

Université Mohamed Khider - Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique  
Réf : .....



جامعة محمد خيضر - بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de :

## **Doctorat en Sciences**

**Spécialité : Génie Civil**  
**Option: Génie Civil**

# **Durabilité des bétons à base du sable de démolition et ajouts minéraux actifs**

Présentée par :

**BENAICHI El hadj**

**Soutenue le 20 /12 /2018**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr.CHEBILI Rachid</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Mr. MEZGHICHE Bouzidi</b>	<b>MCA</b>	<b>Directeur de thèse</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Mr.RAHMOUNI Z/El-Abidine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de M'SILA</b>
<b>Mr. MESSAOUDENE Ibrahim</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Bordj Bou Arréridj</b>

**Année universitaire 2018-2019**

## **AVANT-PROPOS**

Ce travail de mémoire a été effectué, au Laboratoire de Génie-civil (LGC) de l'Université de BISKRA sous la direction du : Dr BOUZIDI MEZGHICHE, maître de conférence à l'Université de BISKRA, Je tiens sincèrement à exprimer toute ma reconnaissance pour ces conseils judicieux et sa disponibilité tout le long de ce travail. Je remercie le Professeur CHEBILI RACHID de l'Université de Biskra qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du Jury.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'ils me faisaient en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail :

Le professeur RAHMOUNI ZINE EL-AL-BIDINE de l'Université de M'sila

Le Docteur MESSAOUEDENE IBRAHIM de l'Université de Bordj Bou Arréridj

J'aimerais ensuite remercier Joao P.Casro-Gomes Full Professeur Université de Beira Interior et Louiz Antonio Pereira de Oliveira Full Professeur, pour leur accueil chaleureux, pour leur aide précieuse et leurs discussions intéressantes.

Je suis enfin très reconnaissant envers ma famille, en particulier mes parents, mes frères et sœurs, pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant toute la durée de ce travail, ainsi que mes amis, en particulier Mohammed Sadek REMADNA, Rachid AMRIOU, Belhi GUERIRA, Bachir TAALAH, Lakhdar SEDIRA, qui m'ont soutenu tout au long de ce travail.

## Résumé

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement.

Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet des ajouts minéraux actifs (Pouzzolane, Laitier et Fumés de silice) et inerte (calcaire) sur le comportement du béton à base des agrégats fin recyclés

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de conclure que l'utilisation des ajouts (pouzzolane, fumées de silice et laitier) améliore les caractéristiques physico-mécaniques et plus particulièrement la durabilité des bétons à base de 50 % d'agrégat fin recyclé.

**Mots clés:** *Granulats recyclés, durabilité, caractéristiques physico-mécaniques, consistance, ajouts minéraux actifs, démolition.*

## ABSTRACT

The depletion of natural deposits of aggregates and the difficulties of exploiting new quarries make it necessary to look for new sources of supply.

Recycling and waste recovery are now considered as a solution for the future in order to meet the deficit between production and consumption and to protect the environment. The objective of this study is to evaluate the effect of active mineral additions (Pozzolan, blast furnace and fumed silica) and inert additions (limestone) on the behavior of recycled aggregates.

The results show that the use of additions (Pozzolan, silica fumes and slag) improves the physico-mechanical and more particularly the durability of concrete based on 50% recycled fine aggregate.

**Keywords:** *Recycled aggregates, durability, physico-mechanical characteristics, consistency, active mineral additions, demolition.*

## ملخص

استنفاد الحقول الطبيعية والصعوبات لفتح محاجر جديدة تحتم علينا البحث عن مصادر جديدة للتموين. إعادة استعمال النفايات وتقييمها تعتبر بمثابة الحل المستقبلي لسد العجز بين الإنتاج والاستهلاك، وحماية البيئة.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم وتثمين استعمال وتأثير الاضافات المعدنية النشيطة من بوزولان وخبث الأفران العالية ودخان الرماد والخاملة المتمثلة في حبيبات الكلس التي استعملت بنسب 10 و20% علي الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المصنوعة من الحبيبات المسترجعة.

النتائج المحصل عليها في هذه الدراسة تسمح لنا بالقول بان:

استعمال الاضافات المعدنية النشيطة حسنت الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وخصوصا ديمومة الخرسانة.

مفاتيح الكلمات : الحبيبات المسترجعة , الديمومة , الخصائص الفيزيائية والميكانيكية , الاضافات المعدنية النشيطة. حبيبات الكلس .

## TABLE DE MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
RESUME.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES PHOTOS.....	vii
LISTE DES ABRIVIATIONS.....	viii
<b><u>1- INTRODUCTION GENERALE</u></b> .....	1
1-1 Problématique.....	1
1-2 Objectifs.....	2
1-3 Plan de travail.....	3
<b><u>2- REVUE DE DOCUMENTATION</u></b> .....	4
2-1 Introduction.....	4
2-2 Nature des matériaux recyclables.....	5
2-3 Conditions économiques de rentabilité.....	5
2-4 Perspectives.....	6
2-5 Caractéristique de fabrication.....	8
2-6 Caractéristiques générales.....	12
2-6.1 Caractéristiques générales des granulats de béton de ciment.....	12
2-6.2 Caractéristiques générales des granulats bitumineux.....	12
2-7 Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons de ciment.....	13
2-7.1 Influence des granulats de béton de ciment recyclés dans la fabrication des bétons de ciment.....	13
2-7.2 Influence des granulats asphaltiques dans les bétons de ciment .....	13
2-8 Utilisation de matériaux recyclés dans les chaussées.....	16
2-8.1 Retraitement en place des chaussées.....	16
2-8.2 Technique utilisée.....	16
2-9 Matériaux générés et utilisés.....	19
2-10 Avantages et inconvénients en place des chaussées.....	19
2-11 Agrégats recyclés et béton d'agrégats recyclés.....	21
2-11.1 Introduction.....	21
2-11.2 Historique et expérience étrangères.....	22
2-11.3 Source et production d'agrégats recyclés.....	29
2-11.3.1 Source d'agrégats recyclés.....	29
2-11.3.2 Matériel de production.....	30
2-11.3.3 Les différents types de concasseurs.....	32
2-11.3.4 Les méthodes de séparation des impuretés.....	33
2-11.3.5 L'élaboration du produit fini.....	35
2-12 Caractéristique des granulats recyclés.....	36
2-12.1 Granulation, forme de particules et texture de surface d'agrégats recyclés .....	36

2-12.2 La Masse volumique .....	37
2.12.3 Porosité.....	37
2.12.4 Mortiers de liaison.....	38
2.12.5 Résistance aux sulfates.....	40
2.12.6 Classification de granulats recyclés selon RILEM.....	42
2-13 Propriétés et dosage du béton frais à base d'agrégats recyclés.....	44
2.13.1 Ouvrabilité.....	44
2.13.2 La compacité.....	45
2-14 Propriétés mécaniques du béton durci.....	45
2.14.1 Résistance à la compression.....	45
2.14.2 Résistance à la traction.....	46
2.14.3 Module d'élasticité.....	46
2.15 Propriétés physiques.....	46
2.15.1 Le retrait plastique.....	46
2.15.2 Le fluage.....	47
2.15.3 La perméabilité et l'absorption d'eau.....	47
2.16 Impact environnementaux.....	48
2.16.1 Impact des matériaux de construction et démolition sur l'environnement naturel humain.....	48
2.16.1.1 Notion de cycle de vie et d'énergie grise.....	48
2.16.1.2 Matériaux de construction « respectueuses » de l'environnement.....	50
2.16.1.3 Impact sur la santé et l'environnement.....	51
2.16.1.3.1 Cas particulier de l'amiante .....	51
2.16.1.3.2 Cas particulier des goudrons .....	52
2.16.1.3.2 Cas particulier des bois traités .....	52
2.17 Les ajouts cimentaires.....	53
2.17.1 Les ajouts inertes.....	53
2.17.2 Les ajouts actifs.....	53
2.17.2.1 Les pouzzolanes.....	53
2.17.2.2 Le laitier de haut fourneau.....	55
2.17.2.3 Les fumés de silice.....	55
2.17.2.4 Les fillers calcaires.....	57
2.18 Durabilité du béton à base de granulat recyclé.....	58
2.18.1 Résistance aux eaux agressives.....	59
2.18.1.1 Définition.....	59
2.18.1.2 Eaux contenant des sulfates.....	59
2.18.1.3 Eaux contenant des chlorures .....	60
2.18.1.4 Eau de mer.....	61
2.18.2 Résistance au gel dégel.....	62
2.18.2.1 Le processus gel / dégel.....	62
2.18.2.2 Influence des conditions environnementales sur la dégradation au Gel-dégel .....	63
2.18.2.3 Les cycles de gel-dégel.....	63
2.19 Déformabilité des bétons.....	64
2.19.1 Définition.....	64
2.19.2 Déformations instantanées .....	65
<b><u>3- MATERIAUX ETUDIÉS ET METHODES EXPERIMENTALES</u></b> .....	66
3-1 Matériaux utilisés.....	66
3-1.1 Le ciment.....	66
3-1.2 Les granulats (naturels et recyclés).....	67

3-1.2.1 Le sable.....	67
3-1.2.2 Le gravier.....	67
3-1.3 Granulométrie et formes de grains.....	70
3-1.4 Caractérisation des sables utilisée.....	70
3-1.5 Masse volumique.....	75
3-1.6 Absorption d'eau.....	76
3-1.7 Propreté des granulats.....	76
3-1.8 Compacité et porosité des granulats.....	77
3-1.9 Adjuvants.....	77
3-1.10 Eau de gâchage.....	78
3.2 Ajouts minéraux.....	78
3.2.1 Le Laitier.....	78
3.2.2 Le filler calcaire.....	79
3.2.3 Fumée de silice.....	79
3.2.4 Pouzzolane.....	80
3-3 Mélanges.....	81
3-3.1 Etudes des mortiers.....	81
3. 4 Confection des éprouvettes.....	83
3-5 Programme des essais.....	83
3-5.1 Ouvrabilité.....	83
3-5.2 Essai de la compression et de traction.....	84
3-4.3 Essai de retrait et gonflement.....	84
3-6 Etude des bétons.....	85
3-6.1 Confection et cure des éprouvettes.....	85
3-6.2 Malaxage du béton.....	88
3-6.2. 1 Malaxage à la main.....	88
3-6.2.2 Malaxeurs à béton.....	89
3-7 Programme des essais.....	89
3-7.1 Ouvrabilité.....	89
3-7.2 Essai de résistance à la compression.....	89
3-7.3 Essai de flexion par traction.....	90
3-7.4 Essais de résistance à la traction par écrasement latéral (Brésilien).....	91
3-7.5 Mode d'action des environnements agressifs.....	92
3-7. 5.1 Liquide.....	92
3-7.5.1.1 Eaux douce.....	92
3-7.5.1.2 Solution acides.....	92
3-7.5.1.3 Solution basique.....	93
3-7.6 Essai de déformabilité et module d'élasticité.....	94
<b>4-ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTAT.....</b>	<b>95</b>
4.1 ETUDE DES MORTIERS.....	95
4-1.1 Comportement du mortier à l'état frais.....	95
4-1.1.1 Ouvrabilité.....	95
4-1.2 Comportement du mortier à l'état durci.....	99
4-1.2.1 Résistance à la compression.....	99
4-1.2.2 Résistance à la traction et à la flexion.....	103
4-1.2.3 Résistance à la flexion.....	105
4-1.3 Influence de l'adjuvant sur les propriétés mécaniques.....	105

4-1.4 Effet des ajouts minéraux actifs sur la résistance des mortiers recyclé.	107
4-1.5 Effet des milieux agressifs sur le comportement des mortiers recyclés Avec un teneur de 10% de laitier et pouzzolane.....	111
4-1.5.1 perte de masse.....	112
4-1.5.2 Résistances mécanique.....	114
<b>4-2 ETUDES DES BETONS.....</b>	<b>117</b>
4-2.1 Comportement rhéologique des bétons frais.....	117
4-2.1.1 Consistance des bétons frais.....	117
4-2.2 Comportements mécaniques des bétons durcis.....	120
4-2.2.1 Résistance à la compression.....	120
4.3 Effet des Ajouts minéraux sur le comportement du béton.....	124
4-3.1 Propriétés du béton à l'état frais.....	124
4-3.1.1 Consistances des bétons frais.....	124
4-3.2 Etat durci.....	127
4-3.2.1 Résistance à la compression.....	127
4-3.2.2 Résistance à la flexion.....	131
4-3.2.3 Résistance à la traction (Essai Brésilien).....	132
4.4 Résistance au temps chaud .....	133
4.5 Reraît des bétons recyclés.....	135
4.6 Coefficient de ramolissement .....	137
4-7 Absorption d'eau par immersion.....	138
4-8 Action des milieux agressifs.....	140
4-8.1 Résistance à la compression.....	141
4-8.2 Perte de masse.....	143
4-9 Résistance au gel/ dégel.....	144
4-10 Déformabilité du béton.....	145
4-10.1 Module d'élasticité .....	146
4-10.2 Relation contrainte-déformation et module d'élasticité.....	146
 <b>5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>	 <b>151</b>
 <b>6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	 <b>153</b>



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1</b> : Propriétés mécaniques de bétons à 28j de cure en fonction A/G.....	15
<b>Tableau 2.2</b> : Taux de recyclage en Europe .....	21
<b>Tableau 2.3</b> : Répartition de la production des déchets de chantiers selon l'origine.....	23
<b>Tableau 2.4</b> : Le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés.....	38
<b>Tableau 2.5</b> : Réduction de la résistance à la compression du béton d'agrégats Recyclés en fonction du pourcentage d'ajout en sulfates .....	40
<b>Tableau 2.6</b> : Composition des différents types d'agrégats recyclés proposé par [36] .....	43
<b>Tableau 2.7</b> : Les différentes limites proposées par le RILEM sur les trois classes de béton recyclé [37] .....	43
<b>Tableau 2.8</b> : Classe de béton recyclé [37] .....	44
<b>Tableau 2.9</b> : Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport au béton ordinaire [37] .....	44
<b>Tableau 2.10</b> : énergie grise de matériaux de construction [48].....	49
<b>Tableau 2.11</b> : consommation d'énergie pour la fabrication du béton [48].....	52
<b>Tableau 2.12</b> : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [58] .....	56
<b>Tableau 2.13</b> : Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [58] .....	58
<b>Tableau 3.1</b> : Caractéristiques des ciments .....	66
<b>Tableau 3.2</b> : Composition chimique des ciments .....	66
<b>Tableau 3.3</b> : Composition minéralogique des ciments.....	67
<b>Tableau 3.4</b> : Analyse minéralogique du SN .....	71
<b>Tableau 3.5</b> : Analyse minéralogique du SDB .....	73
<b>Tableau 3.6</b> : Analyse minéralogique du SDBR .....	74
<b>Tableau 3.7</b> : Masses volumiques des granulats étudiés .....	75

<b>Tableau 3.8 :</b> Les résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés.....	76
<b>Tableau 3.9 :</b> Pourcentages d'impureté dans les granulats fin.....	76
<b>Tableau 3.10 :</b> Compacité et porosité des granulats fin.....	77
<b>Tableau 3.11 :</b> Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLAW 30.....	77
<b>Tableau 3.12 :</b> Composition chimique du laitier.....	78
<b>Tableau 3.13 :</b> Module de basicité (Mb) et module d'activité (Ma).....	78
<b>Tableau 3.14 :</b> Composition chimique d'un filler calcaire.....	79
<b>Tableau 3.15 :</b> Caractéristiques physiques de la fumée de silice .....	<b>80</b>
<b>Tableau 3.16 :</b> Caractéristiques physiques de la pouzzolane .....	<b>80</b>
<b>Tableau 3.17 :</b> Composition des mélanges de mortier pour un dosage de 300 kg/m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tableau 3.18 :</b> Composition des mélanges de mortier pour un dosage de 350 kg/m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tableau 3.19 :</b> Composition des mélanges de mortier pour dosage de ciment de 400 kg/m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tableau 3.20:</b> Composition des mélanges de béton pour un Aff.= 5:7cm avec un dosage de ciment C=300 kg/m <sup>3</sup> .....	86
<b>Tableau 3.21:</b> Composition des mélanges de béton pour un Aff.= 5:7cm avec un un dosage de ciment C=350 kg/m <sup>3</sup> .....	87
<b>Tableau 3.22:</b> Composition des mélanges de béton pour un Aff.= 5:7cm avec un dosage de ciment C=400 kg/m <sup>3</sup> .....	87
<b>Tableau 3.23:</b> Composition des mélanges de béton pour un Aff.= 5:7cm avec un dosage de ciment C=450 kg/m <sup>3</sup> .....	88
<b>Tableau 4.1:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante avec un CPJ 300 kg/m <sup>3</sup> .....	95

<b>Tableau 4.2:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante.....	
avec un CPJ 350 kg/m <sup>3</sup> .....	96
<b>Tableau 4.3:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante	
avec un CPJ 400 kg/m <sup>3</sup> .....	96
<b>Tableau 4.4:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante	
avec un CRS 300 kg/m <sup>3</sup> .....	96
<b>Tableau 4.5:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante	
avec un CRS 350 kg/m <sup>3</sup> .....	97
<b>Tableau 4.6:</b> Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante	
avec un CRS 400 kg/m <sup>3</sup> .....	97
<b>Tableau 4.7 :</b> Résistance à la compression des mortiers à base des sables recyclés pour des dosages de ciment respectifs 300;350 et 400 kg/m <sup>3</sup> sur des éprouvettes (4x4x16) cm <sup>3</sup> .....	100
<b>Tableau 4.8 :</b> Résistance à la compression pour un mortier dosé à 400kg/m <sup>3</sup> à base des sables recyclés sur des éprouvettes (7x7x7) cm <sup>3</sup> .....	100
<b>Tableau 4.9:</b> Résistance à la traction et à la flexion pour différents dosages de ciment CPJ 42.5.....	103
<b>Tableau 4.10:</b> Résistance à la traction et à la flexion pour différents dosages de ciment CRS 42.5.....	103
<b>Tableau 4.11 :</b> Résistance à la flexion et à la compression pour un dosage de 400kg/m <sup>3</sup> .....	105
<b>Tableau 4.12 :</b> Influence de l'ajout d'un superplastifiant sur la résistance des mortiers à base d'agrégats recyclés .....	106
<b>Tableau 4.13 :</b> Résistance à la compression des mortiers à base de sable de démolition de béton concassée avec% de laitier et pouzzolane.....	107
<b>Tableau 4.14 :</b> Résistance à la compression des mortiers à base de sable de	

démolition de brique concassée avec% de laitier et pouzzolane.....108

**Tableau 4.15 :** Résistance à la compression des mortiers recyclés ayant un teneur de 8 %en fumée de silice pour différents dosages en supplastifiants .....108

**Tableau 4.16 :** Variation de pH au cours du temps des différentes solutions pour les Mortiers à base du sable de démolition de béton concassée.....111

**Tableau 4.17 :** Variation de pH au cours du temps des différentes solutions pour les Mortiers à base du sable de démolition de brique concassée.....111

**Tableau 4.18 :** Variation de masse des éprouvettes exposées dans les solutions acides à 60 jours .....113

**Tableau 4.19:** Perte de masse des éprouvettes exposées dans les trois solutions.....113 (60 jours) .....

**Tableau 4.20:** Résistances à la compression des mortiers à base de sable de démolition de béton concassée immergées dans les trios solutions (60 jours ..... 114

**Tableau 4.21:** Résistances à la compression des mortiers à base de sable demolition de brique immergés dans les trios solutions ( 60 jours ).....114

**Tableau 4.22:** Quantité d'eau réellement utilisée pour un affaissement constant avec un dosage  $300\text{kg/m}^3$  ..... .. 118

**Tableau 4.23:** Résistance à la compression des bétons à base des sables recyclés pour des dosages de ciments respectifs 300, 350,400 et  $450\text{ kg/m}^3$  .....121

**Tableau 4.24 :** Chute de résistance en fonction en fonction de taux de

remplacement .....	122
<b>Tableau 4.25 :</b> Consistance des bétons des agrégats recyclés pour un dosage	
350kg/m <sup>3</sup> .....	125
<b>Tableau 4.26:</b> Résistance à la compression du béton à base d'agrégats recyclés	
Avec différents ajouts .....	128
<b>Tableau 4.27 :</b> Résistance à la flexion des bétons testés .....	131
<b>Tableau 4.28 :</b> Résistance à la traction des bétons testés .....	132
<b>Tableau 4.29 :</b> Effet des températures sur les bétons à base des agrégats recyclés.....	134
<b>Tableau 4.30 :</b> Coefficient de ramollissement du béton recyclé .....	137
<b>Tableau 4.31 :</b> Coefficient d'absorption en fonction du type de béton .....	138
<b>Tableau 4.32 :</b> Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression .....	141
<b>Tableau 4.33 :</b> pH des différents milieux agressifs .....	141
<b>Tableau 4.34 :</b> Perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs .....	143
<b>Tableau 4.35 :</b> Résistance au gel des bétons .....	145
<b>Tableau 4.36 :</b> Perte de masse au gel/dégel des bétons recyclés.....	145

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 2-1 ( a et b ) : Systèmes de concassage</b> .....	10
<b>Figure 2-2 : Les étapes du retraitement à haute performance [12]</b> .....	17
<b>Figure 2-3 : Répartition des quantités de déchets par types en 1991 au Royaume-Uni</b> .....	24
<b>Figure 2-4 : Evaluation de l'origine des déchets de chantier au Danemark</b> .....	26
<b>Figure 2-5 : Déchet livré dans les centres de recyclage concassage 1992 au Danemark</b> .....	26
<b>Figure 2-6 : Modèle du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art</b> .....	29
<b>Figure 2-7 : Procédure de criblage des déchets de construction / démolition</b> .....	31
<b>Figure 2-8 : Schéma de fonctionnement d'une centrale de recyclage / concassage</b> .....	35
<b>Figure 2-9: Formes des granulats recyclé</b> .....	37
<b>Figure 2-10 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel [33]</b> .....	39
<b>Figure 2-11 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé [33]</b> .....	39
<b>Figure 2-12 : Répartition de la production en granulats recyclés au Pays-Bas en 1992</b> .....	42
<b>Figure 2-13 : Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [46]</b> .....	47
<b>Figure 2-14 : Les principes de l'analyse du cycle de vie [48]</b> .....	48
<b>Figure 2-15 : Bilan environnement d'un hall industriel [49]</b> .....	51
<b>Figure 3-1 : Courbe granulométrique du sable naturel (SN)</b> .....	68
<b>Figure 3-2 : Courbe granulométrique du sable recyclé (SDB)</b> .....	68
<b>Figure 3-3. Courbe granulométrique du sable recyclé (SDBR)</b> .....	69
<b>Figure 3-4 : Courbe granulométrique des graviers</b> .....	69
<b>Figure 3-5 : Diagramme de diffraction X du sable naturel</b> .....	71
<b>Figure 3-6 : Diagramme de diffraction X du sable de démolition de béton</b> .....	72
<b>Figure 3-7 : Diagramme de diffraction X du sable de démolition de brique</b> .....	74
<b>Figure 4-1 : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ</b> .....	98
<b>Figure 4-2 : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de brique concassé</b>	

pour différents dosages en ciment CPJ.....	98
<b>Figure 4-3</b> : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	99
<b>Figure 4-4</b> : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS.....	99
<b>Figure 4-5</b> : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ.....	101
<b>Figure 4-6</b> : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ.....	101
<b>Figure 4-7</b> : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	102
<b>Figure 4-8</b> : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS.....	102
<b>Figure 4-9</b> : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de béton concassé dosé à 350kg/m <sup>3</sup> .....	104
<b>Figure 4-10</b> : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de brique concassé dosé à 350kg/m <sup>3</sup> .....	104
<b>Figure 4-11</b> : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable de béton concassé dosé à 350kg/m <sup>3</sup> .....	104
<b>Figure 4-12</b> : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable de brique concassé dosé à 350kg/m <sup>3</sup> .....	105
<b>Figure 4-13</b> : Influence du superplastifiant sur la résistance des mortiers à base de 50% de sable de béton .....	106
<b>Figure 4-14</b> : Influence du superplastifiant sur la résistance des mortiers à base de 20% de sable de brique concassé .....	107
<b>Figure 4-15</b> : Résistances à la compression des mortiers à base de sable de béton concassée avec ajouts minéraux à différentes âges.....	109

<b>Figure 4-16</b> : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers à base de déchet de brique concassé .....	109
<b>Figure 4-17</b> : Effet de la fumée de silice (8%) sur la résistance des mortiers à base de 50% de sable de béton .....	110
<b>Figure 4-18</b> : Effet de la fumée de silice (8%) sur la résistance des mortiers à base de 20% de sable de brique .....	110
<b>Figure 4-19</b> : Variation de pH au cours du temps de différents milieux agressifs.....	112
<b>Figure 4-20</b> : Perte de masse des éprouvettes immergées dans les trois solutions (60 jours)...	113
<b>Figure 4-21</b> : Résistances à la compression des éprouvettes de mortier immergées dans les trois solutions (60 jours) .....	115
<b>Figure 4-22</b> : Résistances à la compression des éprouvettes de mortier à base de sable de démolition de brique concassée immergées dans les trois solutions (60 jours) ....	115
<b>Figure 4-23</b> : Résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortier immergées dans les trois solutions (60 jours) .....	116
<b>Figure 4-24</b> : Résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortier à base de sable de démolition de brique concassée immergées dans les trois solutions (60 jours)...	116
<b>Figure 4-25</b> : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ .....	118
<b>Figure 4-26</b> : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ .....	119
<b>Figure 4-27</b> : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	119
<b>Figure 4-28</b> : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	120
<b>Figure 4-29</b> : Résistance à la compression des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ .....	122



<b>Figure 4-30:</b> Résistance à la compression des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ .....	123
<b>Figure 4-31 :</b> Résistance à la compression des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	123
<b>Figure 4-32 :</b> Résistance à la compression des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS .....	124
<b>Figure 4-33:</b> Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons en fonction du taux de Substitution .....	126
<b>Figure 4-34:</b> Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons de sable de béton concassé pour différents ajouts minéraux .....	126
<b>Figure 4-35:</b> Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons de sable de brique concassé pour différents ajouts minéraux .....	127
<b>Figure 4-36:</b> Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substituant .....	128
<b>Figure 4-37 :</b> Résistances à la compression des bétons à base de sable de béton concassée avec ajouts minéraux .....	129
<b>Figure 4-38 :</b> Résistances à la compression des bétons à base de sable de brique concassée avec ajouts minéraux .....	129
<b>Figure. 4-39:</b> Évolution de la résistance à la flexion des bétons testés en fonction de taux de substitution des sables recyclés .....	131
<b>Figure. 4-40:</b> Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés en fonction de taux de substitution des sables recyclés .....	133
<b>Figure 4-41:</b> Effet de la température sur la résistance des bétons recyclés.....	135
<b>Figure 4-42:</b> Evolution de retrait des bétons en fonction de taux de substitution en granulats recyclés conservés à l'air libre .....	136
<b>Figure 4-43:</b> Evolution de retrait des bétons en fonction de taux de substitution en	

granulats recyclés à l'eau .....	136
<b>Figure 4-44:</b> Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons en fonction du taux de substitution pour un dosage en ciment de 350 kg/m <sup>3</sup> .....	139
<b>Figure 4-45:</b> Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons à base de sable De béton concassée .....	139
<b>Figure 4-46:</b> Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons à base de sable de brique concassé avec ajouts minéraux pour un dosage de 350 kg/m <sup>3</sup> .....	140
<b>Figure 4-47 :</b> Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution .....	142
<b>Figure 4-48:</b> Effet du milieu de conservation sur la résistance des bétons à base du sable de démolition de béton et de brique concassée .....	142
<b>Figure 4-49 :</b> variation de perte de masse des bétons conservés dans les milieux agressifs.....	144
<b>Figure 4.50 :</b> Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton $\epsilon_1$ en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour les séries de prisme BT, BSDB+10S, BSDB+10Z BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	148
<b>Figure 4.51 :</b> Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton $\epsilon_{1T}$ en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour les séries de prisme BT, BSDB+10S, BSDB+10Z BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	148
<b>Figure 4.52 :</b> Déformation élasto-instantanés transversale du béton $\epsilon_2$ en fonction des Contraintes relatives $\eta$ pour les séries de prisme BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	149
<b>Figure 4.53 :</b> Déformation élasto-instantanés totales transversales du béton $\epsilon_{2T}$ en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour les séries de prismes BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	149

<b>Figure 4.54 :</b> Module de déformabilités E du béton en fonction des contraintes relatives $\eta$ Pour les séries de prismes BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	150
<b>Figure 4.55 :</b> Module d'élasticité E du béton BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S ET BSDBR+10Z .....	150

## ISTE DES PHOTOS

<b>Photo 2-1 :</b> Type Pouzzolane naturelle [53].....	54
<b>Photo 2-2:</b> Aspect d'une matrice contenant des fumées de silice (photo MEB).....	56
<b>Photo 2-3 :</b> Observation au MEB du calcaire.MEB JEOL 6400. Microanalyses EDS Oxford Inca. [59].....	57
<b>Photo 3-1 :</b> Sable recyclé (SDB) 0/5 produit par le concassage de béton.....	70
<b>Photo 3-2 :</b> Sable recyclé (SDBR) 0/5 produit par le concassage des déchets de briques.....	70
<b>Photo 3-3 :</b> Sable naturel observé au MEB 5(X 250).....	72
<b>Photo 3-4 :</b> Sable de démolition de béton observé au MEB (X 250).....	73
<b>Photo 3-5 :</b> Sable de démolition de brique observé au MEB (X 250).....	75
<b>Photo 3-6:</b> Laitier avant et après broyage.....	79
<b>Photo 3-7:</b> Filler calcaire forme de poudre.....	79
<b>Photo 3-8:</b> Fumé de silice forme de poudre.....	80
<b>Photo 3-9:</b> Pouzzolane avant et après broyage.....	80
<b>Photo 3-10 :</b> Table à secousse.....	83
<b>Photo 3-11:</b> Eprouvette (4 x 4 x 16) cm <sup>3</sup> .....	84

<b>Photo 3-12:</b> Epreuve pour l'essai de retrait.....	84
<b>Photo 3-13 :</b> Appareil de retrait.....	85
<b>Photo 3-14:</b> Epreuves cylindrique (10 x 20) cm <sup>3</sup> .....	86
<b>Photo 3-15 :</b> Slump-Test.....	89
<b>Photo 3-16 :</b> Epreuves cubiques (10 x 10 x 10) cm <sup>3</sup> .....	<b>89</b>
<b>Photo 3-17:</b> Appareil de traction par flexion .....	90
<b>Photo 3-18 :</b> Epreuves prismatiques (10x10x50) cm <sup>3</sup> .....	90
<b>hoto 3-19:</b> Ecrasement d'une epreuve cylindrique (16 x 32) cm <sup>3</sup> .....	91
<b>Photo 3-20:</b> Essai de fendage.....	91
<b>Photo 3-21:</b> Conservation des epreuves dans des milieux agressifs.....	93
<b>Photo 3-22 :</b> Essai de deformabilite sur epreuve prismatique (10x10x40) cm <sup>3</sup> .....	94
<b>Photo 4-1:</b> Exemple de rupture.....	137
<b>Photos 4-2:</b> Essai de deformabilite sur epreuve prismatique (10x10x40) cm <sup>3</sup> .....	146

## LISTE DES ABREVIATIONS

CPJ-CEM II/A 42.5: Ciment Portland composé

CPA-CEM I/ 42.5ES: Ciment Portland

ASTM: American Society for Testing and Materials

EN: Norme Européenne définitive

ENV: Prénorme européenne

NF: Norme Française

NF P : Norme Française applicable au bâtiment et génie civil

GN : Gravier naturel

SDB: Sable de démolition de béton concassé

SDBR: Sable de démolition de brique concassé

SN : Sable naturel

SP : Superplastifiant.

FS : Fumée de silice

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

BTP : Bâtiment et travaux publics

DI : Déchets inertes

DIS : Déchets industriels spéciaux

DIB : Déchets industriels banals

BT : Béton témoin

BSDB : béton de sable de démolition de béton

BSDBR : béton de sable de démolition de brique

S : Laitier

Z : Pouzzolane

D : Fumée de silice

L : Filler calcaire

BSDB+10S : Béton de sable de démolition de béton avec 10% de laitier

BSDB+10Z : Béton de sable de démolition de béton avec 10% Pouzzolane

BSDB+10D : Béton de sable de démolition de béton avec 10% de Fumée de silice

BSDB+10L : Béton de sable de démolition de béton avec 10% de Filler calcaire

BSDBR+10S : Béton de sable de démolition de brique avec 10% de laitier

BSDBR+10Z : Béton de sable de démolition de brique avec 10% Pouzzolane

BSDBR+10D : Béton de sable de démolition de brique avec 10% de Fumée de silice

BSDBR+10L : Béton de sable de démolition de brique avec 10% de Filler calcaire

<p style="text-align: center;"><b>Thème de thèse : Durabilité des bétons à base du sable de démolition et ajouts minéraux actifs</b></p>
--

## Problématique

Les agrégats sont une constituante fondamentale dans l'industrie de la construction résidentielle et des travaux publics. Par exemple, une résidence familiale nécessite en moyenne 100 tonnes d'agrégats. La consommation d'agrégats est particulièrement importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux de toute sorte. Parce qu'ils sont à ce point indispensable à l'économie nationale, les agrégats doivent être considérés à leur juste valeur dans la planification économique et à l'aménagement du territoire.

Les agrégats font partie des richesses naturelles au même titre que la forêt, l'agriculture, l'eau ...etc. Ils sont caractérisés comme suit :

- Ils sont disponibles dans la nature en quantité limitée ;
- Ils ne sont pas renouvelables ;
- Ils sont généralement extraits dans des environnements agricoles périurbains ;
- Une fois utilisés, ils sont récupérables et recyclables ;
- Le coût du transport en vrac est basé sur la distance à parcourir ; donc, plus le site est éloigné, plus élevé est le coût de la matière première ;
- La récupération et le recyclage des agrégats ne sont pas identifiés comme un objectif prioritaire dans le domaine des richesses naturelles.

La demande du public pour les agrégats vise la construction de routes, d'établissements d'enseignement, d'hôpitaux, d'habitations et d'entreprises. Les ressources en agrégats sont également en demande dans le secteur manufacturier pour produire de l'acier, du vinyle, du verre, de la peinture, du papier, des produits pharmaceutiques, des fertilisants, du ciment et des produits d'aménagement paysager.

Grâce à l'accessibilité de ses ressources en agrégats, l'Algérie a pu offrir des coûts d'infrastructures et de logement abordables. La gestion judicieuse des ressources en agrégats et le juste équilibre des intérêts pour ces ressources assureront un approvisionnement continu à proximité du marché.

La prise en compte des agrégats recyclés sur les caractéristiques physico-mécaniques, des bétons devant avoir une valeur variable en fonction de l'âge et des paramètres de formulation (dosage en ciment, en additions, en eau, en adjuvats et nature de ciments et des granulats).

Le sable joue un rôle très important lors de la fabrication du béton, car il influence à la fois les propriétés du béton à l'état frais (rhéologie) et à l'état durci (résistance mécanique et durabilité). Son rôle se traduit par une série de normes et de prescription très restrictives sur la qualité des sables que l'on peut utiliser pour fabriquer du béton. Les caractéristiques très importantes des sables à béton sont :

- Leur teneur en eau ;
- Leur teneur en argile et en motte ;
- Leur granulométrie
- Leur origine et nature.

Avec l'amenuisement des réserves naturelles de sable, il est nécessaire de se préoccuper dès aujourd'hui à l'utilisation des sables manufacturés, des sables contaminés, des **sables recyclés**, des sables de dunes ou des sables de mer, de façon à fabriquer des bétons économiques et durables.

Dans ce contexte, notre travail s'inscrit, il a pour objectif principal de contribuer à la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les bétons comme substitut aux granulats naturels, dans la production de nouveaux bétons structurels, dans le but de:

- Contribuer à préserver l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats et la limitation d'extraction des granulats de carrière et alluvionnaires.
- Répondre à la demande croissante en granulats.
- Contribuer à mettre en valeur des granulats recyclés.
- Contribuer aux études menées sur l'emploi des granulats recyclés dans les bétons en substitution des granulats naturels.



## INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, les pays industrialisés comme l'Europe et les États-Unis sont grandement préoccupés par la protection de l'environnement que ce soit dans les domaines comme les déchets de l'industrie ou bien celui de la construction, on devra trouver des moyens efficaces pour prendre soin de l'environnement qui nous entoure. C'est pourquoi de plus en plus des recherches dans les universités comme dans le domaine privé sont en cours afin de résoudre le problème de la pollution.

Les chantiers de construction et de démolition génèrent une grande diversité de déchets qui constituent une partie importante des coûts de production des déchets solides dans le monde. Environ 90 % d'entre eux sont éliminés en décharge.

L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans les travaux de génie civil, semble être une solution idéale, la plus prometteuse pour les problèmes de déchets. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats.

Actuellement, la valorisation de déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important et le taux de recyclage des débris de construction / démolition atteint dans certains pays les 80 %.

La tendance actuelle en ce qui a trait au recyclage des matériaux est de transporter les résidus sur un site d'exploitation de granulats. Une fois arrivés sur le site, ces résidus constitués de plaques asphaltiques, des blocs de béton de ciment ou de granulats issus de fondations et d'autres matériaux avec des quantités non négligeables provenant de la démolition des bâtiments ainsi que des ouvrages de travaux publics peuvent servir comme granulats, on peut citer les déchets de béton et de la brique de maçonnerie qui sont traités sur place. Le traitement consiste à concasser, nettoyer et tamiser les résidus pour permettre leur réutilisation potentielle. Ces agrégats de démolition recyclés sont entreposés sur le site sous forme de piles de réserve. On les réutilise habituellement comme matériaux de remblai ou de fondation, parfois même après les avoir mélangés avec un liant bitumineux et/ou hydraulique, soit une «grave traitée» dans le premier cas. Il y a lieu de croire que ces matériaux recyclés

pourraient être utilisés à d'autres fins plus exigeantes, comme par exemple dans la fabrication d'enrobés bitumineux ou de bétons de ciment, quitte à devoir les mélanger avec une certaine quantité de granulats conventionnels.

### **Les coûts de ces matériaux recyclés sont-ils comparables à ceux des granulats naturels?**

Le calcul en est bien simple pour le prix des granulats, qu'ils soient recyclés ou non. Plus les matériaux nécessitent des transformations, plus ils sont dispendieux. Aussi, présentement avec tous les traitements effectués sur les résidus, les coûts sont plus élevés pour des granulats recyclés. Cependant, ces granulats recyclés peuvent être utilisés directement sur le terrain, ce qui réduit les coûts de transport. C'est avec une technique comme le retraitement en place des chaussées qu'on obtient de tels résultats. Avec cette technique innovatrice, les résidus sont concassés sur place à l'aide d'une décohesionneuse et réutilisés sur le site, ce qui permet d'éviter les coûts reliés au transport des matériaux. Ainsi, les granulats recyclés sont beaucoup plus attrayants.

Pour ce qui est des matériaux provenant de la démolition des bâtiments ainsi que des ouvrages de travaux publics tels que les blocs de béton et de maçonnerie qui nécessitent des stations de traitement et de concassage ce qui exige plus de transformations et par conséquent un coût élevé relativement à la fabrication des granulats naturels, mais devant les besoins prépondérants des granulats d'une part et les exigences environnementales d'autre part, le recyclage de ces matériaux reste la solution meilleure et efficace.

## **Objectifs**

Notre mémoire a pour objectif premier de caractériser les différents agrégats fins recyclés disponibles provenant de la démolition (débris de béton et brique). Ces matériaux récupérés sont principalement du béton de ciment recyclés et de déchets de brique concassés sous forme d'agrégats fins (sable) qui par la suite, peuvent être mélangés partiellement avec les agrégats naturels pour former un type d'agrégats fins recyclés.

L'étude consiste aussi à l'évaluation expérimentale de l'influence des agrégats fins recyclés sur les caractéristiques physico –mécaniques, rhéologiques ainsi que la durabilité des mortiers et bétons conçus à base de ces agrégats.

### **Plan de travail**

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés. Nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des parties suivantes.

- Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.
- Une revue de la documentation qui porte sur les travaux antérieurs concernant les agrégats recyclés et leur utilisation à travers quelques pays et évidemment leur influence dans la fabrication de béton.
- Une étude expérimentale a été réalisée afin d'établir en premier lieu les caractéristiques des agrégats recyclés et ensuite étudier l'effet de remplacement des agrégats naturels par les agrégats recyclés sur les propriétés du béton à l'état frais et durci à travers un programme d'essais qui tient compte des propriétés physiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton, et l'influence des ajouts minéraux actifs sur le comportement rhéologique de béton.
- Une analyse et une discussion des résultats obtenus tout en faisant des observations sur le béton témoin composé à 100% des granulats naturels.

Enfin, une conclusion générale sur cette étude avec des recommandations qui porte sur les particularités des agrégats recyclés ainsi que les mesures à prendre en compte lors de l'utilisation de ces agrégats dans la fabrication du béton.

## 2 -REVUE DE DOCUMENTATION

### 2 -1 Introduction

Les déchets de construction et de démolition du BTP génèrent une grande diversité de déchets. Aujourd'hui environ 90% sont éliminés en décharge. Le recyclage impose des contraintes de tri et de collecte alors que les gisements sont dispersés, et que les procédés de démolition génèrent en général des déchets en mélange. Certains de ces déchets, en particulier les déchets minéraux, peuvent être réutilisés après tri et traitement particulier, dans les infrastructures routières.

Les pratiques actuelles de sélection et de valorisation amènent à traiter à part :

- Les bétons de démolition de bâtiments ou d'ouvrage d'art ;
- Les matériaux issus de démolition de couches de chaussée en grave non traitée et en matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- Dans certaine région, les sols sous chaussées et les déblais de tranchés présentent de bonnes caractéristiques de propreté, qui permettent de les introduire dans les mêmes circuits de recyclage et de valorisation.

Après traitement approprié, ces produits peuvent être assimilés, en fonction de leur caractéristiques intrinsèque et de fabrication, à de matériaux de pré criblage, grave non calibrées, grave 0/D, sable, gravillons ou cailloux. Ils peuvent alors être utilisés pour les terrassements routiers et dans les couches de chaussées.

Ces matériaux peuvent être classés en deux catégories selon leur aptitude à être déposés dans le milieu naturel avec un risque limité pour l'environnement :

- ✓ Les matériaux dits inertes, qui n'évoluent pas dans le temps (béton, brique, tuile, pierre, verre, céramique),
- ✓ Les matériaux qui évoluent avec le temps ou qui représentent une gêne visuelle pour l'environnement (plâtre, bois, papier, carton, métal, matière synthétiques).

Quatre possibilités permettent d'évacuer l'ensemble de ces matériaux :

- ✚ La décharge de résidu urbain, c'est la plus simple et la plus commode puisqu'elle est apte, réglementairement et techniquement, à recevoir pratiquement tous les matériaux de démolition,
- ✚ L'incinération des produits inflammables ; papier, carton, bois, plastique,
- ✚ La décharge de résidus inerte,
- ✚ Le recyclage, axé sur la fabrication de granulats.

Les trois dernières possibilités ne sont pas opérationnelles que si l'on possède à un tri préalable et parmi celles-ci, notamment pour les matériaux dits inerte, le recyclage est sans doute la filière la plus contraignante.

## **2 -2 Nature des matériaux recyclables**

Les producteurs ont une politique de sélection des matériaux de démolition à la réception, les matériaux refusés étant mis en décharge par les entreprises de démolition. Cette notion de qualité est fondée sur deux critères : la propreté et l'homogénéité, ce qui permet de distinguer cinq catégorie de matériaux :

- ❖ Le béton propre, armé ou non, sans enduit ni plâtre,
- ❖ Les matériaux propre, mais composites (enrobés, briques, tuiles, graves, pierres et blocs rocheux...),
- ❖ Les matériaux mélangés, avec une faible teneur en plâtre et en bois (maçonnerie, béton armé...),
- ❖ Les mauvais matériaux, avec une teneur en plâtre et en bois (maçonnerie, béton armé...),
- ❖ Les autres (matériaux terreux....).

Généralement, les matériaux réceptionnés sont stockés selon leur qualité et leur facilité de traitement. Ils sont composés à plus de 90% de matériaux propres et à 60% de bétons propres.

## **2 -3 Conditions économiques de rentabilité**

Le coût d'élaboration des granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturels en moyenne, à qualité égale, et résulte de deux principaux facteurs :

La nécessité d'adjoindre aux fonctions traditionnelles de concassage criblage, un certain nombre d'opérations, destinées à faciliter le traitement des matériaux et à améliorer la qualité des produits finis, notamment :

- le stockage sélectif des matériaux réceptionnés,

- la préparation avant concassage (réduction du volume de gros éléments, cisailage des ferrailles...).
  - En cours d'élaboration, le défeuillage (magnétique) ainsi que le tri manuels et mécaniques (épurateur, table densimétriques) des papiers, des bois et des plastiques,
- D'autre part, l'efficacité moindre des matériels d'une installation de recyclage par rapport à celle d'une installation de granulats naturels.
- Le recyclage des matériaux de démolition s'effectue en zone urbaine ou péri-urbaine, c'est à dire à la proximité immédiate, des grands centres de consommation de granulats.

En conséquence, le prix rendu sur les lieux d'utilisation des matériaux recyclés est très voisin du prix du départ de l'installation, ce qui n'est pas le cas, généralement, des granulats naturels qui doivent supporter un transport plus ou moins long.

L'égalité des prix est satisfaite sur pour un transport de granulats naturels sur une distance de l'ordre de 20 kilomètres. La règle de compétitivité peut se traduire de la façon suivante, à prix égal rendu sur le chantier de mise en œuvre :

Les granulats recyclés supportent un surcoût, au départ de l'installation, qui correspond à une distance de transport de 20km, environ, Ce qui revient à dire que les granulats naturels bénéficient d'une possibilité de transport supplémentaire de 20km, environ.

Cependant il s'agit d'un ordre de grandeur car les prix de départ des granulats varient d'une région à une autre. D'autre part, les conditions de circulation dans certaines agglomérations peuvent conduire à calculer les coûts de transport non seulement en fonction de la distance parcourue, mais aussi en fonction du temps écoulé.

Ainsi, la différence de coût constatée au niveau de l'élaboration peut être plus ou moins compensée par l'économie faite au niveau du transport, de telle sorte que, sous certaines conditions, les granulats de recyclage sont économiquement compétitifs.

## **2 -4 Perspectives**

Malgré une évolution ascendante de la production, le développement du recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition n'est pas acquis. En effet la différence entre granulats " anciens " est principalement d'ordre économique. Pour que l'utilisation des granulats

de recyclage s'accroisse, il faut que celle-ci ne soit pas plus coûteuse que l'utilisation des matériaux naturels.

A cet égard, ce sont les grandes métropoles qui offrent les conditions les plus favorables :

- Approvisionnement en matériaux de démolition abondant et régulier,
- Consommation en granulats importante, avec des sources d'approvisionnement en granulats naturel souvent éloignées,
- Coût de mise en charge élevé.

Dans ce contexte, le recyclage peut être rentable, d'autant plus qu'il permet :

- d'économiser une matière première d'accès souvent difficile aux environs des grandes métropoles,
- de réduire l'encombrement des décharges de résidus urbains,
- de réduire, au moins partiellement, le transport en milieu urbain ou pré-urbain.

Ailleurs, où le potentiel de recyclage est plus ou moins diffus, des solutions techniques sont envisageables, mais les risques d'échecs sont importants :

- ✓ le recyclage par une installation mobile, outre le fait qu'il nécessite des chantiers de démolition importants (30 000 tonnes au minimum), présente des difficultés au niveau de la commercialisation des produits, pour plusieurs raisons :

Compétitivité souvent moins favorable que dans les grandes métropoles,

Délais d'évacuation des matériaux courts (durée du chantier),

Offre des produits se situant en marge du circuit organisé,

- ✓ le recyclage par une installation fixe collectant les matériaux de démolition sur une vaste aire géographique (la moitié d'un département, par exemple) est réalisable techniquement mais plus incertaine sur le plan économique car le coût de collecte doit être plus attractif que le coût de mise en charge. Ainsi pour un chantier de démolition situé à 50km de l'installation de recyclage, le coût de mise en décharge, pour être dissuasif, devrait être supérieur au coût du transport à l'installation.

## **Conclusion**

Le développement du processus de recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition repose sur la promotion de projets économiquement viables, des projet construits non pas sur la recherche d'opportunités, mais sur l'étude des conditions susceptibles d'assurer la compétitivité de l'installation ( proximité des centre de consommation, possibilité d'une collecte régulière d'une matière première sélectionnée et peu éloignée, compétence technique dans les granulats pour une bonne intégration dans les circuits de commercialisation). Ceci suppose :

- une action de promotion visant à diffuser auprès des maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre les possibilités d'utilisation, sans risques, de ces granulats de recyclage,
- des mesures d'accompagnement de types réglementaire et inactif,
- une parfaite intégration dans le milieu environnant pour que la filière recyclage ne puisse être rejetée loin des grands centres urbains et être privée, ainsi, d'un atout économique important.

## **2 -5 Caractéristique de fabrication**

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différente des installations de concassage des granulas naturel ; par contre, on doit porter une attention particulière à la présence d'impuretés dans les matériaux.

Pour enlever ces impuretés, on procédera à différents moments au cours du processus de concassage, à des opérations de triage manuel ou mécanique. Les plus gros débris comme les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc. sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire, tandis que pour enlever les impuretés légères, Quebaud (1996) propose deux procédés : l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature. Par contre, ces installations demandent des frais d'investissement élevé. Dans le deuxième cas, l'épuration par voie humide ( flottation) , la séparation est réalisée au moyen d'un bain dit « aquamator » dans lequel les granulats recyclés sont transportés par bande immergée et les fractions légères qui flottent sont séparés par des jets d'eau à contre-courant. On peut aussi ajouter au circuit de concassage des électro-aimants pour enlever les débris métalliques. Ces électro-aimants seront installés à la sortie des concasseurs et recueilleront les éléments métalliques comme les aciers d'armature.

Pour ce qui est de concassage en tant que tel, on peut procéder en système ouvert ou en circuit fermé. L'inconvénient d'un système ouvert est que la granulométrie du produit fini est



moins bien contrôlée. Le RILEM [7] recommande donc un circuit fermé, et ce même si le circuit ouvert permet une plus grande capacité de production (fig. 2.1). Le nombre de concasseurs utilisés dépendra de la qualité des granulats que l'on veut obtenir. L'utilisation d'un seul concasseur nous donnera des matériaux de plus ou moins bonne qualité, et ce, même si le matériau de départ est relativement propre. De plus, procéder à un seul concassage n'enlèvera pas toutes les impuretés, seuls les débris métalliques seront enlevés grâce à l'électro-aimant. Donc l'utilisation d'un deuxième concasseur permettra de procéder à une deuxième opération de tirage (manuel et magnétique), ce qui donnera un matériau beaucoup plus propre. Pour obtenir une plus grande propreté, le RILEM [7] propose donc d'enlever la fraction inférieure à 10 mm après le premier concassage et de diriger le retenu vers le deuxième concasseur.

Le choix des concasseurs est aussi un élément important de la production de ce type de granulats. Au départ, les concasseurs doivent traiter des blocs de 0.8 à 1 mètre de diamètre, ce qui implique que l'usure du concasseur est beaucoup plus rapide et que le débit de production est plus faible qu'en carrière. Selon Quebaud [8], le concassage primaire est souvent assuré par un concasseur à mâchoires ou à percussion alors que le concassage secondaire est assuré par un concasseur à mâchoires, à percussion ou, rarement, de type conique. A l'exception de la distribution granulométrique, les autres propriétés (la densité, la masse volumique, l'absorption...) ne sont pas affectées par le type de concasseur ou le circuit de concassage proprement dit, et tous les concasseurs produisent à peu près la même quantité de particules cubiques, si évidemment, les granulats originaux du béton de ciment n'ont pas de tendance particulière à développer des particules plates et allongées.

Les concasseurs à mâchoires donneront à eux une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, le RILEM [7], affirme que ce sont ces concasseurs qui donneront la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment.

Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton ; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Il faut noter qu'ils donneront une très bonne distribution granulométrique pour les usages routiers. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près une quantité de particules fines (<80).

Le troisième type de concasseur, à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de grosseur maximale de 200 millimètres.

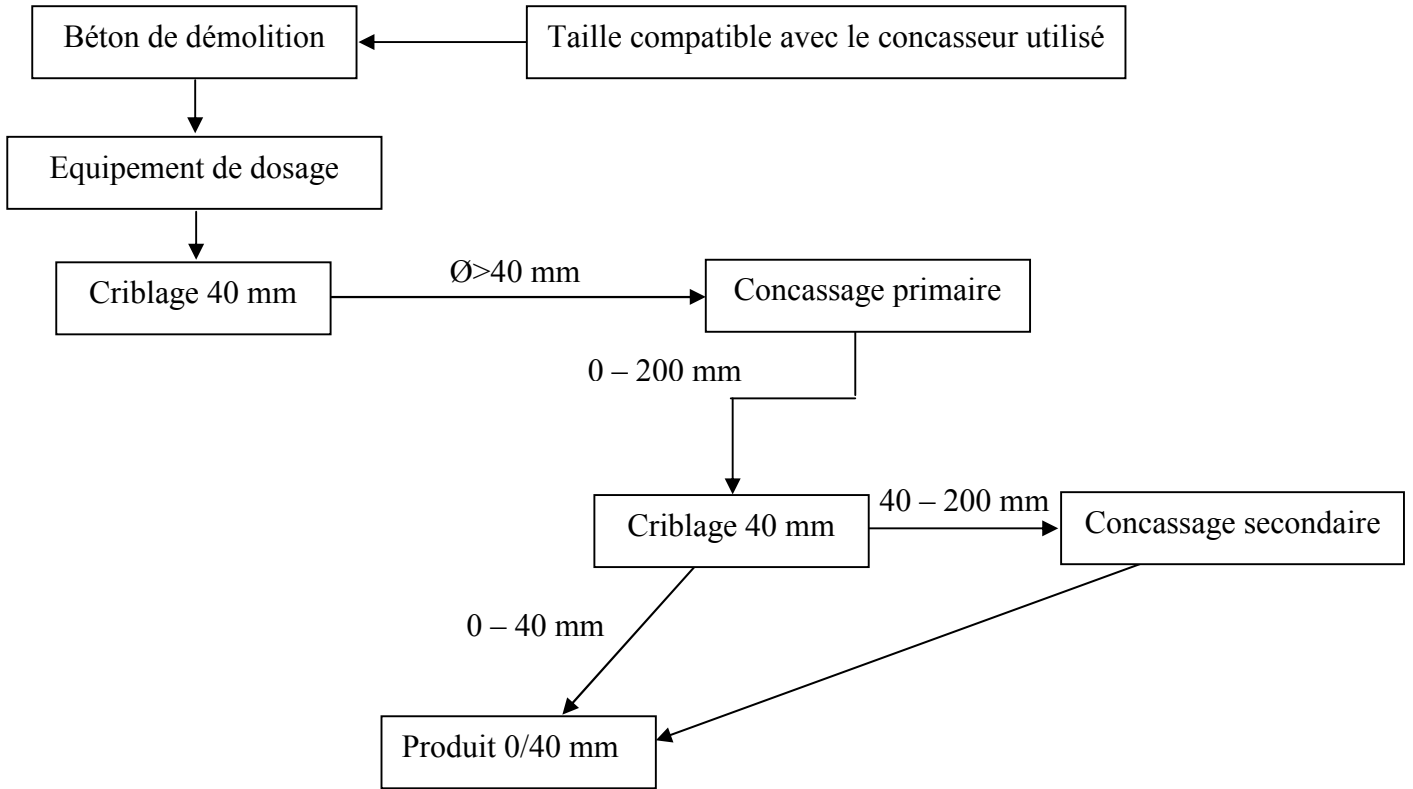


Figure 2-1(a) : Système ouvert de concassage

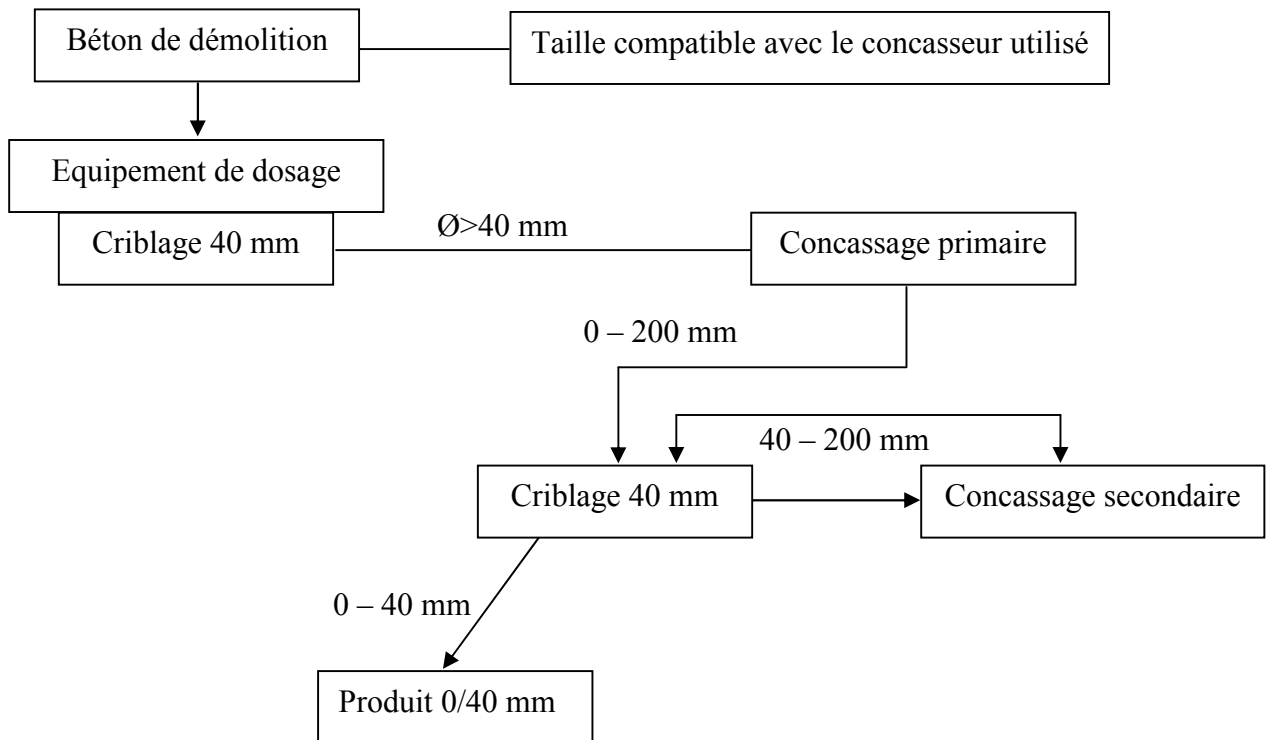


Figure 2-1 (b) : Système de concassage fermé

Le type de matériaux à concasser aura aussi une incidence sur le choix des concasseurs. Si on broie du béton de ciment, la quantité de pâte de ciment entourant les granulats naturels sera ou moins importante dépendamment du type de concasseur utilisé. De plus, Quebaud [8] affirme que le concasseur à percussion brise aussi bien les granulats que la gangue de ciment, mais ne détache pas cette dernière des granulats naturels tandis que, de par leur action combinée de frottement écrasement, les concasseurs à mâchoires donneront un pourcentage de pâte de ciment plus important dans les fractions fines. On aura donc, à la sortie du concassage, des granulats ayant une grande proportion de particules fines.

Pour sa part, un matériau bitumineux qui n'est pas concassé sur la place et entreposé en pile de réserve aura tendance à durcir, à se re-cimenter et deviendra plus difficile à manipuler. Si c'est possible, le matériau devrait être mélangé au plus tôt avec d'autres granulats pour enrayer ces problèmes. De plus, par temps chaud, les mâchoires de concasseur s'enduisent de bitume et ont tendance à perdre de leur efficacité. Le concassage est donc beaucoup plus efficace par temps frais.

En guise de conclusion sur la fabrication de ce type de granulats, Cimpelli[9] propose un résumé des différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage sur l'île-de-France :

- Sélection et stockage des produits bruts ;
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique ;
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un déferrailage électromagnétique ;
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à retirer les impuretés ;
- Eventuellement, concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire.

## **2 -6 Caractéristiques générales**

Les matériaux recyclés qui sont maintenant concassés qui se retrouvent sous forme de granulats ont des propriétés mécanique et chimique particulières. Pour être utilisée dans la structure de la chaussée, les granulats devront répondre à une série d'exigence relative à ces usages. Il faut donc procéder à des essais pour mieux connaître les caractéristiques de ces granulats.

### **2 -6.1 Caractéristiques générales des granulats de béton de ciment**

En général, les matériaux de béton de ciment sont générés par la démolition de pavages, de bâtiment, de structures routières, etc. De plus, dans la région métropolitaine, on peut ajouter comme sucres les trottoirs, les éléments de voiries et de stationnements. Ces bétons de ciment sont fabriqués avec des granulats de bonne qualité qui composent entre 60 % et 75% du volume total du béton, qui ont une granulométrie relativement bien étalée et qui sont liée par une pâte de ciment.

Les différences de qualité des granulats recyclés proviennent donc surtout de la qualité des granulats qui composent le béton, de la grosseur de ces granulats, de la résistance en compression du béton original et de son uniformité. Par exemple, les bétons préfabriqués contiennent généralement de plus petits granulats, et ont une meilleure résistance en compression et les variations de résistance et des autres propriétés sont plus faibles que les bétons coulés sur place. Le béton recyclé peut aussi montrer des signes de faiblesse due aux réactions alcali-granulats. De plus, dans plusieurs régions où l'utilisation des sels déglacant est pratique courante, les granulats recyclés produits par de ces bétons peuvent contenir des niveaux élevés de chlorures. Malgré ces variations, les essais indiquent que les granulats de béton de ciment concassés ont des propriétés qui ressemblent à celles des matériaux granulaires naturels et qu'ils réagiront de façon similaire lors de leur mise en oeuvre.

Le volume occupé par la pâte de ciment adhérant aux granulats naturels est de 25 à 35 % pour les particules comprises entre 16 et 32 mm, autour de 40 % pour les particules de 8 à 16 mm et d'environ 60 % pour les particules de 4 à 8 mm et ces pourcentages ne varient pas beaucoup en fonction du rapport eau/ciment du béton original ] , de plus, environ 45 à 65 % de la pâte de ciment est comprise dans la fraction 0/300 $\mu$ m.

Finalement, si on compare les granulats naturels, normalement utilisés dans les bétons conventionnels, et les granulats de béton de ciment recyclé, on peut conclure que les granulats de béton recyclé sont :

- ❖ moins denses;
- ❖ moins propres;
- ❖ plus exigeants en eau (plus absorbants);
- ❖ plus poreux et hétérogènes.

## **2 -6.2 Caractéristiques générales des granulats bitumineux**

Les propriétés des granulats bitumineux dépendent largement des propriétés des constituants du vieux pavage (granulats et bitume). Étant donné que les granulats bitumineux peuvent provenir de différentes sources, la qualité de ceux-ci peut varier énormément. La quantité de bitume à l'intérieur des enrobés bitumineux est généralement de 3 à 7 % en masse, mais selon des études réalisées aux États-Unis [10], les granulats bitumineux obtenus à partir de la majorité des couches de roulement ont en moyenne de 4,5 à 6 % de bitume (en masse). Les propriétés mécaniques des granulats bitumineux et d'un mélange granulaire non lié contenant de tels granulats évoluent avec le temps et varient de façon significative en fonction du contenu en enrobé bitumineux. De plus, comme les granulats bitumineux sont composés de plus de 90 % de granulats naturels, leurs propriétés dépendront grandement de celles des granulats naturels qui les composent.

## **2-7. Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons de ciment**

### **2 -7.1 Influence des granulats de béton de ciment recyclés dans la fabrication des bétons de ciment**

Les bétons de ciment recyclés sont peu utilisés dans les bétons de ciment. Ce type de granulat est pourtant un produit de démolition très répandu. De plus, les nouveaux bétons comportant ces matériaux recyclés sont encore peu étudiés. Pour faire un béton avec de bonnes résistances mécaniques et une bonne durabilité, il est essentiel de respecter quelques règles de fabrication en utilisant un bon granulat, une quantité d'air suffisante pour résister aux cycles de gel/dégel, un rapport E/C adéquat.

L'utilisation de bons granulats est essentielle dans la confection d'un bon béton. Ce sont eux qui vont régir une bonne partie de la résistance mécanique. Dans notre cas, mentionnons qu'il faut utiliser les meilleurs granulats recyclés possibles pour ne pas affaiblir le nouveau béton.

Une étude effectuée par **Quebaud [8]**, à l'université d'Artois, démontre que les mélanges fabriqués avec ce type de granulats aboutissent à des bétons plus exigeants en eau et un peu moins résistants mécaniquement que les bétons classiques.

Un béton se doit de posséder de bonnes résistances mécaniques et une qualité importante. D'après une étude menée par **Bérubé et al. [11]**, les bétons fabriqués avec des granulats de béton recyclé obtiennent de bonnes résistances mécaniques. Ces nouveaux bétons peuvent atteindre des résistances à la compression équivalente à celle d'un béton normal, soit des résultats de 30 à 40 MPa. Bien sûr, plus la quantité d'air entraînée et le rapport E/C augmentent dans un mélange, plus la résistance mécanique va baisser.

L'autre facteur pouvant influencer la performance d'un béton est sa quantité d'air entraîné dans le mélange. Cette quantité est très importante au niveau de la durabilité du béton face au gel. Il faut donc en entraîner suffisamment dans le mélange, soit de 5 à 8 % selon son utilisation. D'après **Bérubé et al. [11]** il est plus difficile d'entraîner de l'air dans un mélange comportant des granulats de béton recyclé. Il faudra alors utiliser des mesures pour remédier à ce problème, comme par exemple utiliser un agent entraîneur d'air en quantité appréciable pour que le béton résiste mieux au climat du gel/dégel.

De plus, d'après ces mêmes auteurs, les prismes de béton conçus avec du béton recyclé et sans air entraîné réagissent assez mal aux cycles de gel/dégel, soit l'essai d'expansion ASTM C666. Les prismes ont tendance à prendre de l'expansion et à se fissurer facilement. Notons que l'utilisation dans le mélange, d'un béton recyclé avec air entraîné mène à de meilleurs résultats. Ces prismes ainsi construits se fissurent moins et prennent beaucoup moins d'expansion.

Pour conclure, d'après **Quebaud**, les bétons conçus avec des granulats de béton de ciment recyclé présentent des caractéristiques bien particulières si on les compare aux bétons classiques. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Des résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %;
- Des modules élastiques inférieurs d'environ 15 à 40 %;
- Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et le granulat.
- Des retraits plus élevés de l'ordre de 50 à 100 %.

## **2 -7.2 Influence des granulats asphaltique dans les bétons de ciment**

Les granulats asphaltiques sont très peu utilisés dans les bétons de ciment. Les alternatives sont de les utiliser dans le retraitement en place des chaussées ainsi qu'en usine (grave bitume). Très peu de recherches sont effectuées dans le but de les utiliser dans les bétons conventionnels puisque, d'après **Pilon [12]**, ces granulats asphaltiques influencent beaucoup les résistances mécaniques.

D'après des études effectuées par **Tremblay [13], Pilon [12] et Marchand et coll.[14]** au Centre de recherche interuniversitaire sur le béton de l'Université Laval(CRIB): un des paramètres les plus influents sur les propriétés mécaniques du béton retraits en place serait la teneur en granulats asphaltiques. Cette teneur est exprimée selon le rapport **A/G**: soit l'épaisseur d'asphalte par rapport à l'épaisseur totale des matériaux décohesionnés.

Quelques résultats tirés de l'étude de **Tremblay [13]** sont présentés au tableau 2-8. Ces résultats démontrent très bien l'influence de la teneur en granulats asphaltiques sur les propriétés mécaniques des bétons fabriqués. Notons que dans le cadre de cette étude, les bétons ont été fabriqués à maniabilité constante et non à rapport E /C constant.

**Tableau 2-1** : Propriétés mécaniques de bétons à 28 jours de cure en fonction du rapport A/G [13]

<b>Rapport A/G</b> *	<b>Rapport E/C</b>	<b>Compression simple (MPA)</b>	<b>Flexion (MPA)</b>	<b>Module élastique (MPA)</b>
0.00	0.51	45.5	5.6	33000
0.15	0.61	17.8	3.6	18600
0.33	0.58	12.6	3.5	-----
0.60	0.56	8.6	2.6	7600

\* Rapport de l'épaisseur d'asphalte sur l'épaisseur totale des matériaux décohesionnés

D'après ces résultats, on remarque que plus le mélange contient des granulats asphaltiques, plus les propriétés mécaniques diminuent, soit la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module élastique. Mais, pour une application routière, les résultats obtenus pour la résistance à la flexion demeurent très acceptables.

De plus, l'étude menée par **Tremblay [13]** démontre que la présence de granulats asphaltiques tend à faire augmenter le retrait de séchage par rapport à un béton conventionnel.

**Quebaud [8]** comme dans le cas de Tremblay, a remarqué que la présence de bitume dans la constitution des granulats réduisait considérablement les résistances mécaniques du béton. Par exemple, une addition de 2% de bitume dans le volume total des granulats impliquait une réduction de 15% de la résistance à la compression du béton.

D'après ce même auteur les mélanges confectionnés à l'aide de ces matériaux démontreraient les caractéristiques suivantes :

- Une baisse de la résistance à la compression;
- Une baisse de la résistance à la flexion;
- Une baisse du module élastique;
- Une augmentation du retrait de séchage (p/r à un béton conventionnel);
- Une bonne liaison pâte/granulat.

Finalement, d'après **Pouliot et al. [12]** malgré la faible résistance à la compression des bétons, la résistance à la flexion demeure très acceptable pour une utilisation routière.

## **2 -8 Utilisation de matériaux recyclés dans les chaussées**

### **2 -8.1 Retraitement en place des chaussées**

#### **2 -8.1.1 Techniques utilisées**

Le retraitement en place des chaussées est une méthode de plus en plus utilisée dans les différentes municipalités du Québec et ailleurs dans le monde, notamment en France pour la reconstruction des routes. Cette méthode consiste à recréer, à partir d'une ancienne chaussée dégradée, une structure stable et homogène. Ainsi, on traite en place les matériaux existants, soit ceux de la route, et ce avec un apport éventuel de matériaux complémentaires comme de nouveaux granulats et un liant (simple ou mixte). La technique se limite cependant aux routes à trafics faible et moyen dont la structure ancienne présente des qualités suffisantes. Il en découle plusieurs techniques comme la « grave-bitume » (en usine), le retraitement haute performance (RHP) et la stabilisation au liant simple ou mixte. Il faut noter que la technique de « grave-bitume », bien qu'élaborée en usine, utilise tout de même les matériaux du chantier.

#### **A) - Grave-bitume**

La technique « grave-bitume » est un procédé qui utilise un mélange fabriqué en centrale d'enrobage à chaud (en usine). Elle est caractérisée par sa faible teneur en bitume, soit **3,5%**, comparativement à un enrobé conventionnel qui lui, en contient de 5 à 6%. Le mélange obtenu par ce procédé est composé d'environ 50% de produit de planage (enrobé bitumineux contenant environ 5% de bitume) et 50% de nouveaux granulats. Ces nouveaux granulats proviennent généralement d'une nouvelle source et non directement de la fondation de la route comme dans les autres techniques. Un ajout de 1% de nouveau bitume est donc ajouté au mélange de granulats pour obtenir la teneur en bitume résiduelle de 3,5% mentionnée ci-dessus. Cette méthode est utilisée dans le but d'augmenter la capacité structurale (portante) de la chaussée et d'en diminuer l'épaisseur.



## B) - Le retraitement haute performance (RHP)

Le retraitement haute performance ou RHP se définit comme étant une technique de décohéssionnement et de retraitement des chaussées au coulis de ciment. Cette technique consiste à décohéssionner le pavage, constitué d'enrobé bitumineux, et une partie de la fondation pour en faire un mélange avec un coulis de ciment. Ce type de mélange est de type BCR (béton compacté au rouleau). Une chaussée fabriquée à l'aide de cette technique constitue une alternative intéressante puisqu'elle allie économie et performance. Elle s'effectue en cinq étapes, présentées Figure 2.4.

Dans un premier temps, il y a un décohéssionnement initial du tronçon de la route réhabilité. Cette étape consiste à décohéssionner la structure, soit le pavage souple et une partie de la fondation, et ce jusqu'à une profondeur d'environ 200 à 300 mm (schéma 1a).

Par la suite, un échantillonnage et une caractérisation du matériau sont effectués pour évaluer sa qualité (granulométrie, teneur en bitume, propreté, matières organiques, etc.).

Notons que la quantité de granulats bitumineux ne devrait pas dépasser 50%. À cette étape, des corrections peuvent être apportées si les matériaux ne sont pas conformes (schéma 1 b).

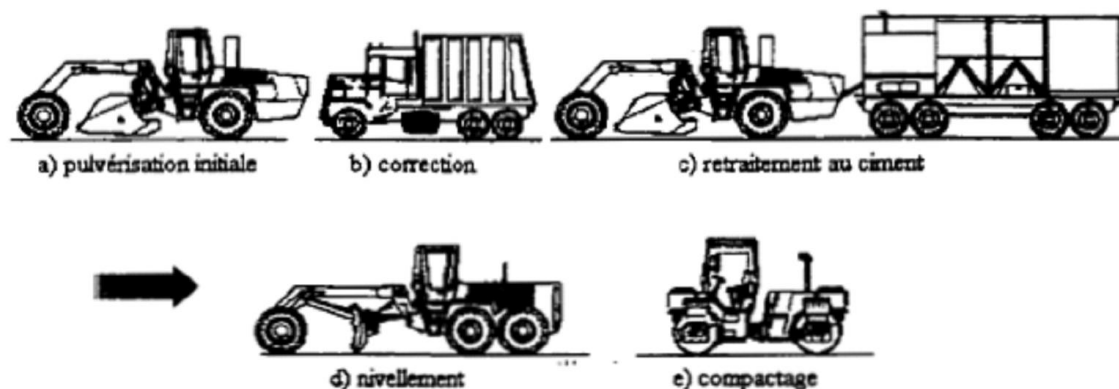


Figure 2-2 : Les étapes du retraitement à haute performance [12]

La troisième étape consiste à homogénéiser le matériel et à introduire le coulis de ciment. Ces manoeuvres sont effectuées lors du deuxième passage de l'appareil de décohéssionnement. Le dosage en ciment est contrôlé de façon précise par un débitmètre à la sortie de l'unité. À ce stade des opérations, des adjuvants (agent entraîneur d'air, etc.) sont ajoutés dans la plupart des mélanges (schéma 1c).

Une fois ces opérations terminées, on procède immédiatement à la mise en place des matériaux. C'est à cette phase du procédé qu'il y a nivellement et compactage de ceux-ci.

Le nivellement est effectué à l'aide d'une niveleuse conventionnelle et le compactage à l'aide d'un rouleau compacteur avec ou sans vibration, selon la maniabilité du mélange. Le produit fini donne une dalle de béton compactée (BCR) dont la capacité portante est très bonne (schéma 1d et 1 e).

Finalement, après un mûrissement de 2 à 3 jours de la dalle, il y a application d'une couche de roulement en enrobé bitumineux afin d'assurer un confort de roulement et protéger la surface de la chaussée.

### C) - Stabilisation au liant simple ou mixte

Ce type de retraitement est de plus en plus utilisé dans la construction du réseau routier au Québec.

La technique impliquée s'apparente beaucoup à celle du RHP. Le RHP est un retraitement stabilisé au ciment. Le procédé de fabrication est sensiblement le même avec un liant simple ou mixte. Les routes sont étudiées cas par cas et sont construites selon les normes.

Bon nombre d'options s'offrent au fabricant de route quant à l'utilisation de liants simples ou de liants mixtes. Il existe aujourd'hui plusieurs types de liants sur le marché ainsi que plusieurs façons de les utiliser. Les Liants retrouvés sur le marché sont l'émulsion de bitume, un ciment Portland, la chaux, un bitume « moussé » et un bitume standard.

L'émulsion de bitume est constituée principalement d'eau et de fines gouttelettes de bitume. Le produit final est un liquide homogène de couleur noire. Il est utilisé à froid dans les mélanges. Le bitume « moussé » ressemble fortement à l'émulsion, mais il a une texture différente. Le bitume standard est utilisé à chaud comme dans la pose d'un pavage conventionnel. Le ciment Portland et la chaux sont des produits bien connus et sont utilisés selon des dosages prescrits.

Les liants peuvent être mélangés entre eux pour obtenir des mélanges de qualité supérieure. D'après **Bergeron [15]**, les mélanges les plus couramment utilisés sont l'émulsion et le ciment, l'émulsion la chaux et le bitume, la mousse de bitume et la chaux. Ces liants peuvent être ajoutés au mélange de plusieurs façons, par le biais d'un coulis (liquide), par épandage à sec directement sur le sol ou lors de la fabrication du mélange dans une cuve servant à leur

préparation. De toutes ces méthodes, la dernière option reste la plus intéressante pour l'entrepreneur. De cette manière, le mélange est plus homogène et donne de meilleurs résultats.

## **2-9 Matériaux générés utilisées.**

Le procédé de retraitement en place des chaussées consiste à décohesionner le pavage et à mélanger les matériaux asphaltiques à une certaine épaisseur des matériaux de la fondation existante. Les matériaux asphaltiques sont réduits à une grosseur de particules équivalentes à un 0/20 mm ou un 0/40 mm selon le cas. Les matériaux de fondation ont déjà une granulométrie adéquate pour ce type de projet. Ils ne posent donc aucun problème, à condition qu'ils respectent la quantité de fines recherchée et un bas niveau de matières organiques.

D'après **Bergeron [15]**, il est recommandé d'utiliser des matériaux de fondation comportant moins de 15 % de passant 80  $\mu$ m. De plus, le mélange généré par les deux types de granulats, soit ceux asphaltiques et ceux de la fondation, devrait contenir des particules jusqu'à 40 mm. Ce maximum semble plus valable et plus réaliste pour un entrepreneur car, lors du décohesionnement de la chaussée, il est difficile d'obtenir une granulométrie se rapprochant exactement d'un 0/20 mm. On se contente alors d'un 0/40 mm ou on fait les corrections nécessaires pour obtenir une granulométrie plus fine. Pour en arriver à de tels résultats, on doit tamiser le matériel ou redécohesionner le mélange, ce qui est plus coûteux et plus long.

## **2-10 Avantage et inconvénients du retraitement en place des chaussées**

### **❖ Avantages**

Le retraitement en place des chaussées est une nouvelle technique qui nécessite encore beaucoup d'études mais qui est, jusqu'à maintenant, performant assez bien. D'après **Vautrin** voici les principaux avantages de cette technique.

- Son premier avantage est l'utilisation des matériaux en place, ce qui conduit à l'économie de granulats naturels et à la diminution des coûts de transport.
  
- De plus, le remplacement d'une partie de la fondation et parfois même de la sous-fondation permet la réalisation d'une nouvelle structure à capacité portante améliorée. Avec cette nouvelle base, l'ancien patron de fissuration est détruit et la route devient plus durable et moins sujette à la fissuration.

- Le niveau d'une route restaurée à l'aide des méthodes courantes, soit l'ajout d'une couche de roulement neuve ou un simple ajout granulaire, est haussé considérablement, ce qui n'est pas le cas du retraitement en place.

Finalement, les qualités visées avec cette technique sont une bonne capacité portante, la résistance au gel et un coût de réalisation abordable

#### ❖ Inconvénients

Les techniques de retraitement en place utilisées lors de la restauration des anciennes routes comportent aussi des difficultés. Les résultats obtenus lors de l'utilisation de ces techniques dépendent principalement de la qualité de la structure de la route déjà existante. En effet, la qualité du produit fini va être grandement influencée par la qualité des matériaux de la structure ainsi que de l'infrastructure. Voici les principaux inconvénients liés au traitement en place des chaussées :

- Comme le remarque **Vautrin [16]**, l'inconvénient le plus remarqué dans le retraitement des chaussées est la piètre qualité des matériaux traités. L'utilisation de liants peut toutefois valoriser beaucoup ces granulats de composition souvent variable.
- Autre aspect négatif, le problème relié au gel dans les sols supports. D'après **Vautrin [16]**, la reconstruction d'une route à l'aide des techniques de retraitement en place des chaussées, produit une structure routière d'épaisseur équivalente ou plus faible que celle de l'ancienne route. Ce faible apport de matériaux rend la structure plus gélive. Pour régler ce problème, on peut jouer avec l'épaisseur de la fondation. En épaississant la structure de la chaussée, on limite habituellement les effets du gel. Cependant; des normes d'esthétisme et des contraintes monétaires s'imposent. Une structure trop rehaussée signifie des coûts élevés pour l'entrepreneur et un paysage modifié. On peut aussi régler partiellement le problème en entraînant une quantité d'air suffisante dans le béton pour lui permettre de mieux se comporter face aux cycles de gel/dégel.
- D'après **Quebaud [8]**, les granulats de béton de ciment recyclé vont demander un apport en eau plus grand qu'un granulats conventionnel quand ils vont être utilisés dans la fabrication de nouveaux bétons. Donc les mélanges effectués avec ce type de granulats vont demander beaucoup plus d'eau lors de leur fabrication.

- Le dernier problème est celui du temps de prise de la dalle de béton ou des matériaux traités. En effet, selon les essais effectués par le **CRIB** [17] (Centre de recherche interuniversitaire sur le béton) sur la rue Borne et le Chemin Benoît, entre 1997 et 1999, le temps de durcissement d'une dalle de béton compacté au rouleau peut varier entre 2 à 3 jours avant de permettre la pose d'une couche de roulement. La couche de roulement est installée pour protéger la structure et pour le confort des usagers. Notons que les autres méthodes utilisées dans la réhabilitation des chaussées comportent des temps de cure beaucoup plus élevés, ce qui est défavorable pour un entrepreneur et surtout pour les usagers. C'est pourquoi cette méthode n'est utilisée que pour des routes à faible débit.

## 2 -11 Agrégats recyclés et béton d'agrégats recyclés

### 2-11.1 Introduction

L'idée de recycler des matériaux de démolition n'est pas nouvelle. Pendant la seconde guerre mondiale, les gravats provenant du bâtiment détruit par les bombardements étaient employés en grande Bretagne et en Allemagne pour la restructuration. Les granulats obtenus par ce recyclage comportaient un forte de brique compte tenu de la nature des constructions de l'époque [18, 19]. Un travail de recherche a lieu mondialement et a fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolis 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 2-2

**Tableau 2-2:** Taux de recyclage en Europe [8]

Pays	Déchets de démolition en million de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonne 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	2.6
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	58	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	05	1.25	25	4.25
France	25	03	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	145	42	Moyenne = 31	21.0

## 2-11.2 Historique et expérience étrangères

Il est connu que le principe de recyclage des matériaux n'est pas nouveau car il est 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 nouvelles.

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

Cette période d'après guerre est suivi d'une période assez longue passée dans les études, jusqu'à la publication par "BUCK" d'un rapport de recherche 1973 [18], puis la présentation par le même auteur d'une communication en 1976, [18, 19, 20]. Sur l'étude des granulats de béton recyclé.

A partir de 1975, les premiers tentatives de recyclage ont débuté aux Etats-Unis et plus précisément dans le domaine routier, ou 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 41ans d'age pour la formulation d'un nouveau béton toujours de chaussée [1].

Après la bonne réussite de 1976, les travaux de recherches dans ce domaine (recyclage de béton de chaussées) ont évoqué jusqu'à 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 [1]. 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**, Sshutz [1], 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 « déchet de chantier » basé sur la participation de l'ensemble des intéressés 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 chantiers devant être recyclés en 2000. Les premières installations fixes de recyclage concassage datent du début des années 60 [20].

Dès 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 [21 ,20].

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 (construction, rénovation et démolition). (Tableau 2-3)

**Tableau 2-3:** Répartition de la production des déchets de chantiers selon l'origine en 1993 (en milliers de tonnes) [20]

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

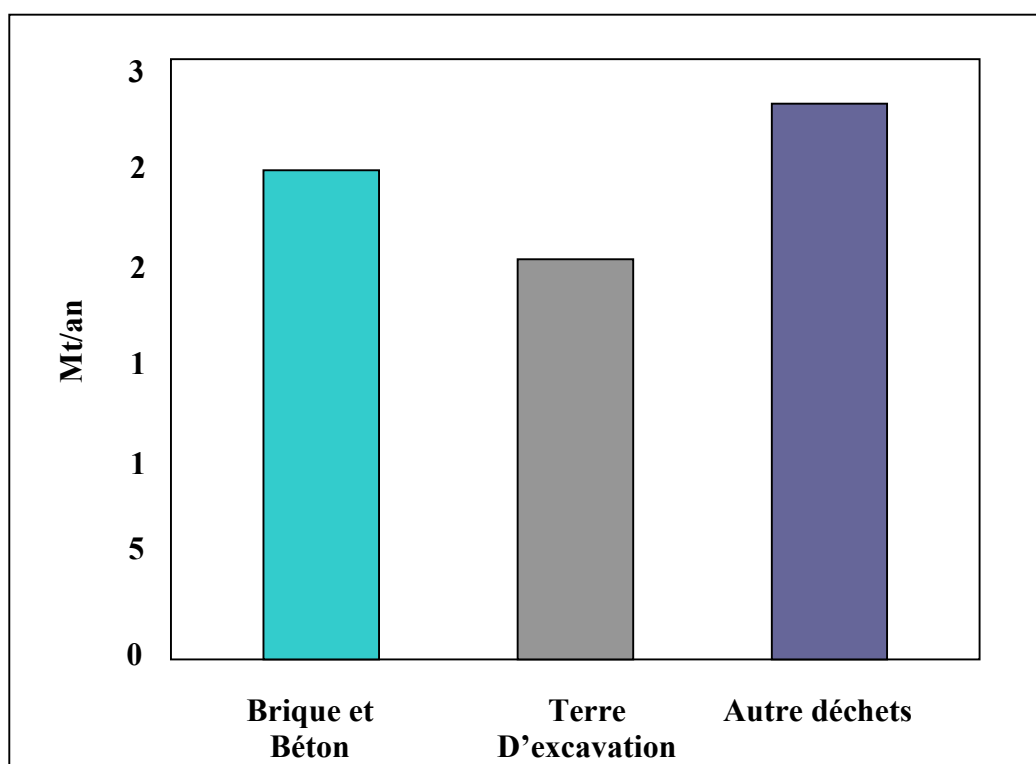
Pratiquement toutes la production de granulats recyclés est actuellement destinée aux travaux routiers et hydrauliques, et à peine 2% à l'industrie du béton (0.2% en 1990).

#### ❖ 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 [21], les estimations des quantités des déchets dues aux activités de construction et de démolition étaient de 24 millions de tonnes par ans. La figure 2.1 résume la Répartition des quantités de déchet au Royaume-Uni.

Royaume-Uni [21], en 1995 il y avait 36 centres fixes [1]. 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 déchet de construction /démolition recyclées de 1995 pourraient atteindre 75% l’an 2000, et les granulats recyclés passeront à 5 millions de tonnes.



**Figure 2-3 :** Répartition des quantités de déchets par types en 1991 au Royaume-Uni [21]

### ❖ La Belgique

La recherche en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition a débuté en Belgique il y a plus d’une vingtaine d’années [21]. Aux années 80, un mur de soutènement a été recyclé et reconstruit lus largement au même endroit [1]. En 1987, avec l’aide du CSTB (centre Scientifique et Technique de la reconstruction), 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 m<sup>3</sup> 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 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 75 millions par ans 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 [21].

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 maigres de fondation de routes. La réutilisation du béton dans le bâtiment est encore au stade de développement.

#### ❖ **Le Danemark**

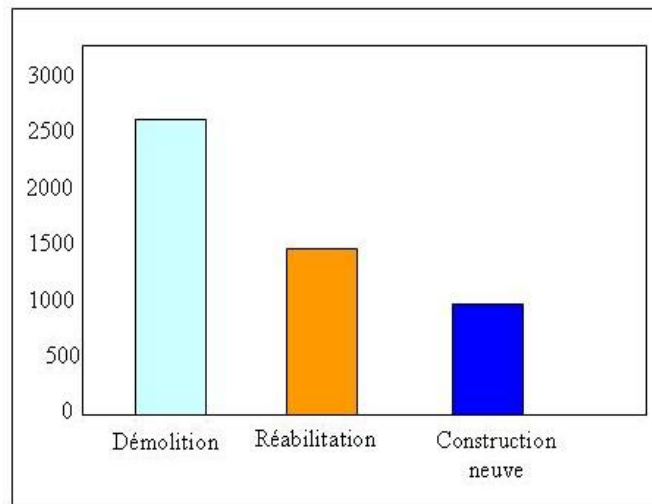
Aujourd'hui encore, des projets de « maison recyclés » c'est-à-dire bâtiments construits à partir de matériaux à base de granulats recyclés (béton recyclés par exemple) sont construits en Danemark.

Le recyclage a été encouragé depuis 1971 dans les domaines des emballages alimentaires, puis en 1983, la première expérience de recyclage de béton a lieu : Les pistes d'atterrissage de l'aéroport de Copenhague ont été reconstruites à partir de béton recyclés provenant des anciennes pistes. En 1991, 135 communes avaient élaboré une réglementation spécifique aux déchets de construction et 17 centres sur le territoire Danois [20].

En effet en 1987, le ministre de l'environnement a élaboré un plan d'action en comparaison à 1985 et qui signifie que la répartition des déchets en 2010 devrait être la suivante : 74% recyclés, 15% incinérés et 11% seulement mise en décharge.

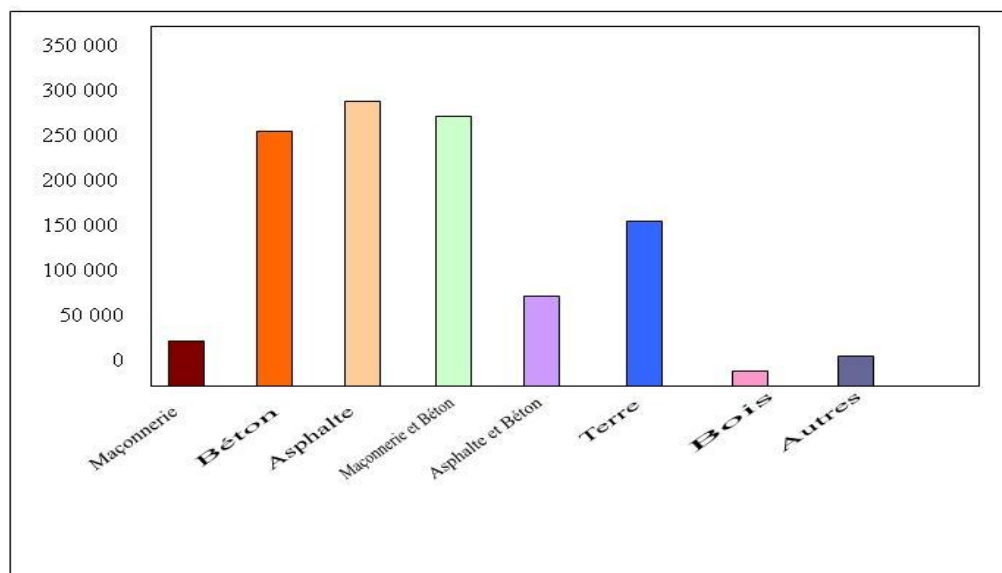
Selon le rapport PROBA publié par le ministère de l'environnement en 1990 [1], les déchets de chantier représentent environ 4.4 millions de tonnes. Leur provenance est

majoritairement de la démolition, la réhabilitation et la construction neuve. Le traitement des ces déchet est résumé dans la figure 2.4.



**Figure 2-4 :** Evaluation de l'origine des déchets de chantier au Danemark [20]

La nature des déchets de chantier est résumée dans la figure 2-5



**Figure 2-5 :** Déchet livré dans les centres de recyclage concassage 1992 au Danemark [20]

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

#### ❖ France

L'extraction de granulats recyclés a commencée 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 Villette. A partir de 1985, l'activité s'est développée à raison de trois à cinq nouvelles installations créées par an. En 1991, le nombre était de vingt sociétés de recyclage [8].

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 estimés recyclables (10 à 15 millions de tonnes) [8]. L'Île de France, le nord, l'Alsace et la région de Rhône-Alpes sont les principales productrices. Les granulats recyclés représentent moins de 1% de consommation totale en granulats et 25 % de production de granulats non issus de carrière, contre 15 % de production de granulats non issus de carrière, contre 15 % en 1987.

#### ❖ L'ex URSS

Des stations de recyclage de 720.000m<sup>3</sup>/an sont couramment en opération [1]. Les gros agrégats recyclés sont utilisés dans les fondations et pour la production de nouveaux bétons de structure avec une résistance caractéristique de 20MPa et les agrégats fins sont utilisés comme filler dans l'asphalte.

#### ❖ Le Japon

Jusqu'à 1985, les agrégats recyclés étaient utilisés uniquement dans la construction routière à cause des autorités Japonaises qui n'avaient 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 installation 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 [22].

#### ❖ **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 inconnues.

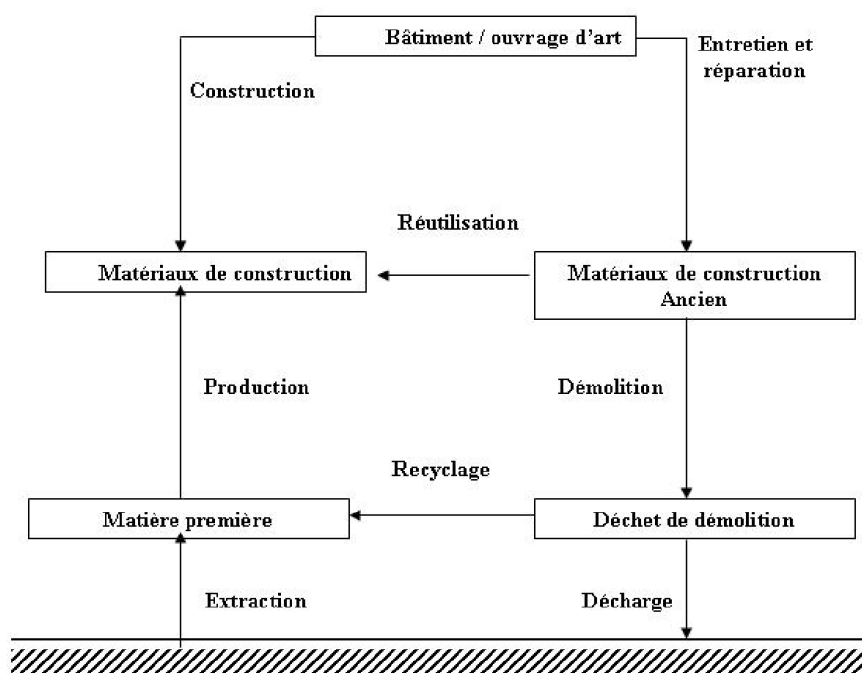
Au cours de la deuxième moitié de ce siècle et en 1980, la ville algérienne d'El Asnam (Chlef actuellement), a été secouée par deux tremblements de terre intenses qui l'ont quasiment réduit en un énorme tas de gravats. En 1981, L'expérience acquise par la Belgique en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition, a permis au CSTC [24] (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 la suite l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de tonnes de débris, l'opération pilote de recyclage menée par la recherche du CSTC [24], a démontré qu'il est possible de recycler les débris en blocs de construction de qualité convenables [23].

Il faut aussi noter la 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.

## 2-11.3 Source et production d'agrégats recyclés

### 2-11.3.1 Source 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 [8]. La figure 2-6 illustre en gros les sources des granulats recyclés.



**Figure 2-6 :** Modèle du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art [8]

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<sup>ème</sup> siècle repose sur un gros œuvre en pierre, en brique et en métal mais une construction de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> 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 5/1 [8]. 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 d'agrégats recyclés, l'industrie de recyclage des déchets de construction démolition avaient comme deux génération 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 systèmes : un ouvert et l'autre fermé, les deux systèmes sont gérés dans la réhabilitation de chaussées et projet de recyclage.

### **2-11.3.2 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'un 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 figure 2-7.

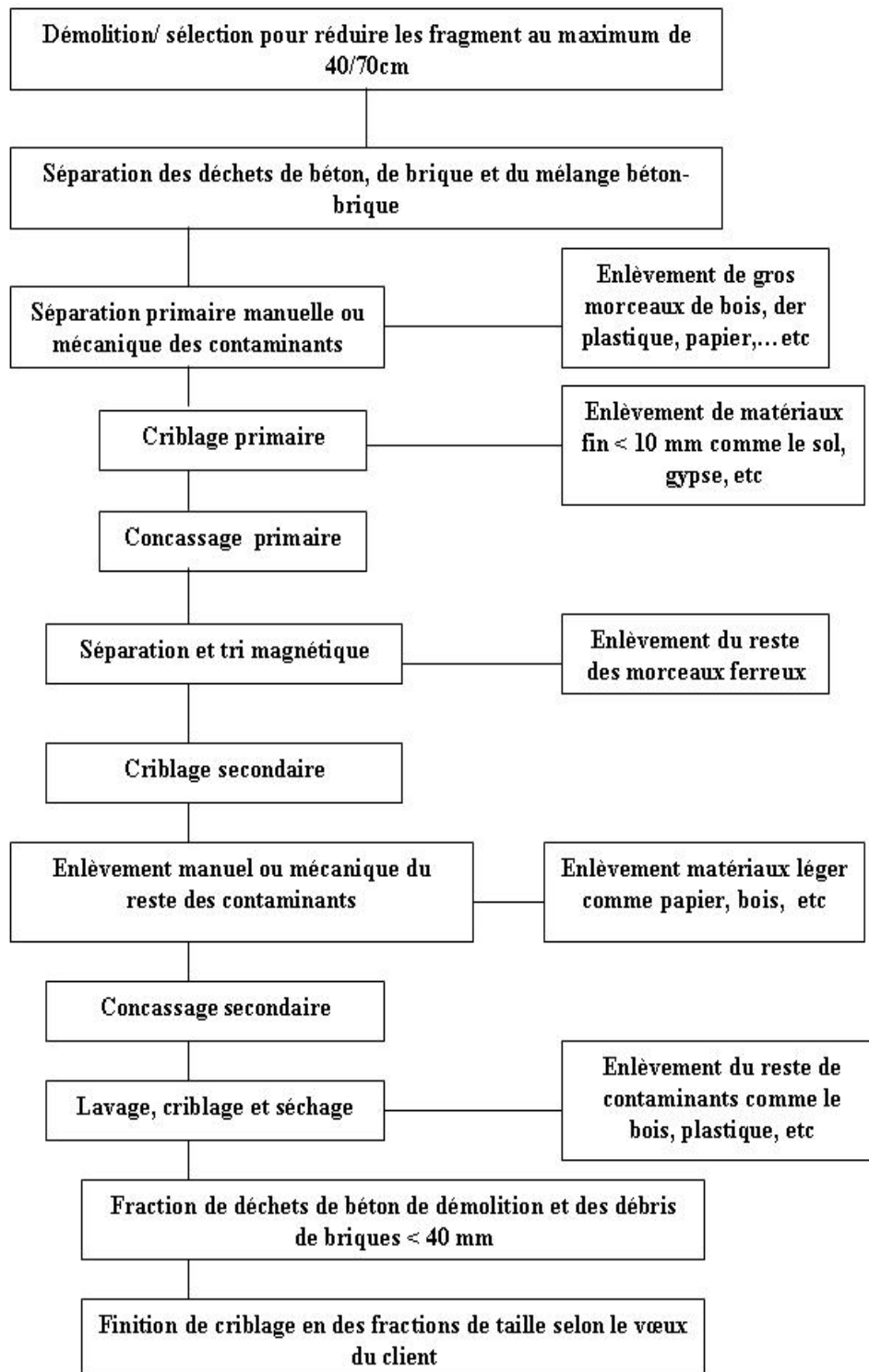


Figure 2-7 : Procédure de criblage des déchets de construction / démolition [8]

### 2-11.3.3 Les différents types de concasseurs

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

#### □ *Concasseurs à mâchoire*

Avec ce type de concasseurs, le matériau est cassé par pression entre les deux machines, l'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 tournants 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 réglant la vitesse du rotor d'assurer une très importante réduction de la dimension des matériaux concassés. La forme des matériaux a une influence sur la dimension et la forme des granulats obtenus. Le niveau de fragmentation est difficilement maîtrisable, la consommation énergétique de l'équipement est plus élevée en comparaison avec le concasseur 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 encoches en acier de haute résistance. Les agrégats sont produits par choc et éclatement, ils sont de ce fait très durs et de faible calibre avec une importante quantité de fines (jusqu'à 40% de particules < 6mm).



**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 200mm environ. Sans métal ni bois, cet équipement peut être utilisé comme concasseur primaire et produit des agrégats de forme cubique et une quantité moyenne de fines (< 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.

#### **2-11.3.4 Les méthodes de séparation des impuretés**

**Séparation manuelle :**

Elle a l'avantage majeur de pouvoir éliminer les éléments indésirables qui ne sont pas facilement séparable par d'autres moyens, il s'agit notamment du verre, des morceaux d'isolants plats, 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).

**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 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 peut l'utiliser que pour une fraction granulométrique bien définie. Dans ce cas, il permet jusqu'à 95% des éléments indispensables.

#### **Séparation 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 fraction 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 granulat très propre. Par contre il produit une grande quantité de boue qui doit être traité.

La figure 2-8 résume le fonctionnement d'une centrale de concassage :

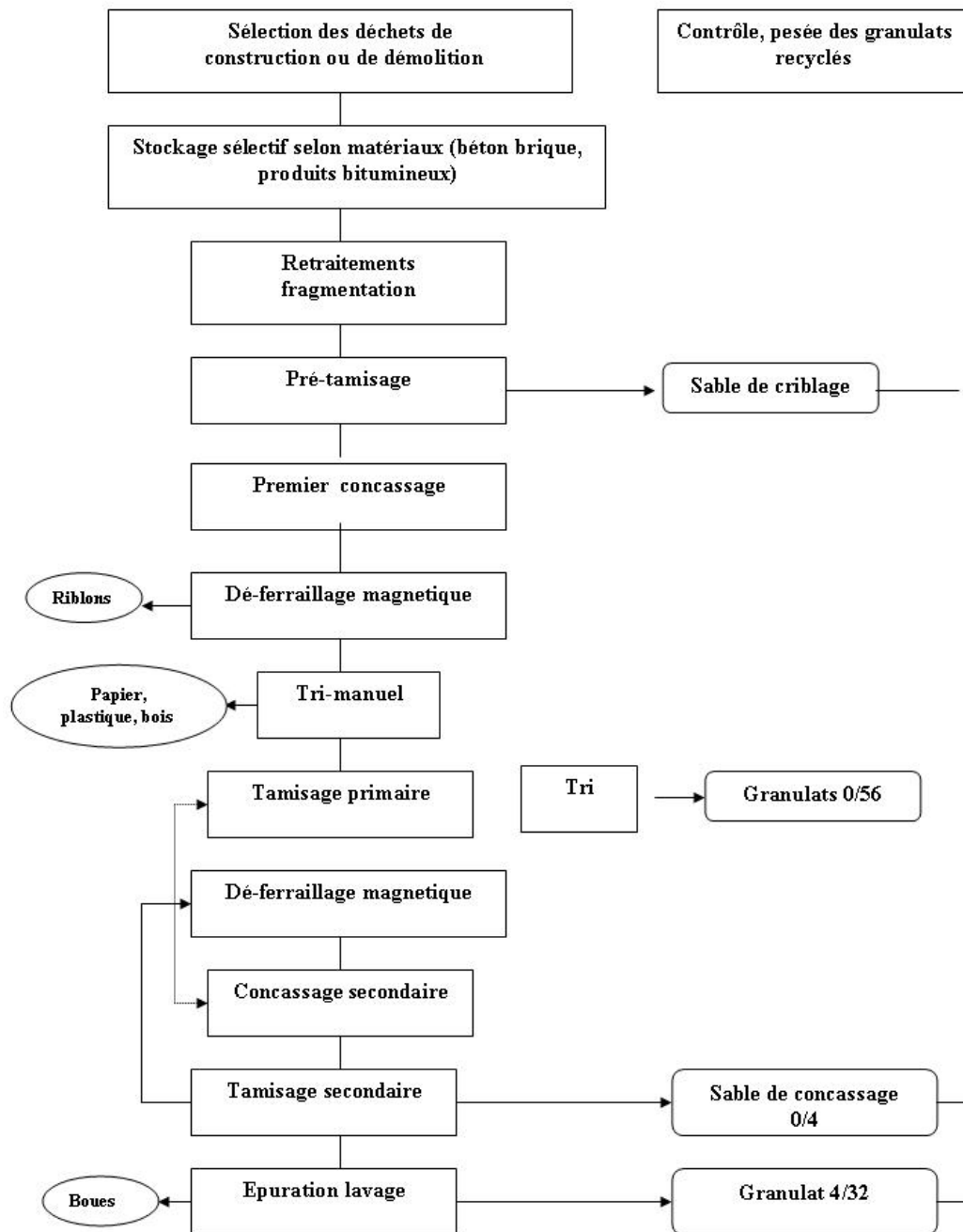


Figure 2-8 : Schéma de fonctionnement d'une centrale de recyclage / concassage [8]

### 2-11.3.5 L'élaboration du produit fini

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 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 surdimensionné afin de faciliter le passage des blocs de béton et de leurs armatures. L'opération de broyage dé-ferraillage proprement dite et réalisée par un double concassage (deux concasseurs à percussion avec scalpage intercalé à 60 mm) et à 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, 80/150. Seul 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 éliminée. La fraction 0/6 qui est relativement plus homogène contourne le circuit de l'appareil de nettoyage, quand au 80/150, elle se réintroduit dans l'installation après concassage.

## **2-12. Caractéristique des granulats recyclés**

### **2-12.1 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.

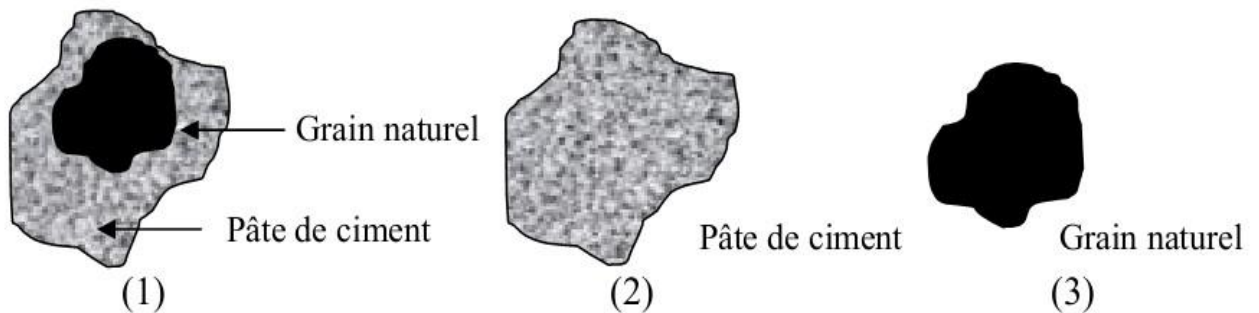
Des granulats recyclés ont été obtenus en passant une seule fois le concasseur avec une granulométrie des gros agrégats recyclés (5/25) très proche des limites admissibles préconisées par la norme ASTM C-33. Par contre, la partie fine des agrégats recyclés (< 4 mm), présentait une granulométrie assez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

Les particules fines (< 75µm) sont selon différents chercheurs [1]. 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.

#### **2.12.2 Composition des agrégats recyclés**

Les agrégats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition. En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont [25, 26, 27] :

- Des granulats naturels concassés partiellement.
- De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.



**Figure 2-9:** Formes des granulats recyclés.[25,26,27]

### 2-12.2 La Masse volumique

La masse volumique des granulats naturels, varie généralement de 2100 à 2500 kg/m<sup>3</sup> pour les gros granulats et de 1970 à 2200 kg/m<sup>3</sup> pour les granulats fins [5]. La masse volumique d'agrégats de béton recyclé est inférieure de l'ordre de 5 à 10% de celle d'agrégats naturels [28, 29, 30]. Cette baisse est relativement à la masse volumique faible d'anciens mortiers attachés aux particules d'agrégats du béton recyclé.

Hansen et Narud, rapportaient [31], que la densité des gros agrégats recyclés est de l'ordre de 2.340 kg/m<sup>3</sup> pour les agrégats 4/8 mm et de 2.490 kg/m<sup>3</sup> pour les agrégats 16/32 mm, indépendamment de la qualité de béton original dont les densités de gros et fin agrégats étaient de 2.500 kg/m<sup>3</sup> et 2.610 kg/m<sup>3</sup> respectivement. Par contre les valeurs de 2.430 kg/m<sup>3</sup> pour les gros agrégats recyclés (5/25 mm), et 2.310 kg/m<sup>3</sup> pour les agrégats recyclés fin (< 5 mm) ont été reportées par Hasba et autres dont la densité originale des agrégats était de 2700 kg/m<sup>3</sup> et 2500 kg/m<sup>3</sup> pour les gros et fins granulats respectivement [31].

### 2-12.3. Porosité

La proportion importante des grains de mortiers attachés aux granulats recyclés, conduit à des teneurs en eau plus importantes et par conséquent à une porosité élevée. Selon Kazuyuki et autres [18], la porosité des granulats issus 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
<b>Porosité (%)</b>	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 [1]

		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 granulats naturels, et donc il convient de réaliser un pré-mouillage comparable à celui utilisé pour les granulats poreux et les granulats légers.

#### 2-12.4. Mortiers 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 graviers naturel dans les agrégats recyclés peut être distingué clairement entre les particules de graviers originales et la matrice de ciment rouge [1].

Le pourcentage de mortiers attaché aux particules de graviers naturels est estimé entre 25 à 35 % pour les agrégats recyclés 16/32mm, autour de 40 % pour 8/16 mm et de 60% pour le reste de 4/8 mm [36 ,32]

Selon d'autres chercheurs, par exemple Hasaba et autres [31], ce mortiers est de 35.5, 36.7, 38.4 % respectivement pour un béton original de résistance à la compression de 24.41 et 51 MPa.

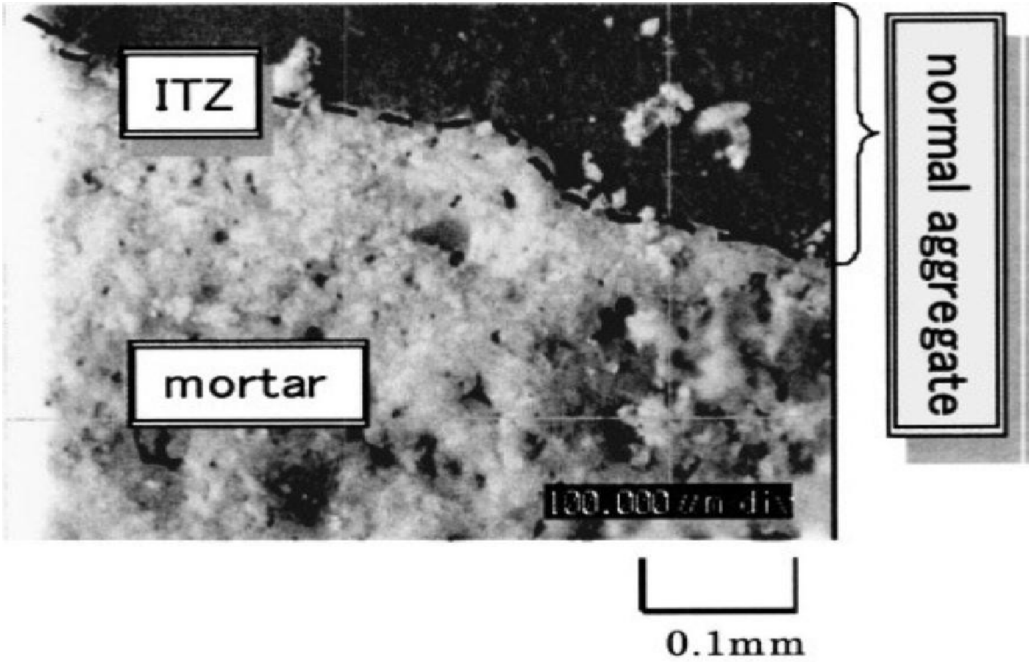


Figure 2-10 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel [33].

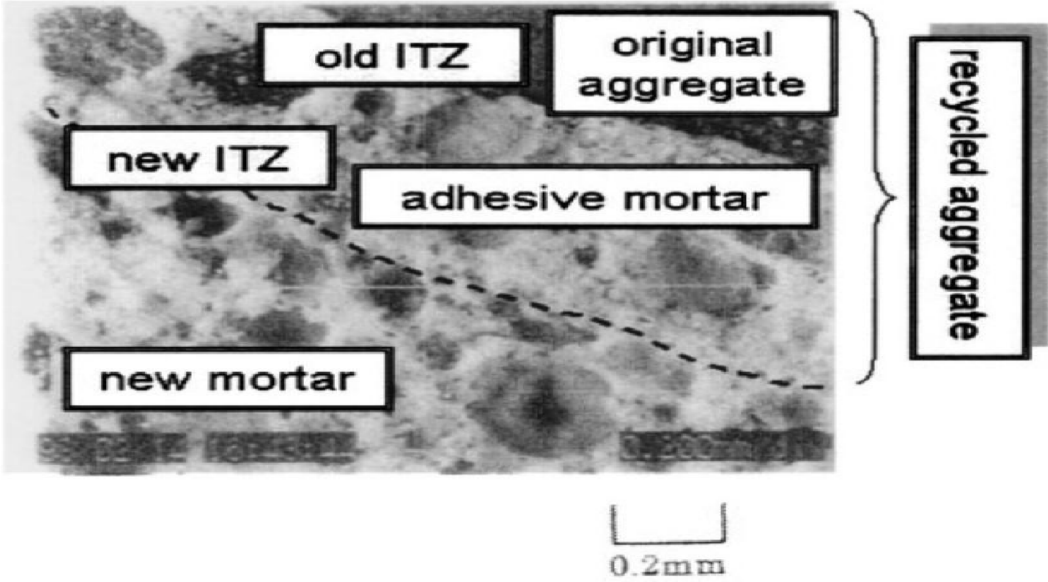


Figure 2-11 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé [33]

### 2-12.5. Résistance aux sulfates

La norme américaine ASTM C-33 limite le pourcentage de perte de résistance du à la présence des sulfates de magnésium pour les gros granulats à 18% et à 15% pour les agrégats fin, et le pourcentage de sodium de 10 et 12 % respectivement. Cependant, des travaux menés au Japon [31], ont montré 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 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 fin agrégats de perte de 3.9% et 7 % respectivement [34].

**Tableau 2-5:** Réduction de la résistance à la compression du béton d'agrégats recyclés en fonction du pourcentage d'ajout en sulfates [1, 34]

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	43.50	16.6
21.7	0	41.30	15.8
30.8	0	41.30	15.8
30.8	30.8	34.10	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 bétons bitumineux recyclés 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 ou les agrégats recyclés sont contaminés par du gypse. Car la présence peut conduire à un gonflement (expansion du sulfate).



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

Le ACI limite le contenu en chlorures 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 non exposé au chlorure.

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

L'utilisation de plastifiants entraîneurs d'air et retardateur de prise n'ont pas d'effet significatif sur l'affaissement, la quantité d'air, ou le temps de prise du béton d'agrégats recyclés frais.

Le béton démolé est fréquemment contaminé par la terre organique ou l'argile.

Il n'a pas raison de croire que les agrégats recyclés contaminés par la terre ne présente aucun effets dans le béton d'agrégats recyclés, mis un bon lavage peut éliminer le problème. Les mêmes limites d'impureté pour les agrégats naturels sont recommandées pour les agrégats recyclés.

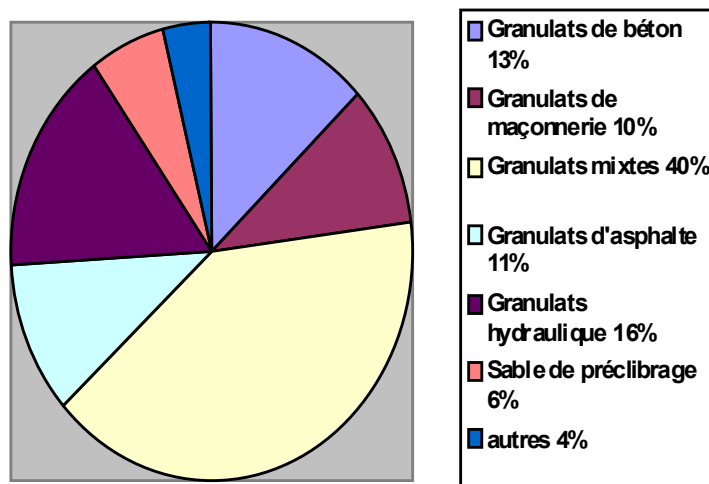
Les débris de construction comportent généralement une quantité assez considérable des déchets de conduite en fer, de ferme ou de fixation en en métal. Cependant, il n'est pas avantageux d'avoir une quantité significatives de fer ou d'autres métaux dans la fraction d'agrégats recyclés Ce type de déchets 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 fissuration du béton d'agrégats recyclés.

Le béton de démolition est souvent contaminé par les déchets de verre des fenêtres et autre. 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'agrégats 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.

### 2-12.6 : Classification de 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 suivantes :



**Figure 2-12** : Répartition de la production en granulats recyclés au Pays-Bas en 1992 [35]

Parmi les différentes définitions et classifications d'agrégats recyclés, la classification du comité technique (TC121) de la RILEM lors du 3ème congrès sur la démolition et réutilisation du béton et de la maçonnerie au DANEMARK (Odense) 1993[35], paraît être un des plus convenables pour une application pratique. La RILEM recommandait de classifie les gros granulats recyclés en trois type (Tableau 2.6) dans chacun serait sujet de limites spéciales en impuretés en plus des limites imposées par les normes européennes accordées comme le montre le tableau suivants :

**Tableau 2-6 :** Composition des différents types d'agrégats recyclés proposé par [36,37]

Types d'agrégats	Composition
<b>Type I</b>	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie (brique).
<b>Type II</b>	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.
<b>Type III</b>	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 résumées au tableau 2.7 suivants :

**Tableau 2-7 :** Les différentes limites proposées par le RILEM sur les trois classes de béton recyclés [37]

Exigences mandataires	Type I	Type II	Type III
Densité sèche minimum (kg/m <sup>3</sup> )	1800	2200	2400
Absorption d'eau max. (%)	15	5	3
Teneur maximale de matériaux à densité sèche < 2200 kg/m <sup>3</sup> (%)	-	10	10
Teneur maximale de matériaux à densité sèche < 1000 kg/m <sup>3</sup> (%)	10	1	1
Teneur maximale on matériaux à densité sèche < 1200 kg/m <sup>3</sup> (%)	2	0.5	0.5
Teneur maximale on matériaux non minéraux (%)	1	1	1
Teneur maximale on matériaux organique (%)	0.5	0.5	0.5
Teneur maximale en élément fins (< 0.8mm) (%)	3	3	2
Teneur maximale en sable (< 1mm) (%)	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 résumées dans le tableau 2.8 suivants :

**Tableau 2-8 : Classe du béton recyclé [37]**

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'agrégats naturels proposés par la RILEM, sont comme suite :

**Tableau 2-9: Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons ordinaire [37]**

	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

## 2-13 Propriétés et dosage du béton frais à base d'agrégats recyclés

### 2-13.1 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 recyclés. 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 de 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 certain travaux [1 ,38], la demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5 % pour le béton à base 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 % [26]. Si les gros et fins agrégats recyclés sont de la brique cuite, la demande en eau supplémentaire peut atteindre 20 % [2 ,39 ,40] .

## **2-13.2 La compacité**

Les masses volumiques des bétons recyclés sont toujours nettement plus basses que celle des bétons témoins [3], 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 [28 ,2], 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'agrégats naturels.

## **2-14 Propriétés mécanique du béton durci**

### **2-14.1 Résistance à la compression**

Il est connu que le béton à base d'agrégats 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 et de 20 à 40% par rapport à un béton à granulats naturels [1, 38, 24].

Selon d'autres chercheurs [1, 38, 24 ,41] et pour une même plasticité du béton frais, la résistance à la compression du béton recyclé à base de gros agrégats 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 de béton original, et lorsque le béton recyclés est composé des deux types d'agrégats recyclés (gros et fins), la chute de résistance à la compression arrivera jusqu'à 40 % par rapport à celle du béton témoin.

## **2-14.2 Résistance à la traction**

Comme pour la compression, la résistance à la traction du béton recyclé est plus faible que celle de béton d'agrégats naturels ayant la même ouvrabilité. La résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage d'agrégats recyclés (gros et fins) intervenant dans la composition du béton et chute d'environ 10% par rapport à celle du béton original lorsqu'on utilise que les gros agrégats recyclés et environ 20% lorsqu'on utilise des gros et des fins agrégats recyclés [24].

La résistance à la traction par flexion du béton d'agrégats recyclés dépend en général du rapport E/C et de la période de malaxage [42]. 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 compression [1, 38].

## **2-14.3 Module d'élasticité**

Les bétons de recyclage, compte tenu de leurs légèreté, ont toujours des modules d'élasticité inférieurs de 20 à 40% que celle du béton comparable comportent des granulats naturels.

Les modules d'élasticité trouvés par Coquillat [3] sont de 29GPa pour le béton recyclé de granulats de béton démolis, de 25GPa pour le béton de brique et de 24GPa pour le béton de brique et béton démolis en comparaison à un module d'élasticité de 40GPa pour le béton témoin.

## **2-15 Propriétés physiques**

### **2-15.1 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 démolis, 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 démolis [43, 44, 3].

A ouvrabilité constante, d'autres chercheurs [1, 38, 3] 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 fin agrégats recyclés.

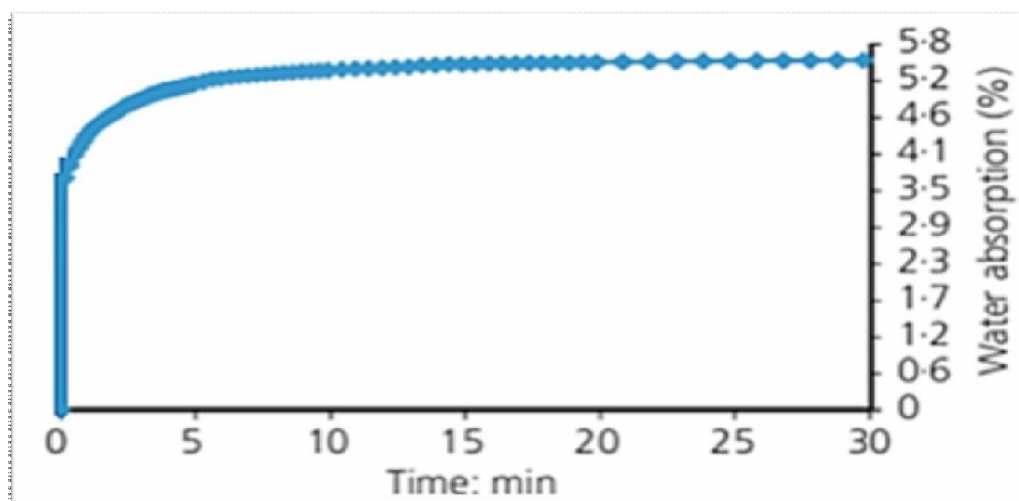
## 2-15. 2 Le Fluage

La présence d'ancien mortier qui recouvre à 50% les agrégats recyclés, augmente le fluage du béton 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% supérieurs à celui du béton original d'agrégats naturels et qu'elle plus importante lorsque les gros et fin agrégats sont utilisés [45].

### 2-15.3 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 néfaste sur la durabilité du béton.

L'augmentation de la perméabilité et de l'absorption de l'eau du béton recyclés par rapport au béton d'agrégats naturels, est due en générale à la présence du mortier d'ancien béton collé aux granulats recyclés et la résistance du béton recyclés. 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.



**Figure 2-13 :** Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [46]

## 2-16 Impact environnementaux

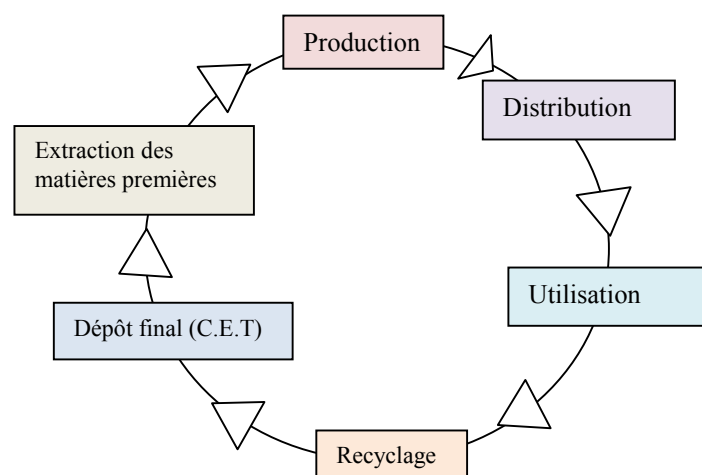
Il est important de connaître l'impact environnemental des déchets du BTP afin d'améliorer leur stockage et de déterminer les filières de valorisation les plus adaptées et les plus respectueuses de l'environnement [47].

### 2-16.1 Impact des matériaux de construction et démolition sur l'environnement naturel humain :

#### 2-16.1.1 Notion de cycle de vie et d'énergie grise :

Une analyse du cycle de vie des matériaux intègre les différentes de la vie d'un produit. Elle vise à comptabiliser les entrants (matières premières, énergie, ...etc.) et les sortants (déchets liquides, solides, gazeux) de sorte à pouvoir, à chaque étape de vie d'un matériau ou d'une construction, établir un bilan et son impact sur l'environnement.

Les chantiers de construction génèrent des nuisances, mais sont aussi capables d'absorber des déchets, à travers le recyclage (aspect positif). L'air, l'eau, le sol, le bruit et les vibrations sont les principaux vecteurs des pollutions [48].



**Figure 2-14 :** Les principes de l'analyse du cycle de vie [48].

Le recyclage n'est donc pas l'étape unique du cycle de vie des matériaux de construction : l'énergie dépensée pour l'extraction, la transformation, le transport ou encore la mise en œuvre constituent des postes importants dans l'évaluation de l'impact que peut avoir le choix d'un matériau sur son environnement.

La notion d'énergie grise, c'est-à-dire l'énergie, calculée en kwh/m<sup>3</sup> ou associée à un matériau, permet de prendre en compte les aspects suivants :



- Machines d'extraction
- Carburant pour le transport
- Consommation d'électricité pour la transformation
- Pétrole utilisé pour la production

**Tableau 2-10 : Energie grise de matériaux de construction [48]**

Matériau	Energie grise (kwh/m <sup>3</sup> )
Brique perforée	700
Brique silico-calcaire	350
Enduit synthétique	3300
Enduit au ciment	1100
Profilés en acier	57000
Bois d'œuvre	180
Panneaux d'agglomérés (liés avec résine formaldéhyde)	2000
Panneaux de fibres de bois (tendre)	1400
Polystyrène expansé (isolant)	450
Isolant à base de cellulose de bois	50

Une étude intéressante a été réalisée relativement à béton armé [48] : les postes les plus significatifs du point de vue de la consommation d'énergie pour un cycle complet de « 1m<sup>3</sup> de béton normal lourd armé coulé in situ en Belgique » représentent sur le tableau I -4

**Tableau 2- 11:** Consommation d'énergie pour la fabrication du béton [48]

Matériau/ opération	Energie (GJ)
Ciment	1.58
Sable et granulats	0.27
Armatures	2.25
Coffrage	0.43
Transport et mise en œuvre	0.34
Démolition et traitement des déchets	0.27
Total	5.14

### 2-16.1.2 Matériaux et constructions « respectueuses » de l'environnement :

Il est fort difficile de définir des règles précises de choix des matériaux plus respectueux de l'environnement que d'autre : il existe bien entendu des labels de qualité comme le F.S.C. (Forest Stewardship Council) qui est relatif à un mode d'exploitation du bois d'œuvre respectueux de la forêt et qui participe par la même au problème globale de conservation des forêts .Il résultat d'une collaboration avec les différents maillons de la filière du bois.

Mais bien souvent, ces différents labels présentent le désavantage de ne concerner qu'une phase spécifique du cycle de vie du produit.

Il est important donc d'envisager non seulement le cycle de vie complet du produit, mais aussi celui de la construction ou du bâtiment dont il va faire partie, dans la mesure ou il va interagir, être lié voire être mélangé avec d'autres matériaux. Une analyse de cycle de vie sur la construction elle-même est donc requise : quelques travaux expérimentaux ont été réalisés à sujet [56]. Ils ne sont tout à fait complets car il est très difficile de rassembler de façon exhaustive les informations nécessaire .Un exemple donné ci-après concerne la comparaison entre trois méthodes de fabrication d'un hall industriel(i) colonnes et poutres en acier, (ii) colonnes et poutres en béton et (iii) colonnes en béton et poutre en bois lamellé-collé.

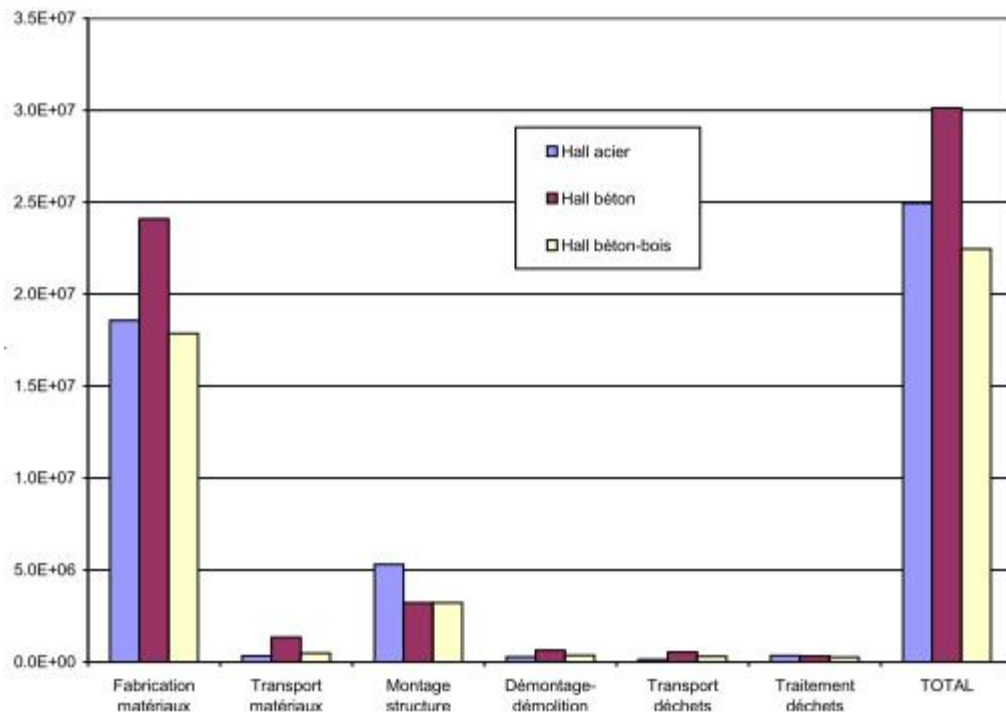


Figure 2-15 : Bilan environnement d'un hall industriel [49]

### 2-16.1.3 Impact sur la santé et l'environnement :

L'activité de construction et de démolition génère des déchets sous formes gazeuse, liquide et solide. Une liste exhaustive de ces déchets: ils concernent tous les corps de métier sans exception. Ces déchets, dangereux ou non, constituent une menace potentielle pour l'environnement naturel dans la mesure où ils peuvent contaminer les sols, les nappes phréatiques où les rivières et polluer l'air par des rejets dans l'atmosphère [48].

#### 2-16.1.3.1 Cas particulier de l'amiante :

L'amiante se rencontre à l'occasion des travaux de démolition, entretien ou rénovation, son emploi dans des constructions nouvelles est en effet interdit. L'amiante se retrouve au niveau des systèmes d'isolation thermique, sous forme libre ou floquée, ou dans les éléments en asbestociment, auquel cas elle est enveloppée dans une gangue de ciment. Les fines particules d'amiante qui se retrouvent dans l'air et sont inhalées par les habitants ou les travailleurs peuvent provoquer des lésions irréversibles au niveau des poumons.

Il convient donc de prendre des précautions particulières pour l'enlèvement et le traitement de ces produits qui sont classés comme déchets dangereux.

### **2-16.1.3.2 cas particulier des goudrons :**

Les goudrons ont été utilisés pendant des décennies en mélange avec du bitume dans les revêtements routiers. Les goudrons de houille, au contraire du bitume, contiennent des quantités importantes de substances toxiques, principalement des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des phénols. Les effets génotoxiques des HAP présents dans les goudrons ont été largement étudiés. Les premières observations de toxicité, ont été rapportées par Pott **Pepin [50]** en 1775 à propos de cancers de la peau des ramoneurs de cheminées. Le pouvoir cancérigène des produits de pyrolyse (goudrons, suies) a été reconnu, suite au développement de l'utilisation du charbon.

Six HAP sont classés par le Centre International de Recherche sur le Cancer **[51]** comme des cancérigènes probables pour l'homme.

De plus, le devenir des HAP dans l'environnement est influencé par leur :

- Volatilisation et leur transformation en dérivés dans l'atmosphère
- Transport, tributaire des facteurs de ségrégation tels que des mobilités différentes liées aux solubilités variables de ces composés, et des caractéristiques intrinsèques du sol.
- Absorption sur des particules de matière organique ou par des plantes.
- Bioaccumulation.
- Dégradation microbiologique.

**[51] IARC, 1978** « Monographie sur l'évaluation des risques cancérigènes pour l'homme des produits chimiques » Composés aromatiques polycycliques, 4<sup>ème</sup> partie : les bitumes, goudrons dérivés, les huiles de schistes et suies

Ces matériaux sont proscrits mais peuvent encore se retrouver dans d'anciennes infrastructures routières.

### **2-16.1.3.3 Cas particulier des bois traités :**

Les produits de préservation du bois contiennent habituellement trois éléments fondamentaux **[52]** : matières actives, solvant et agent de fixation. Les matières actives sont des pesticides qui doivent posséder une action fongicide et/ou insecticide vis-à-vis des agents d'altération concernés, on retrouve des substances minérales ou métalliques (Cu, F, Bo, As) et des substances de synthèse telles que les dérivés d'étain, les azotes, les pyrétroïdes, les ammoniums quaternaires et les carbamates. Certains produits sont interdits pour des raisons de toxicité mais encore présents dans les bâtiments. Les solvants visent à transporter les matières actives à l'intérieur du bois et à les y déposer : ce sont soit l'eau, soit des dérivés pétroliers. Les

agents de fixation travaillent par réaction chimique, notamment avec les sels métalliques, ou par collage avec des résines.

Le recyclage de tels déchets pose un réel problème dans la mesure où ils peuvent contenir des substances dangereuses et toxiques pour la santé humaine et l'environnement, hormis le stockage éventuel, la combustion ou la thermolyse restent la seule solution envisageable actuellement

## **2-17 Les ajouts cimentaires**

### **2-17.1 Les ajouts inertes :**

Sont des produits qui n'ont aucune influence sur le processus de fabrication d'hydratation et de durcissement du ciment, ces ajouts finement broyés sont ajoutés au clinker avant le broyage [61].

### **2-17.2 Les ajouts actifs :**

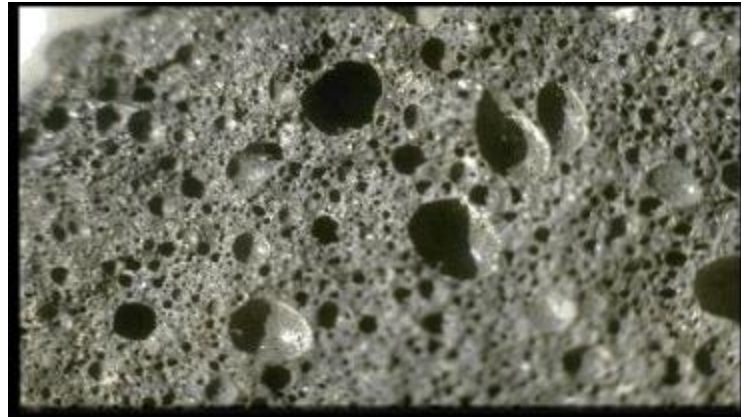
On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles finement broyées et ajoutées au clinker avant ou après le broyage, améliorent la résistance du ciment et son pouvoir hydraulique [53].

#### **2-17.2.1 Les pouzzolanes**

Une pouzzolane qui dans cet ouvrage est classée comme étant l'un des constituants du ciment, bien qu'en fait sous une forme latente seulement, est un matériau d'origine naturelle ou artificielle contenant de la silice sous forme réactive. Une définition plus explicite est donnée par la norme ASTM 618-94 qui décrit une pouzzolane comme un matériau siliceux ou silico-alumineux qui, intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, mais qui, finement broyée en présence d'humidité a des composés possédant des propriétés hydrauliques. Autrement dit, une pouzzolane est un matériau capable de fixer la chaux à la température ambiante et de former des composés ayant des propriétés hydraulique, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation. Il est indispensable que la pouzzolane soit sous forme finement broyée, car seul cet état permet à la silice de se combiner avec l'hydroxyde de calcium (produit par l'hydratation du ciment portland) en présence d'eau pour former des silicates de calcium stables ayant des propriétés hydrauliques. La silice doit être amorphe, c'est-à-dire vitreuse, étant donné que la silice cristallisée a une très faible réactivité. La teneur en verre peut être déterminée par spectroscopie de diffraction des rayons X ou par dissolution dans l'acide chlorhydrique et l'hydroxyde de potassium [6].

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes:

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie) [54].



**Photo 2-1** : Type Pouzzolane naturelle [53].

### Avantages

- ❖ Améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cette effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.
- ❖ Améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.
  - Accroissement de la résistance finale.
  - Légère diminution du retrait et du fluage.
  - Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
  - Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
  - Protection des armatures contre la corrosion.
  - Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
  - Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
  - Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [53].

### **2-17.2.2 Le laitier de haut fourneau**

- Le laitier de haut fourneau est un liant hydraulique fabriqué à partir du laitier de fonte et composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

L'hydratation initiale du laitier est très lente car elle doit être activée par les ions hydroxydes présents dans la solution des pores. Elle ne se produit donc pas si la solution interstitielle n'a pas atteint une certaine valeur de pH. Les laitiers de haut-fourneau ne produisent pas de portlandite lors de l'hydratation et ils ont un certain potentiel pouzzolanique (dix fois plus faible que celui de la fumée de silice). Le mûrissement humide prolongé est particulièrement important en raison de la faible vitesse initiale d'hydratation [55].

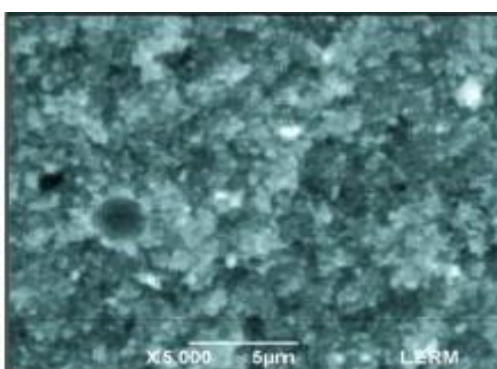
- Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à u sable vitreux.
- C'est un résidu de l'industrie sidérurgique. Il présente des caractéristiques hydrauliques latentes. Le laitier broyé s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [32]. Le Tableau I -6 indique une composition chimique typique pour un Laitier de Haut Fourneau (LHF).

### **2-17.2.3 Les Fumées de silice**

La fumée de silice est aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, mais le terme « fumée de silice » est le plus généralement utilisé. C'est un sous-produit des usines de fabrication d'alliages de silicium et de ferrosilicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le  $\text{SiO}$  entraîne par les gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous forme de particules de silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ) sphériques extrêmement fines ; d'où le nom de fumée de silice. La silice, sous forme de verre (amorphe), est très réactive et la petitesse des particules accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment portland. Les très petites particules de fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides. Lorsque le four comprend un système de récupération de chaleur efficace, la majeure partie de carbone est brûlée si bien que la fumée de silice est pratiquement sans carbone et de couleur claire. Toutefois, les fours n'ayant pas de système complet de récupération de chaleur laissent échapper un peu de carbone dans la fumée, qui présente par conséquent une couleur foncée [62]. Les fumées de silice (FS) sont un sous-produit industriel provenant de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Les

fumées de silice sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion. Elle s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000°C. Une fois refroidie, elles se condensent pour être captée dans des poches de tissu [76]. Ensuite, elles seront traitées pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules. Le Tableau I -7 représente la composition chimique typique de la fumée de silice.

Conformément à la norme NF P18-502, la fumée de silice présente une densité de 2.1 une masse volumique apparent de 2240Kg/m<sup>3</sup>, une surface spécifique de 600Kg/m<sup>3</sup> et une surface spécifique BET de 18.2 cm<sup>2</sup> [57].



**Photo 2-2:** Aspect d'une matrice contenant des fumées de silice (photo MEB)

**Tableau 2-12:** Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [58].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Accroissement des résistances mécaniques</li> <li>✓ Affinement de la structure poreuse</li> <li>✓ Diminution des coefficients de diffusion</li> <li>✓ Diminution du pH et des concentrations en alcalins de la solution interstitielle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice</li> <li>✓ Accroissement de la demande en eau</li> <li>✓ Accroissement du retrait endogène</li> </ul>

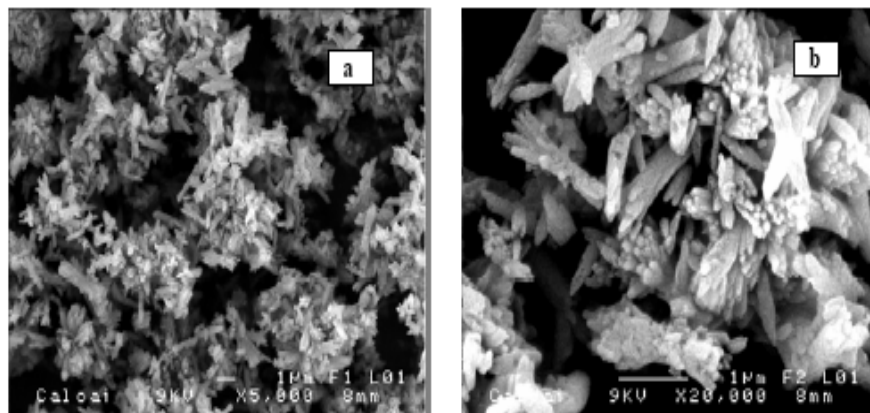


#### 2-17.2.4 Les fillers calcaires

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), s'il réagit de calcaires dolomitique.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite, vaterite) [59].

Les particules de calcaire se présentent sous forme de rosaces, constituées de plusieurs plaquettes enchevêtrées (*Photo I-5*) (a x 5 000) et (b x 20 000).



**Photo 2-3 :** Observation au MEB du calcaire.MEB JEOL 6400. Microanalyses EDS Oxford Inca. [59]

Les caractéristiques granulométriques sont mesurées à la granulométrie laser CILAS 1 180. Le calcaire utilisé a une Surface Spécifique Blaine de  $16\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ . Le point essentiel qui émerge des résultats granulométriques se résume par une grande finesse, les dimensions de ses particules ne dépassent guère les  $6\text{ }\mu\text{m}$ .

**Tableau 2-13:** Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [58]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Affinement de la structure poreuse</li> <li>✓ Réduction de la chaleur l'hydratation</li> <li>✓ Diminution de la perméabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Retard de prise</li> <li>✓ Augmentation du retrait endogène</li> </ul>

## 2-18 Durabilité du béton à base de granulats recyclés

Les études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités des agrégats recyclés sur les propriétés du béton à base de granulats recyclés. Cependant, certaines études ont montré que le béton à base de granulats recyclés est beaucoup plus perméable que le béton à base de granulats naturels, donc est un béton moins résistant à un degré satisfaisant aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration.

Il a noté que les propriétés de durabilité peuvent être améliorées par l'utilisation des cendres volantes, fumée de silice condensée, etc.

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons. L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation et l'absorption d'eau est la tare essentielle qui compromet la durabilité.

L'absorption d'eau par immersion et le volume total des pores sont considérés comme les meilleurs indicateurs de la longévité potentielle du béton que l'absorption par capillarité qui donne une indication macroscopique du réseau poreux puisque le béton n'est pas totalement en état de saturation d'eau. WIRQUIN & ALL [60] ont rapporté dans une étude, que le processus d'absorption d'eau d'un béton recyclé est similaire à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Toutefois, les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau.

Cela est dû à la taille plus grande des gros capillaires et à la proportion en volume plus importante des petits capillaires, ce qui les rend a priori plus vulnérables à la pénétration des agents agressifs. Ceux-ci sont sous forme d'eau, d'ions ou de gaz qui pénètrent dans le béton et peuvent changer la cinétique de dégradation du béton pendant la durée de vie de l'ouvrage. Les pathologies les plus abordées par la littérature pour le cas du RAC sont ; la carbonatation ; l'alcali-réaction et le gel-dégel. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une

dureté beaucoup plus faible que le granulats naturels, affecte davantage cette dureté, donc sa qualification [61].

## **2-18.1 Résistance aux eaux agressives**

### **2-18.1.1 Définition**

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, sont d'ordre chimique ou physique. Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, bases et à solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en associations avec cette dissolution la formation des composés nouveaux.

Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives aux frottements, aux chocs thermiques et aux gonflements ou aux retraitants, entraînant l'érosion et la fissuration du béton. L'enquête OCDE (organisation de coopération et de développement économique), indique que les plus importantes causes de dégradation relevées sur 800000 ponts de par le monde, sont : contaminations par les chlorures et attaque par les sulfates.

L'utilisation de ciments contenant des additions semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces additions nous permet d'augmenter la capacité des bétons à résister à l'attaque chimique de son environnement agressif, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs [62].

### **2-18.1.2 Eaux contenant des sulfates**

Lorsque le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium et calcium. Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de  $\text{CaSO}_4$  attaque le béton à cause de la réaction entre  $\text{CaSO}_4$  et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en  $\text{CaSO}_4$  et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , comme le cas des pâtes de ciment portland [62].

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que  $\text{CaSO}_4$  puisqu'il réagit non seulement avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'étréangéité expansive. L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [63].

Les additions des pouzzolanes naturelles et des fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact [63].

### **2-18.1.3 Eaux contenant des chlorures**

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur de l'eau en chlorure est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton [63].

Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorures de sodium et calcium, qui a largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif [63].

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment [62].

Le lessivage de chaux CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments portland. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme C-S-H avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments portland et diminue dans ceux qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane.

Une solution concentrée de 30%  $\text{CaCl}_2$  endommage les pâtes et les mortiers de ciment portland, avec ramollissement de la surface, fissuration, non seulement après plusieurs cycles de séchage et mouillage, mais aussi, après une simple submersion. Les pâtes de ciment pouzzolanique montrent une meilleure résistance aux solutions concentrées de chlorure que celle obtenu par le ciment portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés [63].

Les chlorures pénètrent au sein du béton à travers des microfissures et par diffusion dans l'eau contenue dans la pâte de ciment et dans les pores d'agrégat. Supposant que le béton ne possède pas de microfissures, la pénétration se produit par diffusion. Les bétons à base des ciments pouzzolaniques s'opposent généralement à la pénétration d'ions de chlorure, contrairement au ciment portland. Ceci s'explique par le fait que les ciments contenant des matériaux pouzzolaniques sont capables d'immobiliser (dans les aluminates et les silicates) une quantité de

Cl<sup>-</sup> plus grand que celle dans le ciment portland, ainsi que la diffusion de Cl<sup>-</sup> dans les ciments pouzzolaniques est ralentie [64].

#### 2-18.1.4 Eau de mer

L'eau de mer a une forte teneur en sel (3.5% environ) avec une prédominance de chlorure et de sulfate. Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes : dissolution, lixiviation, réaction d'échange de base, précipitation des composés insolubles, cristallisation des sels expansifs [65].

Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante :

##### ➤ Action des chlorures

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers des bétons armés, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre partie se combine au C<sub>3</sub>S sous forme de monochloroaluminate de calcium **C<sub>3</sub>A.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O**.

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite suivant la réaction d'échange :



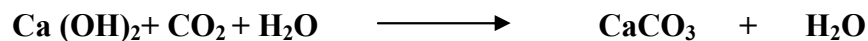
La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le CaCl<sub>2</sub> réagit avec les aluminates pour former de monochloroaluminate.

##### ➤ Action des sulfates de magnésium

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca<sup>2+</sup> par les ions Mg<sup>2+</sup>, soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

##### ➤ Action du dioxyde de carbone

Il réagit sur la portlandite selon la réaction :



Le carbonate de calcium se précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmatent les pores. Les actions de chacun des ions ne sont pas cumulatives. Le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former de l'ettringite. Elle-même, en présence de silice dissoute et de carbone, il se transforme partiellement en thaumasite (**Ca. SiO<sub>3</sub>.CaSO<sub>4</sub>.CaCO<sub>3</sub>.15H<sub>2</sub>O**). C'est l'interférence des différents ions qui explique l'agressivité de l'eau de mer sera bien plus faible que celle des eaux sulfatées [66].

La thaumasite n'est détectée qu'en solution solide avec l'ettringite. Sa formation cause une dégradation du béton qui se manifeste par une expansion et une fissuration, dans un premier

temps, et par une destruction des C-S-H par la suite. La formation de la thaumasite est encore plus destructive que celle de l'ettringite, car d'abord la quantité de thaumasite qui peut se former est beaucoup plus grande que celle de l'ettringite à cause des constituants qui rentrent dans sa composition (silicates, carbonates, sulfates, chaux et eau) et ensuite, la formation de la thaumasite peut causer la consommation des silicates et du calcium des C-S-H [67].

Selon **Mehta [64]**, le remplacement des ions  $\text{OH}^-$  par des ions  $\text{Cl}^-$  réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive .

Par ailleurs, de fait de leur coefficient de diffusion relativement élevé, les chlorures pénètrent rapidement dans le béton et consomment une partie des aluminates en formant du monochloroaluminate non expansif. Toutefois, les chloroaluminates instables en présence de sulfate, tendent à se transformer en ettringite expansive plus ou moins lessivée par l'eau de mer.

**Locher [68]**, attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton. Cependant la pénétration d'ions de chlorure est beaucoup plus faible quand les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers utilisés à la place du CPA.

Les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers, grâce à leur pâte plus compacte et à cause de leur faible teneur en aluminates de calcium hydratés et de CH, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments Portland à l'attaque des sulfates [69].

## **2-18.2 Résistance au gel/dégel**

### **2-18.2.1 Le processus gel/dégel**

Il faut distinguer deux types de dégâts liés au gel : le processus gel/dégel intervenant au cours du vieillissement de la structure et le gel du béton au moment du coulage à basse température [70]. L'effet d'éclatement provoqué par l'eau de geler est la cause principale des dégâts du béton dus au gel quand le degré de saturation dépasse 90%. Ce phénomène se produit lorsque le béton en surface, se gorge d'eau et gèle de façon répétée.

Les pores capillaires absorbent l'eau de la surface du béton. Si l'eau gèle, l'accroissement de volume vaut 9% du volume d'eau. Dans le cas d'une formation de glace dans un pore complètement rempli, l'accroissement de volume va générer une pression hydraulique qui va créer un éclatement du béton en surface.

Influence combinée du gel et des sels de déverglaçage (ouvrages concernés : piles de ponts, talus).

La réaction du sel avec la glace est une réaction endothermique et crée un refroidissement plus rapide de la structure.

Les sels de déverglaçage provoquent une absorption plus rapide de l'eau.

Le point de congélation de l'eau dépend directement de la teneur en sel

Si le refroidissement se poursuit, la couche intermédiaire va également geler mais la pression de congélation qui en résulte ne pourra pas s'affaiblir dans les couches voisines déjà gelées et cela peut conduire à l'éclatement de la couche superficielle.

- Les dégâts visibles dus au gel :

Un faïençage superficiel.

- Moyens d'auscultation pour déterminer si le béton est gelé :

Seule une analyse visuelle peut permettre de déterminer si un béton a été gelé. La matrice du béton est plus claire et on observe également une mauvaise interface granulats/matrice au MEB et le béton est assez poreux.

### **2-18.2.2 Influence des conditions environnementales sur la dégradation au gel-dégel**

Les dégradations au gel, et plus particulièrement l'écaillage, se produisent majoritairement dans des régions humides (surface du matériau saturée en eau) ou les conditions hivernales sont rigoureuses (gel sévère) et où l'utilisation des sels de déverglaçage est importante (qualifiée de fréquent ou très fréquent) [71]. La norme française XP-P-18-305 définit trois classes de gels :

- Faible : pas plus de deux jours par an avec une température inférieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ ,
- Sévère : plus de 10 jours par an avec une température inférieure à  $-10^{\circ}\text{C}$ ,
- Modéré : entre faible et sévère.

L'importance du salage est définie dans le fascicule 65-A. Le salage est dit fréquent lorsqu'il y a entre 10 et 30 jours de salage par an très fréquent pour plus de 30 jours de salage par an.

Il faut distinguer 2 types de dégâts liés au gel : le processus gel/dégel intervenant au cours du vieillissement de la structure et le gel du béton au moment du coulage par faible température.

Dans la suite de cette partie, les conséquences des conditions hivernales (cycles de gel-dégel), de l'humidité de l'air et des sels de déverglaçage sur l'endommagement au gel sont étudiées séparément.

### **2-18.2.3 Les cycles de gel-dégel**

L'endommagement de surface est augmenté par une température minimale basse (dans la gamme allant de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $-20^{\circ}\text{C}$ ) est une durée de sollicitation longue [72] [73] [74]. Cet effet est plus sensible sur les bétons de résistance intermédiaire (résistance en compression de l'ordre de 50 MPa)

que sur les BHP (résistance en compression supérieure à 70MPa) et les bétons ordinaires (résistance en compression de 20 à 40 MPa) [75].

Le taux de descente en température ne semble pas avoir une importance majeure [72]. Cependant une légère augmentation de l'écaillage semble se produire pour de faibles taux de gel [73].

On notera des différences notables sur le nombre et la durée des cycles de gel dégel appliqués : 300 cycles de 4-h pour le gel interne, 56 cycles de 24h pour l'écaillage.

## 2-19 Déformabilité des bétons

### 2-19.1 Définition

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Le béton est un matériau en évolution: ses propriétés se modifient constamment au cours de son existence, l'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation [Venuat 1989][84]. Le béton soumis à l'action d'une charge assez faible subit une déformation pratiquement instantanée élastique, réversible. Il suit la loi de *Hooke* bien connue. ( $\sigma = E \times \varepsilon$ ).

Avec:  $\sigma$  : contrainte appliquée;  $E$  : module d'élasticité;  $\varepsilon$  : déformation.

Au delà d'une certaine charge apparaît une zone plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation permanente. Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la viscosité du béton qui est très élevée intervient. Il y'a fluage du béton, il se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. La compacité joue un rôle important. Certains auteurs ont trouvé qu'une revibration du béton diminuait sensiblement à la fois le retrait et le fluage [Venuat 1989][84]. Il a été prouvé par voie expérimentale que pour pouvoir obtenir des bétons basiques à base de laitier granulé possédant une résistance suffisante ainsi que de bonnes caractéristiques de déformation (module d'élasticité initial), le liant devrait être dosé à 340 - 350 kg par unité de volume, la macrostructure est très compacte où les agrégats sont bien liés au conglomérat fin ainsi les grains d'agrégats sont répartis régulièrement [Mezghiche 1996][85]. Cette étude permis de préciser un certain nombre de point :

- 1 - Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- 2 - La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle  $\eta = 0 - 0.5$ .
- 3 - La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations est curviligne dans l'intervalle  $\eta = 0.5 - 0.9$ , ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.



4 - Une attention particulière doit être prêtée au choix optimal de la microstructure des bétons de manière à ce que la résistance et la déformabilité s'y combinent convenablement. En négligent ce facteur on risque de compromettre les caractéristiques de déformation que ce soit celles d'un béton au laitier basique ou de toute autre sorte du béton.

### **2-19.2 Déformations instantanées**

La courbe contrainte-déformation s'obtient par enregistrement de  $F_{bc} - \varepsilon_{bc}$  au cours d'un essai de compression sur éprouvette ( $16 \times 32$ )  $\text{cm}^2$  :

D'après [Gabrysiak][86]., on définit un module de déformation instantanée sécant  $E_{ij}$  pour une contrainte de courte durée  $t < 24$  h.  $E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$  (MPa). Avec,  $f_{cj} = 1.1 f_{c28j}$ . Un béton de 40 MPa de résistance a donc un module de déformation longitudinale instantané de l'ordre de 38000 MPa.

En compression, l'endommagement est visible sous forme de microfissures à l'interface pâte/granulat à partir de contraintes comprises entre 30 et 50 % de la résistance (figure 3.2) selon le type du béton. La microfissuration est issue du déplacement relatif entre le mortier et les inclusions granulaires [Bascoul1996], HSU [T.T.C. 1963], [Smadi1989] et [Shah 1987] [87, 88, 89 et 90].

### 3- MATERIAUX ETUDIÉS ET METHODES EXPERIMENTALES

#### 3-1. Matériaux utilisés

##### 3-1-1- Le ciment

Tous les bétons et mortiers ont été fabriqués avec deux types de ciment provenant de la cimenterie de Ain Touta (wilaya de Batna) à savoir le CPJ-CEM II/A 42.5 et le CPA-CEM I 42.5 ES dont les caractéristiques sont données au Tableau 3-1

**Tableau 3-1** : Caractéristiques des ciments

Nomination Caractéristiques	CPJ-CEM II/A 42.5	CPA-CEM I 42.5 ES
Masse Volumique Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.215	1.100
Masse volumique Absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.150	3.190
Surface spécifique (BLAINE) (cm <sup>2</sup> /g)	4000	4200
Temps de début de prise (heures)	2h : 03	2h : 12
Temps de début de prise (heures)	3h : 00	3h : 08
La résistance à la compression à 28 jours (MPA)	47	43

Les compositions chimiques et minéralogiques de ces ciments sont présentées aux tableaux 3.2 et 3-3.

**Tableau 3-2** : Composition chimique des ciments

Composition chimique (%) :												
1. CPJ-CEM II/A 42.5												
2. CPA-CEM I 42.5 ES												
Type de ciment	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Chaux libre	PAF	Résidu insoluble
1	20.34	5.37	3.00	61.69	1,80	2.20	0.027	0.76	0.14	0.97	5.03	1,12
2	22.17	4.53	5.04	64.55	1.02	1.34	0.00	0.42	0.21	1.09	0.94	0.80

**Tableau 3-3** : Composition minéralogique des ciments

<b>Composition minéralogique (%)</b>				
<b>Type de ciment</b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>
<b>CPJ-CEM II/A 42.5</b>	58.3	14.6	8.7	11.26
<b>CPA-CEM I 42.5 ES</b>	51.20	21.16	3.10	12.42

### 3-1-2- Les granulats (naturels et recyclés) :

Pour le besoin de l'étude, nous avons jugé important d'utiliser deux sources de matériaux de démolition (bétons de ciment concassés) et (déchets de brique concassés) ;

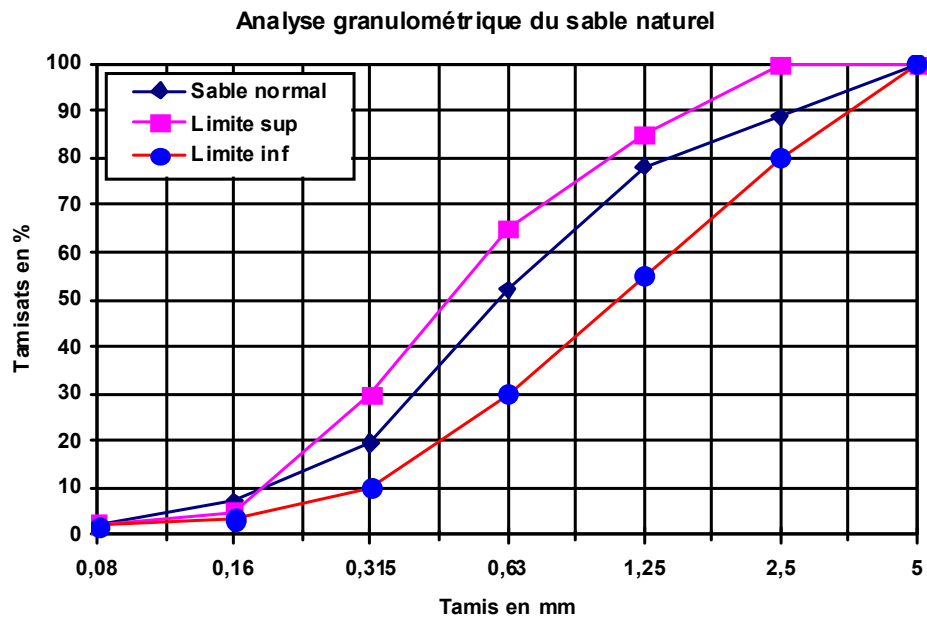
#### 3-1-2-1. Le sable :

- Sable naturel (SN) 0/5 provenant de Oued-Lioua (Biskra).
- Sable recyclé (SDB) 0/5 produit par le concassage de béton de ciment d'un vieil immeuble situés à Biskra.
- Sable recyclé (SDBR) 0/5 produit par le concassage de la brique cuite de la briqueterie des Frères Amouri (Biskra).

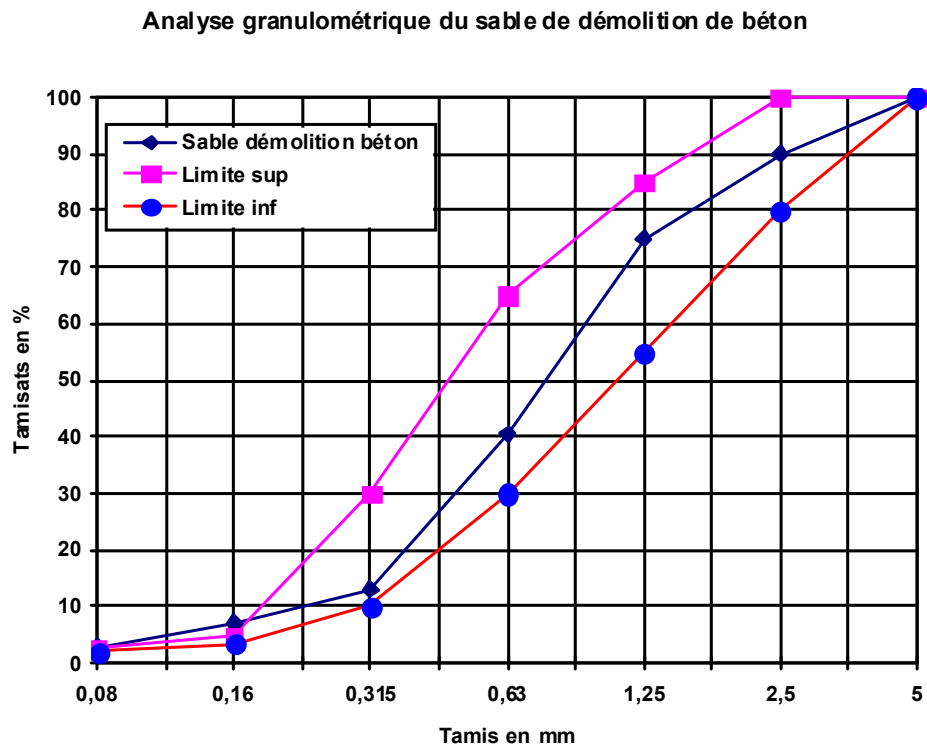
Le concassage des deux types de sables recyclés était assuré après tirage des impuretés par un marteau.

#### 3-1.2.2. le gravier :

Nous avons utilisé des pierres concassées de la région d'Ain Touta (Wilaya de Batna), la figure 3.4 présente les résultats de l'analyse granulométrique.



**Figure 3-1** : Courbe granulométrique du sable naturel (SN)



**Figure 3-2** : Courbe granulométrique du sable recyclé (SDB)

Analyse granulométrique du sable de démolition de brique rouge

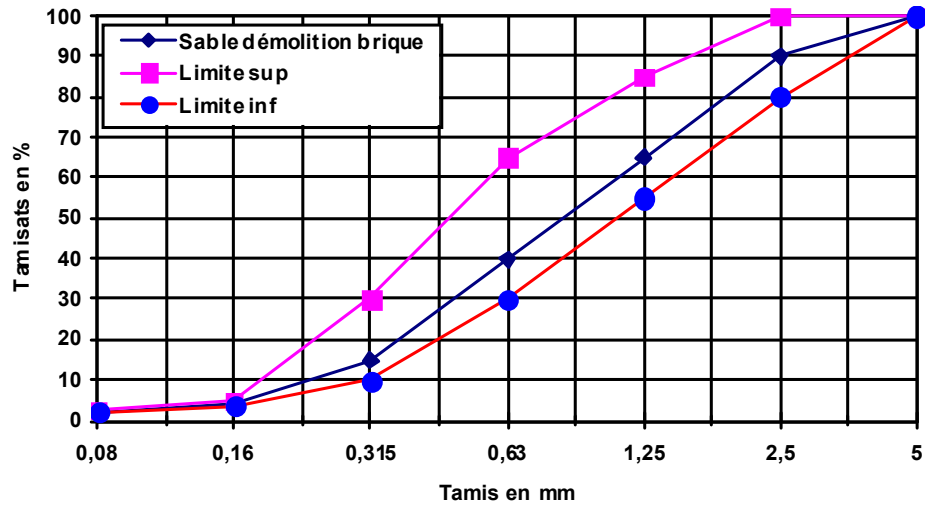


Figure 3-3. Courbe granulométrique du sable recyclé (SDBR)

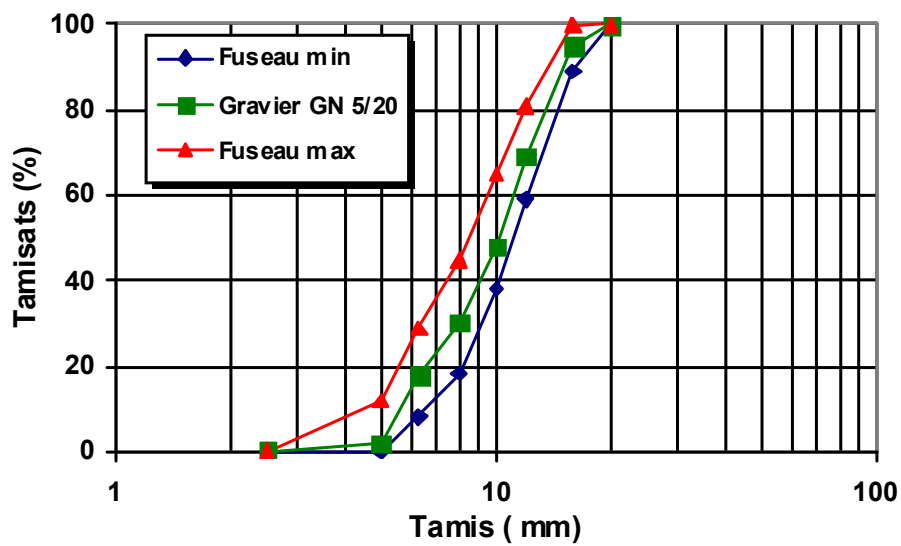
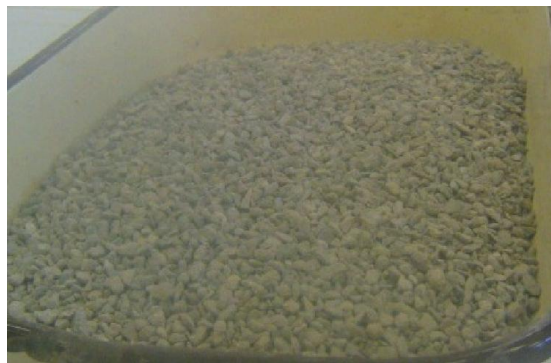


Figure 3-4 : Courbe granulométrique des graviers

### 3-1.3 Granulométrie et formes de grains

L'étude granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF EN 933-1 [Normes AFNOR], qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimensions inférieures ou égales à 80mm, ou le gravier et le sable passant à travers une série de maille décroissante dont on pèse le refus pour chaque tamis. Les courbes granulométriques des graviers et sables utilisés sont présentées dans les figures : 3.1, 3.2 et 3.3. Nous remarquons d'après ces courbes granulométriques que les différents sables utilisés sont acceptables pour la confection du béton hydraulique.

Le module de finesse est de 2.53, 1.85 et 1.74 respectivement pour les sables naturels (SN), le sable recyclé (SDB) et le sable recyclé (SDBR).



**Photo 3-1** : Sable recyclé (SDB) 0/5 produit par le concassage de béton



**Photo 3-2** : Sable recyclé (SDBR) 0/5 produit par le concassage des déchets de briques

## 3.1.4 Caractérisation des sables utilisés

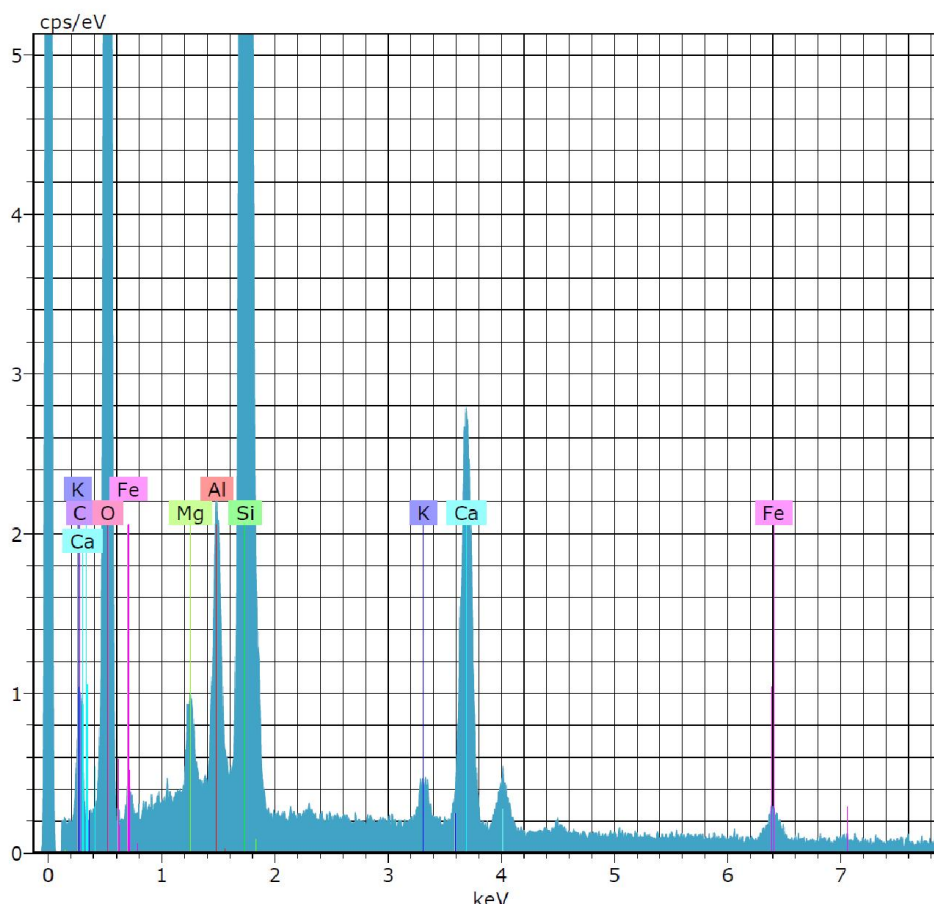


Figure 3-5 : Diagramme de diffraction X du sable naturel

Tableau 3-4 : Analyse minéralogique du SN

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	7.05	6.86	10.70	1.39
O	8	K-series	58.81	57.20	67.02	6.97
Mg	12	K-series	0.66	0.64	0.49	0.07
Al	13	K-series	1.77	1.72	1.20	0.12
Si	14	K-series	25.77	25.07	16.73	1.13
K	19	K-series	0.62	0.61	0.29	0.05
Ca	20	K-series	7.12	6.92	3.24	0.24
Fe	26	K-series	1.01	0.98	0.33	0.07
Total:			102.80	100.00	100.00	

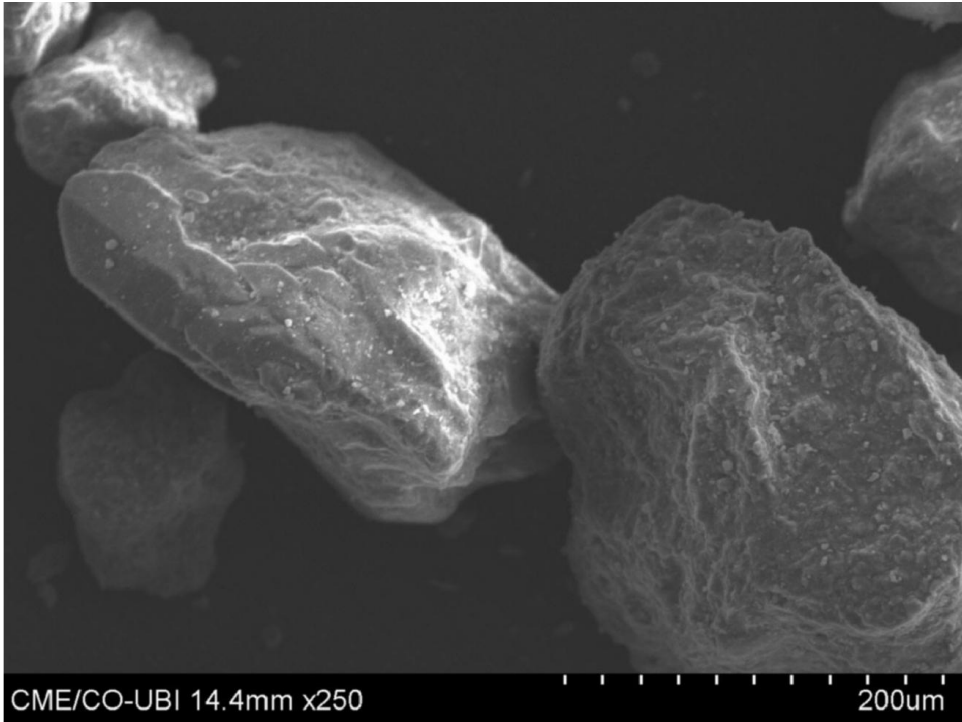


Photo 3-3 : *Sable naturel observé au MEB 5(X 250)*

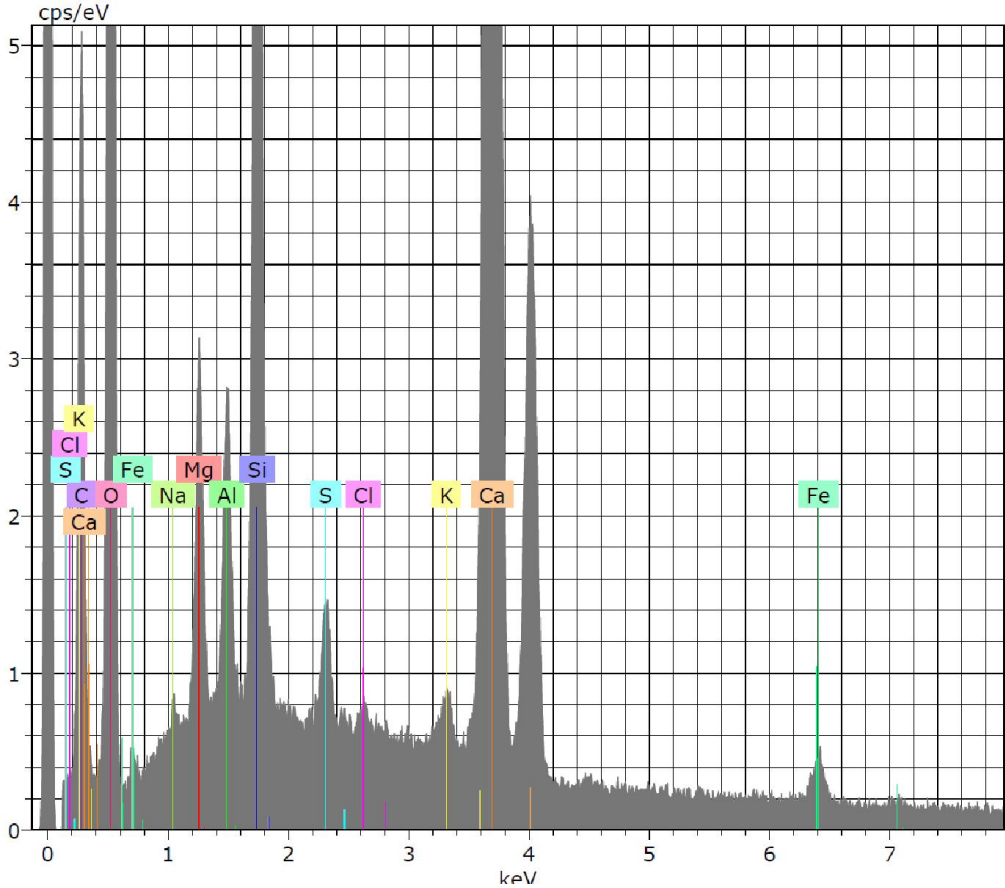
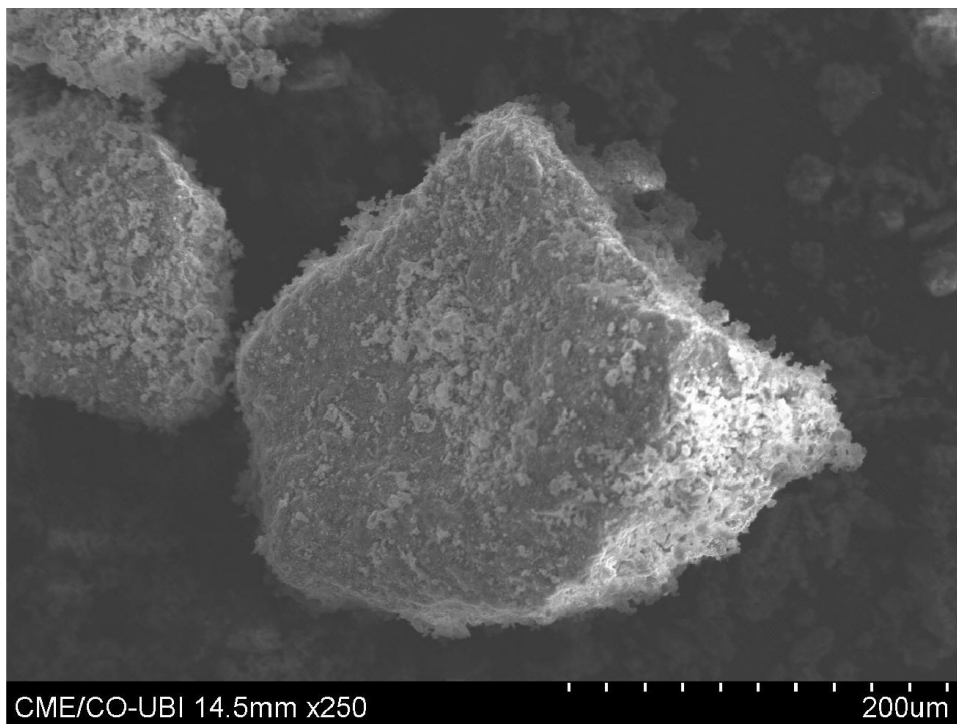


Figure 3-6 : Diagramme de diffraction X du sable de démolition de béton



**Tableau 3-5 : Analyse minéralogique du SDB**

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
O	8	K-series	24.05	33.49	53.89		0.00	0.00	2.87
Na	11	K-series	0.30	0.42	0.47	Na2O	0.56	0.41	0.05
Mg	12	K-series	1.72	2.40	2.54	MgO	3.97	2.85	0.12
Al	13	K-series	1.26	1.76	1.68	Al2O3	3.32	2.39	0.09
Si	14	K-series	4.59	6.39	5.86	SiO2	13.68	9.83	0.22
S	16	K-series	0.56	0.79	0.63	SO3	1.96	1.41	0.05
Cl	17	K-series	0.14	0.20	0.14		0.20	0.14	0.03
K	19	K-series	0.33	0.46	0.30	K2O	0.55	0.40	0.04
Ca	20	K-series	37.80	52.62	33.80	CaO	73.63	52.88	1.13
Fe	26	K-series	1.06	1.48	0.68	Fe2O3	2.12	1.52	0.06
Total:			71.83	100.00	100.00				



**Photo 3-4 : Sable de démolition de béton observé au MEB (X 250)**

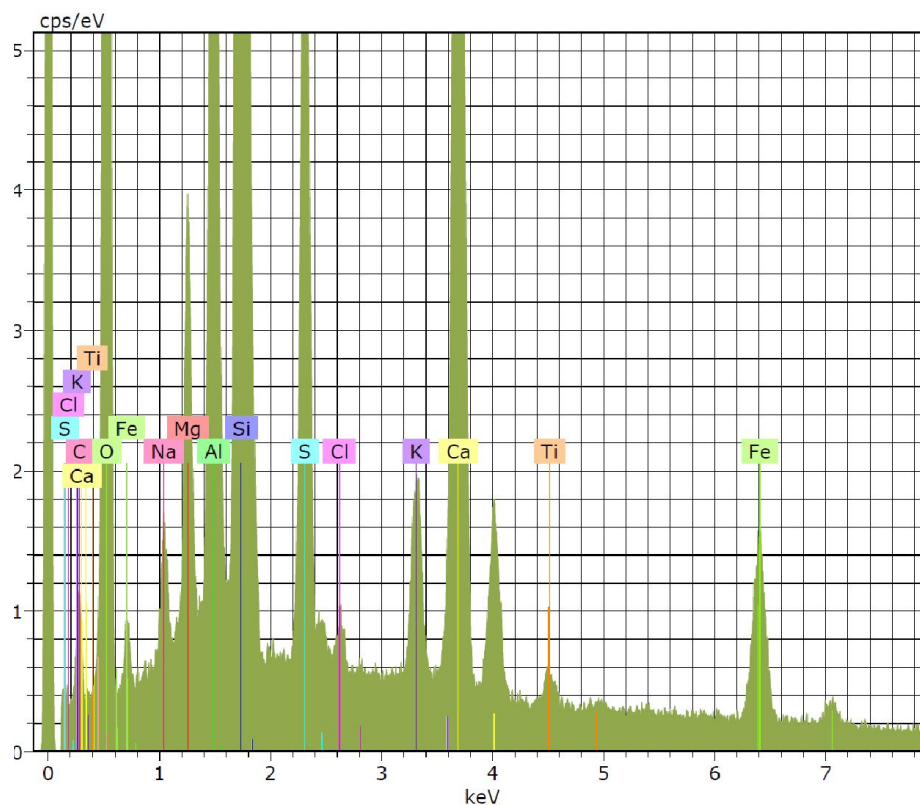
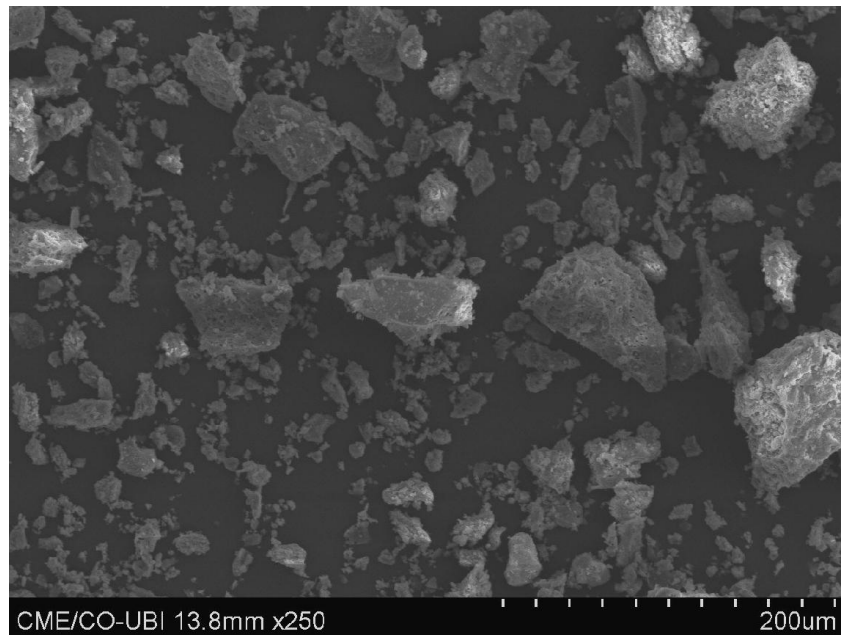


Figure 3-7 : Diagramme de diffraction X du sable de démolition de brique

Tableau 3-6 : Analyse minéralogique du SDBR

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
O	8	K-series	39.90	45.89	62.64		0.00	0.00	4.60
Na	11	K-series	0.81	0.93	0.88	Na2O	1.25	1.09	0.08
Mg	12	K-series	1.72	1.98	1.78	MgO	3.28	2.86	0.12
Al	13	K-series	5.85	6.72	5.44	Al2O3	12.71	11.05	0.31
Si	14	K-series	18.63	21.43	16.66	SiO2	45.84	39.86	0.82
S	16	K-series	3.83	4.40	3.00	SO3	11.00	9.56	0.16
Cl	17	K-series	0.23	0.26	0.16		0.26	0.23	0.04
K	19	K-series	1.27	1.46	0.81	K2O	1.75	1.53	0.07
Ca	20	K-series	11.18	12.86	7.01	CaO	18.00	15.65	0.35
Ti	22	K-series	0.35	0.40	0.18	TiO2	0.67	0.58	0.04
Fe	26	K-series	3.18	3.66	1.43	Fe2O3	5.24	4.55	0.12
Total:			86.95	100.00	100.00				



**Photo 3-5 :** *Sable de démolition de brique observé au MEB (X 250)*

### 3-1.5 Masses volumiques :

Les masses volumiques apparentes et spécifiques des différents granulats étudiés naturels ou recyclés sont mesurées d'après la norme NF P 18-554 et 555 [Normes AFNOR], les résultats sont résumés dans le **tableau 3-7**

**Tableau 3-7 :** Masses volumiques des granulats étudiés :

	<b>GN</b>	<b>SN</b>	<b>SDB</b>	<b>SDBR</b>
<b>Masse volumique apparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1420	1560	1244	1160
<b>Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2740	2550	2300	2000

Nous remarquons que la masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, ce qui est conforme avec les résultats trouvés par d'autres chercheurs [1, 2, 3], en moyenne une chute de 10% de la masse volumique des granulats de béton concassés et de 18% pour les granulats de brique concassés par rapport au granulats originaux a été observée. Cette diminution est principalement due à la masse d'ancien mortier de faible densité recouvrant les particules des granulats de béton concassé, tandis que la chute de masse volumique des granulats de brique est très remarquable et ses granulats peuvent être classés comme granulats légers.

### 3-1.6 Absorption d'eau :

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555 [Normes AFNOR].

Les résultats de cet essai sur les granulats étudiés sont portés **au tableau 3-8**.

**Tableau 3-8 :** Les résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés

	<b>GN</b>	<b>SN</b>	<b>SDB</b>	<b>SDBR</b>
<b>Abs %</b>	1.3	11	14	16

Nous remarquons que les sables recyclés absorbent beaucoup plus que les sables naturels. Cela du à la présence d'ancien mortier dans les granulats de béton concassé. Par contre, il semble que pour les granulats de brique est du à la porosité élevée de ces derniers.

### 3-1.7 Propreté des granulats:

- **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 (1991) [Normes AFNOR] et les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau 3.9.

**Tableau 3-9 :** Pourcentages d'impureté dans les granulats fin

	<b>SN</b>	<b>SDB</b>	<b>SDBR</b>	<b>Critère de la norme</b>
<b>Equivalent de sable (ES)</b>	70.7	78.00	82.00	$\geq 70$ (65 et 60 pour les sable concassé ou broyé)

Nous remarquons une augmentation de l'équivalent de sable des bétons recyclés de 10 à 15% respectivement pour les sables (SDB) et ( SDBR) par rapport à celui du sable naturel, ceci confirme les résultats d'autres chercheurs où l'augmentation était de 10% pour les sables recyclés de béton démolis et de 18 à 20 pour les sables recyclés de brique concassé [1, 4]

### 3-1.8 Compacité et porosité des granulats

La compacité est définie par le rapport du volume de matière pleine au volume total. Alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité.

«  $P = 1 - C$  ». L'essai est réalisé selon la norme NFP18-554 [Normes AFNOR]

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3-10.

**Tableau 3.10 : Compacité et porosité des granulats fins**

	SN	SDB	SDBR
<b>Compacité (%)= MVA/MS</b>	60	50.00	40.00
<b>Porosité (%) : P=1-C</b>	37	48.00	58.50

**MVA : Masse volumique apparente.**

**MS : Masse volumique spécifique.**

La diminution de compacité par rapport au sable naturel est de l'ordre de 18%, pour les sables de béton concassé (SDB) et de 34% pour le sable de brique concassé (SDBR)

La compacité du sable pour le béton hydraulique selon Dreux [5] doit être entre 60 et 70%. Les résultats ci-dessous montrent que les sables recyclés (SDB et SDBR) sont assez peu compacts et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au sable naturel ce qui peut engendrer une ségrégation du béton.

### 3-1.9. Adjuvants

Lors de cette étude nous avons utilisé **un super plastifiant** nommé **MEDAFLOW 30**, provenant de GRANITEX-Oued Smar (Wilaya d'Alger), il est conforme aux exigences des normes NFP 18333 et NFP 18336. Ce produit est un réducteur d'eau. Il est compatible avec tous les types de ciments. Ses caractéristiques sont présentées au tableau 3.11.

**Tableau 3-11 : Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW 30**

Forme	Couleur	Densité	PH	Teneur en chlore
Liquide	jaunâtre	1.18	6 - 6.5	< 1g/l

### 3-1.10. Eau de gâchage

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est celle provenant du robinet en principe exempte d'impuretés. Il s'agit d'une eau potable. Sa température n'est pas contrôlée lors des gâchées, quoique le béton obtenu à une température assez constante d'un mélange à l'autre, de 18 à 20°.

## 3-2 Ajouts minéraux

### 3-2.1 Le Laitier

Dans notre étude on a utilisé le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie d'AIN-TOUTA.

#### Analyse du laitier

**Tableau 3-12 :** Composition chimique du laitier.

Les composantes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	MnO	S
(%)	40,80	5,2	0,53	43,01	6,4	3,02	0,8

La qualité du laitier est appréciée par deux modules

**Tableau 3-13 :** Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma)

Module	Formule	Valeur	Remarque
Mb	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	1,074	Mb>1 donc le laitier est basique
Ma	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	0,127	—

#### Propriétés physiques de laitier

- Masse volumique apparente = 1080 kg/m<sup>3</sup>.
- Masse volumique absolue = 2733 kg/m<sup>3</sup>.
- Surface spécifique = 3500 cm<sup>2</sup>/g.





**Photo 3-6:** Laitier avant et après broyage

### 3-2.2 Le filler calcaire

Les fillers proviennent de la carrière géante d'El Khroub, près de Constantine. Ils sont de nature calcaire. La composition chimique est représentée au-dessous.

**Tableau 3-14:** Composition chimique d'un filler calcaire.

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	NaCl	PF
0.58	0.02	0.06	55.80	0.06	0.08	0.56	43.53

#### Propriétés physiques de filler calcaire

- Masse volumique apparente = 1530kg/m<sup>3</sup>.
- Masse volumique absolue = 2720 kg/m<sup>3</sup>.
- Surface spécifique = 3000 cm<sup>2</sup>/g.



**Photo 3-7:** Filler calcaire forme de poudre

### 3-2.3 Fumée de silice

Elle est à base de microsilice provenant de la société «GRANITEX» sous forme de poudre grise. Cette Fumée de silice est désignée par le nom «MEDAPLAST HP». Ses caractéristiques physiques sont présentées au tableau II-12

**Tableau 3-15:** Caractéristiques physiques de la fumée de silice

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.5
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	1.87
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	20470



**Photo 3-8:** Fumé de silice forme de poudre

### 3-2.4 Pouzzolane

La pouzzolane provient de la région de Beni Saf à l'ouest de l'Algérie.

**Tableau 3-16:** Caractéristiques physiques de la pouzzolane.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.92
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.48
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3800



**Photo 3-9:** Pouzzolane avant et après broyage



### 3-3. MELANGES

Dans le cadre de cette étude on a deux types de mélanges :

- Le premier type consiste à l'étude des mortiers dans lequel ont été utilisés deux types de sable recyclés :

SDB : sable de démolition de béton concassé

SDBR : sable de démolition de brique concassée

et un sable naturel comme témoin, (SN)

Qui sont utilisées pour l'étude des mortiers et bétons le taux de substitution en sable recyclés (béton de démolition), (déchet de brique concassé) : 20%,30%,50%,70%. Le dosage en ciment : 300 ; 350 et 400 kg/m<sup>3</sup> pour deux types de ciment CPJ 42.5 et CRS 42.5. Pour les mortiers.

- Le deuxième type consiste à l'étude des bétons avec les mêmes sables recyclés et le sable naturel comme témoin avec les mêmes taux de substitution, et le dosage en ciment est 300-350-400-450kg/m<sup>3</sup> avec le même ciment utilisé pour les mortiers.

#### 3-3. 1. Etudes des mortiers

Après avoir défini les principales caractéristiques de tous les matériaux, l'étude de l'évolution des propriétés des mortiers en fonction de la qualité et nature de sable a été effectuée. La quantité d'eau de gâchage conditionne, en grande partie l'ouvrabilité d'un mortier. Le degré d'ouvrabilité s'il existait toutes fois un moyen de la spécifier et de le mesurer serait fonction de la maniabilité.

Pour les différentes substitutions, des quantités d'eau successives seront ajoutées aux mélanges jusqu'à obtention d'une maniabilité constante. Pour ce faire nous avons utilisé une table à secousses (photos 3-3) : le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenu

l'étalement en % est donné par la formule : 
$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Les tableaux 3-9 ; 3-10 et 3-11 : présentent la formulation des différents mélanges de mortiers pour des dosages de ciment respectifs 300;350et 400 kg/m<sup>3</sup>.

Notons que le calcul de la composition des mortiers a été fait par la méthode des « volumes absolus ».

**Tableau 3-17 :** Composition des mélanges de mortier pour un dosage de ciment de  $300\text{kg/m}^3$  pour  $1\text{m}^3$

Proportion SN/SDB/SDBR	Ciment $\text{kg/m}^3$		Eau $\text{l/m}^3$		Sable $\text{kg/m}^3$	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	300	300	150	150	1925	1930
80/20/0					1887	1889
70/30/0					1868	1871
50/50/0					1831	1834
30/70/0					1793	1796
80/0/20					1842	1845
70/0/30					1800	1803
50/0/50					1717	1720
30/0/70					1634	1637

**Tableau 3-18 :** Composition des mélanges de mortier pour un dosage de ciment de  $350\text{kg/m}^3$  pour  $1\text{m}^3$

Proportion SN/SDB/SDBR	Ciment $\text{kg/m}^3$		Eau $\text{l/m}^3$		Sable $\text{kg/m}^3$	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	350	350	175	175	1820	1824
80/20/0					1785	1788
70/30/0					1767	1770
50/50/0					1732	1735
30/70/0					1696	1700
80/0/20					1742	1746
70/0/30					1703	1706
50/0/50					1624	1628
30/0/70					1546	1550

**Tableau 3-19 :** Composition des mélanges de mortier pour un dosage de ciment de  $400\text{kg/m}^3$  pour  $1\text{m}^3$

Proportion SN/SDB/SDBR	Ciment $\text{kg/m}^3$		Eau $\text{l/m}^3$		Sable $\text{kg/m}^3$	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	400	400	200	200	1720	1721
80/20/0					1683	1687
70/30/0					1666	1670
50/50/0					1632	1636
30/70/0					1600	1603
80/0/20					1642	1646
70/0/30					1605	1610
50/0/50					1531	1535
30/0/70					1457	1461

### **3-4. Confection des éprouvettes**

Des moules prismatique (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> et des moules cubiques (7 x 7 x 7) cm<sup>3</sup> ont été réalisés pour les essais de compression et des moules prismatiques de (7 x 7 x 28) cm<sup>3</sup> pour les essais de flexion et retrait. La confection des éprouvettes est faite conformément aux normes EN 196-1. La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique a été à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage elles sont conservées dans l'eau à 20°C.

### **3-5 Programme des essais**

#### **3-5-1 Ouvrabilité**

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de table à secousse ; le mortier, une fois mise en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenu. L'étalement en % est donné par la formule :

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$



**Photo 3-10 : Table à secousse**

### 3-5-2 Essais de Resistance à la compression et à la traction

Les essais sont souvent effectués sur prisme de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20°C.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Ces essais sont effectués sur une machine d'essai de compression équipée d'un dispositif de compression conformément à la norme NF P 15-301.



Photo 3-11: Eprouvette (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup>

### 3-5-3 Essai de retrait et gonflement

Les mesure de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (Demis des éprouvettes) confinent à la norme **NF P 15-433**. Les éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24h, placées dans un rétractomètre (photo) muni d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment.

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre, et dans l'eau à une température de 25 à 30°C et en humidité relative entre 60 à 70°.

On compare, à différents temps  $t$ , la variation de longueur d'une éprouvette 8 x 8 x 28 cm<sup>3</sup>, par rapport à sa longueur à un temps  $t_0$  pris pour origine.



Photo 3-12: Eprouvette pour l'essai de retrait

Un déformomètre tel que celui montré sur la Fig. 3-13 Équipé d'un comparateur permettant de réaliser Des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,001 mm. Une éprouvette de référence de 280 mm de Longueur doit permettre de régler le zéro du déformomètre Cette éprouvette en bois de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.



**Photo 3-13** : Appareil de retrait

### **3-6 Etude des bétons**

Elle consiste à l'étude des bétons avec deux types de sables recyclés et un sable naturel comme témoin avec les même taux de substitution .et le dosage en ciment est 300-350-400-450kg/m<sup>3</sup> avec deux types de ciments ( CPJ 42.5 ,CRS 42.5 ).

#### **3-6.1 Confection et cure des éprouvettes**

Des moules cubiques (10 x 10 x 10 cm) et cylindres (10 x 20) cm<sup>3</sup> ont été utilisés pour les essais de compression , des prismes ( **10 x 10x 50 cm** ) pour les essais de flexion, des moules ( **7 x 7 x 28 cm** ) déformabilité et des cylindres ( 16 x 32 cm) pour les essais de traction par fendages ainsi que la perméabilité. La confection des éprouvettes est réalisée conformément aux modalités des normes NF P 18-404 et 405 (déc. 1981). La conservation des éprouvettes a été faite 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).

Les mélanges de béton ont été réalisés avec un slump de 50 à 70 mm qui définit la classe de béton plastique indiquée par la norme NF P 18-305, tout en contrôlant la plasticité du béton. La quantité de ciment utilisée pour tous les mélanges a été variée de 300; 350; 400 et 450 kg par m<sup>3</sup>.

**Les tableaux 3-20÷3-23** : présentent la formulation complète des différents mélanges de béton pour des dosages de ciment respectifs de 300; 350; 400 et 450 kg /m<sup>3</sup> et pour un affaissement constant compris entre 5 et 7cm.

Notons que le calcul de la composition du béton a été fait par la méthode des « volumes absolus » élaborée par le professeur **B.Scramtaïv**.



**Photo 3-14:** Eprouvette cylindrique (10 x 20) cm<sup>3</sup>

**Tableau 3-20** : composition des mélanges de béton pour Aff=5-7cm avec un dosage de ciment C=300 kg/m<sup>3</sup>

Proportion SN/SDB/SDBR	Les quantités de matériaux utilisés pour 1 m <sup>3</sup> de béton							
	Ciment kg/m <sup>3</sup>		Eau l/m <sup>3</sup>		Pierres concassés kg/m <sup>3</sup>		Sable kg/m <sup>3</sup>	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	300	300	200	200	1240	1240	670	700
<b>80/20/0</b>			202	203			646	634
<b>70/30/0</b>			205	206			624	628
<b>50/50/0</b>			211	212			612	615
<b>30/70/0</b>			212	214			599	602
<b>80/0/20</b>			205	205			615	620
<b>70/0/30</b>			209	209			602	605
<b>50/0/50</b>			213	213			574	577
<b>30/0/70</b>			217	217			546	549

**Tableau 3-21** : composition des mélanges de béton pour Aff=5-7cm avec un dosage de ciment  
C=350 kg/m<sup>3</sup>

-Proportion SN/SDB/SDBR	Les quantités de matériaux utilisés pour 1 m <sup>3</sup> de béton							
	Ciment kg/m <sup>3</sup>		Eau l/m <sup>3</sup>		Pierres concassées kg/m <sup>3</sup>		Sable kg/m <sup>3</sup>	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	350	350	200	200	1240	1240	630	630
<b>80/20/0</b>			205	206			591	595
<b>70/30/0</b>			207	208			585	589
<b>50/50/0</b>			213	214			573	577
<b>30/70/0</b>			215	216			561	565
<b>80/0/20</b>			208	209			577	580
<b>70/0/30</b>			212	213			564	567
<b>50/0/50</b>			216	217			538	541
<b>30/0/70</b>			224	225			512	515

**Tableau 3-22**: composition des mélanges de béton pour Aff=5-7cm avec un dosage de  
Ciment C=400 kg/m<sup>3</sup>

Proportion SN/SDB/SDBR	Les quantités de matériaux utilisés pour 1 m <sup>3</sup> de béton							
	Ciment kg/m <sup>3</sup>		Eau l/m <sup>3</sup>		Pierres concassés kg/m <sup>3</sup>		Sable kg/m <sup>3</sup>	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	400	400	200	200	1240	1240	600	590
<b>80/20/0</b>			207	208			551	555
<b>70/30/0</b>			209	210			546	550
<b>50/50/0</b>			215	216			535	539
<b>30/70/0</b>			217	218			524	528
<b>80/0/20</b>			209	210			538	542
<b>70/0/30</b>			213	214			526	530
<b>50/0/50</b>			217	218			502	505
<b>30/0/70</b>			228	230			477	481

**Tableau 3-23:** composition des mélanges de béton pour  $A_{ff}=5-7\text{cm}$  avec un dosage de ciment  $C=450\text{ kg/m}^3$

Proportion SN/SDB/SDBR	Les quantités de matériaux utilisés pour $1\text{ m}^3$ de béton							
	Ciment $\text{kg/m}^3$		Eau $\text{l/m}^3$		Pierres concassés $\text{kg/m}^3$		Sable $\text{kg/m}^3$	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	450	450	200	200	1240	1240	540	550
<b>80/20/0</b>			208	210			512	516
<b>70/30/0</b>			210	212			507	511
<b>50/50/0</b>			215	216			496	500
<b>30/70/0</b>			220	220			486	490
<b>80/0/20</b>			210	212			500	504
<b>70/0/30</b>			214	215			488	492
<b>50/0/50</b>			218	220			465	496
<b>30/0/70</b>			230	235			443	447

### 3-6-2 Malaxage du béton [6]

Il est essentiel que les constituants de base (C; S; G et E) soient mélangés correctement afin de produire un béton frais dont la surface de tous les granulats sera enrobée de pâte de ciment et qui sera alors homogène à grande échelle et possédera par conséquent des propriétés uniformes. Le malaxage est effectué dans des malaxeurs ou à la main. Dans notre cas on a utilisé deux types de malaxage :

#### 3-6-2.1-Malaxage à la main [6]

Dans ce type de malaxage les granulats doivent être déposés en une couche uniforme sur une surface dure, propre et non absorbante. Le ciment est ensuite déposé sur les granulats et les matériaux secs sont mélangés en les retournant d'un bout à l'autre de la surface et en les recoupant avec la pelle jusqu'à ce que le mélange semble uniforme. Il faut retourner le mélange au moins trois fois. L'eau est ensuite ajoutée progressivement afin qu'elle ne s'écoule pas vers l'extérieur en entraînant le ciment hors de l'air de gâchage. Le mélange est retourné au moins trois fois jusqu'à ce qu'il ait une consistance et une couleur uniformes. Durant le malaxage à la main, il est impératif qu'aucune impureté provenant du sol ou de tout autre matériau ne soit mélangé au béton.



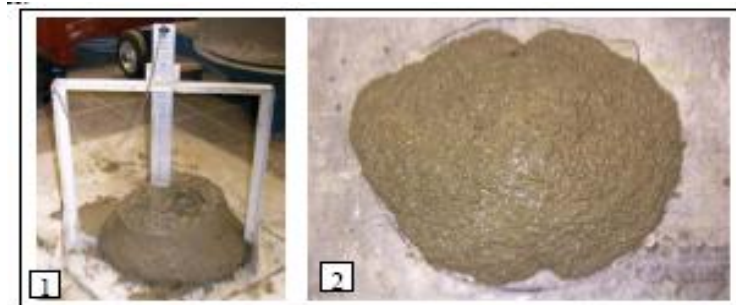
### 3-6-2.2. Malaxeurs à béton

Les malaxeurs à béton doivent, non seulement assurer un malaxage uniforme des constituants du béton, mais ils doivent également décharger le béton sans modifier cette homogénéité.

## 3-7 Programme des essais

### 3-7.1 Ouvrabilité

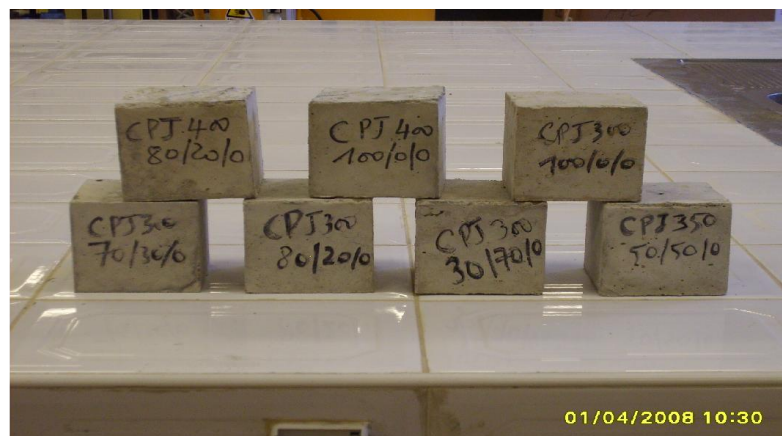
L'ouvrabilité a été mesurée par le Slump-Test conformément à la norme NF P 18-451 (déc. 1981). Tous les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité constante pour faciliter la comparaison entre eux.



**Photo 3-15 : Slump-Test**

### 3.7.2 Essai de la résistance à la compression

L'essai s'effectue sur une machine à compression conformément à la norme NF P 18-406. La résistance à la compression est déduite par la moyenne d'écrasement de trois éprouvettes cubiques de 10 cm pour chaque mélange, soit à 28 jours de cure



**Photo 3-16 : Epreuves cubiques (10 x 10 x 10) cm<sup>3</sup>**

### 3-7. 3. Essai de traction 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). L'essai s'effectue sur une machine de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvettes prismatiques ( $10 \times 10 \times 50$ )  $cm^3$  à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque type de béton.



**Photo 3-17:** Appareil de traction par flexion



**Photo 3-18 :** Echantillons prismatiques ( $10 \times 10 \times 50$ )  $cm^3$

### 3-7. 4. Essai de résistance à la traction par écrasement latéral (Brésilien)

L'essai Brésilien détermine la résistance à la traction par écrasement latéral des échantillons de béton. Cet essai a été effectué presque entièrement sur les bétons conventionnels, et ce pour la même raison décrite précédemment. C'est à dire un bris mécanique avec la première presse utilisée. Trois cylindres par échéance et par mélange ont été utilisés pour évaluer les différents mélanges. Les cylindres sont de dimension  $(16 \times 32) \text{ cm}^2$ . Cet essai est régi par la norme NF P18 – 408.



**Photo 3-19:** Ecrasement d'une éprouvette cylindrique  $(16 \times 32) \text{ cm}^3$



**Photo 3-20:** Essai de fendage

### **3-7.5. MODE D'ACTION DES ENVIRONNEMENTS AGRESSIFS**

#### **3-7.5.1 Liquides**

##### **3-7.5.1.1 Eaux douces**

Les eaux pures ou très peu chargées peuvent dissoudre les constituants calciques du béton. La dissolution est accélérée en présence d'ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  et retardée par les ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$ . Les eaux dont le titre alcalimétrique complet (TAC) est inférieur à 1 m $\text{e}/\text{l}$  sont faiblement agressives.

##### **3-7.5.1.2 Solutions acides**

Les solutions acides sont caractérisées par un  $\text{PH} < 7$ . L'agressivité des acides minéraux ou organiques dépend de la solubilité des sels formés.

Les acides minéraux libres ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) sont des acides forts ayant un effet dissolvant sur le ciment et les granulats calcaires. L'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est doublement agressif par son acidité suffisante et la concentration de l'anhydride carbonique agressif doit être mesurée séparément.

Pour l'acide carbonique contenu dans certaines eaux, la valeur du pH n'est pas un critère et la concentration de l'anhydride carbonique agressif doit être mesurée séparément.

Les acides organiques libres, tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique contenus dans certaines eaux usées provenant des sucreries, papeteries, teintureries, conserveries, distilleries, tanneries, laiteries, etc. Attaquent les constituants calciques du ciment. Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux et peuvent même former des couches protectrices dans le cas des acides oxalique et tartrique par exemple. Toutefois, ces acides faibles peu dissociés peuvent être très agressifs vis-à-vis du béton malgré des pH peu inférieurs à 7: leur neutralisation par des ions alcalins ou alcalino-terreux entraîne la permanence de la dissociation et par suite une importante émission cumulée d'ions  $\text{H}^+$ .

Les acides humiques présentent moins de risques pour les bétons durcis. Mais, dans certains cas, ils peuvent échanger leurs ions  $\text{H}^+$  contre des cations de sels neutres et former ainsi des acides libres qui sont surtout des acides minéraux. Ils sont susceptibles également de retarder ou d'inhiber la prise du ciment.



**Photo 3-21:** Conservation des éprouvettes dans des milieux agressifs

### 3-7.5.1.3. Solutions basiques

Les solutions basiques sont caractérisées par un  $\text{PH} > 7$ . Les ciments portland résistent généralement bien aux solutions basiques de concentration modérée (exemple  $\text{NaOH} < 10\%$ ). Toutefois, des précautions (durcissement suffisant, imperméabilité) doivent être prises si le béton est en contact par l'une de ses faces avec la solution, l'autre face étant soumise à l'évaporation. Dans ce cas, l'accumulation des sels peut provoquer des dégradations même pour de faibles concentrations.

Les ciments avec ajouts résistent un peu moins bien à ces solutions que les ciments portland. Les ciments alumineux sont détruits.



### 3-7 6. Essai de déformabilité et module d'élasticité

Dans le but d'étudier l'influence des ajouts minéraux actifs sur la déformabilité du béton à base de sable recyclés; nous avons confectionné trois types de béton (100/0/0; 50/50/0; 50/0/50) avec un dosage en ciment de  $350\text{kg/m}^3$  en incorporant 10% de laitier et pouzzolane.

Chaque série comprend trois échantillons prismatiques  $(10\times 10\times 40)\text{ cm}^3$ .

Les essais ont été effectués à 28 jours du durcissement, la déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une distance de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal. (Photos 3-22).



**Photo 3-22** : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique  $(10\times 10\times 40)\text{ cm}^3$

### Chapitre 4 : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

#### 4-1 Etude des mortiers

##### 4-1-1 Comportement du mortier à l'état frais

###### 4-1-1.1 Ouvrabilité :

La quantité d'eau de gâchage conditionne, en grande partie, l'ouvrabilité d'un mortier s'il existait toutefois un moyen de la spécifier et de la mesurer ce serait en fonction de la maniabilité.

Pour les différents sables, des quantités d'eau successives seront ajoutées aux mélanges jusqu'à obtention d'une maniabilité constante. Pour ce faire nous avons utilisé une table de secousse. Pour les différents dosages en ciment (voir tableaux 4-1 à 4-6).

D'après les figures 4-1 à 4-4 on remarque que le rapport E/C des différents mélanges varie dans le même sens que le taux de substitution en sables recyclés. Cela se traduit par la présence des fines en grande quantité dans le sable de démolition de béton concassé. Tandis que les sables issus du concassage de brique ont une porosité élevée plus la nature du matériau argileux.

Par ailleurs le rapport E/C d'une même composition de mortier diminue en fonction du dosage de ciment.

**Tableau 4-1 :** Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constante avec un CPJ  $300 \text{ kg/m}^3$

Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
<b>100/0/0</b>	0.83	249.0	111.0	106-115
<b>80/20/0</b>	0.85	255.0	112.5	
<b>70/30/0</b>	0.87	261.0	108.5	
<b>50/50/0</b>	0.90	270.0	107.0	
<b>30/70/0</b>	0.92	276.0	109.0	
<b>80/0/20</b>	0.92	276.0	110.5	
<b>70/0/30</b>	0.94	282.0	109.5	
<b>50/0/50</b>	0.98	294.0	114.0	
<b>30/0/70</b>	1.06	318.0	114.5	

## Analyse et discussion des résultats

**Tableau 4-2 :** Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constant avec un CPJ 350 kg/m<sup>3</sup>

Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
100/0/0	0.67	235.0	110.5	106-115
80/20/0	0.69	241.00	111.5	
70/30/0	0.71	246.70	107.5	
50/50/0	0.74	258.50	108.5	
30/70/0	0.75	264.30	112.0	
80/0/20	0.77	270.0	113.5	
70/0/30	0.79	276.00	112.5	
50/0/50	0.84	294.00	107.5	
30/070	0.87	305.40	109.0	

**Tableau 4-3 :** Quantité d'eau réellement utilisée kg/m<sup>3</sup> pour un étalement constant avec un CPJ 400 kg/m<sup>3</sup>

Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
100/0/0	0.56	225.0	115.0	106-115
80/20/0	0.58	231.0	112.0	
70/30/0	0.59	237.0	109.5	
50/50/0	0.62	248.50	107.5	
30/70/0	0.64	254.5	106.5	
80/0/20	0.68	272.20	111.5	
70/0/30	0.71	284.0	107.5	
50/0/50	0.77	308.0	108.5	
30/070	0.80	320.0	109.0	

**Tableau 4-4 :** Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constant avec un CRS 300 kg/m<sup>3</sup>

Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
100/0/0	0.83	249.0	111.0	106-115
80/20/0	0.85	255.0	112.5	
70/30/0	0.87	261.0	108.5	
50/50/0	0.90	270.0	107.0	
30/70/0	0.92	276.0	109.0	
80/0/20	0.92	276.0	110.5	
70/0/30	0.94	282.0	109.5	
50/0/50	0.98	294.0	114.0	
30/070	1.06	318.0	114.5	

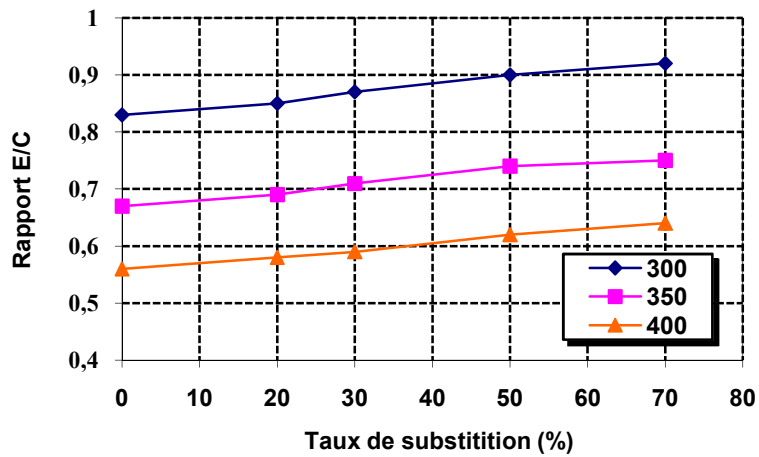


**Tableau 4-5 :** Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constant avec un CRS 350 kg/m<sup>3</sup>

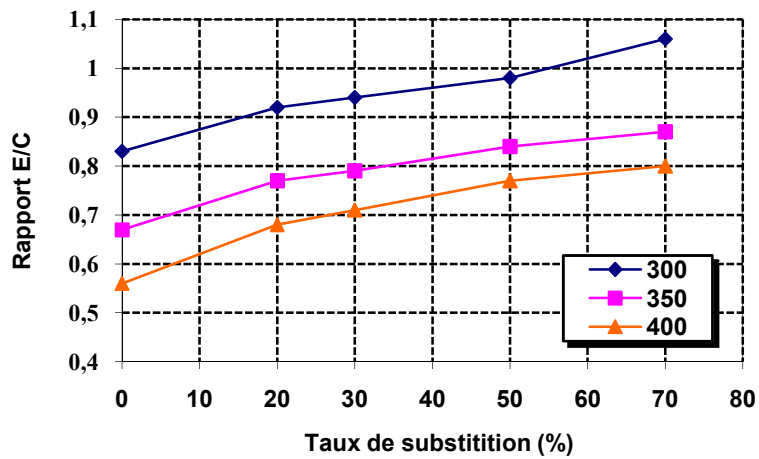
Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
<b>100/0/0</b>	0.67	235.0	110.5	106-115
<b>80/20/0</b>	0.69	241.0	111.5	
<b>70/30/0</b>	0.70	247.0	107.5	
<b>50/50/0</b>	0.74	258.5	108.5	
<b>30/70/0</b>	0.75	264.30	112.0	
<b>80/0/20</b>	0.79	276.0	114.5	
<b>70/0/30</b>	0.80	282.0	113.5	
<b>50/0/50</b>	0.87	305.4	111.5	
<b>30/070</b>	0.91	317.0	110.0	

**Tableau 4-6 :** Quantité d'eau réellement utilisée pour un étalement constant avec un CRS 400 kg/m<sup>3</sup>

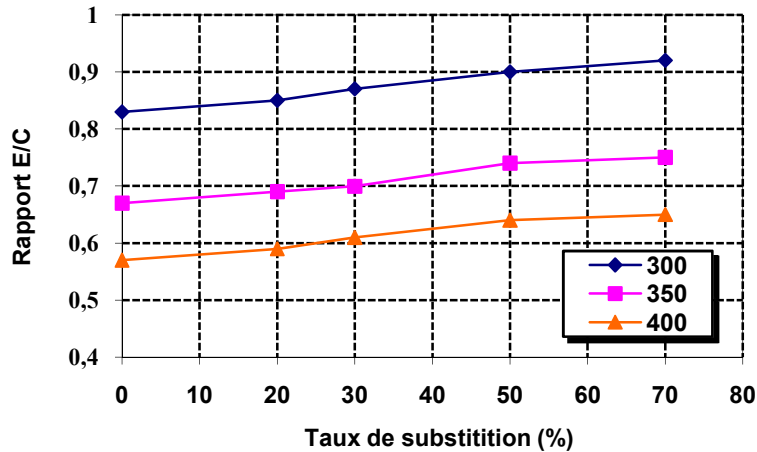
Type de mortier	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée	Etalement (mm)	Etalement Normalisé (mm)
<b>100/0/0</b>	0.57	231.0	112.5	106-115
<b>80/20/0</b>	0.59	237.0	106.5	
<b>70/30/0</b>	0.61	243.0	108.0	
<b>50/50/0</b>	0.64	254.5	109.5	
<b>30/70/0</b>	0.65	260.5	111.5	
<b>80/0/20</b>	0.68	272.20	107.5	
<b>70/0/30</b>	0.71	284.0	109.0	
<b>50/0/50</b>	0.74	296.0	111.0	
<b>30/070</b>	0.77	308.0	113.5	



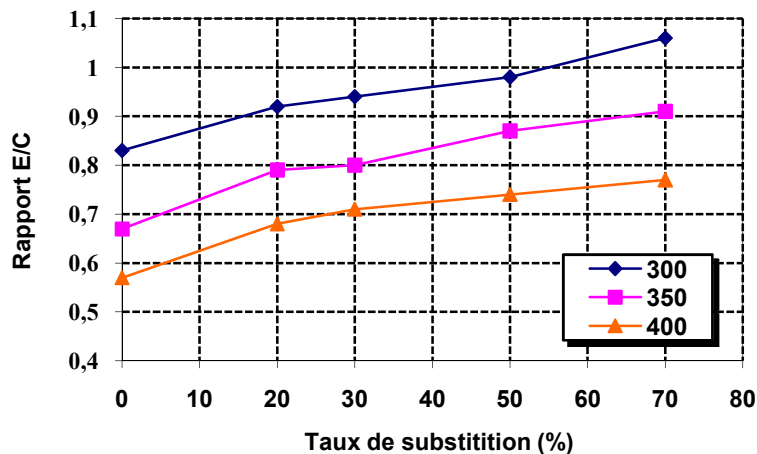
**Figure 4-1** : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ



**Figure 4-2** : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ



**Figure 4-3** : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS



**Figure 4-4** : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS

### 4-1-2 Comportement du mortier à l'état durci

#### 4-1-2-1 Résistance à la compression

La résistance mécanique du mortier après durcissement dépend du rapport E/C, de la qualité et nature de sable, du mode de conservation du mortier et de l'échéance de l'essai. Cette résistance mécanique est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression et flexion.

Nous présentons les résultats des essais à la résistance à la compression et à la flexion effectués sur les éprouvettes de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  et  $(7 \times 7 \times 7) \text{ cm}^3$  dans les tableaux (4-7 et 4-8). Les essais ont été effectués à 28 jours.

## Analyse et discussion des résultats

**Tableau 4-7** : Résistance à la compression des mortiers à base de sables recyclés pour des dosages de ciments respectifs 300, 350, 400 kg/m<sup>3</sup> sur des éprouvettes (4x4x16)cm<sup>3</sup>

Type de mortier	Résistance à la compression MPa					
	Dosage 300		Dosage 350		Dosage 400	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
	<b>1<sup>ère</sup> série</b>					
100/0/0	12.00	22.50	19.50	30.00	24.00	42.00
80/20/0	11.00	21.00	18.00	28.00	22.00	40.50
70/30/0	10.00	19.50	16.75	26.50	21.00	39.00
50/50/0	8.75	17.00	14.00	24.00	18.00	37.00
30/70/0	7.00	13.50	10.00	21.00	14.00	32.00
	<b>2<sup>ème</sup> série</b>					
80/0/20	9.00	18.00	13.50	25.00	18.00	32.00
70/0/30	7.60	16.00	11.00	22.50	15.50	28.00
50/0/50	4.80	12.50	6.75	18.00	9.40	22.00
30/70/0	2.75	9.00	4.00	14.00	5.60	18.00

**1<sup>ère</sup> série:** Substitution en sable recyclés de béton de démolition

**2<sup>ème</sup> série:** Substitution en sable recyclés de déchet de brique concassé

**Tableau 4-8:** Résistance à la compression pour mortier dosé à 400 kg/m<sup>3</sup> à base de sables recyclés sur des éprouvettes (7x7x7)cm<sup>3</sup>

DESINATION	Résistance à la compression MPa					
	Dosage 300		Dosage 350		Dosage 400	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	12.70	24.00	20.80	28.00	25.00	43.00
<b>50/50/0</b>	9.50	18.00	12.83	22.00	19.00	36.00
<b>80/0/20</b>	10.40	11.42	13.20	15.00	16.00	32

Les graphes 4-5 à 4-8 montrent que :

- ✓ Les mortiers à base des sables recyclés présentent des résistances à la compression plus faible par rapport aux mortiers naturels qui nécessitent une augmentation du dosage et présentent un inconvénient du point de vue économique ;
- ✓ Un mortier à base de sable concassé avec un taux de substitution de 20% présente une meilleure résistance à la compression ;

## Analyse et discussion des résultats

- ✓ Au de la de 20% la résistance à la compression chute ;
- ✓ Un mortier à base de sable de brique concassé avec un taux de substitution de 20% présente une meilleure résistance à la compression cependant elle est inférieure à celle du sable de béton concassé et cela peut être expliqué par la présence de matériaux argileux et la porosité élevée du sable concassé de brique ;
- ✓ Avec le taux de substitution de 70% la résistance à la compression d'un mortier à base de sable concassé de brique chute d'une façon considérable ;
- ✓ La résistance à la compression augmente avec le dosage en ciment dans tous les mortiers étudiés,
- ✓ Pour les essais effectués sur les éprouvettes de dimensions  $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$  les résultats ont les mêmes tendances que celles des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$ .

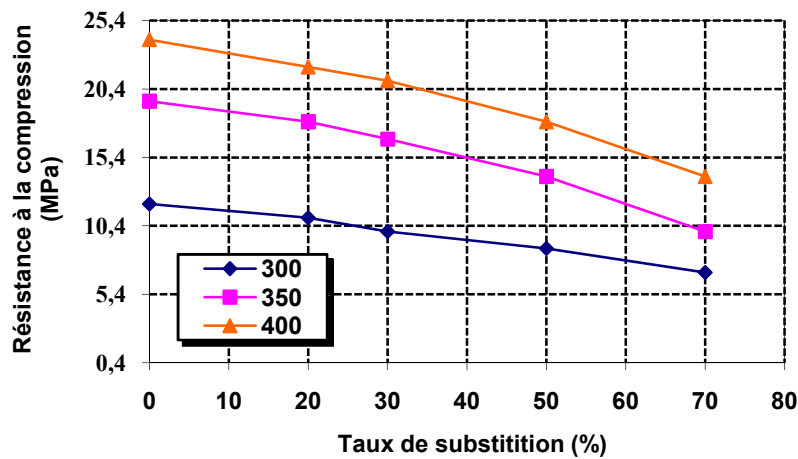


Figure 4-5 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ

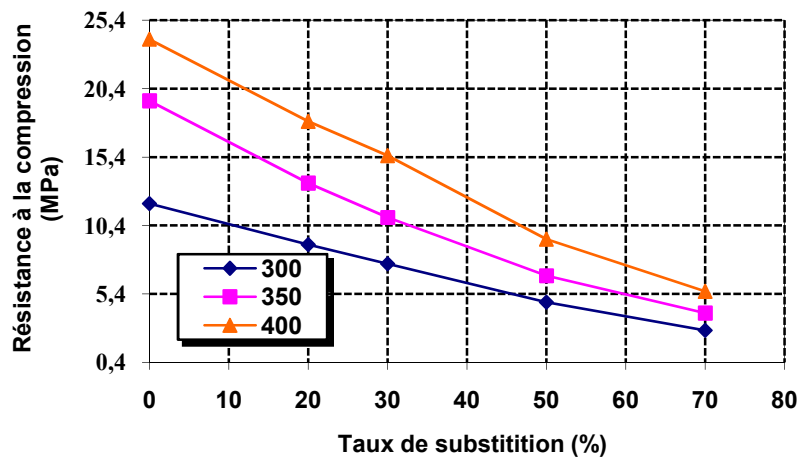


Figure 4-6 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ

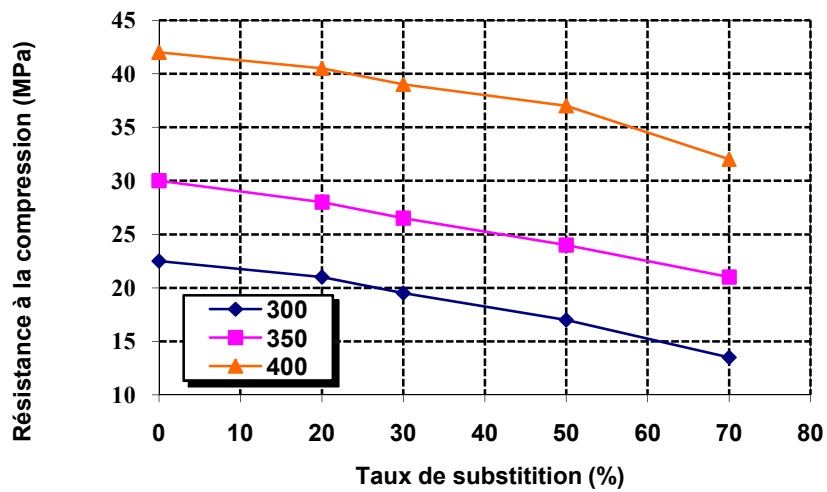


Figure 4-7: Résistance à la compression des mortiers à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS

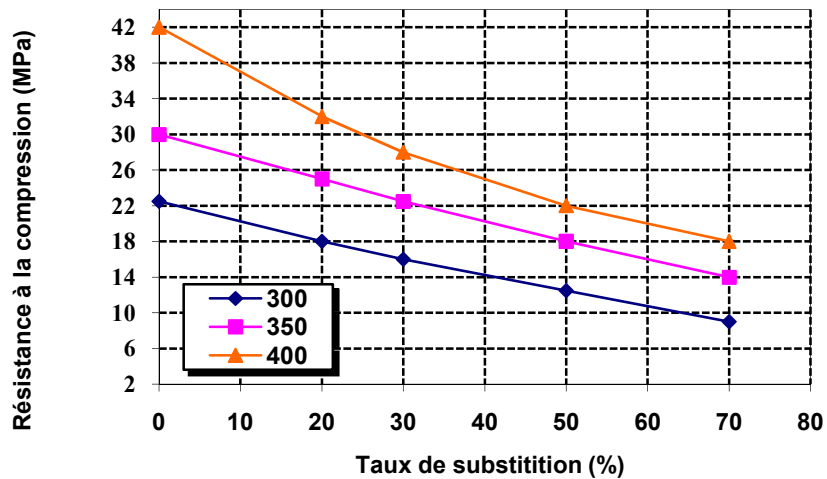


Figure 4-8 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS

**4-1-2-2 Résistance à la traction et à la flexion**

**Tableau 4-9 : Résistance à la traction et à la flexion pour différents dosages de Ciment CPJ42.5 (MPa)**

Désignation	Dosage 300		Dosage 350		Dosage 400	
	Rf	Rt	Rf	Rt	Rf	Rt
100/0/0	4.00	3.40	4.77	4.00	6.12	5.22
80/20/0	3.80	3.20	4.30	3.65	5.35	4.50
70/30/0	3.00	3.00	4.00	3.45	5.30	4.42
50/50/0	2.80	2.50	3.66	3.10	5.20	4.42
30/70/0	1.80	1.00	3.30	2.80	5.00	4.27
80/020	2.00	1.70	2.50	2.15	3.85	3.30
70/0/30	1.50	1.20	1.96	1.62	3.57	3.00
50/050	1.20	0.95	1.50	1.30	3.00	2.53
30/070	1.00	0.85	1.30	1.00	2.55	2.20

**Tableau 4-10 : Résistance à la traction et à la flexion pour différents dosages de Ciment\_CRS 42.5 (MPa)**

Désignation	Dosage 300		Dosage 350		Dosage 400	
	Rf	Rt	Rf	Rt	Rf	Rt
100/0/0	7.00	5.57	8.00	6.80	8.40	7.15
80/20/0	6.00	4.95	7.30	6.12	8.00	5.56
70/30/0	5.00	4.20	6.81	5.81	7.80	6.70
50/50/0	4.83	4.00	5.85	5.00	7.40	6.30
30/70/0	3.85	3.00	4.80	4.00	6.50	5.42
80/020	3.50	3.00	4.50	4.00	6.25	5.34
70/0/30	3.20	2.75	3.50	3.00	6.00	5.10
50/050	1.95	1.65	2.65	2.25	3.00	2.60
30/070	1.40	1.30	2.00	1.60	2.40	1.80

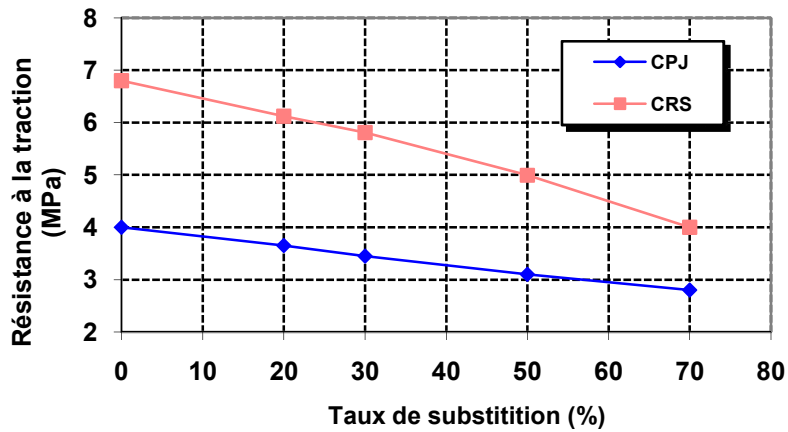


Figure 4-9 ; Résistance à la traction des mortiers à base de sable de béton concassé dosé à  $350\text{kg/m}^3$

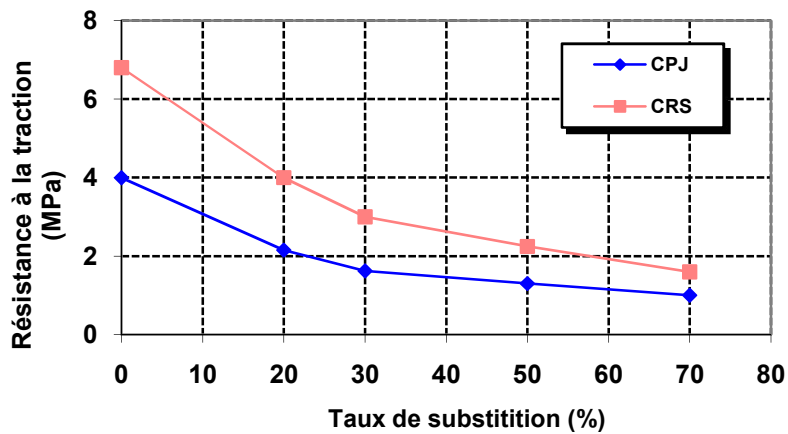


Figure 4-10 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de brique concassé dosé à  $350\text{kg/m}^3$

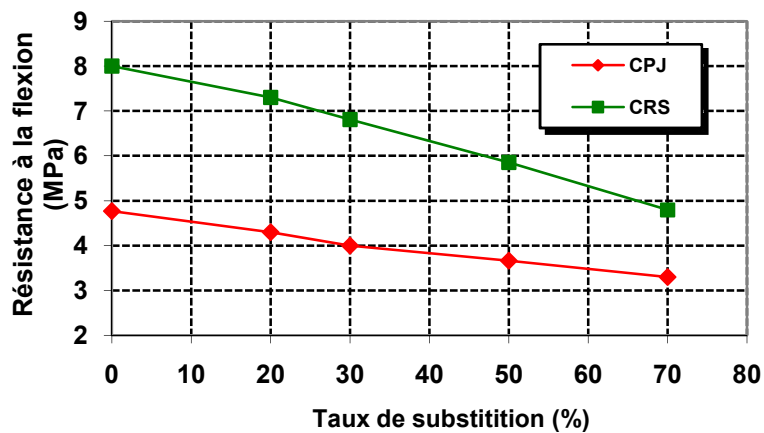
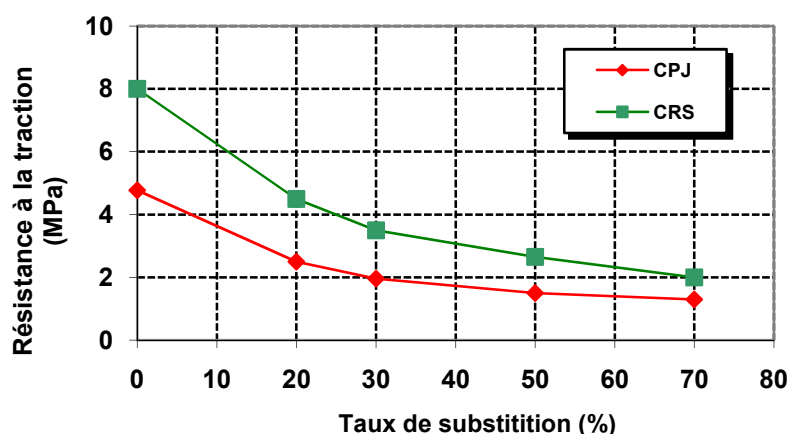


Figure 4-11 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable de béton concassé dosé à  $350\text{kg/m}^3$





**Figure 4-12 :** Résistance à la flexion des mortiers à base de sable de brique concassé dosé à  $350\text{kg/m}^3$

D'après les figures 4-9 à 4-12 la résistance à la traction par flexion est inversement proportionnelle au taux de substitution en sable à base de béton concassé et de brique concassé.

### 4-1-2-3 Résistance à la flexion

On a aussi réalisé des essais de flexion par traction sur des éprouvettes de dimension  $7 \times 7 \times 28$  cm, les résultats sont présentés au tableau qui suit :

**Tableau 4-11 :** Résistance à la flexion et à la compression pour un dosage de  $400 \text{ kg/m}^3$

Désignation	Résistance en MPa							
	CPJ				CRS			
	RF	%	RC	%	RF	%	RC	%
100/0/0	0.065	100	42.00	100	0.072	100	45.00	100
80/0/20	0.045	69.30	22.65	54.00	0.054	75.00	31.63	70.30
50/50/0	0.036	55.40	35.71	85.00	0.045	62.50	44.48	98.85

### 4-1-3 Influence de l'adjuvant sur les propriétés mécaniques

Afin d'améliorer le comportement du mortier frais et durci à base de sable recyclé, un adjuvant super plastifiant du type MEDAFLAW 30 (Granitex) a été incorporé sur les deux meilleures compositions des deux séries de mortiers recyclés, soit 80/0/20 et 50/50/0.

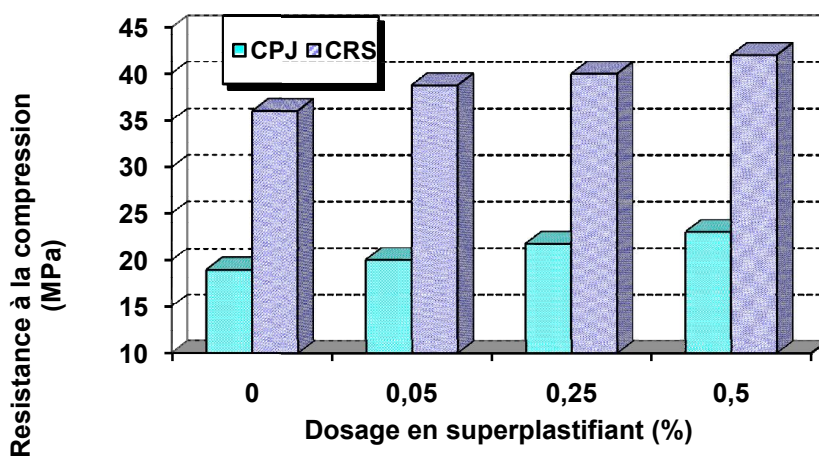
## Analyse et discussion des résultats

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4-12

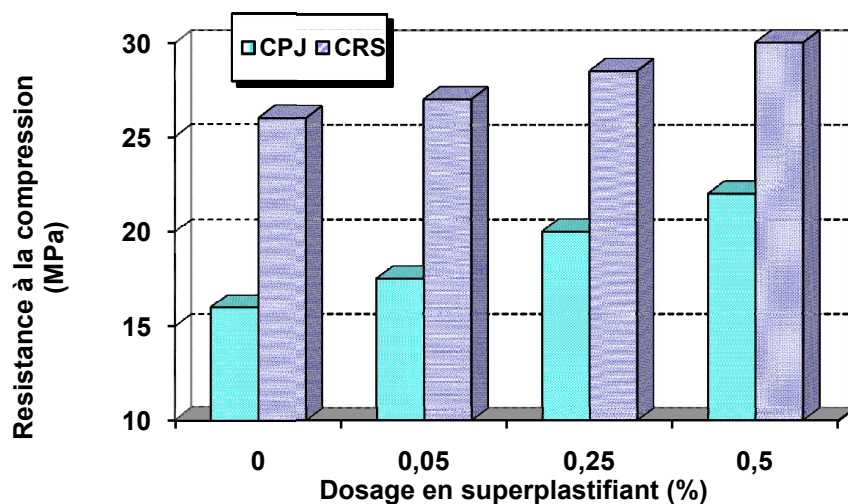
D'après les figures 4-13 et 4-14 nous remarquons que l'adjuvant influe favorablement sur les propriétés du mortier recyclé. Une légère amélioration de la résistance à la compression est observée. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [77].

**Tableau 4-12** : Influence de l'ajout d'un superplastifiant sur la résistance des mortiers à base d'agrégats recyclés

Type de mortier	R28 (MPa) Sans adjuvats		R28 (MPa) avec adjuvats(CPJ)			R28 (MPa) avec adjuvats(CRS)		
	CPJ	CRS	% d'adjuvats			% d'adjuvats		
			0.05%	0.25%	0.5%	0.05%	0.25%	0.5%
100/0/0	25.00	43.00	25.00			43.00		
50/50/0	25.00	43.00	20.00	21.75	23.00	38.75	40.00	42.00
80/0/20	16.00	26.00	17.50	20.00	22.00	27.00	28.50	30.00



**Figure 4-13** : Influence du superplastifiant sur la résistance des mortiers à base de 50% de sable de béton



**Figure 4-14** : Influence du superplastifiant sur la résistance des mortiers à base de 20% de sable de brique concassé

### 4.1-4 Effet des ajouts minéraux actifs sur la Résistance des mortiers recyclés

Afin d'améliorer le comportement du mortier durci à base de sable recyclé, des ajouts minéraux actifs (Laitier (S) ; pouzzolane (Z) et la fumée de silice (D) ont été incorporés sur les deux meilleures compositions des deux séries de mortiers recyclés, soit 80/0/20 et 50/50/0.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4-13

**Tableau 4-13** : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de démolition de béton concassée ayant une teneur de 10% en laitier ou en pouzzolane.

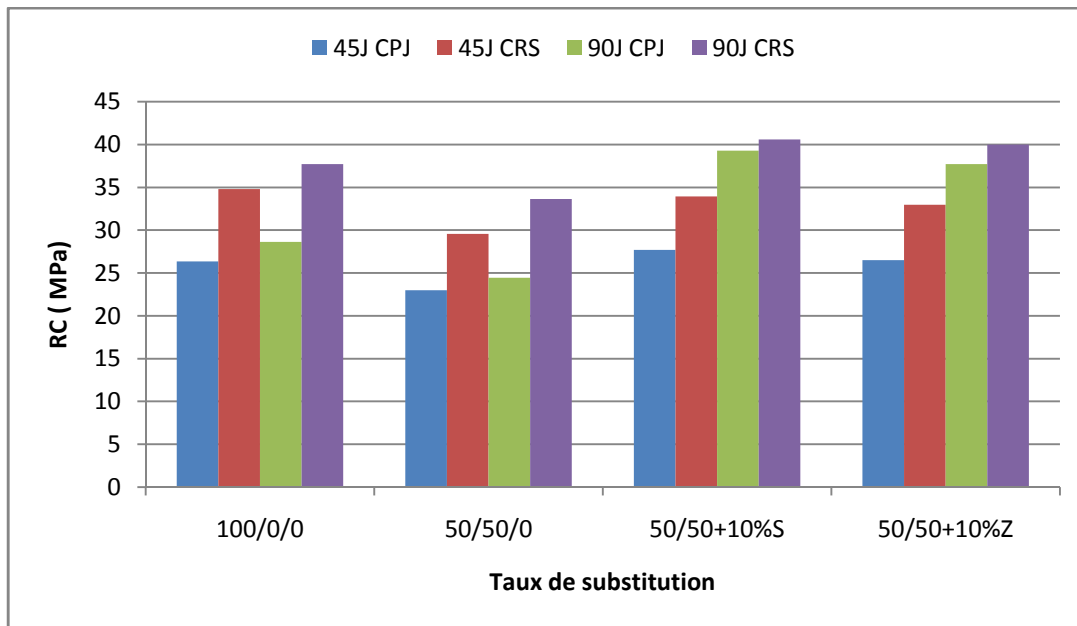
Type de mortiers	Rc ( MPa )			
	45 jours		90 jours	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS
<b>100 /0/0</b>	26.35	34.80	28.64	37.70
<b>50/50/0</b>	23.00	29.55	24.43	33.63
<b>50/50+10%S</b>	27.70	33.941	39.30	40.58
<b>50/50+10%Z</b>	26.50	32.96	37.70	40.00

**Tableau 4-14:** Résistance à la compression des mortiers à base de sable de démolition de brique concassée ayant une teneur de 10% en laitier et pouzzolane à 90jours.

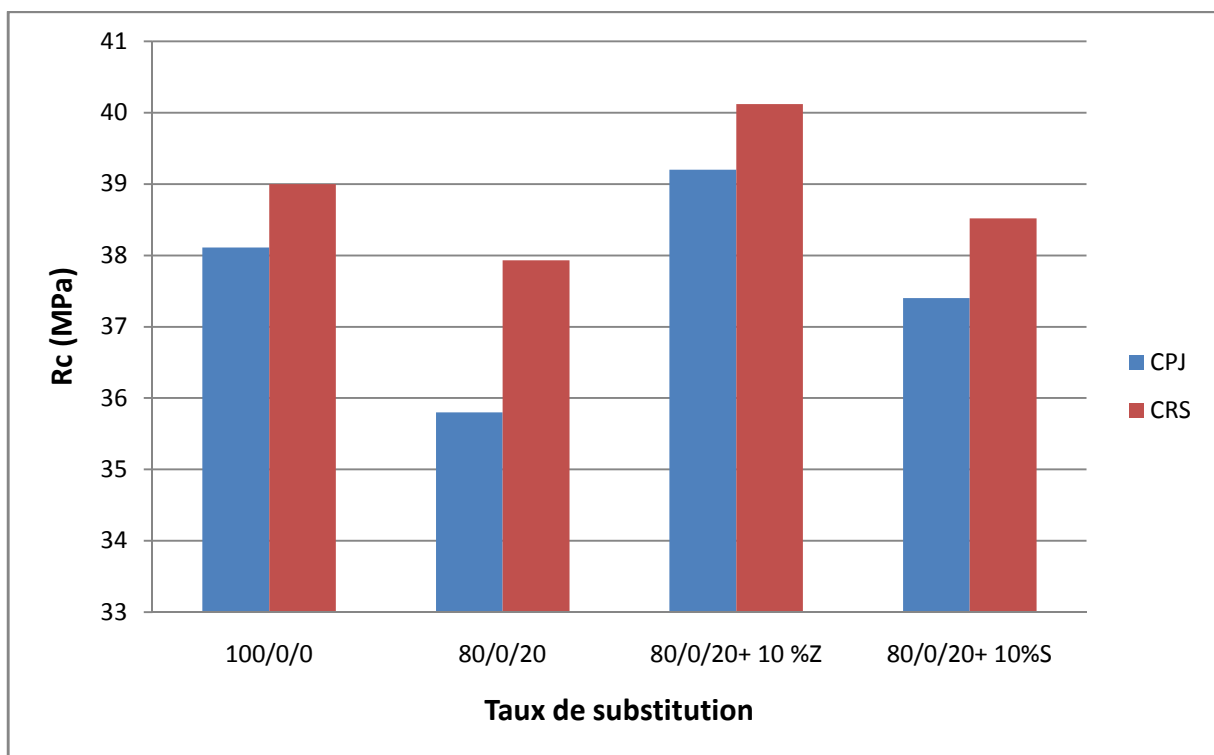
Type de mortier (SN/SDBR)	Rc (MPa)	
	CPJ	CRS
<b>100/0/0</b>	38.11	39.00
<b>80/0/20</b>	35.80	37.93
<b>80/0/20+ 10 %Z</b>	39.20	40.12
<b>80/0/20+ 10%S</b>	37.40	38.52

**Tableau 4-15 :** Résistance à la compression des mortiers recyclés ayant une teneur de 8% en fumée de silice pour différents dosages en superplastifiant.

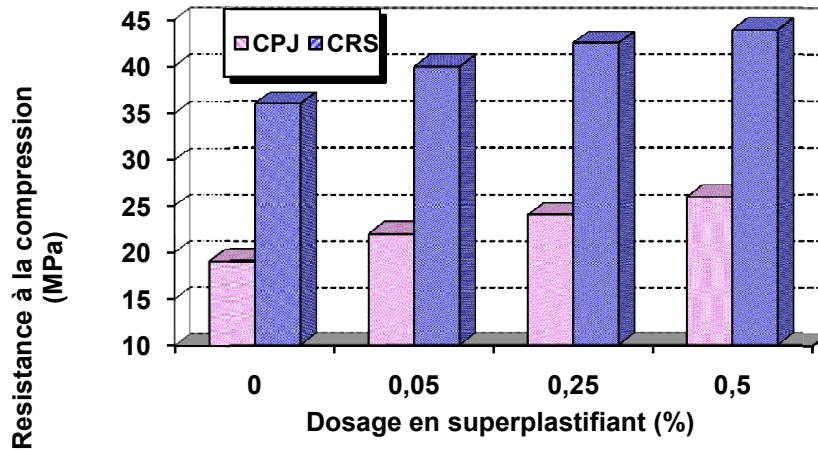
Type de mortier	R28 (MPA) Sans adjuvats		R28 (MPA) avec adjuvats+8%FS			R28 (MPA) avec adjuvats +8%FS		
	CPJ	CRS	CPJ			CRS		
100/0/0	25.00	43.00	0.05%	0.25%	0.5%	0.05%	0.25%	0.5%
50/50/0	19.00	36.00	22.00	23.50	25.50	40.00	42.50	44.00
80/0/20	16.00	26.00	20.00	22.00	23.50	28.50	30.00	32.00



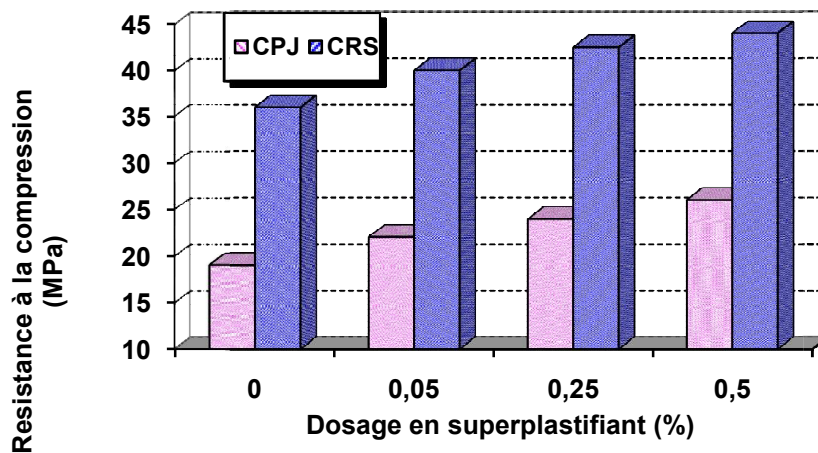
**Figure 4-15** : Résistances à la compression des mortiers à base de sable de béton concassée avec ajouts minéraux à différentes âges



**Figure 4-16** : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers à base de déchet de brique concassé.



**Figure 4-17** : Effet de la fumée de silice (8%) sur la résistance des mortiers à base de 50% de sable de béton



**Figure 4-18** : Effet de la fumée de silice (8%) sur la résistance des mortiers à base de 20% de sable de brique

Les figures 4-17 et 4-18, montrent que la présence de la fumée de silice dans les mortiers à base de sables recyclés influence de façon significative les propriétés mécaniques de ces derniers et d'une manière analogue que pour les mortiers conventionnels. Cette action particulière est due au fait que les grains de la fumée de silice ont un diamètre environ 100 fois plus petit que celui des plus petits grains de ciment, et que cette finesse des grains diminue le ressuage.

### 4-1.5 Effet des milieux agressifs sur le comportement des mortiers recyclés avec un teneur de 10% de laitier et pouzzolane.

Cette étude expérimentale nous a permis d'obtenir des résultats concernant l'estimation de la durabilité des mortiers à l'attaque chimique dans un milieu agressif à différentes solutions : HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaOH pour différents âges d'une part et d'autre part les résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion.

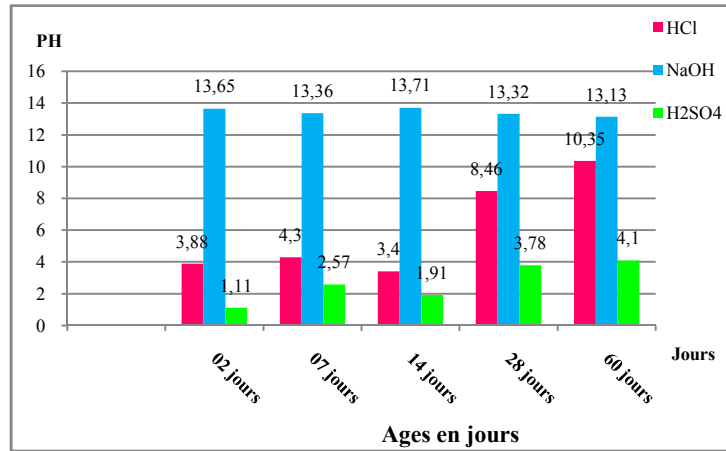
Les éprouvettes (50/50/0 ; 50/50+10%S et 50/50+10%Z) et (80/0/20 ; 80/0/20+ 10%S et 80/0/20+ 10%Z) sont immergées dans des solutions de concentration 5% en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; HCl et NaOH à une température ambiante à 28 et 60 jours, elles sont renouvelées selon la valeur du pH.

**Tableau 4-16:** Variation de pH au cours du temps des différentes solutions pour les mortiers à base du sable de démolition de béton concassée

<b>Milieux</b> <b>Jours</b>	<b>HCl</b>	<b>NaOH</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
02 jours	3.88	13.65	1.11
07 jours	4.3	13.36	2.57
14 jours	3.4	13.71	1.91
28 jours	8.46	13.32	3.78
60 jours	10.35	13.13	4.10

**Tableau 4-17 :** Variation de pH au cours du temps des différentes solutions pour les mortiers à base du sable de démolition de brique concassée

<b>Milieux</b> <b>Jours</b>	<b>HCl</b>	<b>NaOH</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
02 jours	3.30	13.70	0.99
07 jours	3.65	13.64	2.30
14 jours	3.13	13.17	1.95
28 jours	4.50	13.27	3.58
60 jours	7.52	13.80	4.25



**Figure 4-19** : Variation de pH au cours du temps de différents milieux agressifs

Le suivi de la lecture du pH des solutions contenant l'HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaOH est réalisé grâce à un pH- mètre durant la période d'immersion des éprouvettes (Figure 4.19).

La Figure 4.19 présente le degré de pH au cours des premiers 14 jours et révèle :

Le pH relevé de l'acide chlorhydrique (HCL) est de l'ordre de 3.88 ÷ 3.4, l'environnement est très fortement agressif.

Le pH relevé de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> est de l'ordre de 1.11 ÷ 1.91, l'environnement est très fortement agressif.

Le pH relevé de d'hydroxyde de sodium (NaOH) est de l'ordre de 13.65 ÷ 13.71, l'environnement est très fortement basique.

Pour une période allant de 2 jours jusqu'à 14 jours, nous constatons aussi dans la figure précédemment citée, que les solutions acide perdent leurs acidités à savoir 8.46 et 3.78 pour l'HCl et l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivement et la solution NaOH perd ses caractéristiques basiques à partir du 28<sup>ème</sup> jour.

#### 4-1.5.1 Perte de masse des éprouvettes exposées dans les trois solutions (60 jours).

Après la durée de cure dans les solutions, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau de robinet puis on les laisse sécher.

❖ La résistance à l'attaque chimique selon la variation de masse par :

$$M_L = \frac{M_t - M_i}{M_i} \times 100$$



## Analyse et discussion des résultats

Où  $M_t$  est la masse (gr) à l'instant  $t_i$

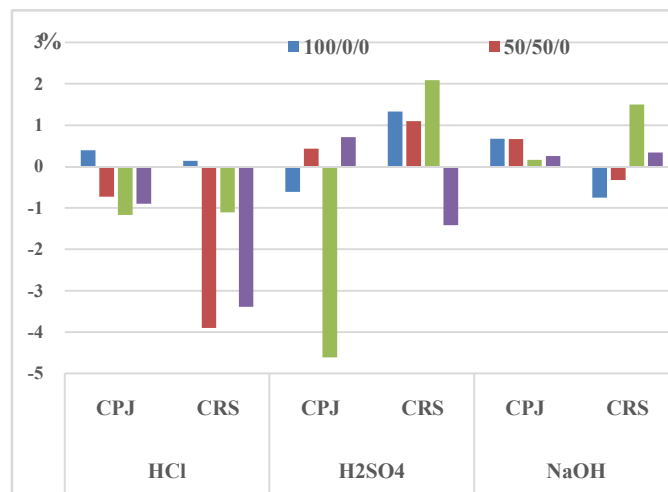
$M_i$  est la masse (gr) initiale avant exposition à la solution utilisée.

**Tableau 4-18:** Variation de masse des éprouvettes exposées dans les solutions acides à 60 jours

Eprouvettes	Masse initiale (g)		HCl (g)		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
	100/0/0	593.68	586.16	596	587	590
50/50/0	598.40	598.39	594	575	601	605
50/50/0+ 10% LT	610.19	591.58	603	585	582	604
50/50/0+ 10% PZ	615.60	608.68	610	588	620	600

**Tableau 4-19:** Perte de masse des éprouvettes immergées dans les trois solutions (60 jours)

Eprouvettes	Perte de masse (%)					
	HCl		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		NaOH	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	0,39	0,14	-0,61	1,33	0,67	-0,75
50/50/0	-0,73	-3,90	0,43	1,10	0,66	-0,33
50/50/0+ 10% LT	-1,17	-1,11	-4,61	2,09	0,16	1,5
50/50/0+ 10% PZ	-0,90	-3,39	0,71	-1,42	0,25	0,34



**Figure 4-20 :** Perte de masse des éprouvettes immergées dans les trois solutions (60 jours)

La figure 4-20 exhibe qu'en terme de perte de masse les mortiers 50/50/0, 50/50/0 + 10% PZ à base de CRS et le mortier CPJ 50/50/0 + 10% LT ont connu un gain de perte de masse comparativement aux autres mortiers dans le milieu acide à savoir HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Le gain exprimé dans le mortier CRS 50/50/0 + 10% S immergé dans le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> est dû au dépôt de gypse qui se forme suite à la réaction entre la portlandite et l'acide sulfurique.

## Analyse et discussion des résultats

Les mortiers immergés dans le NaOH subissent un gain en masse. Ce gain traduit un début de gonflement des mortiers, conséquence des réactions chimiques se produisant entre les hydrates et la base NaOH.

### 4-1.5.2. Résistances mécaniques :

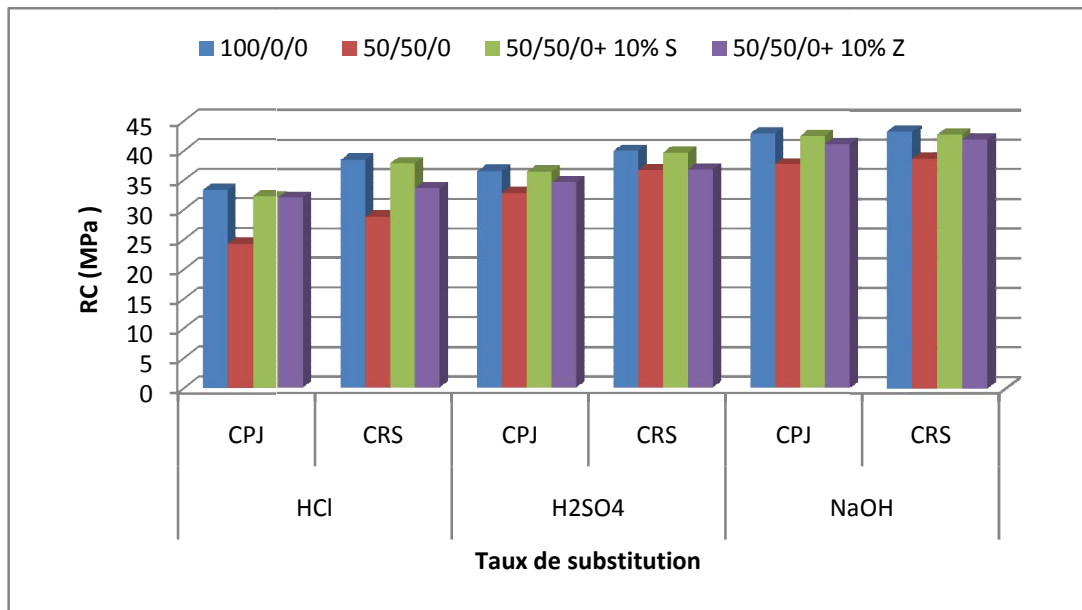
Les résultats des résistances à la traction par flexion et à la compression aux âges 28 et 60 jours des éprouvettes 4x4x16 cm selon la norme [NF EN 196-1] des bétons témoins et de celles immergées dans les trois solutions (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaOH) sont présentés dans les tableaux 4.20 et 4.21.

**Tableau 4-20:** Résistances à la compression des mortiers à base de sable de démolition de béton concassée immergées dans les trois solutions (60 jours)

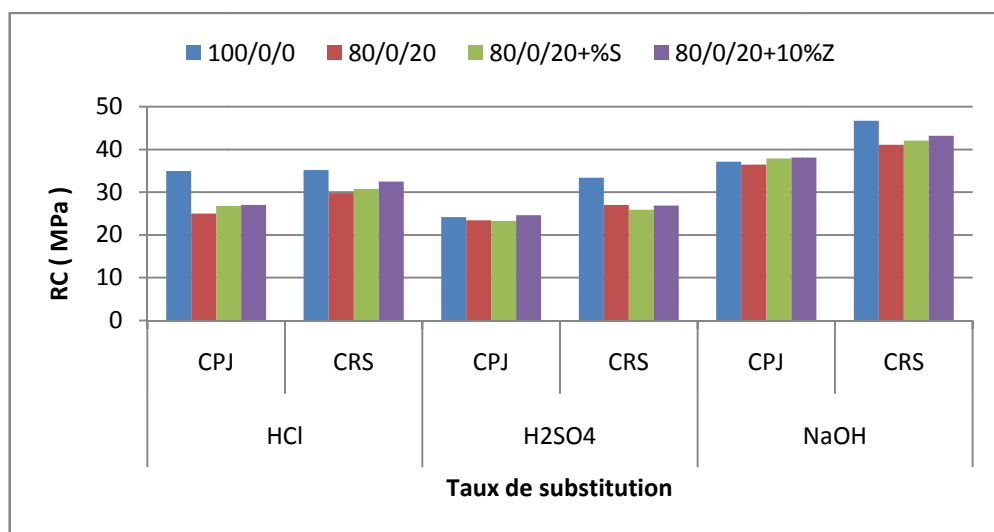
Epreuves	R <sub>c</sub> (MPa)					
	HCl		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		NaOH	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	33,38	38,44	36,42	39,96	42,89	43,16
50/50/0	24,32	28,71	32,95	36,66	37,71	38,61
50/50/0+ 10% LT	32,21	37,86	36,35	39,69	42,5	42,67
50/50/0+ 10% PZ	32,16	33,67	34,61	36,79	41,14	41,85

**Tableau4-21:** Résistances à la compression des mortiers à base de sable de démolition de brique concassée immergées dans les trois solutions (60 jours)

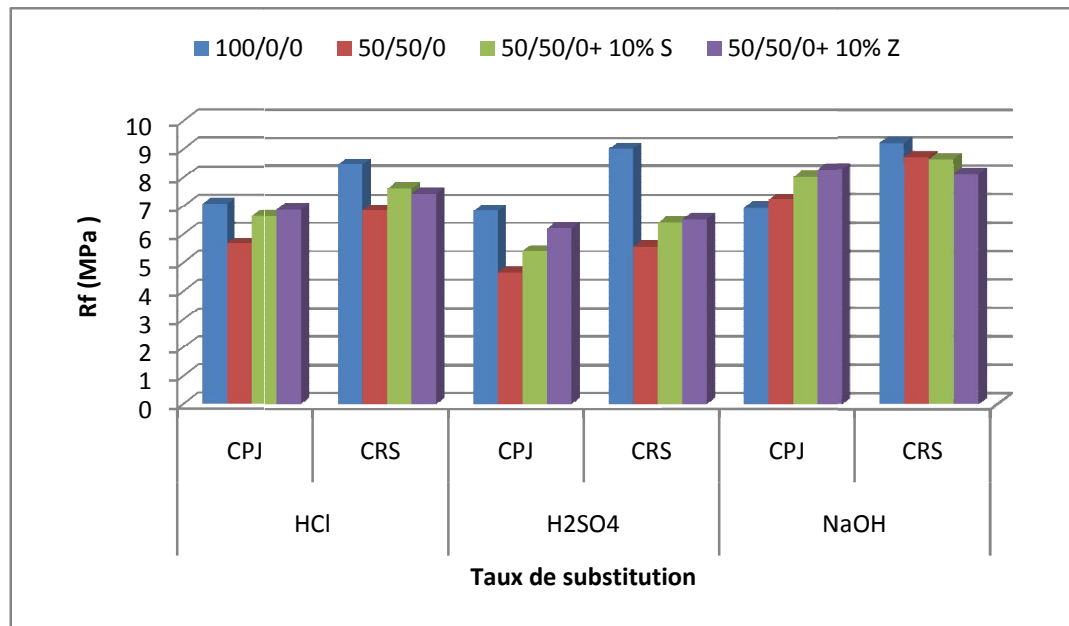
Epreuves	R <sub>f</sub> (MPa)					
	HCl		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		NaOH	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
100/0/0	34.94	35.18	24.20	33.41	37.12	46.67
80/0/20	25.00	29.79	23.40	27.04	36.43	41.10
80/0/20+ 10% S	27.00	32.50	24.60	26.84	38.09	43.16
80/0/20+ 10% Z	26.83	30.80	23.27	25.90	37.90	42.03



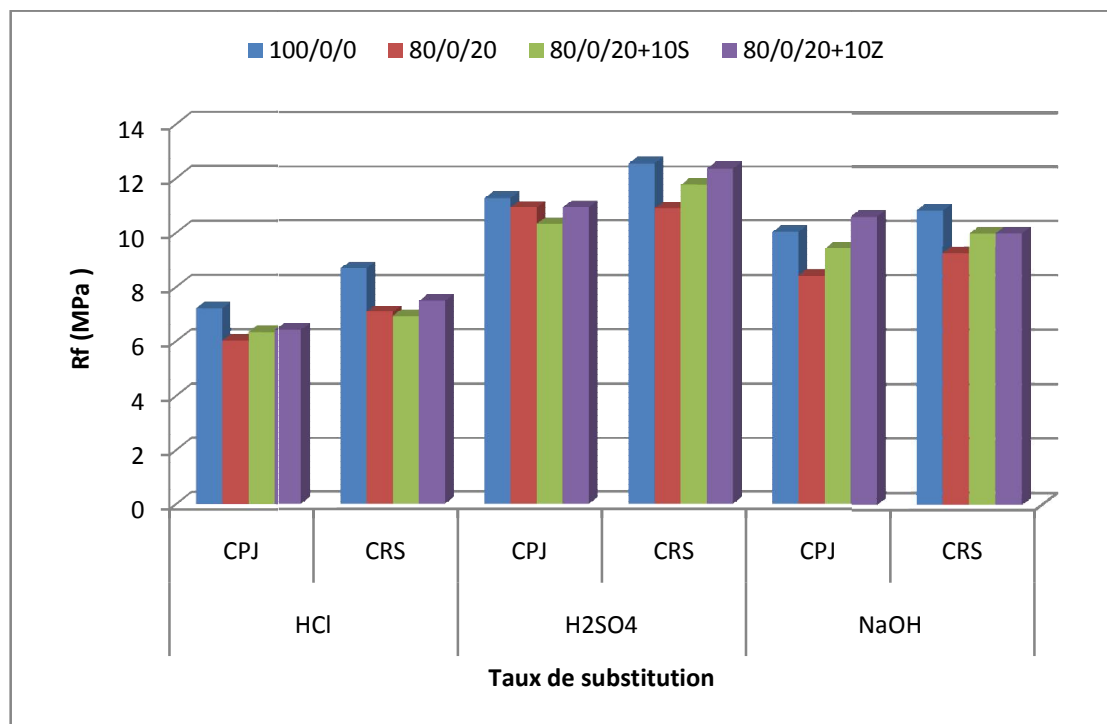
**Figure 4-21:** Résistances à la compression des éprouvettes de mortier immergées dans les trois solutions (60 jours)



**Figure 4-22:** Résistances à la compression des éprouvettes de mortier à base de sable de démolition de brique concassée immergées dans les trois solutions (60 jours)



**Figure 4-23:** Résistances à la traction par flexion des échantillons de mortier immergés dans les trois solutions (60 jours)



**Figure 4-24:** Résistances à la traction par flexion des échantillons de mortier à base de sable de démolition de brique concassée immergés dans les trois solutions (60 jours)

D'après les tableaux 4-20 et 4-21 et les figures 4-21 ; 4-22 ; 4-23 et 4-24, on voit que la résistance des mortiers conservés dans les milieux agressifs est inférieure à ceux conservés dans l'eau potable.

Le comportement mécanique des mortiers dans les milieux agressifs diffère de l'un à l'autre. Cela est dû au mécanisme de dégradation aux attaques sulfatiques, attaques des acides, sulfuriques et chlorures qui sont totalement différents l'un de l'autre.

Les mortiers recyclés avec ajouts de 10% de laitier ou de pouzzolane conservés dans les milieux agressifs sont plus résistants que les autres mortiers.

### **4-2 Etudes des bétons**

Elle consiste à étudier des bétons avec les mêmes sables recyclés et un sable naturel comme témoin et des agrégats naturels, avec des dosages de 300 ; 350 et 400 kg/m<sup>3</sup> en utilisant deux types de ciment CPJ 42.5 et CRS 42.5.

#### **4-2.1 Comportement rhéologique des bétons frais.**

##### **4-2.1.1 Consistance des bétons frais**

La composition des bétons a été faite avec un affaissement constant au cône d'Abrams de l'ordre de 70mm la valeur faisant partie de la fourchette de consistance des bétons plastiques (50 à 90mm).

Le tableau 4.22 donne la quantité d'eau réellement utilisées et les quantités effectivement ajoutées (compte tenu du pourcentage élevé d'absorption d'eau des sables recyclés) ainsi que la fluidité réelle mesurée. Parallèlement, relative à la fluidité idéale, sont reprises les quantités d'eau ajoutée par rapport à la quantité d'eau de gâchage de béton témoin nécessaire pour avoir un affaissement de 70mm au cône d'Abras.

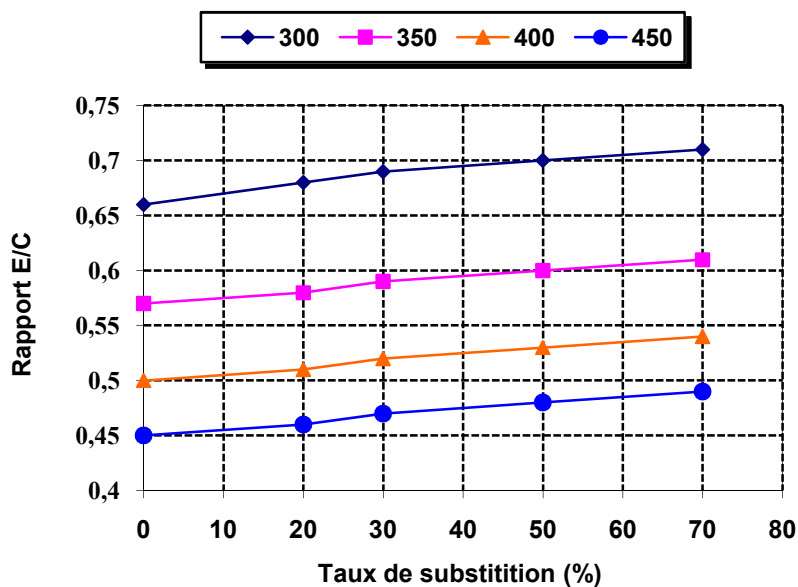
D'après les figures 4-25 à 4-28, nous remarquons que pour obtenir une fluidité constante, il faut augmenter la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage des bétons de sables recyclés. Ceci est logique car les sables recyclés contiennent des particules fines qui absorbent beaucoup d'eau (6% à 10% pour les sables de démolition de béton concassé et entre 8.5 à 15% pour les sables de démolition de brique concassé)

## Analyse et discussion des résultats

Nous notons que le rapport E /C d'une même composition de béton diminue suite à un dosage élevé en ciment.

**Tableau 4-22** : Quantité d'eau réellement utilisée pour un affaissement constant avec un dosage 350 kg/m<sup>3</sup>

Type de béton	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée pour le mélange (l/m <sup>3</sup> )	Affaissement mesuré (cm)	Affaissement choisi (cm)	Quantité d'eau de gâchage ajoutée (l)
100/0/0	0.57	200	5.0	5 ÷ 7	0
80/20/0	0.58	205	5.2		5
70/30/0	0.59	207	5.3		7
50/50/0	0.60	213	5.4		13
30/70/0	0.61	215	5.4		15
80/0/20	0.59	208	5.3		8
70/0/30	0.60	212	5.4		12
50/0/50	0.62	216	5.5		16
30/0/70	0.64	224	6.0		24



**Figure 4-25** : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ

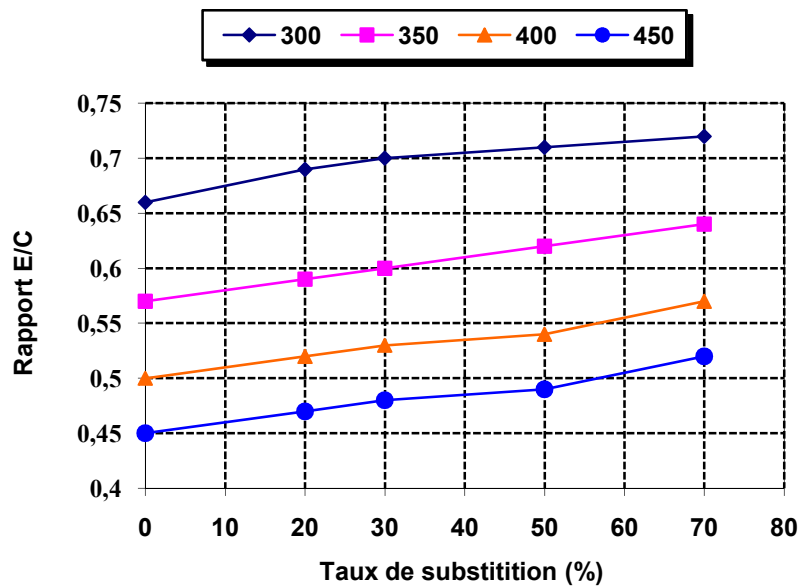


Figure 4-26 : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ

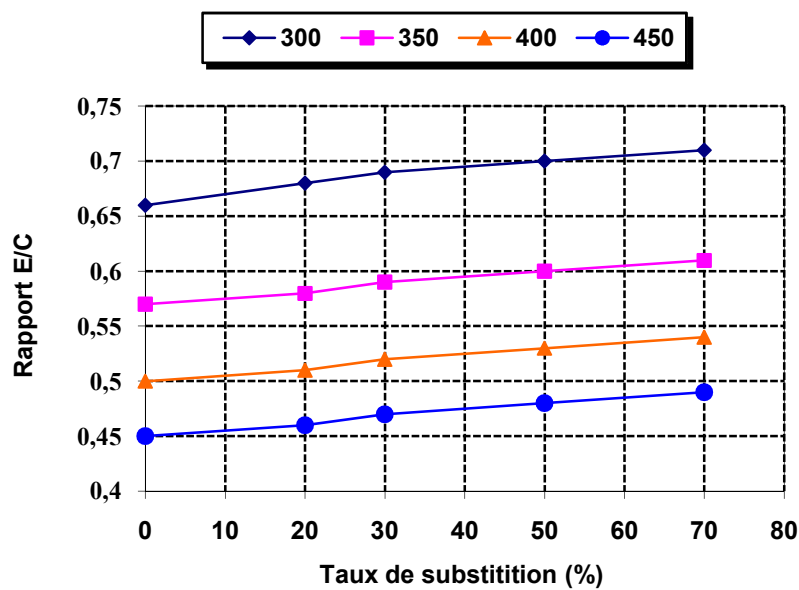
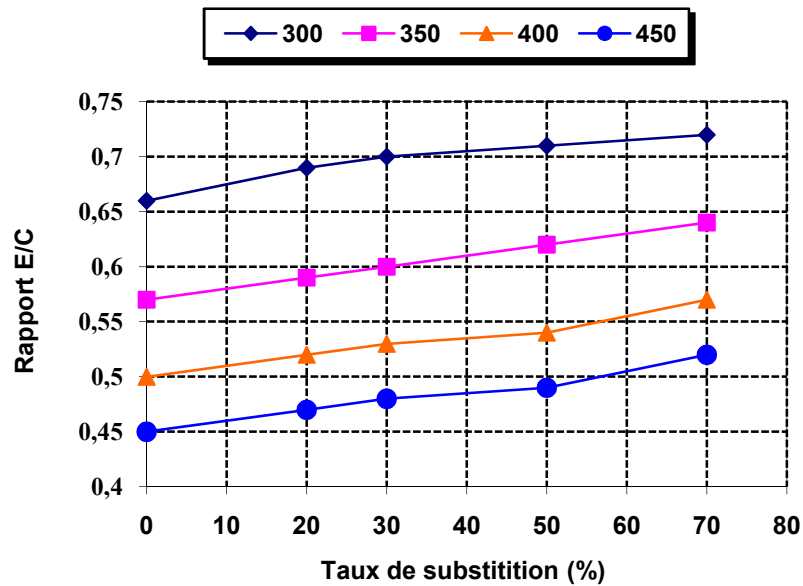


Figure4-27: Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS



**Figure4-28** : Evolution du rapport E/C des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS

## 4-2.2 Comportement mécanique des bétons durcis

### 4-2.2.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée à l'âge de 28 jours sur des cubes (10x10x10) cm<sup>3</sup> de 100 mm d'arête selon la procédure de la norme NF P 18-406.

Dans le cadre de cette étude nous avons confectionné deux séries de béton, à base de sables recyclés, et un béton témoin, la première série est partiellement composée de sable de béton concassé (SDB), la deuxième de sables issus du concassage de brique (SDBR), dans chacune des deux séries, nous avons varié le taux de substitution des sables naturels par des sables recyclés de la manière suivante (0% ,20%, 30%, 50% ,70%) pour les deux séries.

Le tableau 4 – 23 regroupe les résultats de la résistance à la compression à 28 jours des différents mélanges pour des dosages de ciment variables.



## Analyse et discussion des résultats

**Tableau 4-23 :** Résistance à la compression des bétons à base des sables recyclés pour des dosages de ciments respectifs 300, 350, 400 et 450 kg/m<sup>3</sup>

Type de béton	Résistance à la compression MPa							
	DOSAGE 300		DOSAGE 350		DOSAGE 400		DOSAGE 450	
	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS	CPJ	CRS
	<b>1<sup>ère</sup> série</b>							
100/0/0	34.0	36.00	38.00	42.00	44.00	46.00	47.00	53.50
<b>80/20/0</b>	31.0	33.00	35.00	39.00	41.00	43.00	45.00	50.50
<b>70/30/0</b>	29.0	32.00	33.00	37.50	38.50	41.50	42.70	49.00
<b>50/50/0</b>	27.50	29.00	31.00	34.50	36.50	38.47	39.50	45.00
<b>30/70/0</b>	24.80	25.5	28.00	30.00	33.00	33.75	36.00	40.00
	<b>2<sup>ème</sup> série</b>							
<b>80/0/20</b>	29.00	30.8	33.20	36.75	38.95	40.8	42.50	48.7
<b>70/0/30</b>	27.50	29.32	31.29	35.00	37.60	39.00	41.00	46.50
<b>50/0/50</b>	25.60	27.00	30.00	33.00	35.50	37.00	39.00	43.00
<b>30/0/70</b>	22.50	24.00	25.50	29.00	30.80	32.50	33.50	39.00

**1<sup>ère</sup> série: béton à base du sable de béton de démolition**

**2<sup>ème</sup> série: béton à base du sable de déchet de brique concassé.**

Nous remarquons d'après les figures 4-25 à 4-28 que :

☞ Les bétons recyclés présentent des résistances à la compression plus faible que les bétons ordinaires: une chute de 8 à 27% pour les bétons de sable de béton concassé et de 14 à 33% pour les bétons de brique concassé. Ces résultats confirment ceux trouvés par d'autres chercheurs[44] qui ont observé des chutes de l'ordre de 30% et de 40% respectivement pour le béton de démolition et de brique concassée.

Cette réduction dans la résistance à la compression est due principalement à l'effet du mortier de l'ancien béton inerte attaché aux agrégats et qui gêne le bon déroulement de l'hydratation du ciment. Il faut noter aussi que les bétons à base d'agrégats de démolitions ont un rapport E/C assez élevé qui se traduit par une baisse de la résistance à la compression.

**1<sup>ère</sup> série: béton à base du sable de béton de démolition**

**2<sup>ème</sup> série: béton à base du sable de déchet de brique concassé.**

## Analyse et discussion des résultats

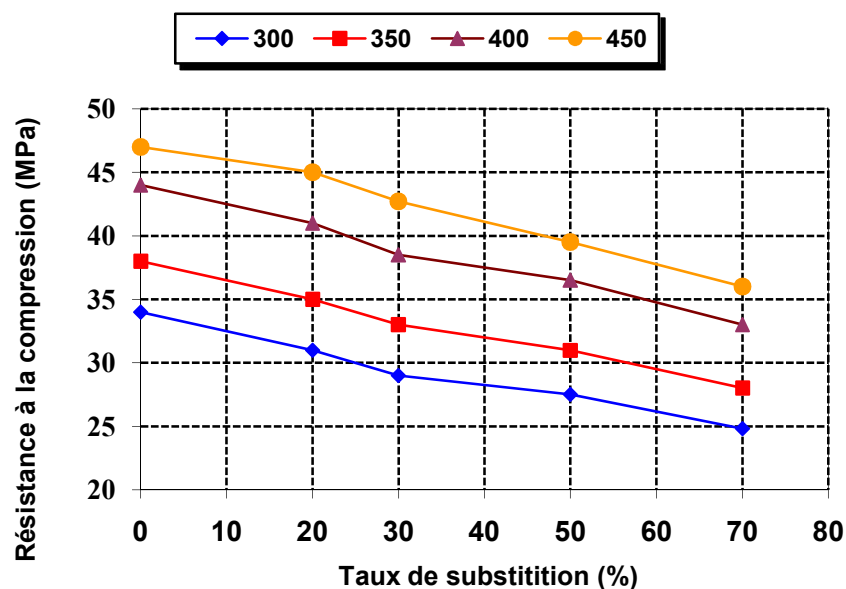
Nous remarquons d'après les figures 4-29 à 4-32 que :

☞ La chute de résistance diminue en faisant augmenter le dosage de ciment, nous pouvons résumer la chute de résistance à 28 jours en fonction de la nature et du taux de substitution des sables recyclés ainsi que le dosage en ciment comme suit (Tableau 4-24) :

**Tableau 4-24** : Chute de résistance en fonction du taux de remplacement

Nature des sables	Chute de résistance en%							
	CPJ				CRS			
	Dosage en ciment en kg/m <sup>3</sup>				Dosage en ciment kg/m <sup>3</sup>			
	300	350	400	450	300	350	400	450
<b>SDB</b>	8.5 ÷ 27	8 ÷ 26	7 ÷ 25	4 ÷ 23	8 ÷ 29	7 ÷ 28	6 ÷ 26	5 ÷ 25
<b>SDBR</b>	15 ÷ 34	13 ÷ 33	12 ÷ 30	10 ÷ 29	14 ÷ 33	12 ÷ 31	11 ÷ 29	9 ÷ 27

La figure 4-29 montre que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement dépasse 50% et que cette diminution peut dépasser 15% de la résistance du béton témoin ce qui a été montré par d'autres chercheurs [78].



**Figure 4-29** : Résistance à la compression des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CPJ

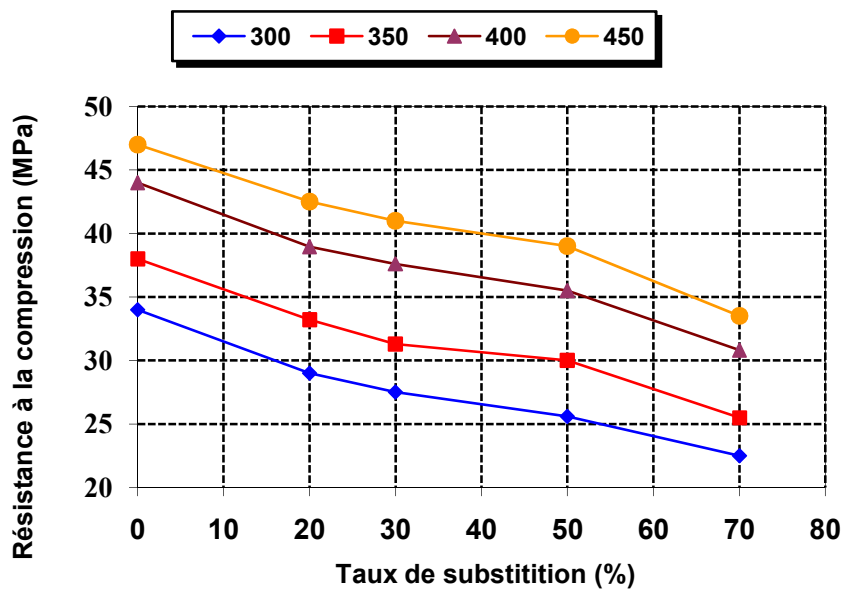


Figure 4-30: Résistance à la compression des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CPJ

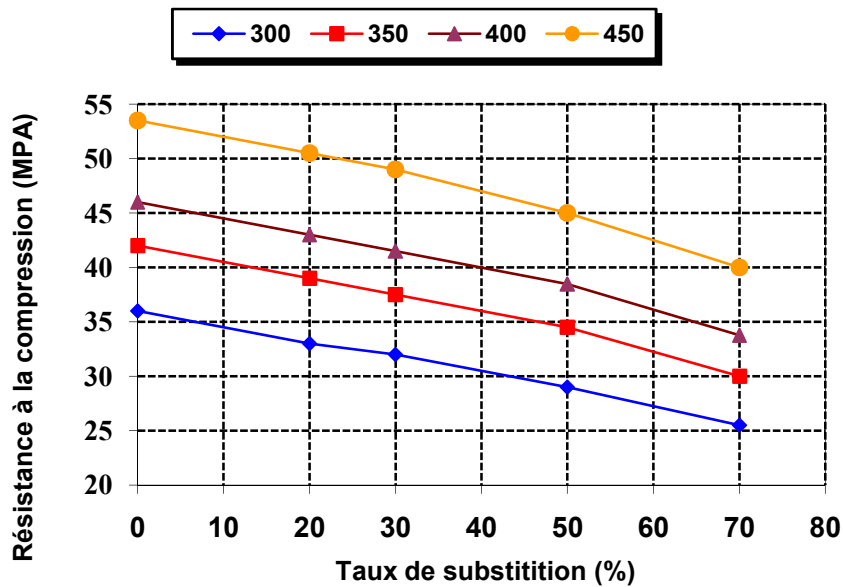
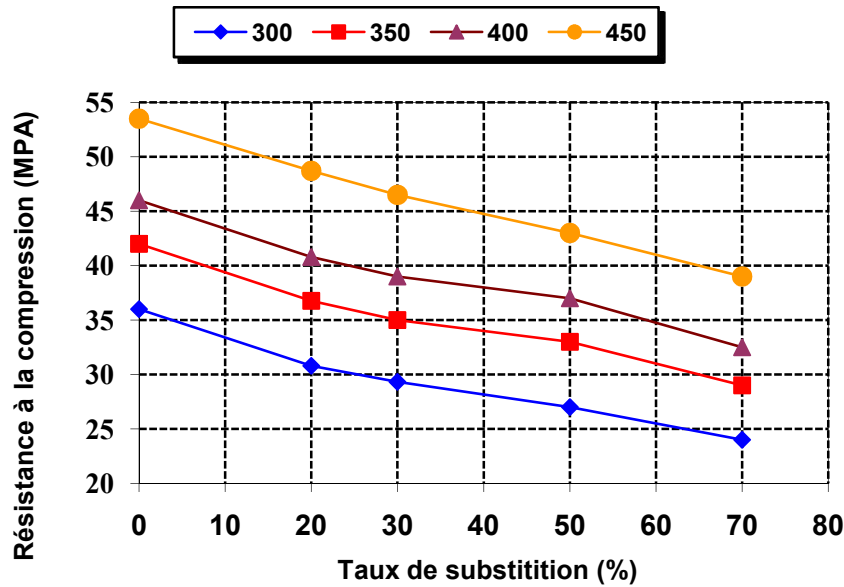


Figure 4-31 : Résistance à la compression des bétons à base de sable de béton concassé pour différents dosages en ciment CRS



**Figure 4-32 :** Résistance à la compression des bétons à base de sable de brique concassé pour différents dosages en ciment CRS

### 4-3 Effet des Ajouts minéraux sur le comportement de béton

Dans notre étude, on a utilisé trois ajouts minéraux actifs qui sont : le laitier de haut fourneau (S) et la pouzzolane (Z) , qui sont concassés et broyés à AIN El kebira après avoir été passés à l'étuve pendant 24 heures à  $100-101\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour éliminer l'eau libre , la Fumée de silice ( D) (GRANITEX) et un ajout inerte le filler calcaire (L).

#### 4-3.1 Propriétés du béton à l'état frais

La méthode utilisée pour évaluer l'aptitude au travail à la fois pour le béton ordinaire et le béton recyclés était la méthode de Slump Test selon la norme NA EN 12350-2.

Une maniabilité d'environ  $70 \pm 20$  mm à étais maintenu pour tous les mélanges.

##### 4-3.1.1 Consistances des bétons frais

Comme tous les mélanges de béton sont préparés avec un affaissement imposé (entre 5 et 9 cm) fourchettes des bétons plastiques ce qui est plus répondu dans les chantiers de coulage de béton.

On remarque que la quantité d'eau réellement utilisée (eau de gâchage) pour assurer cet affaissement s'accroît avec le taux de substitution en sable recyclés d'une part et le type d'ajouts d'autre part. Cette quantité est importante pour l'obtention d'une ouvrabilité

## Analyse et discussion des résultats

plastique (approximativement de 5 à 16%) pour les bétons recyclés conçue avec 10 et 20% des ajouts minéraux actifs [79].

D'après les figures 4-33; 4-34 et 4-35 et le tableau 4-25 on remarque que le rapport E/C des différentes mélanges varie dans le même sens que le taux de substitution en granulats fin recyclés. Cela traduit par la présence de l'ancien mortier qui couvre les granulats provenant du concassage de béton concassée (SDB) qui est caractérisé par sa forte absorption d'eau (6%) tandis que les granulats, issus du concassage de brique (SDBR), ont une porosité élevée, plus la nature d'origine argileuse (10%).

Les bétons recyclés (B.SDB, B.SDBR) avec 10 et 20% des ajouts minéraux ont une consistance plus élevée que celle préparé sans ajouts minéraux et cela due à la finesse des moutures des ajouts minéraux.

**Tableau 4-25:** Consistance des bétons à base des agrégats recyclés pour un dosage  $350\text{kg/m}^3$

Type de béton	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée pour le mélange (l/m <sup>3</sup> )	Affaissement mesuré (cm)	Affaissement choisi (cm)	Quantité d'eau de gâchage ajoutée (l)
<b>100/0/0</b>	0.56	210.00	5.50	5-7	0.00
<b>50/50/0</b>	0.62	216.00	5.80		6.00
<b>50/0/50</b>	0.66	230.00	6.08		20.00
<b>1<sup>ère</sup> série</b>					
<b>50/50/0 S</b>	0.67	227.60	5.70	5-7	17.60
<b>50/50/0 Z</b>	0.71	247.40	6.30		37.40
<b>50/50/0 D</b>	0.77	268.22	5.50		58.22
<b>50/50/0 L</b>	0.72	251.30	5.80		41.30
<b>2<sup>ème</sup> série</b>					
<b>50/0/50 S</b>	0.68	236.98	5.20	5-7	26.98
<b>50/0/50 Z</b>	0.74	260.42	6.00		50.42
<b>50/0/50 D</b>	0.78	273.44	6.60		63.44
<b>50/0/50 L</b>	0.74	259.10	6.20		51.10

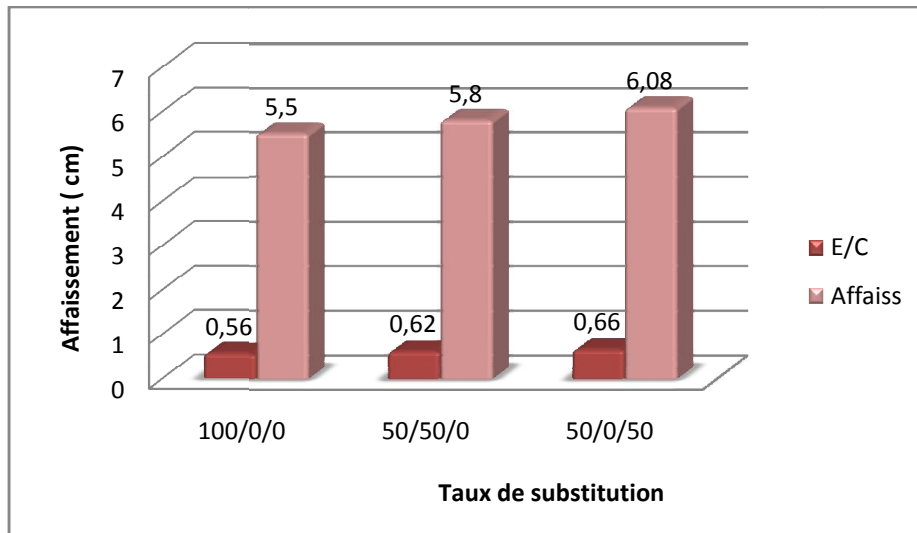


Figure 4-33: Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons en fonction du taux de substitution

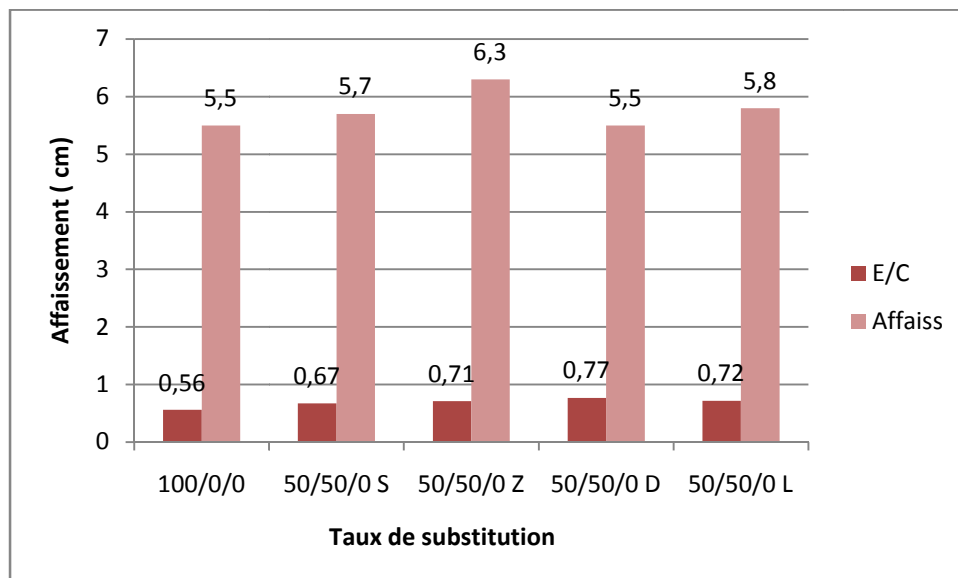
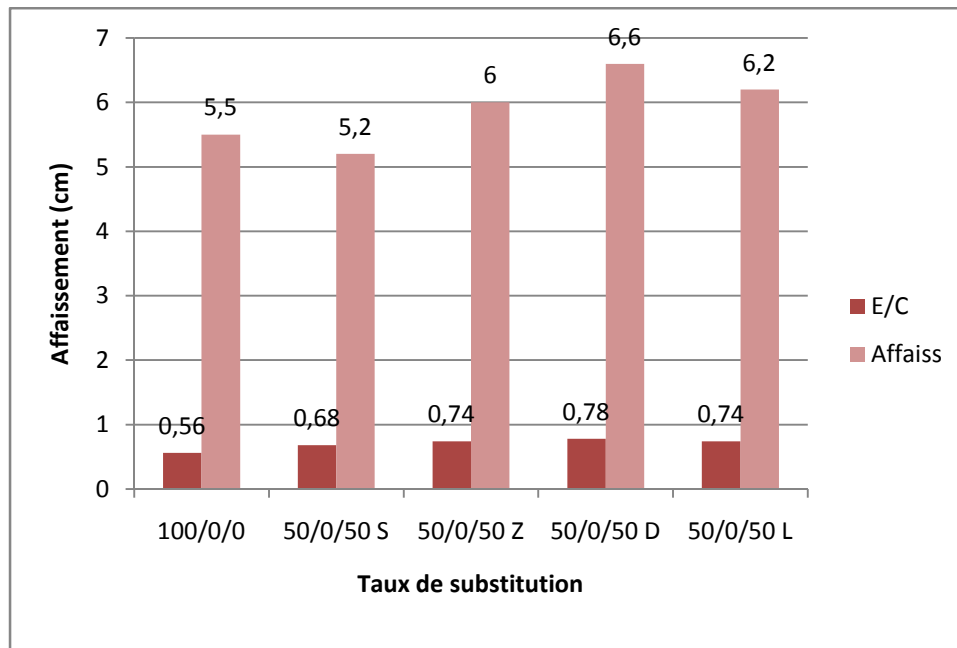


Figure 4-34: Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons de sable de béton concassé pour différents ajouts minéraux



**Figure 4-35:** Evolution du rapport E/C et l'affaissement des bétons de sable de brique concassé pour différents ajouts minéraux

### 4-3.2 Etat durci

#### 4-3.2.1 Résistance à la compression

L'essai s'effectue sur machine à compression conformément à la norme NF P 18-406. La résistance à la compression est déduite par moyenne d'écrasement de cinq éprouvettes cylindriques de  $(10 \times 20) \text{ cm}^3$  pour chaque mélange, soit à 28j et à 90jour de cure.

Le tableau 4.26 regroupe les résultats de la résistance à la compression à 28 et 90 jours du différent effet des ajouts minéraux sur les bétons à base des sables de démolitions.

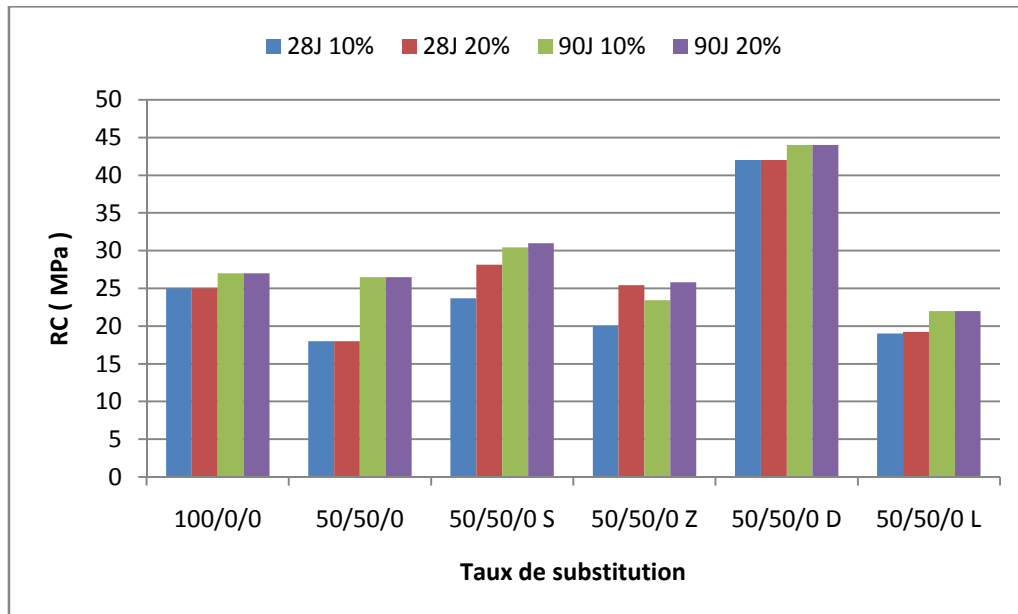
**Tableau 4-26:** Résistance à la compression du béton à base d'agrégats recyclés avec différents ajouts minéraux

Type de béton SN/SDB/SDBR	Résistance à la compression en MPa			
	28j		90j	
	10%	20%	10%	20%
<b>100/0/0</b>	25.00		26.15	
<b>50/50/0</b>	18.00		26.49	
<b>50/0/50</b>	16.00		25.75	
<b>1<sup>ère</sup> série</b>				
<b>50/50/0 S</b>	23.69	28.13	30.45	31.00
<b>50/50/0 Z</b>	20.00	25.42	23.45	25.80
<b>50/50/0 D</b>	42.00	-	42.00	-
<b>50/50/0 L</b>	19.03	19.23	22.00	22.00
<b>2<sup>ème</sup> série</b>				
<b>50/0/50/ S</b>	18.63	25.10	33.62	39.44
<b>50/0/50/ Z</b>	29.04	27.76	35.98	39,10
<b>50/0/50/ D</b>	43.32	-	44.00	-
<b>50/0/50/ L</b>	17.18	17.50	28.06	23,31

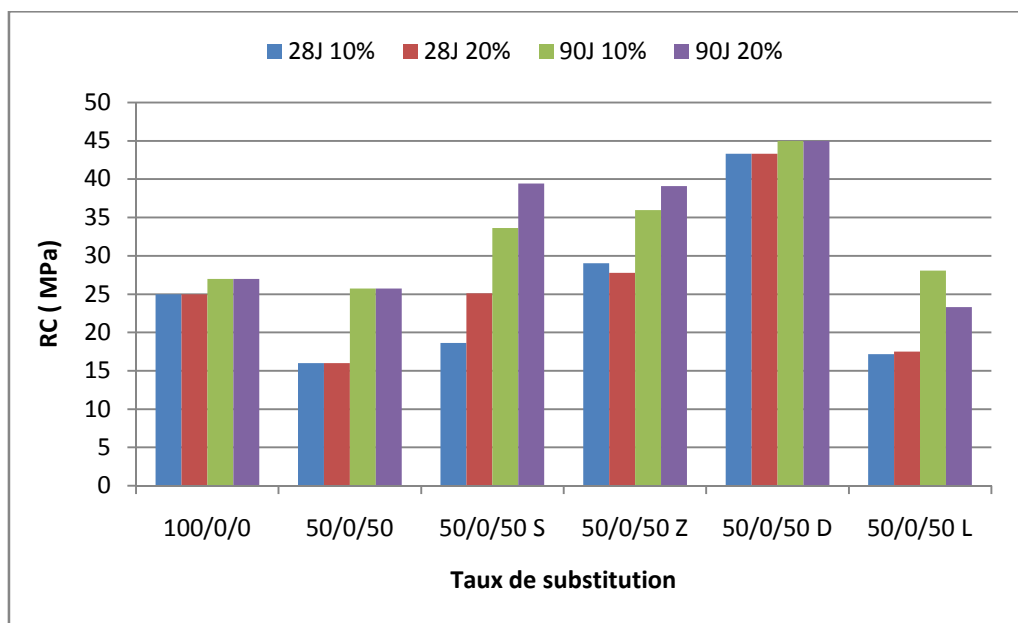


**Figure 4-36:** Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substituant





**Figure 4-37** : Résistances à la compression des bétons à base de sable de béton concassée avec ajouts minéraux



**Figure 4-38** : Résistances à la compression des bétons à base de sable de brique concassée avec ajouts minéraux

D'après la figure 4-36 : on remarque que les bétons recyclés (B.SDB, B.SDBR) présentent des résistances à la compression plus faible que le béton conventionnel, et que la chute de résistance diminue en faisant augmenter l'âge de cure.

Les figures 4-36 ; 4-37 et 4-38 présentent les résultats des essais à la compression des bétons à base de granulats recyclés conçus avec des sables de démolition de béton et brique concassée avec ajouts minéraux actifs (laitier, pouzzolane et fumés de silice) et inerte (calcaire) effectuée sur des éprouvettes cylindrique (10×20) cm<sup>3</sup>.

Pour les bétons à base de sable de démolition de bétons concassée (SDB) :

On remarque que l'ajout de (10 et 20%) de laitier améliore la résistance à la compression à moyen et à long terme (31%) et cela dû à la finesse élé

vée des ces ajouts, tandis que pour le pouzzolane on observe une légère augmentation (11%) à moyen et à long terme du fait que les réactions pouzzolaniques sont lente [80]. L'évolution des résistances selon le temps est expliquée par la propriétés hydraulique latente de l'hydratation des additions minérales ( laitier et pouzzolane ) [81].

Pour le béton conçu avec de sables de démolition de brique concassées (SDBR) :

On remarque une légère augmentation (16%) des résistances mécaniques avec l'ajout de laitier (10% et 20%). Par contre l'ajout de pouzzolane améliore nettement les résistances à la compression à moyen terme qui est sont de l'ordre de 74 % et de 94% à long terme et cela due à la nature pouzzolanique des briques.

On constate que la présence de la fumée de silice dans les bétons à base de sables recyclés influence de façon significative les propriétés mécaniques de ces derniers, une augmentation importante d'environ 97% pour (SDB) et 98 % pour (SDBR) qui dépasse le béton témoin. Cette action particulière est due au fait que les grains de la fumée de silice ont un diamètre environ 100 fois plus petit que celui des plus petits grains de ciment, et que cette finesse des grains diminue le ressuage.

L'ajout de calcaire améliore légèrement les résistances des bétons à base des sables recyclés (SDB, SDBR), mais reste inférieur au béton témoin.

### 4-3.2.2 Résistance à la flexion

Dans cet essai un prisme de béton non armé de  $(10 \times 10 \times 50) \text{ cm}^3$ , est soumis à un effort de flexion jusqu'à la rupture d'une charge en deux points symétriques. Les points d'application de la charge étant placés aux tiers de la portée.

La contrainte maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspondant à la résistance à la flexion est donnée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{1.8F}{a^2} (\text{MPa})$$

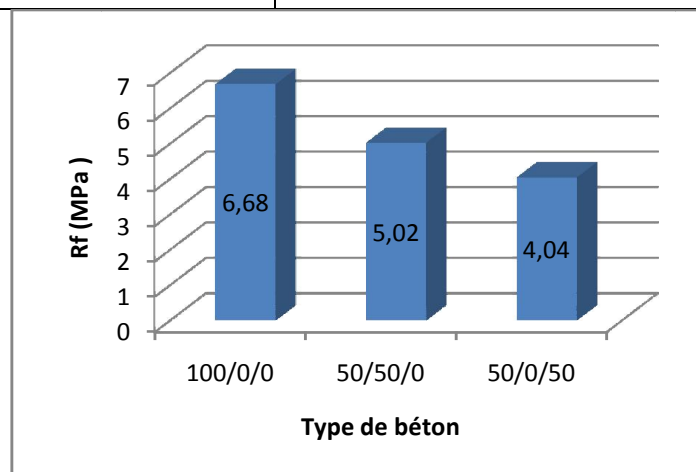
F: la charge de rupture.

a: cote de la section carrée de l'éprouvette.

Dans le cadre de cette étude, cet essai a été effectué sur les meilleures compositions des bétons à base d'agrégats recyclés qui font l'objet de cette étude, dosées à  $350 \text{ kg/m}^3$  après 28 jours de cure dans l'eau à  $20^\circ\text{C}$ , les résultats sont portés sur le tableau 4.27

**Tableau 4-27:** La résistance à la flexion des bétons testés.

Type de béton (SN/SDB/SDBR) %	Résistance à la flexion ( $R_f$ ) MPa
100/0/0	6.68
50/50/0	5.02
50/0/50	4.04



**Figure. 4-39:** Évolution de la résistance à la flexion des bétons testés en fonction de taux de substitution des sables recyclés.

## Analyse et discussion des résultats

---

D'après le tableau 4-27 et la figure 4-39, nous remarquons que les résistances à la flexion des bétons recyclés sont inférieures à celle du béton ordinaire, la chute de résistances est :

- ❖ 5 % pour le béton à base de sable SDB
- ❖ 4 % pour le béton à base de sable SDBR à 50% recyclés.

Cette réduction de résistance peut se justifier par la présence de l'ancien mortier collé à la surface des granulats issus du concassage du béton de démolition causant une faible adhérence, tandis que pour les bétons de SDBR la fragilité des granulats facilite la propagation de la rupture et rend faible la résistance à la flexion.

### 4-3.2.3 Résistance en traction par fendage (essai Brésilien)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cette essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre (16.32) cm<sup>3</sup> par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera:

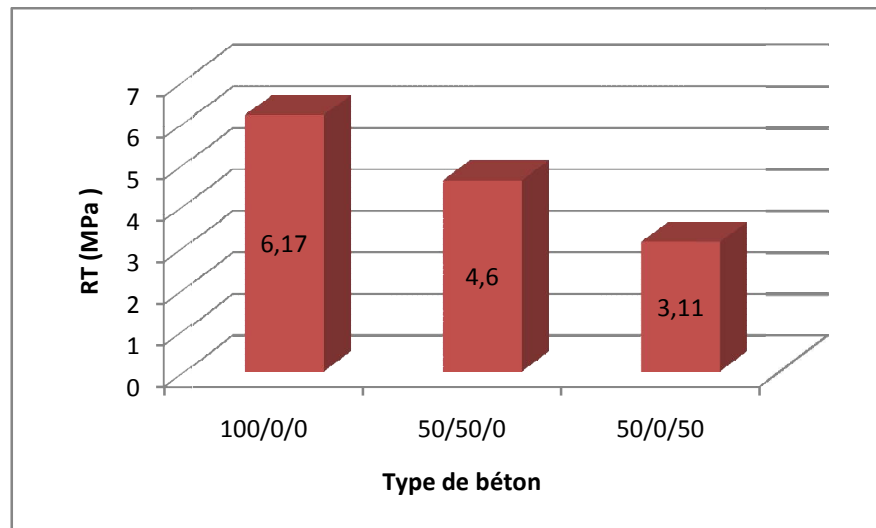
$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

Avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

**Tableau 4-28:** La résistance à la traction des bétons testés.

Type de béton (SN/SDB/SDBR) %	Résistance à la traction (R <sub>T</sub> ) MPa
100/0/0	6.17
50/50/0	4.6
50/0/50	3.11



**Figure. 4-40:** Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés en fonction de taux de substitution des sables recyclés

D'après le tableau 4-28 et la figure 4-40, en remarque que :

La chute de résistance à la traction est de l'ordre de 19 % pour le béton à base de sable de démolition de béton et de 27% pour le béton à base de brique concassé.

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

Les bétons contenant des sables issus du concassage de brique possèdent des résistances à la traction plus faibles que ceux contenant des sables provenant du concassage de béton de démolition.

#### **4-4 Résistance au temps chaud :**

Les éprouvettes des bétons des dimensions  $(10 \times 10 \times 10)$  cm<sup>3</sup> sont soumises à la compression simple, les trois types des échantillons sont chauffées à différentes températures, 50, 100, 150 et 200 °C par palier de 50°C tous les 20 min à une vitesse de chauffage de 5°C/min, l'écrasement intervient après leur refroidissement à l'air libre à l'âge de 28 jours. Les résultats sont représentés sur le tableau 4.29.

D'après le tableau 4.29 et la figure 4.41, en remarque que :

## Analyse et discussion des résultats

---

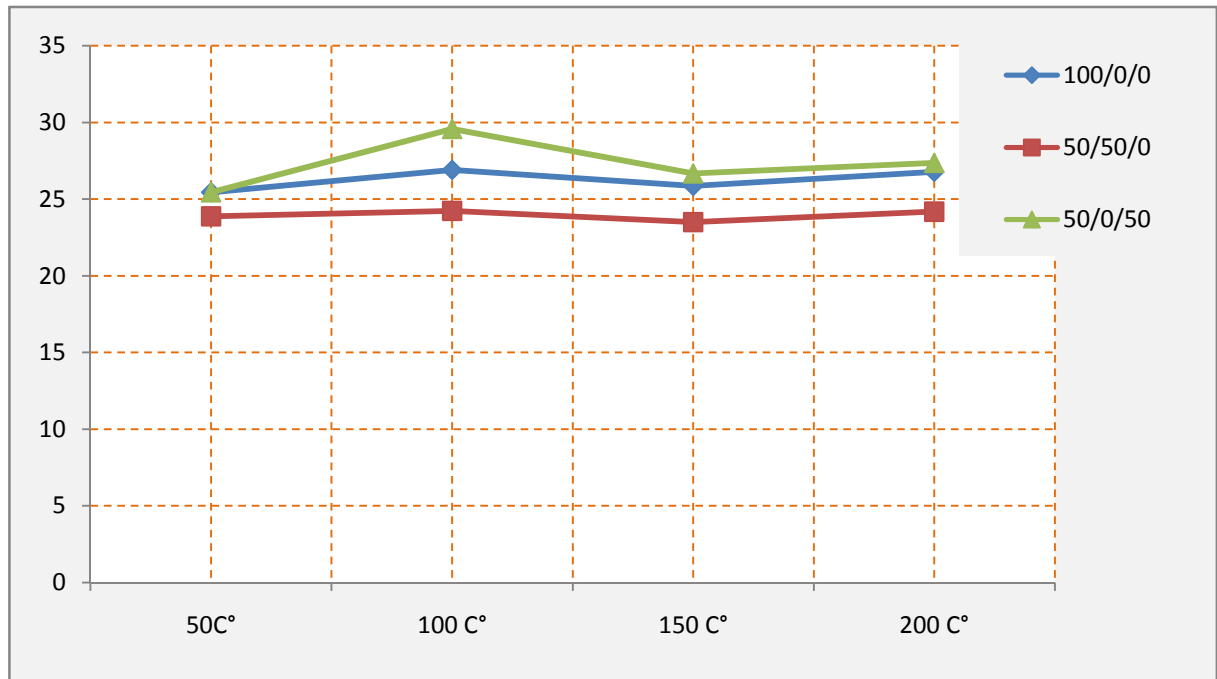
Les résistances à la compression des bétons à base de sable de démolition de brique augmente avec l'augmentation des températures de 50C° à 100C° et diminuent lorsque la température atteint 150C° et reste presque constante jusqu'à 200°C, cette augmentation de la résistance serait le fruit de l'effet des produits d'hydratations additionnels. Ce gain de résistance a été observé par **Kodur [82]**.

Les bétons à base de sable de démolition de béton concassée B.SDB ont les même évolutions que le béton témoin B.SN.

Le béton à base de sable de démolition de brique concassée B.SDBR résiste mieux aux températures élevées que les bétons à base de sable de démolition de béton concassée.

**Tableau 4-29:** Effet des températures sur les bétons à base des agrégats recyclés

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)			
<b>100/0/0</b>	25.00			
<b>50/50/0</b>	18.00			
<b>50/0/50</b>	16.00			
<b>Températures</b>				
	<b>50 C°</b>	<b>100 C°</b>	<b>150 C°</b>	<b>200 C°</b>
<b>100/0/0</b>	25.45	26.91	25.87	26.79
<b>50/50/0</b>	23.88	24.23	23.51	24.18
<b>50/0/50</b>	25.44	29.58	26.67	27.36



**Figure 4-41:** Effet de la température sur la résistance des bétons recyclés.

### 4-5 Retrait des bétons recyclés

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément, les déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation qui se traduit par un rétrécissement des éléments de 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 aussi des retrait importants lors du durcissement ; d'où l'intérêt de l'étude de retrait.

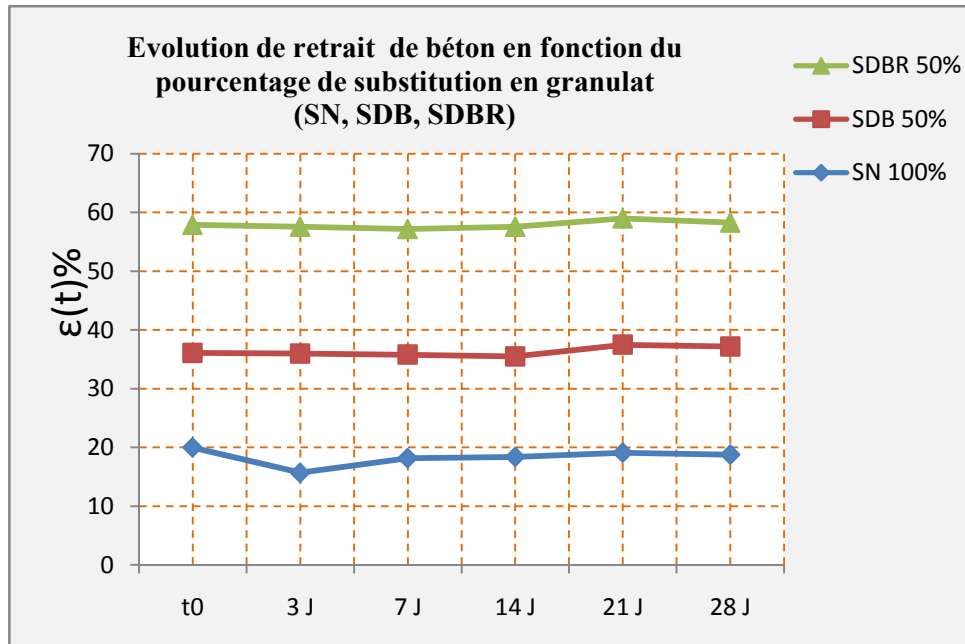


Figure 4-42: Evolution de retrait des bétons en fonction de taux de substitution en granulats recyclés conservés à l'air libre

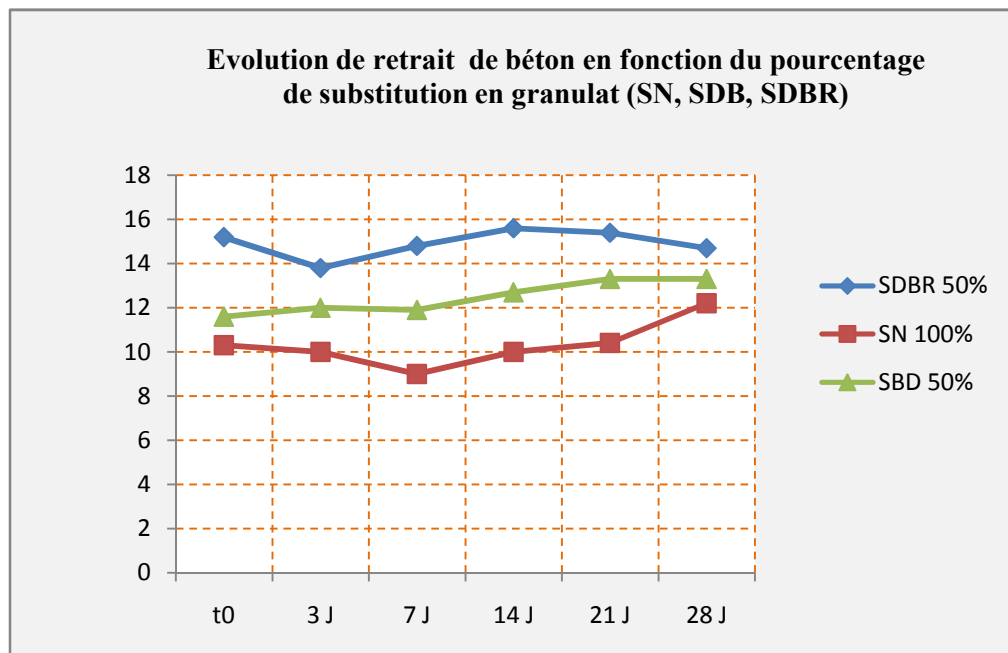


Figure 4-43: Evolution de retrait des bétons en fonction de taux de substitution en granulats recyclés à l'eau

D'après les figures 4-42 et 4-43 on remarque qu'en générale que le retrait en air libre et à l'eau des bétons recyclés nettement plus importants que ceux du béton Témoin



## Analyse et discussion des résultats

- Pour le béton recyclé à base de béton concassé (50/50/0), le retrait est plus grand d'environ 30% au jeune âge (28j).
- Pour le béton recyclé à base de brique concassé (50/0/50), l'évolution est différente, le retrait au jeune âge est six fois plus petit que celui un béton Témoin, ces résultats sont similaire a ceux trouvés par **Coquillât [83]**.

### 4-6 Coefficient de ramollissement

C'est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau  $R_{sat}$  à la résistance à la compression du matériau sec  $R_{sec}$ .

$$K = R_{sat} / R_{sec}$$

Ce coefficient caractérise la résistance à l'eau du matériau béton. Ce dernier est considéré résistant à l'eau si  $K_{ram} \geq 0.8$  surtout dans les régions où l'humidité est un facteur constant ( $K_{ram} = 0$  pour l'argile  $K_{ram} = 1$  pour les métaux et les verres).

Les résistances  $R_{sat}$  et  $R_{sec}$  sont mesurée sur éprouvette  $10 \times 10 \times 10$  cm à 28 jour d'âge



**Photo 4-1:** Exemple de rupture

**Tableau 4-30:** Coefficient de ramollissement du béton recyclé.

	100 /0/0/	50/50/0	50/0/50
$K_{ram}$	1.80	1.48	1.45

### 4-7 Absorption d'eau par immersion

Le volume poreux du béton peut se mesurer par absorption d'eau, le procédé consiste à sécher une éprouvette de béton à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche. L'absorption d'eau en masse (%) est :

$$A = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} 100\%$$

Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton sont illustrées sur le tableau 4.29.

**Tableau 4-31** : Coefficient d'absorption en fonction du type de béton

Type de béton SN/SDB/SDBR	Absorption d'eau %	Densité du béton durci Kg/m <sup>3</sup>
<b>100/0/0</b>	4.09	2.44
<b>50/50/0</b>	6.24	2.39
<b>50/0/50</b>	15.93	2.35
<b>1<sup>ère</sup> série</b>		
<b>50/50/0 S</b>	4.91	2.38
<b>50/50/0 Z</b>	5.98	2.39
<b>50/50/0 D</b>	4.65	2.38
<b>50/50/0 L</b>	6.60	2.36
<b>2<sup>ème</sup> série</b>		
<b>50/0/50 S</b>	4.35	<b>2.37</b>
<b>50/0/50 Z</b>	6.11	<b>2.37</b>
<b>50/0/50 D</b>	4.93	<b>2.33</b>
<b>50/0/50 L</b>	6.94	<b>2.32</b>

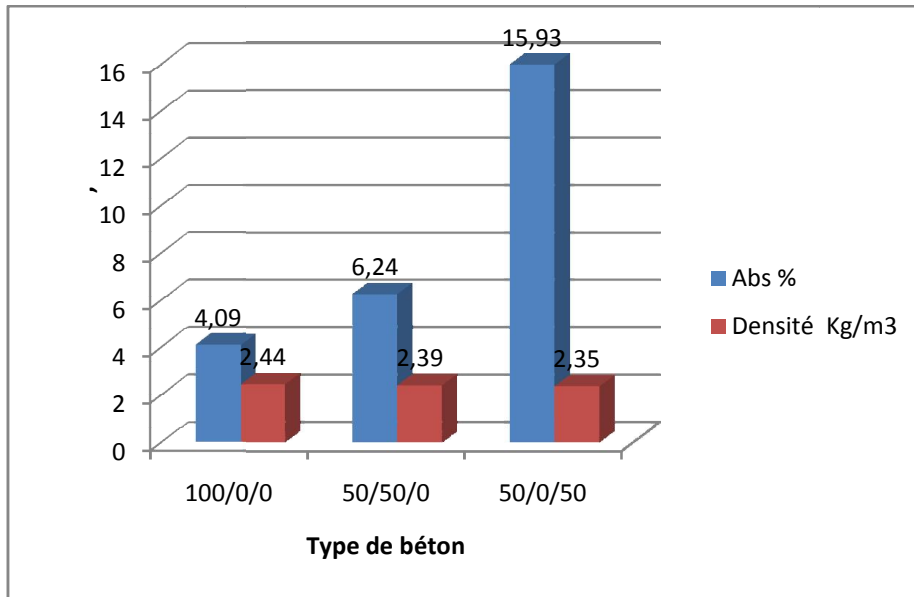


Figure 4-44: Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons en fonction du taux de substitution pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$

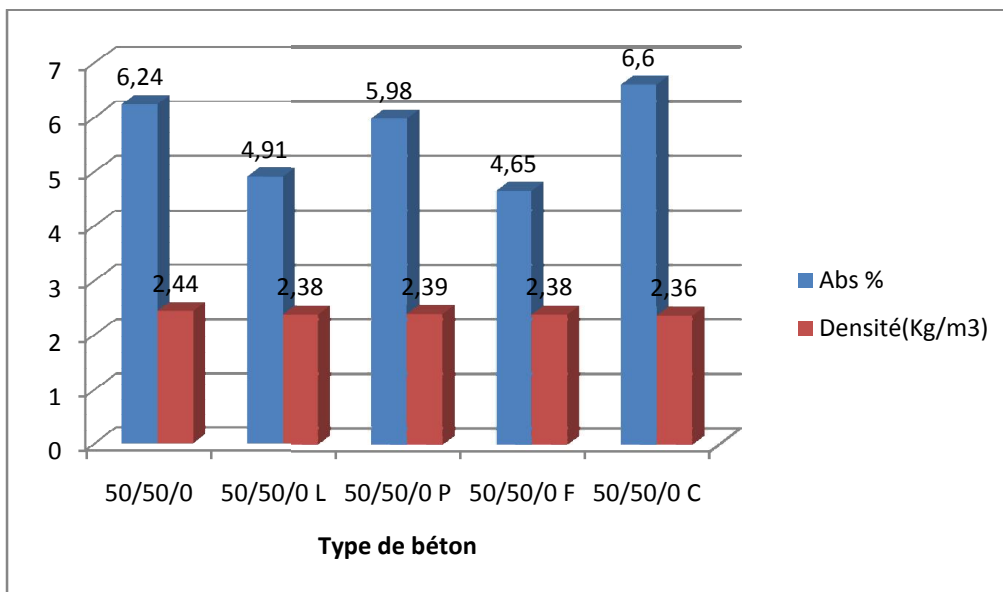
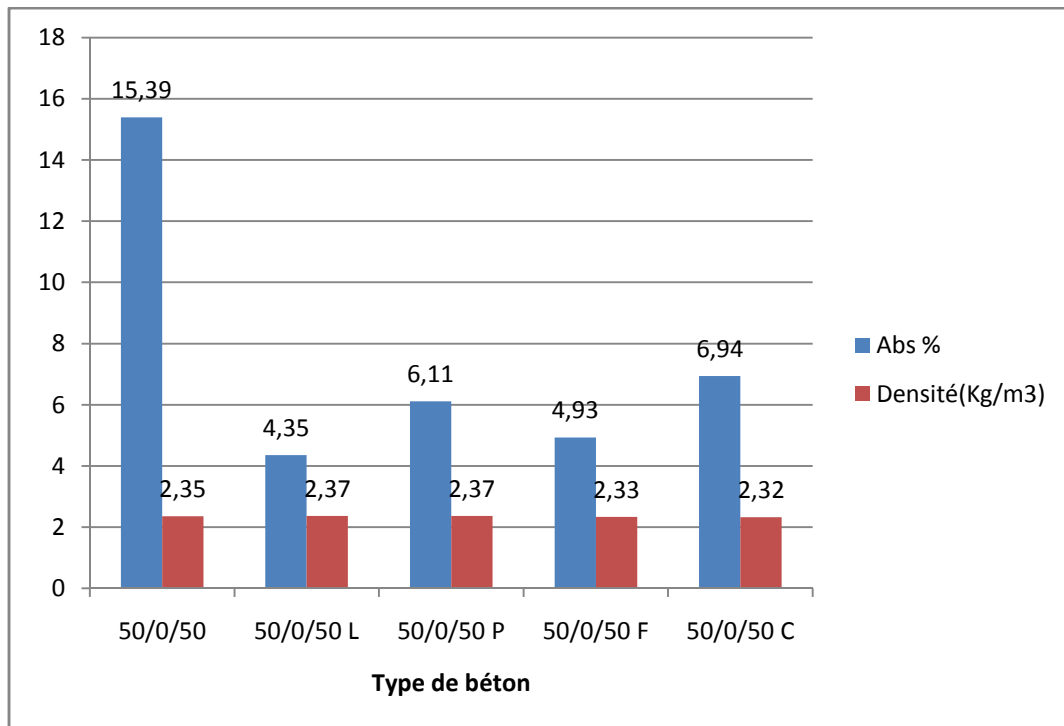


Figure 4-45: Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons à base de sable de béton concassé avec ajouts minéraux pour un dosage de  $350 \text{ kg/m}^3$



**Figure 4-46:** Masse volumique et l'absorption d'eau des bétons à base de sable de brique concassé avec ajouts minéraux pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>

D'après le tableau 4-31 et les figures 4-44 ; 4-45 et 4-46 :

On remarque que les bétons à base des sables recyclés sont plus poreux et absorbent plus d'eau que le béton témoin (à base de sable naturel).

Le pourcentage d'absorption d'eau après 48 heures d'immersion est de l'ordre de 4 % pour le béton témoin, et accroît pour les bétons à base des sables recyclés en fonction du taux de substitution arrivant à 6 % pour béton comportant 50% de sable de démolition de béton concassé (SDB), 16 % pour béton comportant 50% de sable de démolition de brique concassée (SDBR).

Pour les bétons contenant des ajouts minéraux absorbent beaucoup d'eau surtout le pouzzolane et le calcaire et cela due à la finesse des ajouts minéraux.

### 4-8 Action des milieux agressifs

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrate, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaque d'acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline.

## Analyse et discussion des résultats

### 4-8.1 Résistance à la compression

La résistance aux milieux agressifs est déterminée à partir des éprouvettes cubique (10×10×10 cm). Le durcissement étant en condition naturelles (cure sous l'eau) pendant 28 jours , puis les bétons durcis sont immergées séparément pendant 60 jours dans les solutions suivantes : eau potable , eau de mer , HCl (5%), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5%), NaOH (5%), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%) . Les résultats sont représentés dans le tableau 4.32

**Tableau 4-32** : Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression

TYPE DE BETON SN/SDB/SDBR	RC ( MPa )					
	Milieux agressifs					
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCL	NaOH	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	(NH <sub>4</sub> )SO <sub>4</sub>	Eau de mer
<b>100/0/0</b>	<b>50.00</b>					
<b>50/50/0</b>	<b>41.00</b>					
<b>50/0/50</b>	<b>38.00</b>					
<b>100/0/0</b>	19.40	29.40	38.00	40.00	37.00	41.00
<b>50/50/0</b>	14.40	26.00	35.30	39.00	35.40	27.10
<b>50/0/50</b>	13.70	25.00	34.20	36.00	34.00	25.30

**Tableau 4-33** : pH des différents milieux agressifs

Milieux agressifs	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl	NaOH	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Eau de mer
<b>BSDB</b>	2.28	6.3	13.65	12.88	4.40	12.90
<b>BSDBR</b>	3.36	5.12	13.78	12.42	11.40	11.20

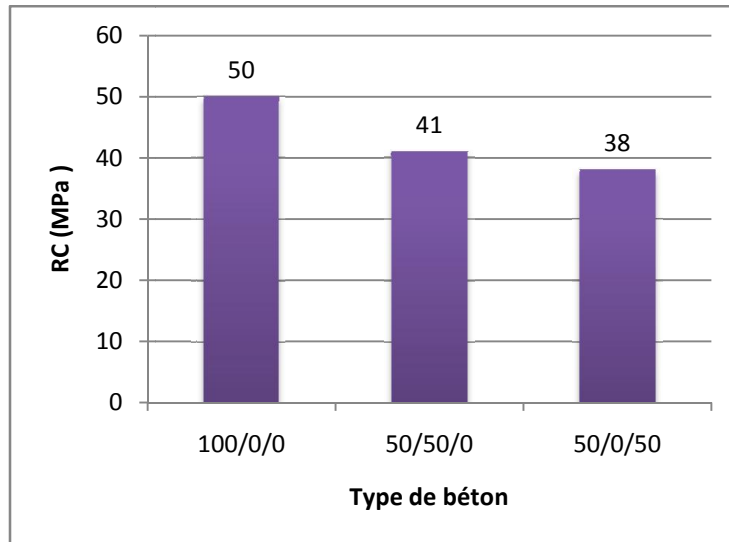


Figure 4-47 : Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution

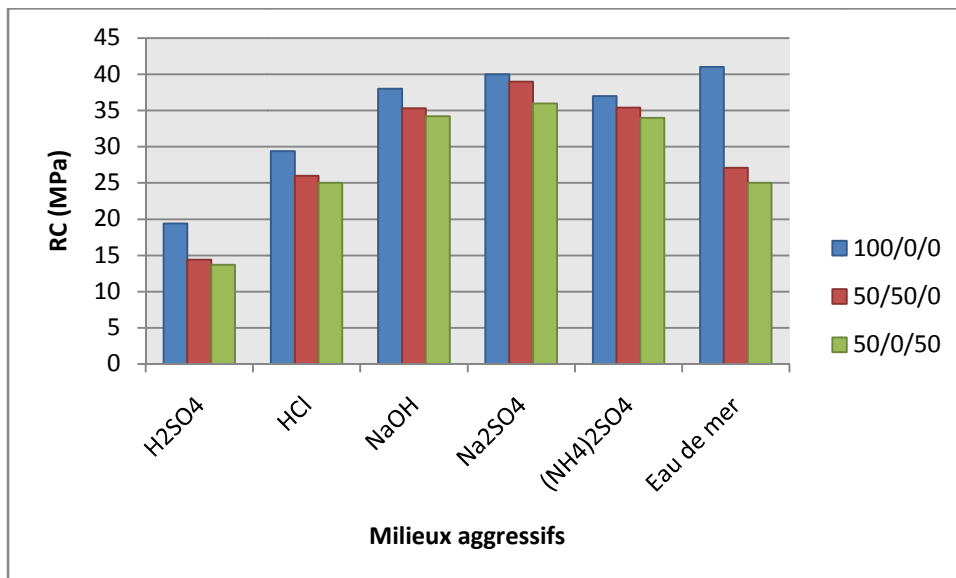


Figure 4-48: Effet du milieu de conservation sur la résistance des bétons à base du sable de démolition de béton et de brique concassée

D'après le tableau 4-30 et les figure 4-47 et 4-48: on remarque que les bétons conservés dans les acides sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et chlorhydrique HCL ont subit une dégradation accompagné d'une chute de résistance remarquable elle est de l'ordre de 65% et 37% pour les bétons recyclés à base de sable de démolition de béton concassée B.SDB pour H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HCL respectivement et de l'ordre de 64% et 35% pour les bétons recyclés à base de sable de démolition de brique concassée B.SDBR pour H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HCL respectivement et de l'ordre de 61% et 41 % pour le béton témoin B.SN pour H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HCL respectivement , cela due à la

## Analyse et discussion des résultats

forte agressivité des acides surtout l'acide sulfurique ( acide fort ). Tandis que les bétons conservés dans les autres milieux (NaOH ; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on remarque une légère diminution des résistances à la compression parce que ce sont des milieux basiques.

### 4-8.2 Perte de masse

On a réalisé des éprouvettes (10x10x10) cm<sup>3</sup> avec des différents taux de substitutions du sable (0%, 30%, 50%, 70% et 100 %) ; elles sont immergées pendant 28 jours dans l'eau à une température de 20 ±2°C, après cette période , les cubes sont pesés pour déterminer M<sub>1</sub> puis elles sont immergées dans les différentes solutions :

- 5 % d'acide chlorhydrique HCL
- 5% d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 5% d'hydroxyde de sodium NaOH
- 5% de sulfate d'ammonium (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Eau de mer.

La perte de masse des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM 267-96, les éprouvettes sont nettoyées 3 fois à l'eau douce pour éliminer le matériau altéré et puis on les laisse sécher pendant une demi heure ensuite on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M<sub>2</sub>.

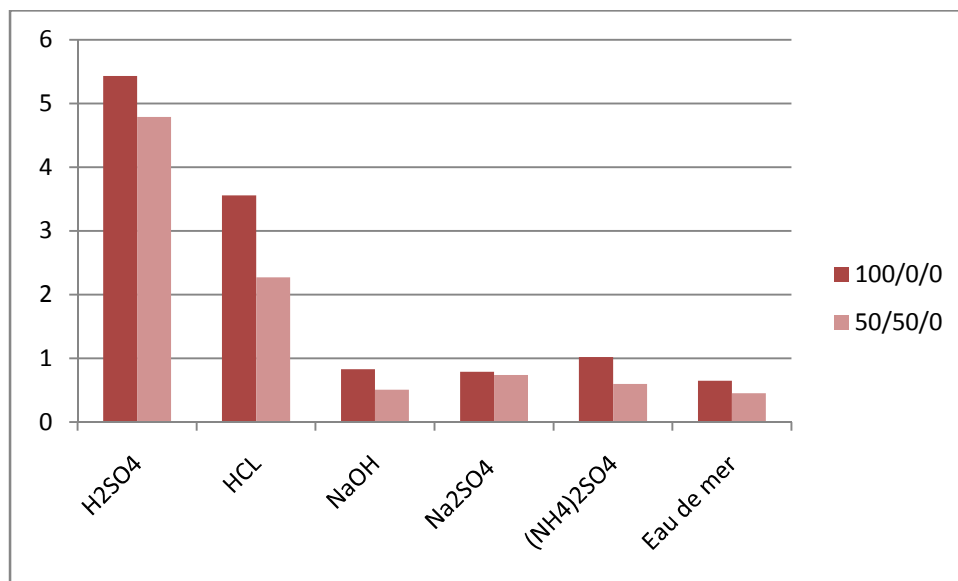
Cette opération est effectuée après 1 ; 7 ; 14 ; 21 et 28 jours après l'immersion concernant l'attaque par les acides. La solution d'attaque est renouvelée à sa totalité chaque 7 jour (selon la valeur du PH).

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

Avec M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

**Tableau 4-34:** perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs.

Type de Béton	Perte de masse en %					
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl	NaOH	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Eau de mer
<b>100 /0/0</b>	3.56	5.43	0.83	0.79	1.02	0.65
<b>50/50/0</b>	2.27	4.79	0.51	0.74	0.60	0.46
<b>50/0/50</b>	2.93	4.30	0.59	0.76	0.56	0.38



**Figure 4-49** : variation de perte de masse des bétons conservés dans les milieux agressifs.

D'après le tableau 4-32 et la figure 4-49 on observe que les solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HCL ont grandement affecté le béton par rapport aux autres solutions (NaOH ; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et l'eau de mer) qui ont moins affecté.

### 4-9 : Résistance au gel/dégel

La résistance au gel est le pouvoir d'un matériau saturé d'eau de supporter la congélation et le dégel alternatif sans aucun signe de destruction ni perte sensible de résistance mécanique.

Un matériau est considéré résistant au gel si, après un nombre déterminé de cycles de congélation et de dégel en état saturé, sa résistance ne diminue pas au-delà de 15-20% et si les pertes en poids, n'ont pas dépassé 5%. Si après la congélation les éprouvettes ne portent pas de traces de destruction, le degré de résistance au gel est établi en déterminant le coefficient de résistance au gel d'après la formule :  $K_{rg} = R_{rg}/R_{sat} > 0.75$

**R<sub>rg</sub>**: est la résistance à la compression d'un matériau après l'essai de résistance au gel ( MPa )

**R<sub>sat</sub>** : la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau, en MPa.

K<sub>rg</sub> des matériaux de construction résistant au gel ne doit pas être inférieure à 0.75.



Tableau 4-35 : Résistance au gel des bétons

Type de béton SN/SDB/SDBR	Rc (MPa)	Rc après l'essai de gel/dégel (MPa)	Coefficient de résistance au gel
100/0/0	49.87	38.20	0.77
50/50/0	40.49	32.19	0.80
50 /0/50	38.20	34.21	0.89

Tableau 4-36 : Perte de masse au gel/dégel des bétons recyclés

	Type de béton SN/BDB/SDBR	Perte de masse en %			
		Ages en Jours			
		1	7	14	28
Gel	100/0/0	1.6	2.0	4.0	4.2
	50/50/0	1.6	1.9	3.2	3.6
	50/0/50	1.6	1.8	3.00	3.5
Dégel	100/0/0	0.8	0.4	1	0
	50/50/0	0.8	0.3	0	0
	50/0/50	0.8	0.25	0	0

D'après les Tableaux 4-33 et 4-34, on remarque que le coefficient de résistance au gel des bétons recyclés est supérieur à 0.75 et la perte des masses est inférieure à 0.5%, ces performances sont similaires à ceux des bétons ordinaires à base des agrégats naturels.

#### 4-10 Déformabilité du béton

Dans le but d'étudier l'influence des ajouts minéraux actifs sur la déformabilité du béton à base des sable recyclés; nous avons confectionné trois types de béton (100/0/0; 50/50/0; 50/0/50) avec un dosage en ciment de 350Kg/m<sup>3</sup> en incorporant 10% de laitier et pouzzolane

Chaque série comprend trois échantillons prismatiques (10×10×40) cm<sup>3</sup>.

Les essais ont été effectués à 28 jours de durcissement, la déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadre appropriés sur une surface de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal, comportant des plots de mesures (distants de 20 cm). Photos 4.



**Photos 4-2:** Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10×10×40) cm<sup>3</sup>

### 4-10.1 Module d'élasticité du béton

Le module d'élasticité se détermine pour chaque éprouvette au niveau de la charge égale à 30% de la charge de destruction.

### 4-10.2 Relation contrainte-déformation et module d'élasticité

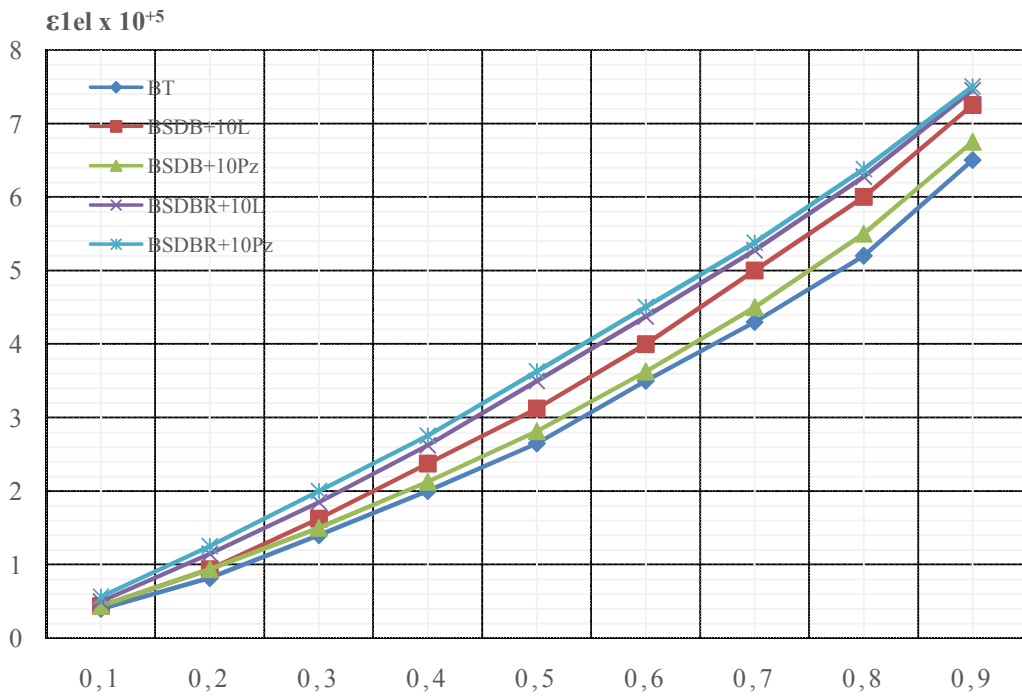
Les figures 4-50 à 4-53 et 4-54 à 4-55, correspondent aux résultats des essais appliqués sur trois prismes identiques (10×10×40) cm<sup>3</sup> pour chaque série (100/0/0, 50/50/0, 50/0/50), avec ajout de 10% de laitier ou de pouzzolane pour chaque type de béton (BSBB, BSDBR). Elles représentent l'évolution de la relation entre les déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales à l'instant (t) et relatives totales à (t+Δt) avec l'augmentation de la contrainte relative (η) ainsi que le module de déformabilité du béton à la compression. Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence des agrégats de démolition sur la déformation du béton à la compression, et de préciser quelques remarques:

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle (η=0.1-0.5) et un comportement élastique linéaire.

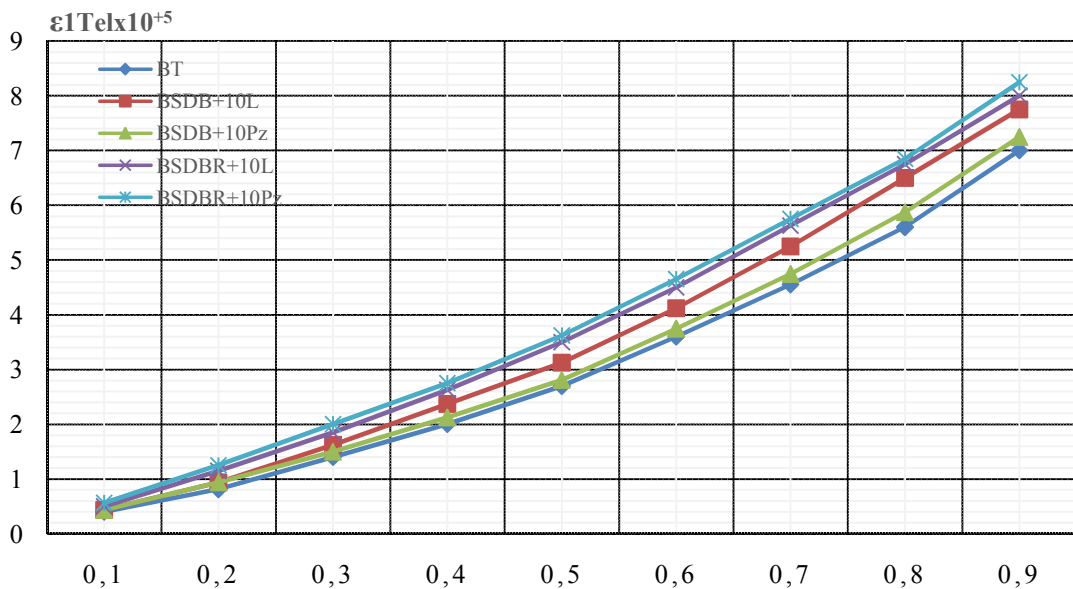
## Analyse et discussion des résultats

---

- La relation entre ( $\eta$ ) et les déformations est curviligne dans l'intervalle ( $\eta=0.5-0.9$ ), ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.
- Ces figures montrent bien que le béton fabriqué à base de sable de démolition de béton concassé avec ajout de 10% de pouzzolane présente des basses déformations par rapport à celles du béton confectionné à base de brique concassée avec ajouts de 10% de laitier et pouzzolane dans le deux sens longitudinale et transversal Pour le module d'élasticité on remarque que :  
Le béton à base de sable de démolition de béton concassé avec 10 % de laitier présente un meilleur module d'élasticité par rapport au béton conçu avec du sable de démolition de brique concassée avec ajouts minéraux (laitier et pouzzolane)
- Notons que le béton à 50% de sable concassé de béton de démolition avec ajouts de 10 % laitier présente un meilleur module d'élasticité voir fig. 4-55 cela s'explique par la forte adhérence entre la pate de ciment et les agrégats.
- Le B.SDBR avec 10% laitier ou de pouzzolane présente un meilleur module de déformabilité figure 4-54.



**Figure4-50:** Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton  $\epsilon_{1el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S ET BSDBR+10Z



**Figure 4-51:** Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton  $\epsilon_{1Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S et BSDBR+Z

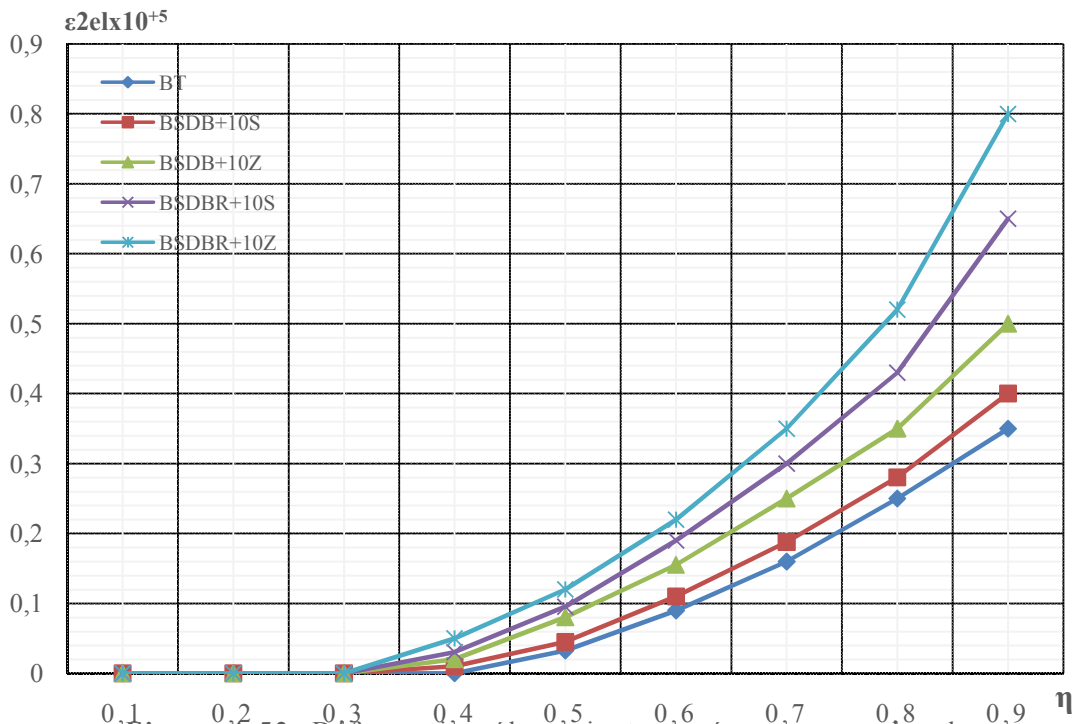


Figure 4-52: Déformation élasto-instantanées transversales du béton  $\epsilon_{2el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes BT, BSDB+10L, BSDB+10Pz, BSDBR+10L et BSDBR+Pz

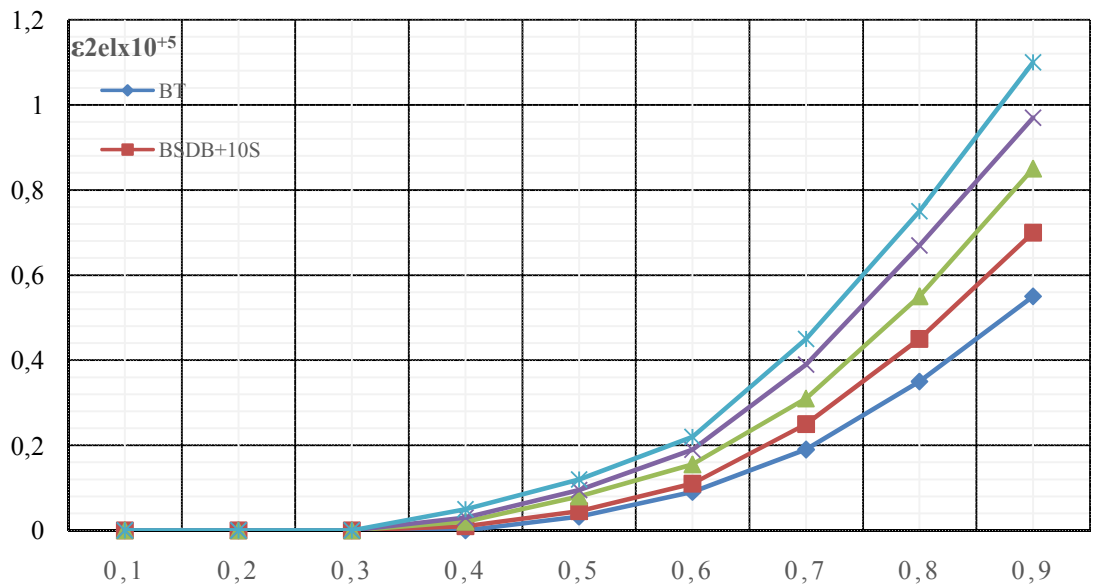
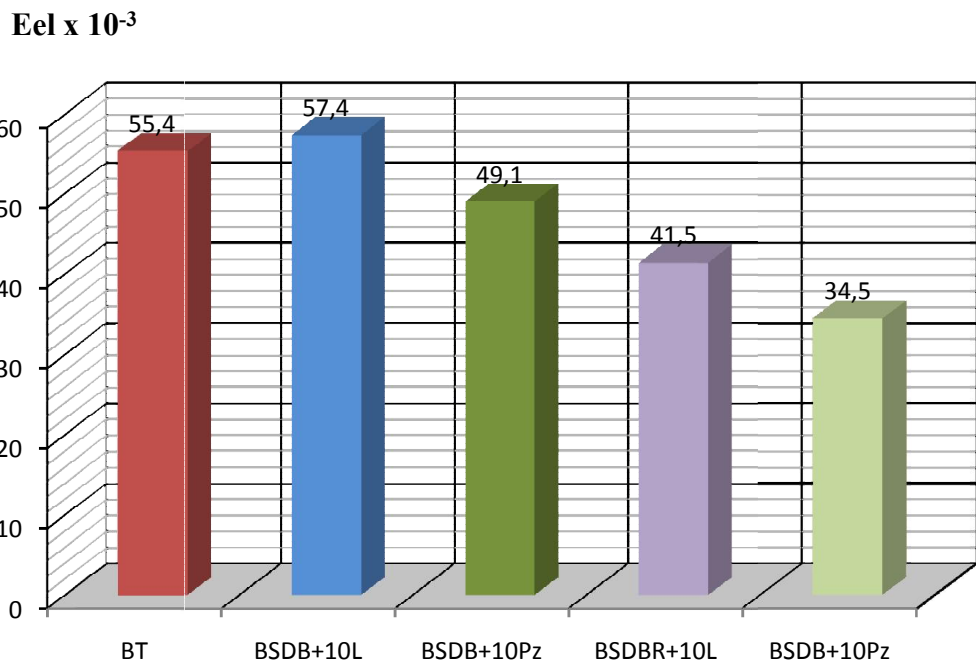
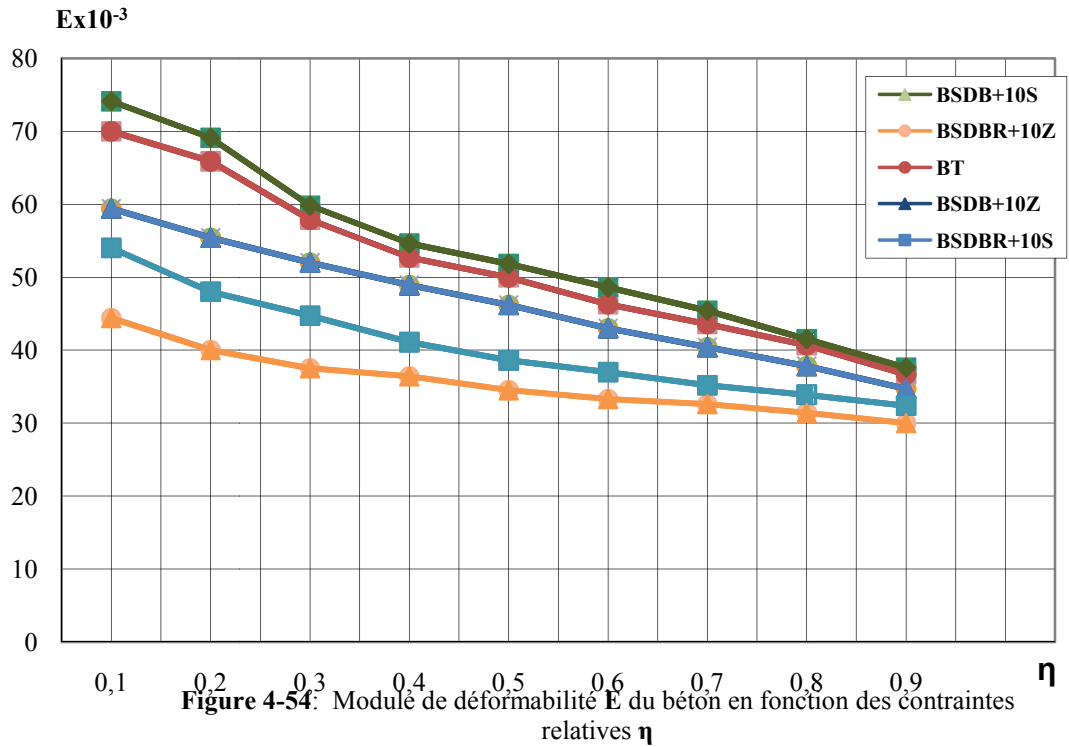


Figure 4-53: Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton  $\epsilon_{2Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes BT, BSDB+10S, BSDB+10Z, BSDBR+10S et BSDBR+Z



## 5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### **5.1 Introduction :**

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des résidus de béton ainsi que de brique démolis et leur utilisation dans le béton comme agrégats. L'étude présente une démarche expérimentale suivie lors de la substitution des granulats ordinaires par les granulats recyclés (sable) provenant de la démolition (produits par le concassage du béton et brique de maçonnerie en particulier). La base de cette démarche est de déterminer les performances de chaque composition qui permet de comprendre le comportement des sables recyclés dans le béton.

Les influences sur l'ouvrabilité, la densité, l'absorption, la résistance à la compression, résistance à la température, coefficient de ramollissement, retrait (l'air et eau) et durabilité dans les milieux agressifs; sont les paramètres retenus dans cette étude.

### **5.2 Conclusions :**

Dans cette étude, on a utilisé des sables recyclés de déchet de démolition de béton (SDB) et de brique concassé (SDBR) avec des ajouts minéraux actifs laitier (S) , Pouzzolane (Z), la Fumée de silice (D) et calcaire (L). Les résultats obtenus montrent que :

- L'ajout de laitier améliore la résistance à la compression à moyen et à long terme du béton à base de 50 % sable de démolition de béton.
- L'ajout de pouzzolane au béton à base de 50% sable de démolition de brique améliore nettement les performances mécaniques, cela est dû à la nature pouzzolanique du déchet de brique concassée.
- La présence de la fumée de silice dans les bétons à base de sables recyclés influence de façon significative les propriétés mécaniques de manière analogue pour les deux sables (SDB, SDBR).

Donc, on peut conclure qu'on peut aller jusqu'à 50% de substitution de sable de démolition soit de béton ou de brique concassée pour fabriquer des bétons hydrauliques avec des même performances mécaniques ou plus que les bétons avec agrégats naturels avec ajouts de 10 et 20% de laitier pour les béton de SDB et de 10 et 20% pour les bétons de SDBR et 10 % de fumée de silice pour les deux sables à moyen et à long terme.

- On constate qu'on peut atteindre une augmentation de la quantité de gâchage de 5 à 16% pour le béton recyclé (B.SDB, B.SDBR) avec ajout de laitier, Pouzzolane, la Fumée de silice et calcaire (S ; Z ; L et D).
- La présence des ajouts minéraux améliore la maniabilité des bétons recyclés notamment la fumé de silice et la pouzzolane.
- Les bétons recyclés B.SDB avec ajouts de 10% de laitier et pouzzolane ont une bonne tenue à la déformation par rapport au B.SDBR avec même ajouts minéraux.
- Le B.SDBR avec 10% pouzzolane présente un meilleur module de déformabilité.
- Les bétons à base de sable de démolition de brique concassée résistent bien à des températures élevées.
- Les bétons à de 50% de SDB ET SDBR peuvent être utilisés dans les milieux chimiquement agressifs notamment les milieux basiques.

### **5.3 RECOMMANDATIONS**

Quelques recommandations pour des futures recherches dans le domaine des agrégats recyclés et leur utilisation dans le béton peuvent être dégagées à la suite de cette étude :

- Dans notre cas, l'étude expérimentale a été faite sur des matériaux récupérés et concassés manuellement (non pollués), il est souhaitable que des essais soient faits sur des matériaux provenant directement des chantiers de démolition et leur concassage soit mécanique.
- Analyser le comportement des éléments structuraux fabriqués en béton armé à base des agrégats recyclés sous chargement statique et dynamique.
- Etudier le comportement à haute température des bétons de granulats recyclés ;



## 6-REFEENCES BIBLIOGRAPHIHIQUES

- [1] HANSEN.TC. (1992) “Recycling aggregates end recycling aggregate and masonry”, RILEM Report N° 06, LONDON, E & FN, SPON.
- [2] NEWMAN. A. J. (1995) “The utilisation of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete”, Department of scientifique and Industrial research, UK.
- [3] COQUILLAT. G. (1984) “ Recyclage des matériaux des démolition dans la confection des bétons”, Annales de L’ITBTP, n°428, France, pp.63-71.
- [4] MARLET.JD ET PIMIENTA.P; “Mechanical and physical-chemical properties of concrete aggregates. RILEM, Proceeding 23. Third international RILEM symposium on demolished and reuse of concrete and masonry, Odens, Danemark 24-27 October, pp 343-354
- [5] DREUX. G, FESTA. J. (1995) “ Nouveau guide du béton ”, Septième édition, EYROLLES.
- [6] NEVILLE ADAM M. (2000) “ Propriétés des bétons”, Centre de Recherche Interuniversitaire (CRIB), Edition Eyrolles, 806 pages.
- [7] RILEM (1988) : Demolition and Reuse of concrete. Report of technical committee 37-DRC. T.C. Hansen, E&FN SPON, 305 p
- [8] QUEBAUD, M. (1996) Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat, Département de génie civil, Université d'Artois, Artois, France. 250 p.
- [9] CIMPELLI, C. (1996). Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'ile-de-france : les bétons et produits de démolition recyclés. Décembre 1996,43 p.
- [10] TURNER - FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. USA (1999) [www.tfhr.gov](http://www.tfhr.gov) ; [www.tfhr.gov/recyle/waste/toc.htm](http://www.tfhr.gov/recyle/waste/toc.htm)
- [11] BERUBÉ. MA, ANGERS, M, FRENETE, J., PELLERIN, F., MARQUIS, B.(1998) : Frost-Resistance of Concrete Incorporating Aggregates Made of Recycled Concrete. Compilation of Paper of International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry. CANMET / ACI., Ottawa, Canada, October 21-23, p. 163-177.
- [12] PILON B. (1998) Durabilité au gel des bétons obtenus par RHP. Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval, en préparation
- [13] TREMBLAY, M. (1996) “Stabilisation des chaussées par pulvérisation et retraitement au ciment selon une approche de béton compacté au rouleau”. Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval, 172 p.
- [14] MARCHAND- J. BOISVERT, L., OUELLET, É., MACHABEE Y. (1997) Réalisation d'une section d'essai en utilisant une technique de retraitement à haute performance : Rue

Borne, Ville de Québec. Rapport GCS-97-05, Département de génie civil. Université Laval, 49 p.

[15] BERGERON, G. (1998) Retraitement en place des chaussées; Stabilisation liants mixtes. Direction laboratoire des chaussées, Service des chaussées, Ministère des Transports du Québec. 15 p.

[16] VAUTRIN. (19 86) “Retraitement en place des chaussées”. Ministère de l’Équipement, du Logement de l’Aménagement du Territoire et des Transport, Lyon, 11 p

[17] CRIB (Centre de recherche interuniversitaire sur le béton) sur la rue Borne et le Chemin Benoît, entre 1997 et 1999,

[18] BOUCHARD. M, (1984) “Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition ”. Bulletin liaison laboratoire pont et chaussé, n° 134, Réf 2852, pp.53-57

[19] PIMIENTA. P, TRAN. T, DEMOLTTE. P, VIMON. E, COLOMARDPROUT. M. (1997) “Emploi des granulats recyclés pour la fabrication de blocs de construction”, Rapport du CSTB rédigé à la demande du plan construction et architecture, France

[20] BUTENWIZER. I, FAVENNEC. M. (1995) “ Le recyclage- concassage des matériaux minéraux issus de la démolition au Danemark et aux Pays-Bas » cahier du CSTB, n° 2794, France.

[21] CANAT. D, CHEVET. H. (1995) “ Le recyclage concassage des matériaux minéraux issus de la démolition en Belgique et au Royaume-Uni ”, cahier du CSTB, n° 2814, France

[22] YANAGIBASHI. K, YONEZAWA.T. (1999) “Development of production process for reusable concrete aggregate”, Congress Proceeding R’99, Vol3, Geneva Switzerland, pp.137-142.

[23] DEPAW. C. (1982) “ Recyclage des décombres d’une ville sinistrée ” ; CSTC, Revue n°4, Belgique, pp.12-28.

[24] CSTC. (1981) “Recyclage du béton”, CSTC, Rapport final de la banal, BRUXELLES.

[25] De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009, Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 872-877. USA. ResourConservRecycl 2004; 42(3):275-94

[26] Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S., «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 829-836,2009

- [27] Douara T.H., « Caractérisation physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels ». 2009.
- [28] HANSEN, T. C. (1986) “ Recycling aggregates and recycling aggregate concrete ”, second state-of- the –art report developments 1945-1985. Materials and structures, vol19, n° 111, pp. 201-246.
- [29] RAMAMURTHY. K &GUMASTE. KS, « properties of recycled aggregate concrete » , The Indian concrete journal, January 1998 ,pp49-53.
- [30] HENDRIKS ch. F, « European standard for recycled aggregates in construction » Congress Proceeding R’ 99, vol 3, Geneva, Switzerland, 1999, pp.108-113.
- [31] HANSEN.TC. (1992) “Recycling aggregates and recycling aggregate and masonry”, RILEM Report N° 06, LONDON, E & FN, SPON.
- [32] BARRA. M DE OLIVEIRA , VAZQUEZ. E. (1996) “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete”, Waste management, Vol16, No1-3 , pp.113-117.
- [33] Rao, A., Jha, K. N. ET Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, numéro 1, p.71-81.
- [34] GALLIA. J. (1999) “Sulfate content threshold for recycled aggregates used in concrete”, Congress Proceeding R’99, vol3, Geneva Switzerland, pp.161-166
- [35] HOSTMANN, « Une nouvelle gestion des déchets de chantier d’ici cinq ans » , les cahiers techniques du bâtiment , n°177, France, Jan-Fév. 1997
- [36] COLLINS. R. J. (1994) “The use of recycled aggregates in concrete”, BRE information paper p5/94.
- [37] RILEM. (1993) “Unified specifications of recycled coarse aggregates for concrete”, RILEM TC 121-DRG.
- [38] TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO.K , HASBA. S. (1984) “Applicability of recycled concrete aggregate as in aggregate for concrete pavement”. Transaction of the Japan concrete institute, Vol6, pp.133-140.
- [39] HOBBS.G, CILLINS R. J, BLACKWELL B. Q, ATKINSON C.J. (1997) “Practical demonstration of the recycling on a building contract ”, Congress proceeding R’ 97, vol2 , Geneva, Switzerland pp47-52.
- [40] DEVENNY. A., KHALAF F. M. (1999) “The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete ”, Masonry international, vol12, n°3, PP81-84.

- [41] DESSY. P, NIRONI. L, “ The mechanical and physical performance of building components made with recycled aggregates “ Congress Proceeding R'99 , Vol 3, Geneva Switzerland , pp.209-213.
- [42] TAVAKOLI. M, SOROUSHIAN. P. (1996) “Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate”, ACI materials journal, March-April , pp. 182-193.
- [43] QUEBAUD. M, COURTIAL. M , BUYLE-BODIN. F. (1996) “ le recyclage des matériaux des de démolition”, Matériaux et structure, travaux, n° 721, France.
- [44] TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO.K , HASBA. S. (1984) “Applicability of recycled concrete aggregate as in aggregate for concrete pavement”. Transaction of the Japan concrete institute, Vol6, pp.133-140.
- [45] HANSEN, T. C. (1986) “ Recycling aggregates and recycling aggregate concrete ”, second state-of- the -art report developments 1945-1985. Materials and structures, vol19, n° 111, pp. 201-246.
- [46] Ferreira, L., Barra, M. ET de Brito, J. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. Magazine of Concrete Research, volume 63.
- [47] Djelal. H et Nouvel. V, 2008 « Gestion des déchets de démolition et environnement» Ecole des Métiers de l'Environnement, Rue Robert Schuman, Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ.
- [48] Courard. L, 2006 « Le cycle de vie des matières les matériaux de construction et de démolition »état de l'environnement wallon études –expertises.
- [49] Rademaker. Ch, 1996 « Application de la notion d'analyse de Cycle de Vie aux éléments de construction industriels (acier, béton, bois) » Travail de fin d'étude. Faculté des sciences Appliquées, Université de liège.
- [50] Pepin. G et all 2001 « Caractérisation des déchets, le goudron dans les déchets du réseau routier » *INERIS*, paris, France, 85p .
- [51] IARC, 1978 « Monographie sur l'évaluation des risque cancérigènes pour l'homme des produits chimiques » Composés aromatiques polycycliques, 4 ème partie : les bitumes, goudrons dérivés, les huiles de schistes et suies.
- [52] Legrand. Ch, 2006 « Quelles solution pour le recyclage des déchets, du bâtiment » Des questions et des réponses dossiers du C.S.T.C. Cahier n° 3, 3<sup>ème</sup> trimestre 2008, 14 p

- [53] Amor. M, sd « Contribution a l'étude rhéologique d'un béton a hautes performances (BHP) local » Mémoire De Magistère, Université 20 Aout Skikda.
- [54] Chabi .S, Mezghiche .B, Guettala .H, 2004 « Étude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers » N°05, Département de Génie Civil, Université de Biskra, pp. 03-08.
- [55] Chaid .R, Jauberthie. R et Boukhaled .A ,2010 « Effet de l'ajout calcaire sur la Durabilité des bétons» Vol. 11, Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, Université de Boumerdès, Algérie·Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA - Rennes, FranceLaboratoire Bâti dans l'Environnement, USTHB, No. 1.
- [56] Salhi. K, Mezghiche, B, 2009 « étude de durabilité de mortier et béton contenant de ciment avec ajouts de laitier granule et sable de dune » Étudiant Doctorat Département Génie civil, Université de Biskra, Algérie.
- [57] Cheiku-Zouaoui. M ,2008 « Contribution a l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons a hautes résistances » Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [58] Bach. T, 2010 « Evolution physico-chimique des liants bas pH hydratés Influence de la température et mécanisme de rétention des alcalins » Thèse de Doctorat, Université Bourgogne Discipline.
- [59] Amouri. C, 2009 « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) » Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [60] E. WIRQUIN, R. HADJIEVA-ZAHARIEVA & F. BUYLE-BODIN, "Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés", *Materials and Structures*, 33(6), pp:403-408, (2000)
- [61] M. S. JUAN & P. A. GUTIÉRREZ, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Construction & Building Materials*, 23(2), 872-877, (2009).
- [62] SAID-MANSOUR M., GHRICI M. et KENAI S., «Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et des bétons». Congrès International réhabilitation des constructions et développement durable, Alger, 2005.

- [63] HERMANN K., «Les ajouts: Les fumées de silice», Bruxelles, n°7/Juillet 1995.
- [64] MEHTA P.K., «Sulfate résistance of blended cements». Concrete workshop, Sydney
- [65] DREUX G. et FESTA J., «Nouveau guide du béton et de ses constituants», 8<sup>ème</sup> édition, Édition Eyrolles, 1998.
- [66] BARON J. et OLLIVIER J.P., «La durabilité des bétons». Presse de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [67] AREZKI TAGNIT- HAMOU., Cours 2003 (chapitre 7). «Ajout dans le ciment». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
- [68] LOCHER F.W., «*Influence of chloride and hydro carbonate on the sulfate attack*», Proc.5th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo. vol. 3, pp. 328-335, 1968.
- [69] COSTA U.and MASSAZA.F., « From materials science to construction materials engineering ». Proc.Ist.Rilem congress, vol 1( versaille, 1987 ).159
- [70] SAUCIER F.; PIGEON M. et CAMERON G.; « *Air-void Stability* », Part V, General Analysis and performance Index. ACI Materials Journal, Vol. 88, No.1, pp 25-36 (Jan.-Feb. 1991).
- [71] E.J. Sellevold and T. Farstad. Frost/salt-testing of concrete: Effect of test parameters and concrete moisture history. Nordic Concrete Research, 10, 1991.
- [72] J. Kaufmann. Experimental identification of damage mechanisms in cementitious porous materials on phase transition of pore solution under frost deicing salt attack. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ecublens, CH-1015 Lausanne, 1999.
- [73] S. Jacobsen, E. Sellevold, and D.H. Saether. Frost testing of high strength concrete: frost-salt scaling at different cooling rates. Materials and structures, 30:33–42, 1997.
- [74] S. Lindmark. Mechanisms of salt frost scaling of portland cement-bound materials: studies and hypothesis. PhD thesis, Suede, 1997.
- [75] Alain BRETTE : fascicule de cours réalisé par pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, 2007. LIEU.
- [76] Lozach. D, 2005 «Les constituants des bétons et des mortiers » collection technique cimébéton française, Tome1,...
- [77] MARLET.JD ET PIMIENTA.P; “Mechanical and physical-chemical properties of concrete aggregates. RILEM, Proceeding 23. Third international RILEM symposium on

demolished and reuse of concrete and masonry, Odens, Danemark 24-27 October, pp 343-354.

[78] J.M.V.GOMEZ-SOBERON (2002). " Porosity of recycled concrete with substitution of recycled aggregate. an experimental study". Cement and Concrete Research 32, Pp.1301-1311.

[79] WIRQUIN E., « Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés », Matériels and structures , 33 pp.829-836, 2009.

[80] Baroghel- Bouny V. (1994) Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses et résultats. Thèse de Doctorat, LCPC, Paris, France.

[81] Messaoudene I, Molez L, Rangeard D, Jauberthie R, Naceri A, Mortiers à base de sable pliocène et de ciments aux ajouts : fillers de déchets industriels et cendres volcaniques, Matériaux & Techniques, EDP Sciences, 2012, vol. 100 (5), pp. 377-386.

[82] Kodur V.K.R , "Spalling in high strength concrete exposed to fire-concerns, causes critical parameters and cures ". Actes du congrès de l'ASCE sur les structures, philadelphie (PA), 2000.

[83] Goquillai. G, 1984 « Recyclage des manteaux de démolition dans la confection des bétons » Annales de L'ITBTP, n° 420, France octobre, pp.63-71

[84] VENUAT M., «*La pratique des ciments mortiers et béton*». Tome 1, et Tome 2, deuxième édition.

[85] MEZGHICHE B., «Résistance et déformabilité de Béton Basique». Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.

[86] GABRYSIK F., Cours (chapitre 4). «Matériaux - Les bétons».

[87] BASCOUL A., «*State of the art report - Part 2: Mechanical microcracking of concrete*». Materials and Structures, vol.29 (2), p.67-78. 1996.

[88] HSU T.T.C., SLATE F.O., STURMAN G.M. and WINTER G., «Microcracking of plain concrete and the shape of the stress - strain curve». ACI Materials Journal, vol .60p.209-224. 1963.

[89] SMADI M.M.and SLATE F.O., «Microcracking of high and normal strength concretes under short and long-term loadings». ACI Materials Journal, vol. 86, n°2, p.117-127. 1989.

[90] SHAH S.P.and SANKAR R., «Internal Cracking and Strain Softening Response of Concrete under Uniaxial Compression». Journal of American Concrete Institute, pp.200-212. 1987.