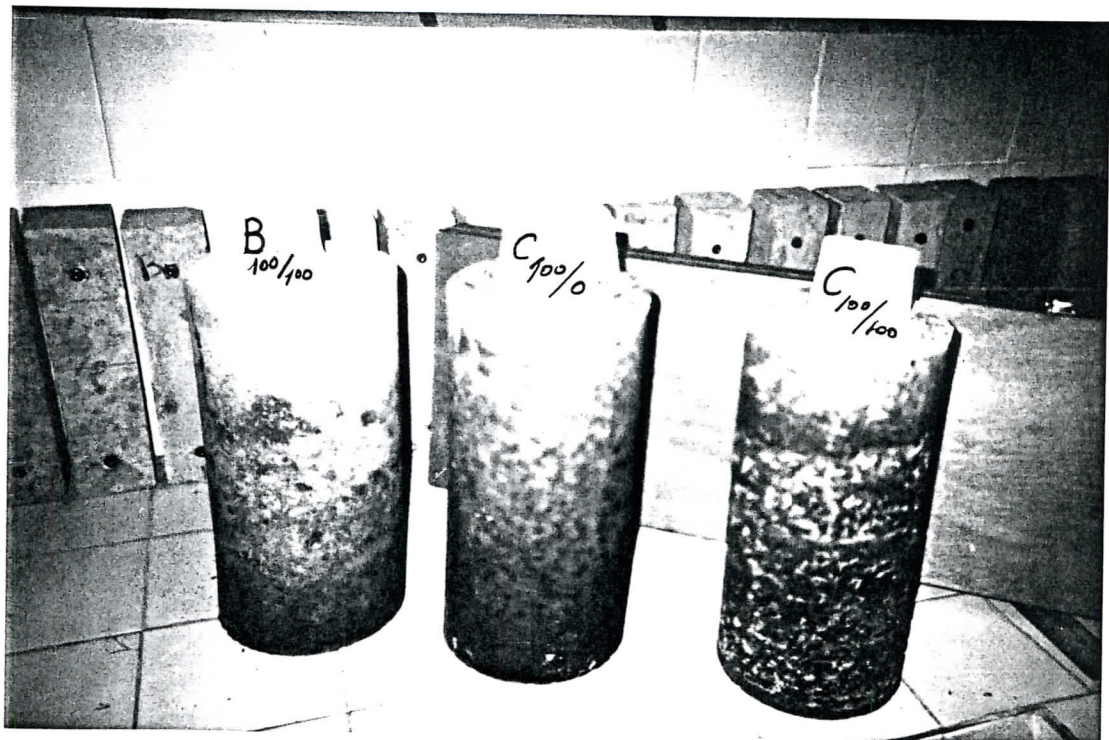


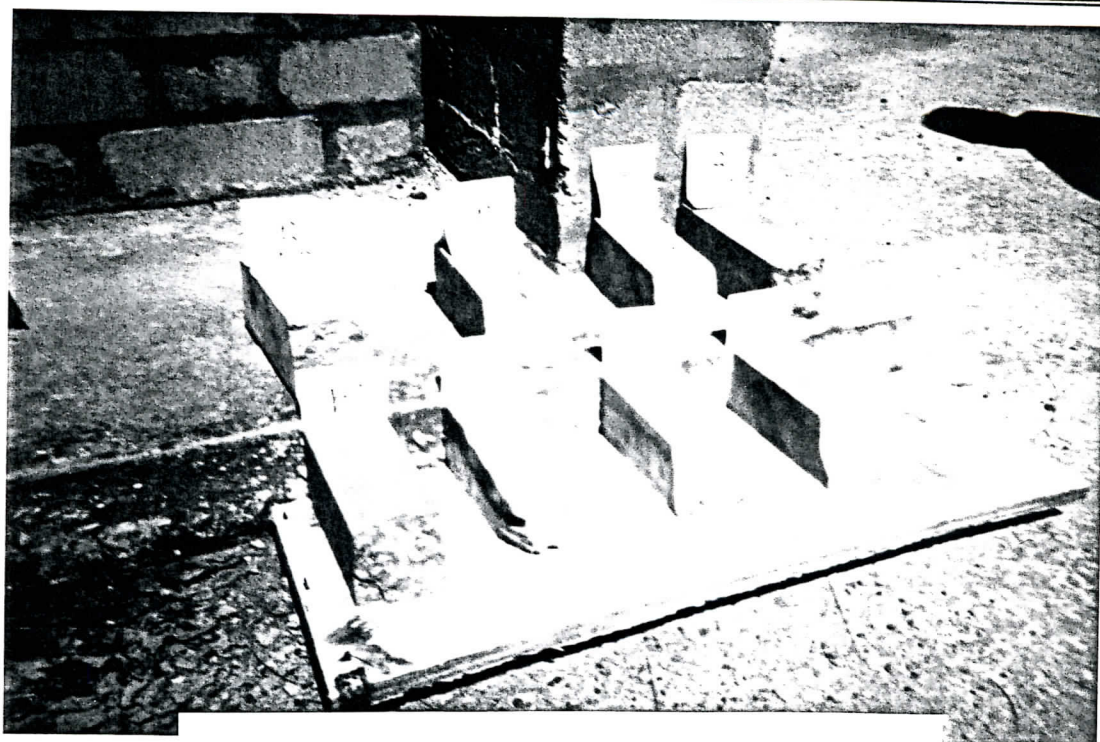
Fig. 6 90 mn d'absorption d'eau des bétons recyclés de brique ($C_{G/s}$)

ANNEXE 4



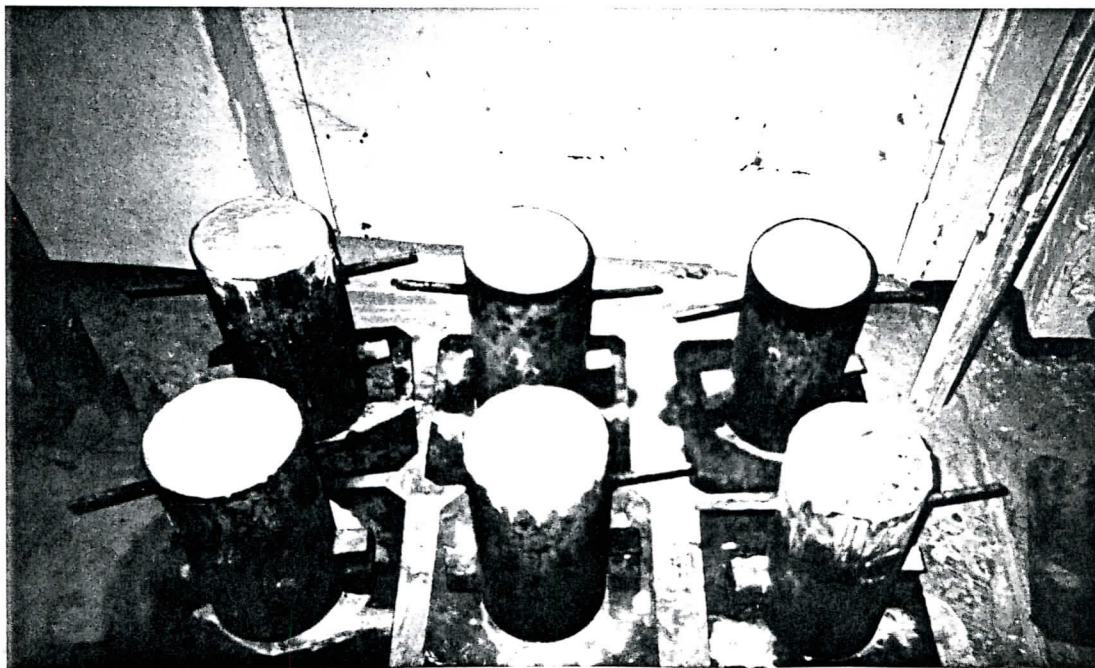
Phénomène de ségrégation du béton recyclé





Eprouvettes de béton de granulats concassée



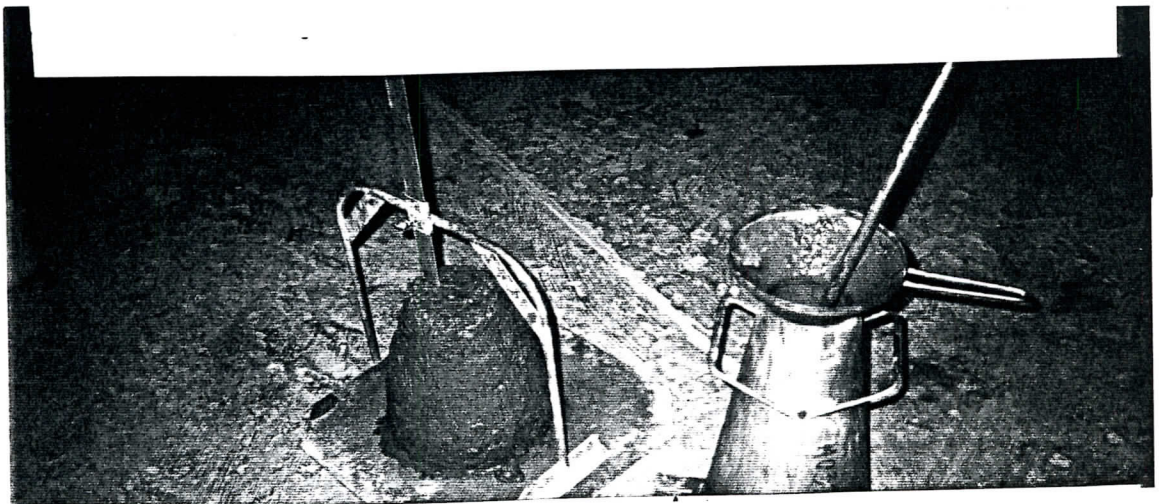


Eprouvettes (16x32 cm) du béton recyclé destiné à l'essai de perméabilité

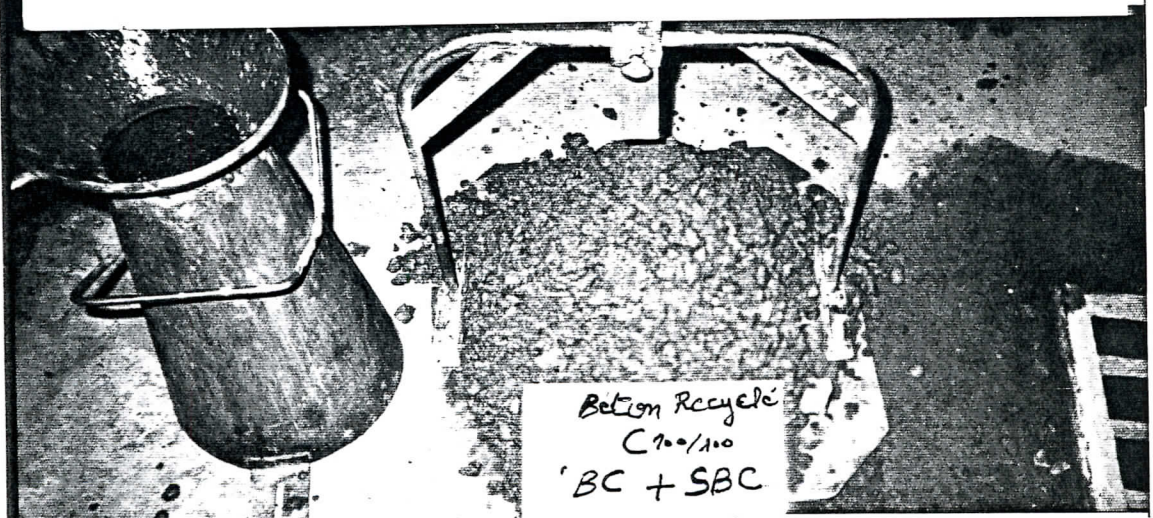
Annexe 4



Le Slump du béton ordinaire à base de 100% de granulats *Naturels*



Le Slump du béton recyclé à base de 100% de concassés de béton



Le Slump du béton recyclé à base de 100% de concassés de brique