

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département de Génie Civil

**MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Construction

PERFORMANCES D'UN BETON AUTOPLACANT A BASE DE  
GRANULATS RECYCLES, LAITIER ET LA POUZZOLANE  
NATURELLE

Par

**Amina DEBBIH**

Devant le jury composé de :

M. BENZAIBI	Professeur, U. de Blida	Président
A. BOUIKNI	Maître de conférences A, U. de Blida	Examineur
F. DEBIEB	Maître de conférences A, U. de Médéa	Examineur
S. KENAI	Professeur, U. de Blida	Rapporteur
B. MENADI	Maître de Conférences A, U. de Blida	Co-Rapporteur

Blida, Avril 2012

## RESUME

Le béton autoplaçant (BAP) est défini comme un béton très fluide qui se met en place sous l'effet de son poids propre, sans vibration interne ou externe. Le BAP doit être homogène et très stable vis-à-vis de la ségrégation et le ressuage. La formulation du BAP est caractérisée par le volume élevé de la pâte, ainsi que l'utilisation d'un adjuvant superplastifiant. Peu de travaux ont été réalisés sur les BAP à base de granulats recyclés. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état frais, en substituant 100% et 50% de granulats naturels par des granulats recyclés, et en comparant avec un BAP de référence à base de 100% de granulats naturels. L'effet de substitution de 15% en poids de ciment par des ajouts présentés par le laitier d'El Hadjar et la pouzzolane naturelle de Beni Saf avec une surface spécifique de Blaine de 3500 cm<sup>2</sup>/g sur le comportement du BAP à l'état frais a été étudié. Les résultats ont montrés que la substitution de 100% et de 50% de granulats naturels par des granulats recyclés donne un BAP avec une ouvrabilité très comparable à celle du BAP de référence. Cependant, les BAP à base de granulats recyclés sont moins stable vis-à-vis du ressuage. L'effet d'addition du laitier améliore l'ouvrabilité pour le BAP à base de granulats naturels mais il engendre une diminution d'ouvrabilité pour les BAP à base de granulats recyclés. Par contre l'effet de la pouzzolane est similaire pour les trois compositions, avec une chute de l'ouvrabilité et une amélioration de la stabilité.

**Mots clés :** Béton autoplaçant, Granulats recyclés, Laitier, Pouzzolane naturelle, Rhéologie.

## ABSTRACT

Self compacting concrete (SCC) is a very fluid concrete which can take place under the effect of its own weight, without vibration. SCC must be homogeneous and very stable against segregation and bleeding. The SCC is characterized by its high volume of paste, and the use of superplasticizer. The main objective of this work is to study the effect of recycled concrete aggregates on the fresh properties of the SCC, by substitution of either 100% or 50% of natural aggregates by recycled aggregates, and by comparing with a reference SCC based on 100% natural aggregates. The effect of substitution of 15% by weight of cement of either slag or natural pozzolan with  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  of fineness on the fresh properties of SCC is studied. The results have shown that the substitution of 50% or 100% of natural aggregates by recycled concrete aggregates gives SCC with very comparable workability to that of the reference SCC. However, SCC with recycled aggregates are less stable against bleeding. The addition of slag improves workability for SCC with natural aggregates but it leads to a decrease of workability for the SCC with recycled aggregates. However, the addition of the natural pozzolan is similar for both SCC where a decrease of workability and improvement of stabilities are observed.

**Key words:** Self compacting concrete, Recycled aggregates, Slag, Natural pozzolan, Rheology.

## الملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا تعرف بأنها خرسانة ذات قابلية تشغيل عالية و تأخذ مكانها بفعل وزنها فقط، بدون اهتزاز داخلي أو خارجي. الخرسانة المرصوصة ذاتيا يجب أن تكون متجانسة و مستقرة ضد العزل و النزيف. تختص تركيبة الخرسانة المرصوصة ذاتيا باحتوائها على حجم كبير من العجينة الإسمنتية ، فضلا عن استعمال اللدنات الممتازة. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الحصى و الرمل المعاد استعماله الناتج عن نفايات خرسانة البناءات على خصائص المرونة للخرسانة المرصوصة ذاتيا و ذلك باستبدال 50% أو 100% من الحصى و الرمل المستخرج طبيعيا بأخرى معاد استعمالها و مقارنتها بخرسانة مكونة من مواد طبيعية. كما تم أيضا دراسة تأثير استبدال 15% من وزن الإسمنت بفضلات الأفران لمركب الحجّار و البوزولان الطبيعي لبني صاف على خصائص الخرسانة في الحالة الطرية. أظهرت نتائج الدراسة التجريبية أن تعويض 50% و 100% من الرمل و الحصى الطبيعي بالرمل و الحصى المعاد استعماله يمنح خرسانة ذات مرونة جدّ مشابهة للخرسانة بالمواد الطبيعية، لكن الخرسانة ذات الركام المعاد استعماله تبقى أقلّ استقرارا ضدّ النزيف. إنّ إضافة فضلات الأفران على الخرسانة الطبيعية يُحسن من قابليتها لتشغيل و لكنها تسبب في انخفاضها بالنسبة للخرسانة ذات الركام المعاد استعماله. عكس البوزولان الطبيعي الذي يبقى تأثيره نفسه على التركيبات الثلاثة المتمثل في تخفيض مرونة الخرسانة مع تحسين استقرارها.

**كلمات المفاتيح :** الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الركام المُعاد استعماله، فضلات الأفران، البوزولان الطبيعي، قابلية التشغيل.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil de l'université Saad Dahleb de Blida.

Je remercie tout t'abord mes deux encadreurs monsieur KENAI Said et monsieur MENADI Belkacem pour m'avoir dirigé et pour leur aide très précieuse ainsi que pour leurs patience et disponibilité.

Je remercie également Mr. BENSAIBI Mahmoud, Mr. BOUIKNI Ammar et Mr. DEBIEB Farid d'avoir accepté examiné ce mémoire et d'honorer par leur présence.

Je tiens à remercier aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire :

- Le directeur et tout le personnel de la cimenterie de Meftah ;
- Le chef de département et tout le personnel de département de chimie industriel de l'université Saad Dahleb de Blida ;
- Les responsables de la société GRANITEX ;
- LAFARGE ;
- Monsieur Boukendakdji Othmane pour son aide ;
- Monsieur Gasti Tayeb ;
- Monsieur Hadj Sadok Ahmed ;
- Monsieur Omrane Mohamed ;
- Mes collègues : Mlle. Hammat Sihem, Mr.Kouider djaloul Omar, Allali Mohamed Amine.

## TABLE DES MATIERES

Résumé .....	1
Remerciement .....	4
Table des matières .....	5
Liste des figures .....	9
Liste des tableaux .....	15
Liste des abréviations et des notations .....	17
<b>Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre 1 : Revue bibliographique béton autoplaçant : formulation et performances</b>	
1-1) Introduction .....	21
1-2) Principe et critères de formulation .....	21
1-3) Quelques approches de formulation .....	22
1-3-1) Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers .....	22
1-3-2) Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte .....	22
1-3-3) Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire .....	23
1-4) Influence des constituants sur les BAP .....	25
1-4-1) Ciment et le fines .....	25
1-4-2) Volume de gravillon .....	25
1-4-3) L'eau de gâchage .....	25
1-4-4) Superplastifiants .....	26
1-4-5) L'agent de viscosité .....	27
1-5) Propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais .....	27
1-6) Propriétés des bétons autoplaçant à l'état durci .....	30
1-6-1) Résistance à la compression .....	30
1-6-2) Résistance à la traction .....	35
1-6-3) Module d'élasticité .....	36
1-6-4) Retrait .....	37
1-6-4-1) Retrait plastique .....	37
1-6-4-2) Retrait endogène .....	39
1-6-4-3) Retrait de dessiccation .....	42

1-6-4-4) Retrait thermique .....	45
1-6-5) Durabilité .....	45
1-6-5-1) Perméabilité au gaz et à l'eau .....	45
1-6-5-2) Diffusion des ions de chlorure .....	47
1-6-5-3) Carbonatation .....	51
1-6-5-4) Absorption capillaire .....	53
1-7) Conclusion .....	56
<b>Chapitre 2 : Granulat recyclés et BAP à base de granulats recyclés</b>	
2-1) Introduction .....	57
2-2) Caractéristiques des granulats recyclés .....	57
2-2-1) La granulométrie .....	58
2-2-2) L'équivalent de sable .....	59
2-2-3) Masse Volumique .....	60
2-2-4) Absorption d'eau .....	62
2-2-5) Dureté .....	63
2-3) Propriétés du béton ordinaire (vibré) à base de granulats recyclés .....	63
2-3-1) Quantité d'eau pour un affaissement constant .....	63
2-3-2) Résistance à la compression et à la traction .....	64
2-4) Propriétés du BAP à base de granulats recyclés .....	71
2-4-1) A l'état frais .....	71
2-4-2) Résistance à la compression et à la traction .....	75
2-4-3) Absorption d'eau .....	78
2-4-4) Retrait de séchage .....	79
2-4-5) Diffusion des ions de chlorure .....	81
2-5) Conclusion .....	81
<b>Chapitre 3 : Matériaux et essais</b>	
3-1) Introduction .....	82
3-2) Caractérisation des matériaux .....	82
3-2-1) Ciment .....	82
3-2-2) Les ajouts minéraux.....	82

3-2-2-1) Le laitier .....	82
3-2-2-2) La pouzzolane .....	83
3-2-3) Granulats naturels.....	85
3-2-3-1) Le sable .....	85
3-2-3-2) Le gravier .....	85
3-2-4) Granulats recyclés .....	87
3-2-5) Superplastifiant .....	91
3-2-6) Eau de gâchage .....	92
3-3) Formulation adoptée .....	92
3-4) Fabrication du mortier .....	92
3-5) Essais réalisés sur mortier .....	93
3-6) Fabrication du béton .....	94
3-7) Essais sur le béton autoplaçant à l'état frais .....	95
3-7-1) Essai d'étalement (Flow test).....	95
3-7-2) Essai à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	97
3-7-3) Essai à la boîte en L (L-Box test).....	98
3-7-4) Essai à la couronne (J-Ring test).....	100
3-7-5) Essai à la boîte en U (U-Box test) .....	102
3-8) Récapitulatif et variables étudiées.....	102

#### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

4-1) Introduction .....	104
4-2) Optimisation de dosage en superplastifiant .....	104
4-2-1) Etalement au mini cône pour mortier .....	105
4-2-2) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) .....	106
4-3) Performances des BAP de granulats recyclés et sans ajouts cimentaires à l'état frais .....	108
4-3-1) Etalement au cône d'Abrams.....	109
4-3-2) Etalement à la couronne (J-Ring test) .....	110
4-3-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	112
4-3-4) Essai à la boîte en L (L-Box test) .....	112
4-3-5) Essai à la boîte en U (U-Box test) .....	114

4-4) Effet des ajouts sur l'état frais du BAP à base de 100% granulats naturel .....	114
4-4-1) Etalement au cône d'Abrams .....	115
4-4-2) Etalement à la couronne (J-Ring test) .....	117
4-4-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	120
4-4-4) Essai à la boîte en L (L-Box) .....	120
4-4-5) Essai à la boîte en U (U-Box) .....	122
4-5) Effet des ajouts sur l'état frais du BAP à base de 50% granulats naturels	
et de 50% granulats recyclés .....	122
4-5-1) Etalement au cône d'Abrams .....	124
4-5-2) Etalement à la couronne (J-Ring test) .....	125
4-5-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	127
4-5-4) Essai à la boîte en L (L-Box) .....	128
4-5-5) Essai à la boîte en U (U-Box) .....	129
4-6) Effet des ajouts sur l'état frais du BAP à base de 100% granulats recyclés .....	131
4-6-1) Etalement au cône d'Abrams .....	132
4-6-2) Etalement à la couronne (J-Ring test) .....	133
4-6-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	135
4-6-4) Essai à la boîte en L (L-Box) .....	136
4-6-5) Essai à la boîte en U (U-Box) .....	137
4-7) Conclusion .....	137
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>138</b>
<b>Annexe A : Exemple de calcul de la composition de mortier. ....</b>	<b>141</b>
<b>Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton. ....</b>	<b>143</b>
<b>Références .....</b>	<b>147</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1-1</b> : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) .....	23
<b>Figure 1-2</b> : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP .....	24
<b>Figure 1-3</b> : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment .....	26
<b>Figure 1-4</b> : Développement de la résistance pour en fonction du rapport E/C .....	31
<b>Figure 1-5</b> : Variation de la résistance moyenne de compression avec le rapport E/C .....	31
<b>Figure 1-6</b> : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant .....	32
<b>Figure 1-7</b> : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP .....	33
<b>Figure 1-8</b> : Effet des cendres volantes sur la résistance à la compression .....	34
<b>Figure 1-9</b> : Effet des cendres volantes, 10% du fumé de silice sur la résistance à la compression .....	34
<b>Figure 1-10</b> : Variation de la résistance moyenne à la traction avec le rapport E/C .....	35
<b>Figure 1-11</b> : Comparaison des modules d'élasticité théorique de BAP et de béton vibré avec leurs valeurs expérimentales .....	36
<b>Figure 1-12</b> : Influence des cendres volante sur la résistance à la compression et module d'élasticité .....	37
<b>Figure 1-13</b> : Retrait plastique de BAP et de béton vibré .....	38
<b>Figure 1-14</b> : Retrait plastique des BAP et des bétons vibrés .....	38
<b>Figure 1-15</b> : Comparaison des retraits endogène d'un béton vibré et cinq BAP .....	40
<b>Figure 1-16</b> : Retraits endogène et retrait total d'un béton vibré et deux BAP de résistance de 60 MPa .....	40
<b>Figure 1-17</b> : Retrait endogène et de dessiccation à (180 jours) de béton vibré et BAP en fonction de la résistance mécanique à 28 jours .....	41
<b>Figure 1-18</b> : Influence de dosage de superplastifiant sur le retrait endogène de BAP .....	42
<b>Figure 1-19</b> : Retrait de dessiccation des BAP et des bétons traditionnel de même rapport E/C .....	43
<b>Figure 1-20</b> : Comparaison de retrait de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP .....	43
<b>Figure 1-21</b> : Influence des cendres volantes sur le retrait .....	44
<b>Figure 1-22</b> : Perméabilité à l'eau .....	46

<b>Figure 1-23</b> : La perméabilité à l'oxygène d'un BAP et BV .....	47
<b>Figure 1-24</b> : Coefficient effectif de diffusion aux ions de chlore en fonction de la résistance mécanique .....	48
<b>Figure 1-25</b> : Coefficient effective de diffusion de chlorure .....	48
<b>Figure 1-26</b> : Pénétration des ions de chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges du BAP .....	49
<b>Figure 1-27</b> : Perméabilité aux ions des chlorures .....	50
<b>Figure 1-28</b> : Effet des cendres volantes sur la pénétration de chlorure .....	50
<b>Figure 1-29</b> : Profondeur de carbonatation des BAP et BO à 28 jours .....	51
<b>Figure 1-30</b> : Profondeur de carbonatation à 9 mois .....	52
<b>Figure 1-31</b> : Profondeur de carbonatation à 42,5 mois .....	52
<b>Figure 1-32</b> : Absorption capillaire des bétons en fonction de la résistance .....	53
<b>Figure 1-33</b> : Le total et l'absorption capillaire d'eau en (%) .....	54
<b>Figure 1-34</b> : Absorption capillaire d'eau .....	55
<b>Figure 1-35</b> : Le total et l'absorption capillaire d'eau en (%) .....	55
<b>Figure 2-1</b> : forme des granulats recyclés.....	58
<b>Figure 2-2</b> : Les courbes granulométriques des granulats recyclé .....	58
<b>Figure 2-3</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés .....	61
<b>Figure 2-4</b> : Rapport E/C des bétons partiellement composé des granulats de béton pour des dosages de ciment respectifs 300, 350,400 kg/m <sup>3</sup> .....	64
<b>Figure 2-5</b> : Evolution de la résistance en compression en fonction des échéances pour les bétons à différentes combinaisons granulaires .....	65
<b>Figure 2-6</b> : Résistance à la compression des bétons à base des granulats de béton concassé.....	65
<b>Figure 2-7</b> : Développement de la résistance des bétons à base des agrégats de béton de démolition .....	66
<b>Figure 2-8</b> : L'effet de béton concassé sur la résistance à la compression (S) .....	66
<b>Figure 2-9</b> : Variation de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours .....	67
<b>Figure 2-10</b> : Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires .....	68
<b>Figure 2-11</b> : Résistance à la compression du béton à granulats recyclés.....	69
<b>Figure 2-12</b> : Résistance à la traction du béton à granulats recyclés.....	69
<b>Figure 2-13</b> : Résistance à la traction du béton à 0, 30 et 100% de granulats fins recyclés ....	70
<b>Figure 2-14</b> : Module d'élasticité pour 0, 30 et 100% de remplacement	

des granulats recyclés .....	70
<b>Figure 2-15</b> : Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de la quantité des fines .....	72
<b>Figure 2-16</b> : Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR) .....	72
<b>Figure 2-17</b> : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés .....	73
<b>Figure 2-18</b> : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de granulats recyclés .....	73
<b>Figure 2-19</b> : Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés .....	74
<b>Figure 2-20</b> : Comparaison entre la résistance à 7 et 28 jours pour les deux types du BAP ...	76
<b>Figure 2-21</b> : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés.....	76
<b>Figure 2-22</b> : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés.....	77
<b>Figure 2-23</b> : Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés.....	78
<b>Figure 2-24</b> : Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés ...	79
<b>Figure 2-25</b> : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,53 .....	79
<b>Figure 2-26</b> : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,44 .....	80
<b>Figure 2-27</b> : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport E/L (A=0,44, B=0,40 et C=0,35) .....	80
<b>Figure 2-28</b> : Charge totale passée (coulomb) à 28 jours .....	81
<b>Figure 3-1</b> : Laitier (non broyé/broyé). .....	83
<b>Figure 3-2</b> : Pouzzolane (non broyée/broyée).....	83
<b>Figure 3-3</b> : Broyeur à boules .....	84
<b>Figure 3-4</b> : Temps de broyage en fonction de la finesse .....	84
<b>Figure 3-5</b> : Sable de Baghlia .....	85
<b>Figure 3-6</b> : Gravier 8/15 de Setif. ....	86
<b>Figure 3-7</b> : Gravier 3/8 de Setif .....	86
<b>Figure 3-8</b> : Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.....	87
<b>Figure 3-9</b> : Gravier 8/15 et 3/8 recyclés .....	88
<b>Figure 3-10</b> : sable recyclés .....	88
<b>Figure 3-11</b> : Courbe granulométrique du sable et gravier recyclés .....	88

<b>Figure 3-12</b> : Procédure de fabrication de granulats recyclés .....	89
<b>Figure 3-13</b> : Comparaison entre la $M_v$ apparente des granulats naturels et recyclés .....	89
<b>Figure 3-14</b> : Comparaison entre la $M_v$ absolue des granulats naturels et recyclés .....	90
<b>Figure 3-15</b> : Pourcentage de diminution des masses volumiques (absolue et apparente) pour les granulats recyclés.....	90
<b>Figure 3-16</b> : Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) des granulats naturels et recyclés .....	91
<b>Figure 3-17</b> : Séquence du malaxage du mortier .....	93
<b>Figure 3-18</b> : Mini cône pour mortier .....	93
<b>Figure 3-19</b> : Mesure de diamètre de la galette de mortier .....	94
<b>Figure 3-20</b> : L'entonnoir en V (V - Funnel test) pour mortier .....	94
<b>Figure 3-21</b> : Séquence du malaxage du béton .....	95
<b>Figure 3-22</b> : Essai au cône d'Abrams .....	96
<b>Figure 3-23</b> : Mesure du diamètre à l'essai au cône d'Abrams .....	96
<b>Figure 3-24</b> : L'entonnoir en V (V - Funnel test).....	98
<b>Figure 3-25</b> : L'essai à la boîte en L (L-Box test) .....	99
<b>Figure 3-26</b> : Essai à la boîte en L (L-Box test) .....	99
<b>Figure 3-27</b> : L'essai à la couronne J (J-Ring test). .....	100
<b>Figure 3-28</b> : Mesure du diamètre à l'essai à la couronne J (J-Ring test).....	101
<b>Figure 3-29</b> : Mesure la différence de hauteurs $B_j$ J (J-Ring test).....	101
<b>Figure 3-30</b> : L'essai à la boîte en U (U-Box test).....	102
<b>Figure 3-31</b> : Organigramme de la procédure expérimentale .....	103
<b>Figure 4-1</b> : Etalement du mortier en fonction de dosage en Sp .....	106
<b>Figure 4-2</b> : Etalement du mortier recyclé à un dosage de 2,20% de Sp .....	106
<b>Figure 4-3</b> : Temps d'écoulement au V-funnel du mortier en fonction de dosage en Sp .....	107
<b>Figure 4-4</b> : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams des BAP sans ajouts.....	109
<b>Figure 4-5</b> : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams et au J-Ring de BAP sans ajouts .....	111
<b>Figure 4-6</b> : Différence de hauteurs $B_j$ au J-Ring de BAP sans ajouts .....	111
<b>Figure 4-7</b> : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP sans ajout .....	112
<b>Figure 4-8</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en L de BAP sans ajouts .....	113
<b>Figure 4-9</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en U de BAP sans ajouts .....	114
<b>Figure 4-10</b> : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams des BAP (GN) avec et sans ajouts	116
<b>Figure 4-11</b> : Diamètre d'étalement à la couronne J-Ring de BAP (GN) sans et avec ajout	117

<b>Figure 4-12</b> : Comparaison entre le diamètre d'étalement avec et sans le J-Ring de BAP (GN) sans et avec ajouts .....	118
<b>Figure 4-13</b> : Comparaison entre le $T_{50}$ et le $T_{50j}$ de BAP (GN) avec et sans ajouts .....	118
<b>Figure 4-14</b> : Différence de hauteurs $B_j$ de BAP (GN) avec et sans ajouts .....	119
<b>Figure 4-15</b> : Blocage au milieu de la couronne de BAP (GN) avec ajouts .....	119
<b>Figure 4-16</b> : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GN) avec et sans ajouts ...	120
<b>Figure 4-17</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en L de BAP (GN) avec et sans ajouts ...	121
<b>Figure 4-18</b> : Temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ de BAP (GN) avec et sans ajouts .....	121
<b>Figure 4-19</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en U de BAP (GN) avec et sans ajouts ...	122
<b>Figure 4-20</b> : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	124
<b>Figure 4-21</b> : Temps d'écoulement $T_{50}$ de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	125
<b>Figure 4-22</b> : Diamètre d'étalement au J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	125
<b>Figure 4-23</b> : Différence de hauteurs de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	126
<b>Figure 4-24</b> : Différence entre l'étalement avec et sans le J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	126
<b>Figure 4-25</b> : Différence entre le temps d'écoulement avec et sans le J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	127
<b>Figure 4-26</b> : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	128
<b>Figure 4-27</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en L de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	128
<b>Figure 4-28</b> : Temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ de BAP (GN/GR) avec et sans ajout .....	129
<b>Figure 4-29</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en U de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts .....	130
<b>Figure 4-30</b> : Essai à la boîte en U de BAP (GN/GR) sans et avec ajouts .....	130
<b>Figure 4-31</b> : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams BAP (GR) avec et sans ajouts .....	132
<b>Figure 4-32</b> : Diamètre d'étalement au J-Ring BAP (GR) avec et sans ajouts .....	133
<b>Figure 4-33</b> : Différence de hauteurs $B_j$ de BAP (GR) avec et sans ajouts .....	134
<b>Figure 4-34</b> : Différence entre l'étalement sans et avec le J-Ring de BAP .....	134
<b>Figure 4-35</b> : Différence entre $T_{50}$ et le $T_{50j}$ de BAP (GR) avec et sans ajouts .....	134
<b>Figure 4-36</b> : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GR) avec et sans ajouts ...	135
<b>Figure 4-37</b> : Rapport $H_2/H_1$ de l'essai à la boîte en L de BAP (GR) avec et sans ajouts ....	136

**Figure 4-38** : Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP (GR) avec et sans ajouts ... 136

**Figure 4-39** : Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en U de BAP (GR) avec et sans ajouts ... 137

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1-1</b> : Essais relatifs aux BAP .....	28
<b>Tableau 1-2</b> : Résistance mécaniques des BAPs .....	33
<b>Tableau 1-3</b> : Composition des mélanges.....	46
<b>Tableau 2-1</b> : Equivalent de sable et module de finesse.....	59
<b>Tableau 2-2</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés .....	60
<b>Tableau 2-3</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés .....	60
<b>Tableau 2-4</b> : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés .....	62
<b>Tableau 2-5</b> : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés .....	63
<b>Tableau 2-6</b> : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés.....	63
<b>Tableau 2-7</b> : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés.....	68
<b>Tableau 2-8</b> : Résultats d'essai de la boîte en L .....	74
<b>Tableau 2-9</b> : Résultats de l'essai de stabilité au tamis .....	75
<b>Tableau 2-10</b> : Densité de BAP avec 50 et 100% de granulats recyclés.....	75
<b>Tableau 2-11</b> : Résistance à la compression.....	77
<b>Tableau 3-1</b> : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment .....	82
<b>Tableau 3-2</b> : Caractéristiques chimiques du Laitier d'El Hadjar .....	83
<b>Tableau 3-3</b> : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane .....	84
<b>Tableau 3-4</b> : Caractéristiques des granulats naturels .....	85
<b>Tableau 3-5</b> : Caractéristiques des granulats recyclés.....	87
<b>Tableau 3-6</b> : Classification des BAP selon domaine d'application.....	97
<b>Tableau 4-1</b> : Composition de mortier à base de sable naturel.....	104
<b>Tableau 4-2</b> : Composition de mortier à base de sable recyclé .....	105
<b>Tableau 4-3</b> : Composition des BAP sans ajouts .....	108
<b>Tableau 4-4</b> : Résultats d'ouvrabilité des trois compositions de BAP sans ajouts .....	109
<b>Tableau 4-5</b> : Composition des BAP à base de granulats naturels sans et avec ajouts.....	115
<b>Tableau 4-6</b> : Résultats des BAP à base de granulats naturels sans et avec ajouts.....	115
<b>Tableau 4-7</b> : Compositions des BAP à base de 50% granulats naturels et 50% granulats recyclés sans et avec ajout.....	123
<b>Tableau 4-8</b> : Résultats des BAP à base de 50% granulats naturels 50% granulats recyclés sans et avec ajout .....	123

**Tableau 4-9 : Compositions des BAP à base de 100% granulats recyclés**

sans et avec ajouts ..... 131

**Tableau 4-10 : Résultats des BAP à base de 100% granulats recyclés**sans et avec ajouts ..... 131

## LISTE DES ABREVIATIONS ET DES NOTATIONS

BAP	Béton autoplaçant.
BAP GN	Béton autoplaçant à base de granulats naturels.
BAP GN/GR	Béton autoplaçant à base de 50% granulats naturels et 50% granulats Recyclés.
BAP GR	Béton autoplaçant à base de granulats recyclés.
Bj	Différence d'hauteur au J-Ring.
BO	Béton ordinaire.
BV	Béton vibré.
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique.
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hydroxyde de calcium ou portlandite.
CaCO <sub>3</sub>	Carbonate de Calcium ou Calcaire.
CEM I	Ciment portland.
cm	Centimètre.
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone.
C-S-H	Silicate de Calcium hydrate.
d	Diamètre d'étalement d'un mortier.
d <sub>0</sub>	Diamètre inférieur du mini – cône pour mortier.
D <sub>max</sub>	Diamètre maximal des granulats.
E/C	Rapport Eau sur Ciment.
E/L	Rapport Eau sur Liant (Ciment + additions minérales).
E/P	Rapport Eau sur Poudre.
G/S	Rapport Gravillon sur Sable.
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramme par mètre cube.
l/m <sup>3</sup>	Litre par mètre cube.
M	Masse d'une mole d'eau.
MAP	Mortier autoplaçant
mm	Millimètre.
MPa	Méga pascal.
s	Secondes.
SCC	Self- Compacting Concrete.
S/M	Rapport sable mortier
Sp	Superlastifiant.

Sp/L	Rapport superplastifiant liant.
SSB	Surface spécifique de Blaine
t	Temps.
v	Volume massique de l'eau.
$\Delta V$	Variation de volume.

# Introduction générale

## INTRODUCTION GENERALE

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années quatre-vingt. Le BAP est un béton très fluide et ne nécessite pas de vibration car il se met en place et se compacte sous l'effet de son poids propre. Les BAP sont avantageux dans le bétonnage des éléments dont la forme géométrique est complexe ou difficilement accessible, ainsi que pour les zones confinées. Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Cependant, un BAP doit présenter une résistance suffisante à la ségrégation durant la mise en place et jusqu'à sa prise, et il ne doit pas aussi avoir un ressuage important, afin de garder son homogénéité pour atteindre les caractéristiques mécaniques souhaitables et également conformes aux règlements techniques en vigueur. Par conséquent, la formulation d'un BAP est assez difficile car elle fait appel à plusieurs facteurs et constituants, comme les superplastifiants afin de donner au BAP sa propriété principale « la fluidité » sans ségrégation et sans ressuage, avec une diminution du rapport E/C. La particularité des BAP est aussi définie par le volume de pâte élevée (ciment et fines) pour améliorer sa ouvrabilité et son écoulement avec une limitation de gravillon en volume et en dimension (diamètre maximale). D'où la combinaison entre ces paramètres de formulation, les exigences et les propriétés à l'état frais et l'état durci du BAP est assez complexe et elle rend la formulation plus délicate.

Le béton restera le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction et les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans sa composition, mais devant l'épuisement des ressources naturelles en matériaux et les quantités importantes des déchets de démolition dans la nature, il est devenu nécessaire de prospecter et étudier toute possibilité de réutilisation de ces déchets, afin de préserver les ressources en granulats naturels et assurer, en même temps, la protection de l'environnement. L'utilisation de ces déchets comme des granulats recyclés dans le béton est limitée aux travaux routiers et elle est moins dans le domaine du bâtiment, et afin de pouvoir les utiliser, une étude de leur propriétés ainsi que leur influence sur les performances du béton doit être faite afin de pouvoir les considérer comme une nouvelle source de granulats pour béton.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier en particulier les granulats recyclés provenant de concassage du béton, leurs propriétés (granulométrie, masse volumique absolue et apparente, absorption...) et l'influence de ces dernières sur les paramètres de formulation du

BAP et ses propriétés à l'état frais, basant sur une comparaison avec un BAP de référence à base de granulats naturels, ainsi que l'effet des ajouts minéraux composés du laitier d'El Hadjar et la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur la rhéologie du BAP à base de granulats naturels et recyclés.

Ce travail est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les caractéristiques des bétons autoplacants, ses propriétés à l'état frais et à l'état durci ainsi que les essais de l'ouvrabilité qui peuvent être réalisés sur le BAP.

Le deuxième chapitre présente les propriétés des granulats recyclés et les caractéristiques du béton autoplacant à base de ces granulats à son état frais et durci.

Le troisième chapitre expose les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du BAP ainsi que les différents essais réalisés afin d'étudier l'ouvrabilité.

Le quatrième chapitre est une présentation et discussion des résultats des essais réalisés.

On terminera avec une conclusion générale et les recommandations pour les futurs travaux.

**Partie 1**  
**Revue Bibliographique**

# Chapitre I : Revue bibliographique

## Béton autoplaçant, formulation et performances

# **CHAPITRE 1**

## **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE BETON AUTOPLACANT**

### **FORMULATION ET PERFORMANCES**

#### **1-1) INTRODUCTION**

Le béton autoplaçant est un béton fabriqué à partir de sable, gravillons ( $\leq 20\text{mm}$ ), un ciment, des adjuvants et des additions minérales, plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- La méthode générale (Japon) par OKAMURA
- Formulation CBI (Suède)
- Formulation LCPC (France)

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités [1].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés à priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité) [2].

#### **1-2) PRINCIPE ET CRITERES DE FORMULATION**

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur. Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables. Les BAP doivent être stables sous l'effet de la gravité au cours de l'écoulement et dans les phases précédant la prise et le durcissement et permettre la réalisation de parements de qualité [3].

La formulation des BAP repose sur trois critères :

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par l'utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice).

Donc les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage.

### **1-3) QUELQUES APPROCHES DE FORMULATION**

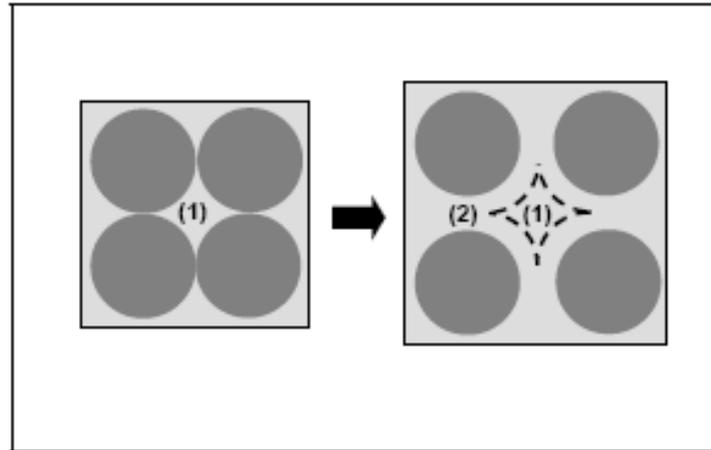
#### 1-3-1) Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

OKAMURA [4], propose de formuler le BAP en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité [1].

A la suite d'une optimisation identique du mortier, OUCHI et al [5] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons [1].

#### 1-3-2) Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. OH et al [6] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la (Figure 1-1) [1].



**Figure 1-1** : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [1].

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte ont été proposées pour déterminer la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Une approche similaire du dosage de la pâte a aussi été mise au point, calés aussi expérimentalement par le volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage [1] [7-9].

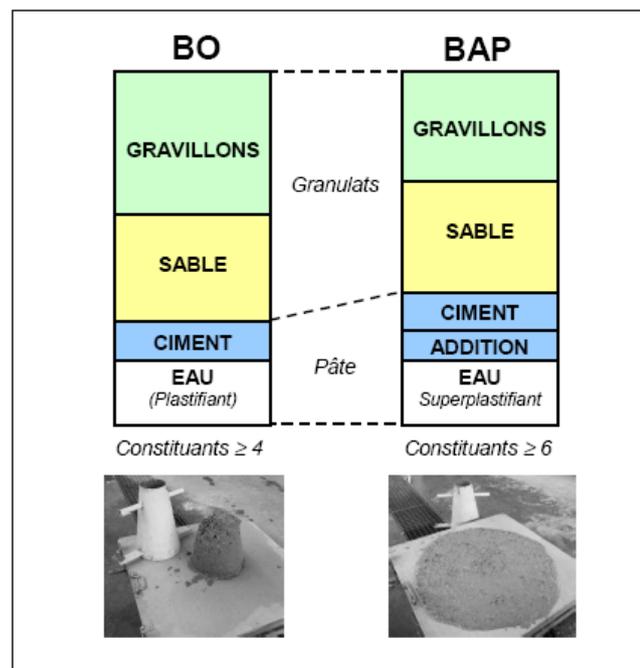
### 1-3-3) Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. La résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte, et l'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. Si on considère sur la figure 1-1 que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte le lien entre compacité et rhéologie peut être montré. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Un modèle décrivant mathématiquement un empilement a été développé par SEDRAN et DE LARRARD [10], à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton

et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton [1]. La formulation des BAP fait appel à :

- des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;
- une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage ( $\sim 500 \text{ kg/m}^3$ ) ;
- un volume de pâte élevé (350 à  $400 \text{ l/m}^3$ ) ;
- un faible volume de gravillons afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voir inférieur). Les granulats ont en général un Dmax compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement ;
- du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées) ;
- un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ;
- éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel dégel (Figure I-2) [3].

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.



**Figure 1-2 :** Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [1].

## **1-4) INFLUENCE DES CONSTITUANTS SUR LES BAP**

### 1-4-1) Ciment et fines

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de  $500 \text{ kg/m}^3$ ) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions minérales et des granulats.

La quantité de pâte joue un rôle important dans la fluidité car l'ajout de fines réduit les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Les différentes additions utilisées sont: les cendres volantes, le laitier des hauts fourneaux, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le calcaire et les additions siliceuses (sable).

Le choix des additions et leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité.

### 1-4-2) Volume de gravillon

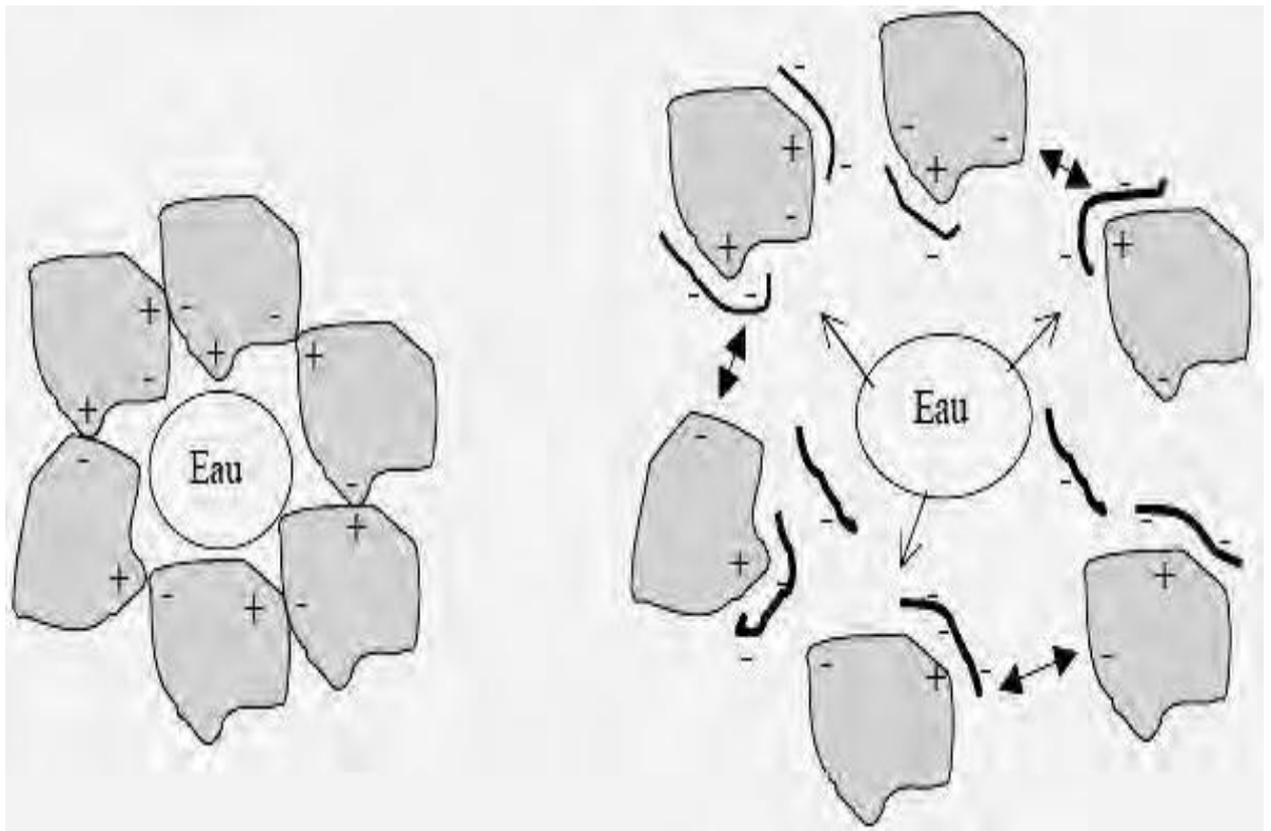
Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP [2].

### 1-4-3) L'eau de gâchage

L'eau a un double rôle, d'hydratation de la poudre de ciment et de facilitation de la mise en œuvre (ouvrabilité). L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.) [11].

#### 1-4-4) Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton pour améliorer sa fluidité, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air) [11]. L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure 1-3). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [2]. L'ajout d'un superplastifiant permettant d'obtenir la fluidité souhaitée, mais l'augmentation de son dosage favorise la ségrégation et le ressuage.



**Figure 1-3** : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [2].

#### 1-4-5) L'agent de viscosité

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau réduisant ainsi le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges. L'utilisation d'un agent de viscosité provoque une perte d'ouvrabilité dans les BAP comparés à ceux qui contiennent uniquement des fillers. L'agent de viscosité donne plus de stabilité au BAP mais ne peut en aucun cas remplacer l'ajout minéral [11].

#### **1-5) PROPRIETES DES BETONS AUTOPLACANT A L'ETAT FRAIS**

Les BAP sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- **La fluidité** : elle caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant sans aucune tendance à la ségrégation et avec une viscosité élevée.
- **L'homogénéité** : le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses, et remplir les moindres recoins de coffrage en gardant son homogénéité.

Quatre (04) propriétés essentielles sont proposées pour caractériser le BAP à l'état frais. Les essais pour résumer ces caractéristiques et les exigences requises sont résumés dans le tableau 1-1.

- La capacité au remplissage : c'est l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement.
- La capacité de passage : c'est la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage.

- La résistance à la ségrégation : c'est la séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre du BAP [12]. D'où la résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité du BAP sur site.
- La rhéologie : elle étudie l'écoulement des BAP à l'état frais. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle de Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. L'affaissement donné par l'essai au cône d'Abrams est relié au seuil de cisaillement [11]. Les mesures réalisées sur bétons montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Le matériau ne peut s'écouler que lorsque la contrainte de cisaillement dépasse une valeur minimale. Cette contrainte minimale est appelée seuil d'écoulement ou contrainte seuil.

**Tableau 1-1 : Essais relatifs aux BAP [11]**

Propriétés	Essai à réaliser	Exigences
Capacité au remplissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etalement au Cône d'Abrams (Slump-flow)</li> <li>• Temps à <math>T_{50}</math> au Cône d'Abrams (<math>T_{50}</math> Slump-flow)</li> <li>• Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel)</li> <li>• Etalement au Tube Orimet (Orimet)</li> </ul>	<p>660-750 mm</p> <p><math>5\text{sec} \leq T \leq 12 \text{ sec}</math></p>
Capacité de passage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etalement au Cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test)</li> <li>• Différence d hauteurs au J-Ring</li> <li>• Essai de la boîte en L (L-Box test)</li> <li>• Essai de la boîte en U (U-Box test)</li> <li>• Essai du caisson (Fill box)</li> </ul>	<p><math>B_j \leq 10 \text{ mm}</math></p> <p><math>H_2/H_1 \geq 0,80</math></p>
Résistance à la ségrégation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essai au Tamis de 5 mm</li> </ul>	<p><math>0 \leq \pi \leq 15\%</math></p>
Mesures rhéologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etalement au Cône d'Abrams modifié</li> <li>• Essai aux rhéomètres</li> </ul>	

Quelques chercheurs ont étudié les performances du BAP à l'état frais ainsi que l'influence des additions minérales sur ces performances.

GIRISH et al [13] ont montré, en étudiant l'effet du volume élevée de la pâte dans le BAP, que l'étalement augmente linéairement avec l'augmentation du volume de la pâte de 0,38 à 0,43 dans le mélange. FELECOGLU et al [14] ont opté pour un intervalle optimum de E/C de 0,87 à 1,07 en volume pour avoir un bon BAP, Les rapports au-dessus et au-dessous de cette gamme peuvent provoquer le blocage ou la ségrégation du mélange, respectivement. Mais ces valeurs dépendent toujours de la méthode de formulation et le type des matériaux. CARLSWARD et al [15] ont remarqué que la substitution du gravier naturel par un gravier concassé n'a pas un effet sur l'ouvrabilité du BAP. D'autre part, ABIB [16] a conclue que le diamètre d'étalement d'un BAP est inversement proportionnel au volume du gravier de la fraction 8/16, lorsqu'il a étudié l'effet de la variation de dimension du gravier sur l'ouvrabilité et la résistance des BAP.

BOUZOUBAA et LACHEMI [17] ont constaté que les cendres volantes peuvent être utilisées par un volume élevé comme un substituant de ciment dans le BAP. De plus, SHADLE et SOMEVILLE [18] ont trouvé que les cendres volantes engendrent une diminution de la ségrégation et une amélioration de la stabilité.

D'autre part BOUKEDAKDJI [11] ont constaté que l'étalement du BAP sans ou avec le J-Ring augmente avec l'augmentation du pourcentage du laitier dans le béton. Donc on peut dire que l'étalement est aussi influencé par le type et le pourcentage d'ajout utilisé. BORSOI et al [19] ont montré que l'ouvrabilité du BAP à base de laitier ou à base de laitier et les cendres volantes est meilleure que celle du BAP à base des cendres volante seule.

HERU ARI [20] a montré que parmi les additions minérales utilisées seule les cendres volantes et les fillers de calcaire améliorent l'ouvrabilité des mortiers autoplaçant. Par ailleurs, ZHU et GIDDS [21] ont constaté que lorsque la substitution du ciment par les fillers de calcaire est élevée la demande en superplastifiant diminue pour un étalement donné. BOUHAMOU et al [22] ont trouvé que l'ajout des fillers de calcaire contribue à diminuer la viscosité du BAP, par conséquent, une augmentation du diamètre d'étalement, mais lorsque le dosage en fillers de calcaire dépasse les 25%, il provoque une augmentation de la viscosité se traduisant par une diminution de taux de remplissage.

FERRARIS et al [23] ont montré que la substitution du ciment par les fumées de silice augmente la demande en eau pour avoir les mêmes propriétés rhéologique qu'un béton de référence. Par contre, CARLSWARD et al [15] ont constaté que l'addition des fumées de silice dans le BAP augmente considérablement le diamètre d'étalement bien que le temps d'écoulement de V-funnel a légèrement diminué.

## **1-6) PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANT A L'ETAT DURCI**

### 1-6-1) Résistance à la compression

Les paramètres influençant la résistance en compression d'un béton : le rapport Eau/Ciment (qui conditionne la porosité) et la résistance propre du ciment.

FELEKOGLU et al [14] ont étudié l'effet du rapport E/C sur les propriétés mécaniques de plusieurs variantes de BAP. Les mélanges ont été formulés de façon à réduire la teneur en eau et augmenter le dosage en superplastifiant en même temps. Le dosage en ciment et en granulats a été gardé constant pour les différents mélanges. Ils ont trouvés que la résistance mécanique augmente avec la diminution de la quantité d'eau dans le béton à 1,7 et 28 jours (Figure 1-4).

De même, DRUTA [24] a comparé la variation de la résistance de compression d'un BAP avec celle d'un béton ordinaire avec la variation du rapport E/C et a montré que la réduction de E/C de 0,6 à 0,3 augmente la résistance à la compression de 65% (Figure 1.5).

La résistance mécanique du béton autoplaçant est influencée par l'introduction d'un agent de viscosité. Une diminution de la résistance au jeune âge est observée [25]. D'autre part, les superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité entraînent des effets secondaires, comme le fait de retarder le temps de prise et retarder le développement de la résistance mécanique au jeune âge [26].

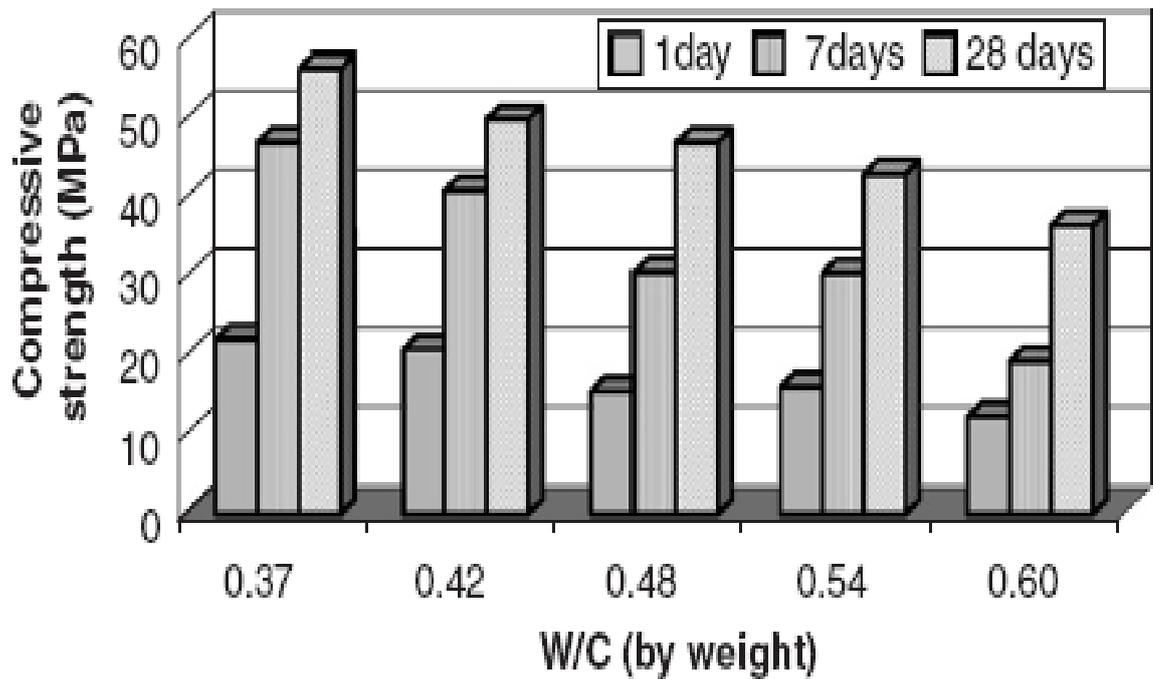


Figure 1-4 : Développement de la résistance pour en fonction du rapport E/C [14].

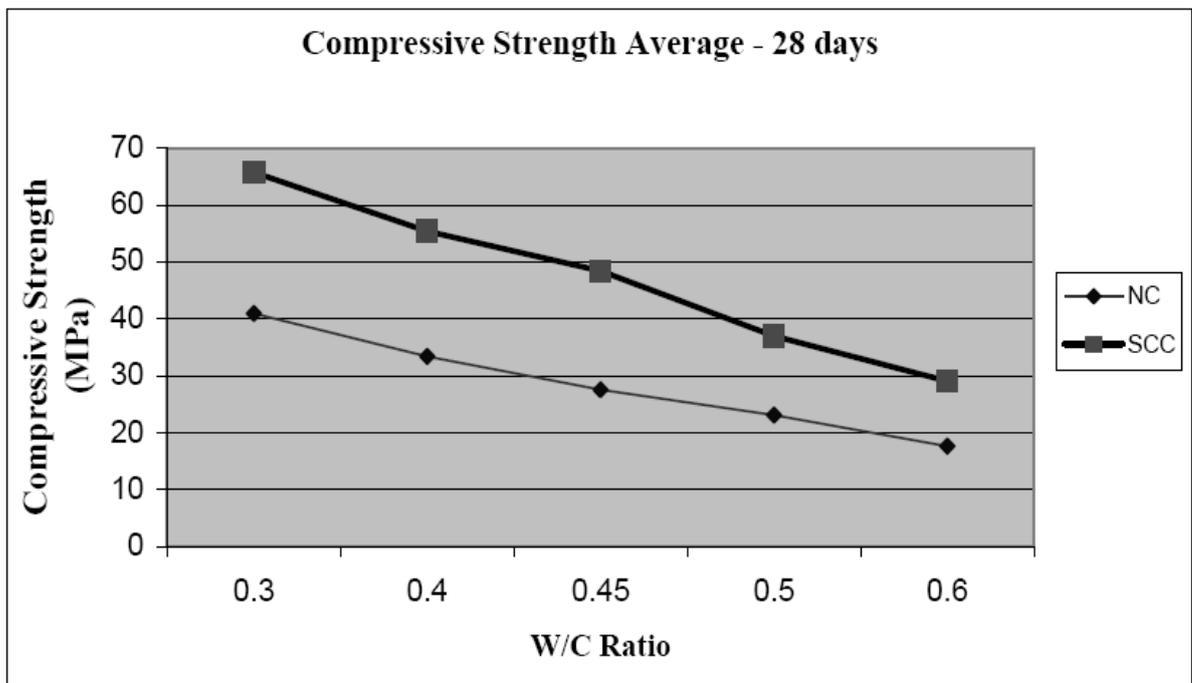
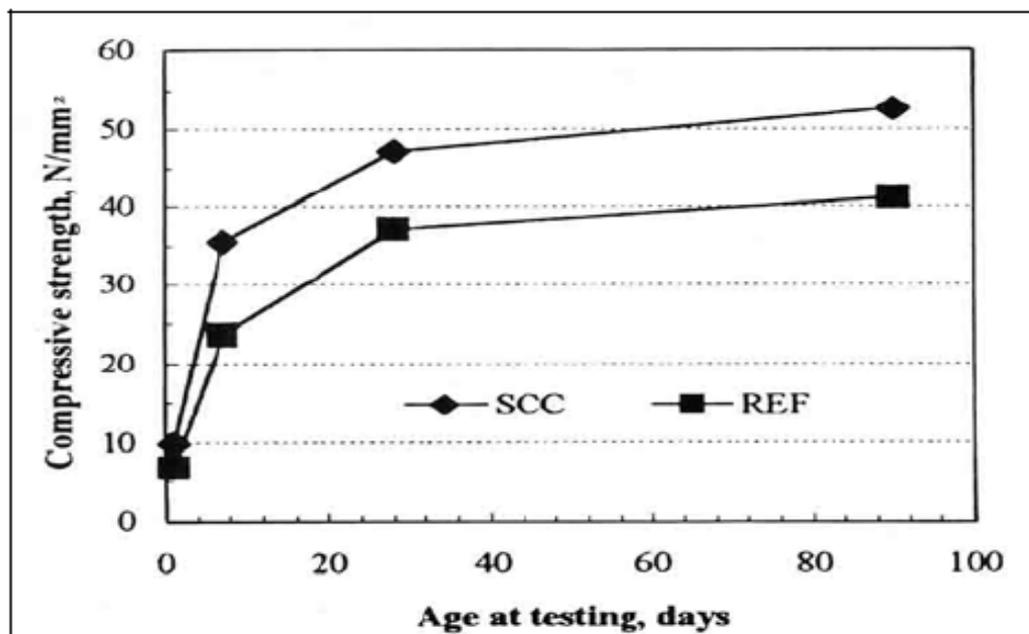


Figure 1-5 : Variation de la résistance moyenne de compression avec le rapport E/C [24].

Autres éléments influencent La résistance à la compression. TURCRY et al [27] a montré que la résistance à la compression est influencée par le volume de la pâte. Une diminution de 12% de la résistance a été observée pour une augmentation de 57% du volume de la pâte.

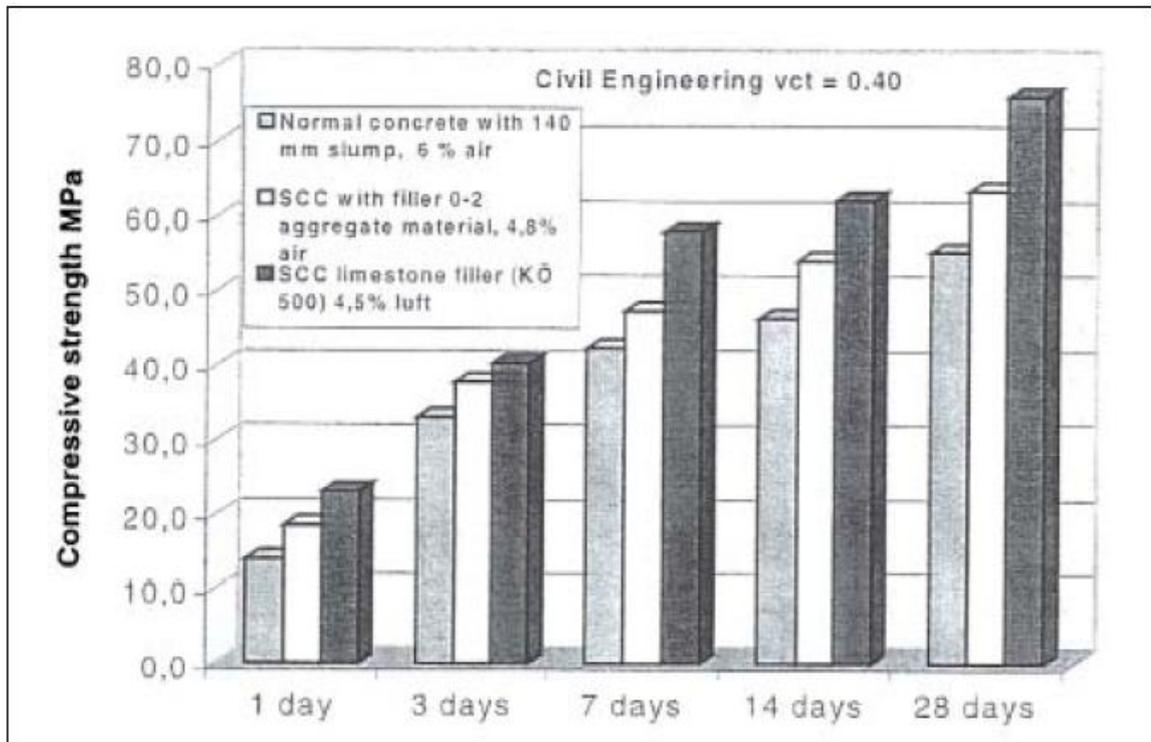
La différence de la résistance à la compression entre les compositions avec les agrégats concassé et non concassé est inférieur pour les BAP que pour BV [28].

Une comparaison de l'évolution de la résistance mécanique de BAP contenant des fillers de calcaire et celle d'un béton vibré a été étudiée par plusieurs chercheurs. Une accélération de la résistance au jeune âge et jusqu'à 28 jours a été observée [2]. GIBBS et ZHU [29] et SONEBI et BARTOS [30] ont montré que la résistance mécanique des BAP contenant les fillers de calcaire est accélérée comparée à celle des bétons vibrés. (Figure 1.6)



**Figure 1-6** : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [29].

D'autres auteurs ont montré que la finesse des fillers influent la résistance, plus la finesse est importante plus la résistance est élevée (Figure 1.7). AYED et al [32] ont constaté que la résistance mécanique à court et à long terme change avec la nature des fillers (fillers calcaire, pouzzolane naturelle), même si le volume de pâte est le même dans les bétons. (Tableau 1.2)



**Figure 1-7 :** Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP [31].

**Tableau 1-2 :** Résistance mécaniques des BAPs [32]

		BAP FC	BAP PN
Etalement (cm)		67	68
Résistance en compression (Mpa)	7j	38,3	46,8
	28j	44,3	60,6
	60j	44,7	62,5

La substitution du ciment par les cendres volantes dans le BAP donne une diminution de la résistance à la compression à jeune âge et à long terme (Figure 1-8). Tandis que le remplacement de 10% de fumé de silice a un effet positif sur la résistance à la compression pour tout le contenu de cendres volante à jeune âge et à long terme (Figure 1-9).

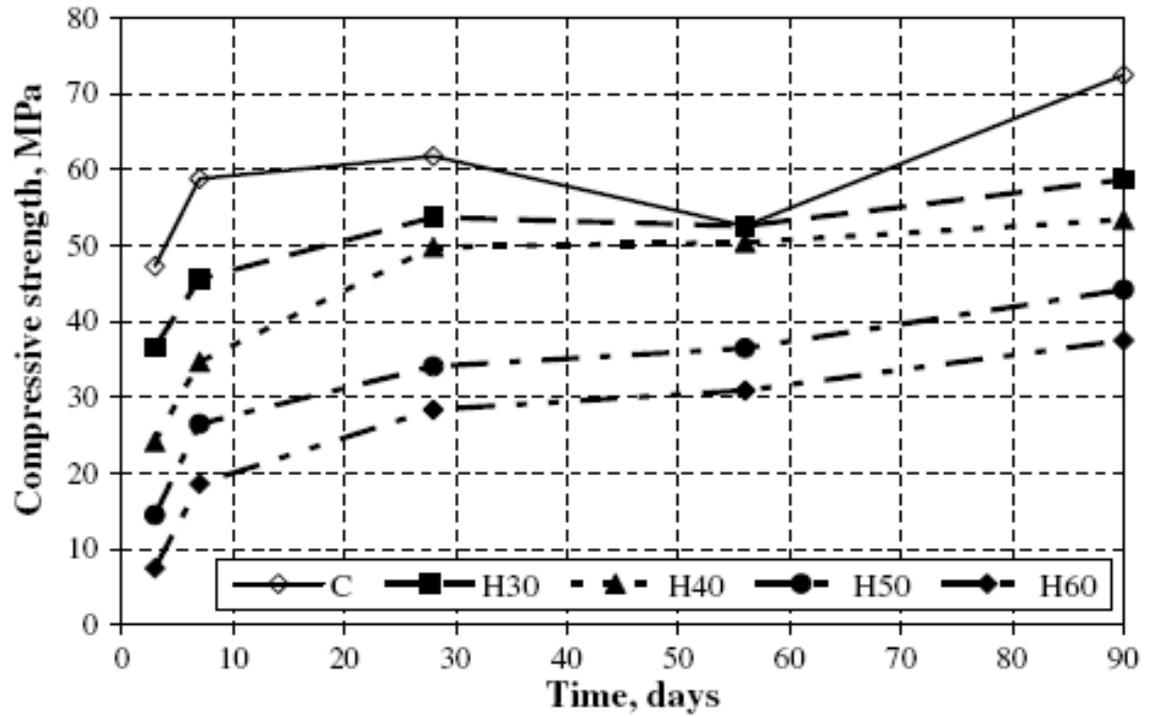


Figure 1-8 : Effet des cendres volantes sur la résistance à la compression [33].

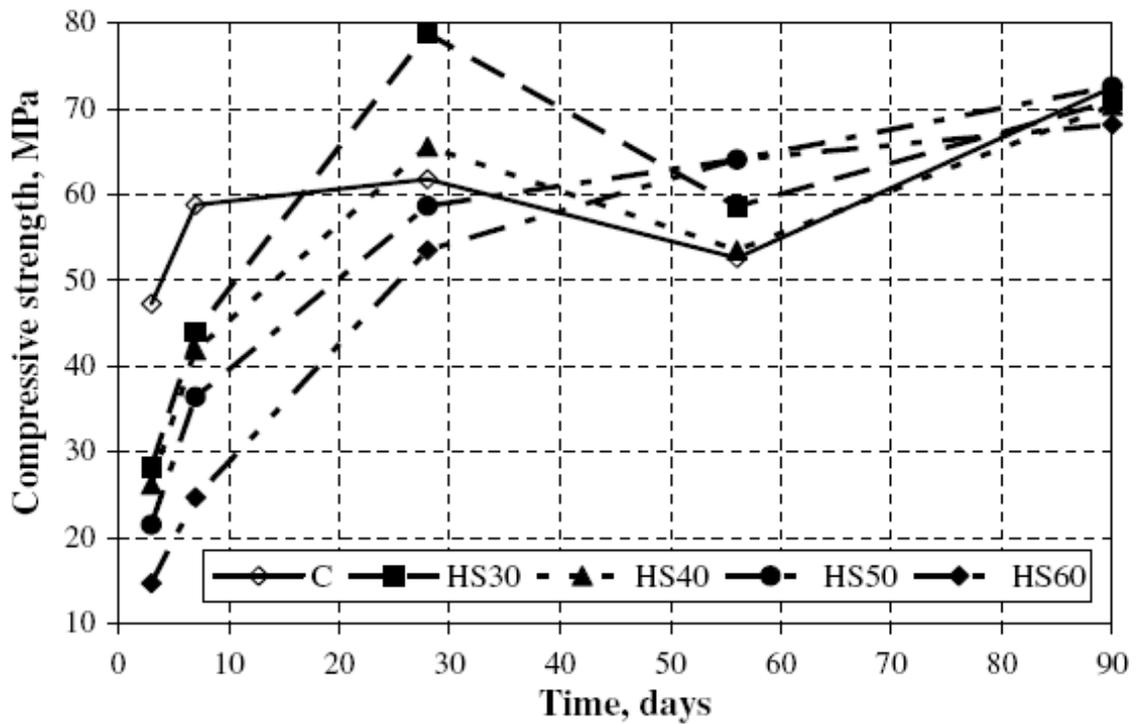


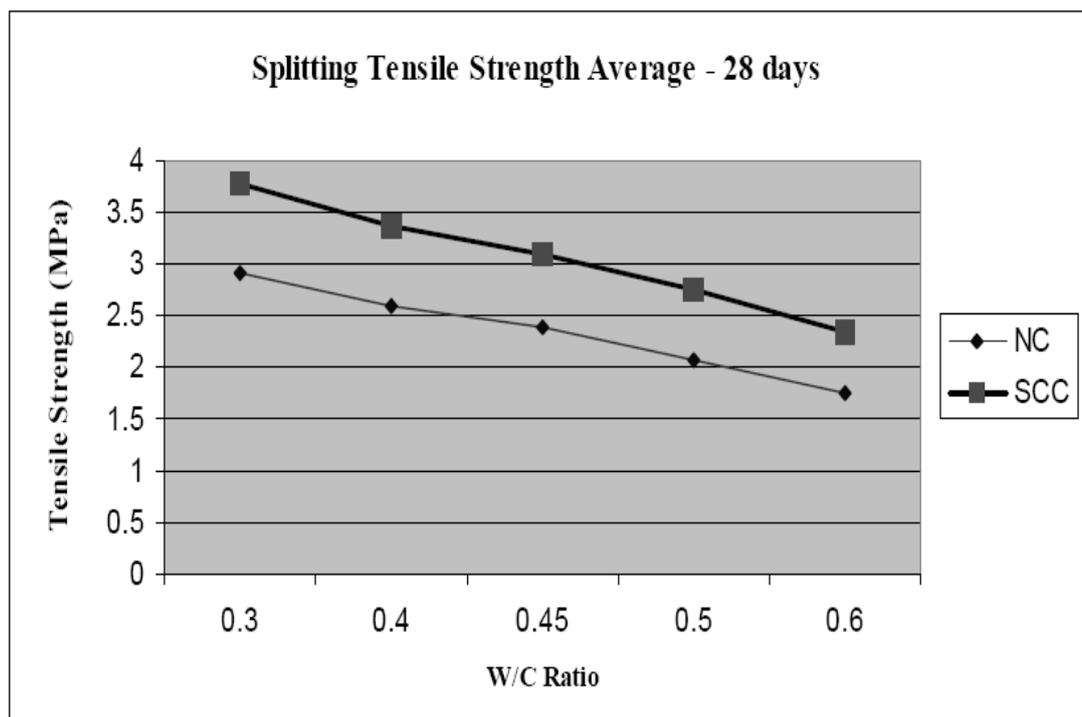
Figure 1-9 : Effet des cendres volantes, 10% du fumé de silice sur la résistance à la compression [33].

### 1-6-2) Résistance à la traction

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance à la traction, qui peuvent être dues à la quantité des fines ou bien au volume des granulats.

Pour certains auteurs, la porosité de l'aurole de transition des BAP est inférieure à celle des BV et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures. Par conséquent, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%) [2].

Une augmentation de la résistance à la traction de BAP d'environ 30%, par rapport au béton normal, peut être obtenue par l'utilisation des ajouts chimiques ou minéraux. La résistance à la traction de BAP augmente ainsi avec la diminution de rapport E/C. cette diminution est de l'ordre 30% lorsque le rapport E/C diminue de 0,6 à 0,3 (Figure 1-10).



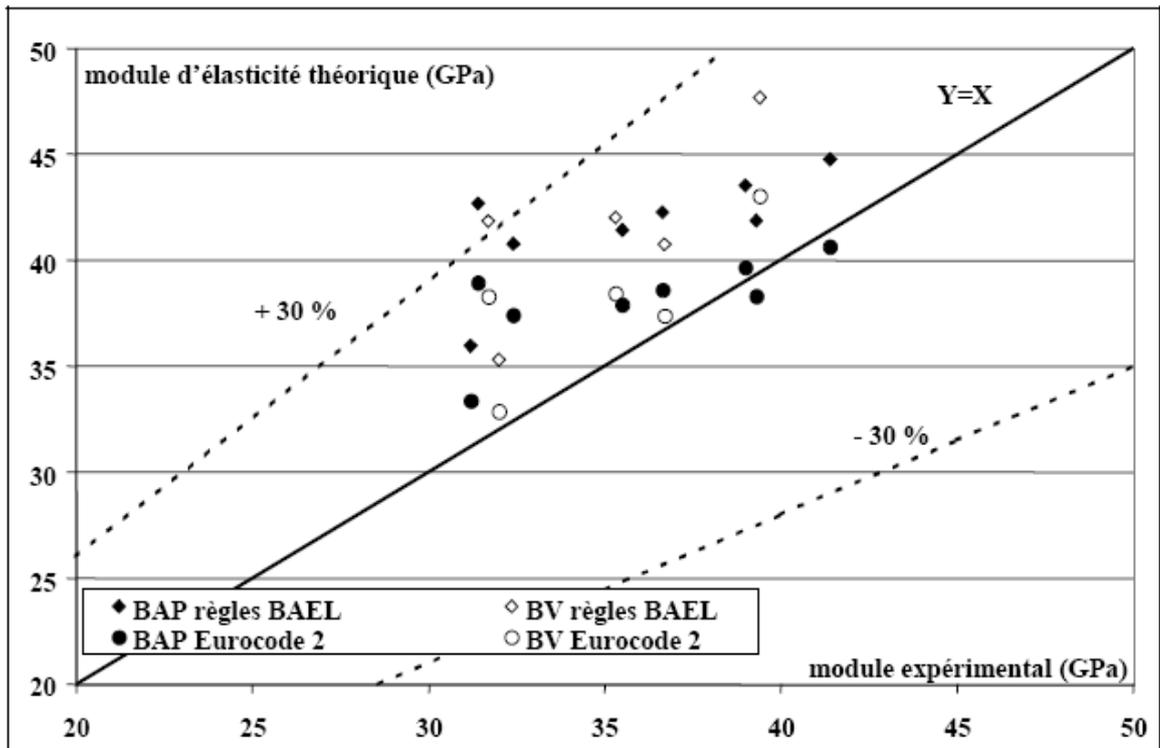
**Figure 1-10** : Variation de la résistance moyenne à la traction avec le rapport E/C [24].

PARRA et al [34] ont montré que dans un BAP contenant les fillers de calcaire la résistance à la traction est inférieure à celle du béton vibré. A 7 jours, la différence entre

les deux bétons est négligeable, mais à 28 et 90 jours, la différence augmente et atteint 15% environ.

### 1-6-3) Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend de la résistance à la compression du béton, donc si la résistance à la compression est la même pour le BAP et BV, les modules d'élasticité doivent être plus au moins égaux [2]. Le module d'élasticité d'un BAP et d'un BO est comparable (Figure 1.11).

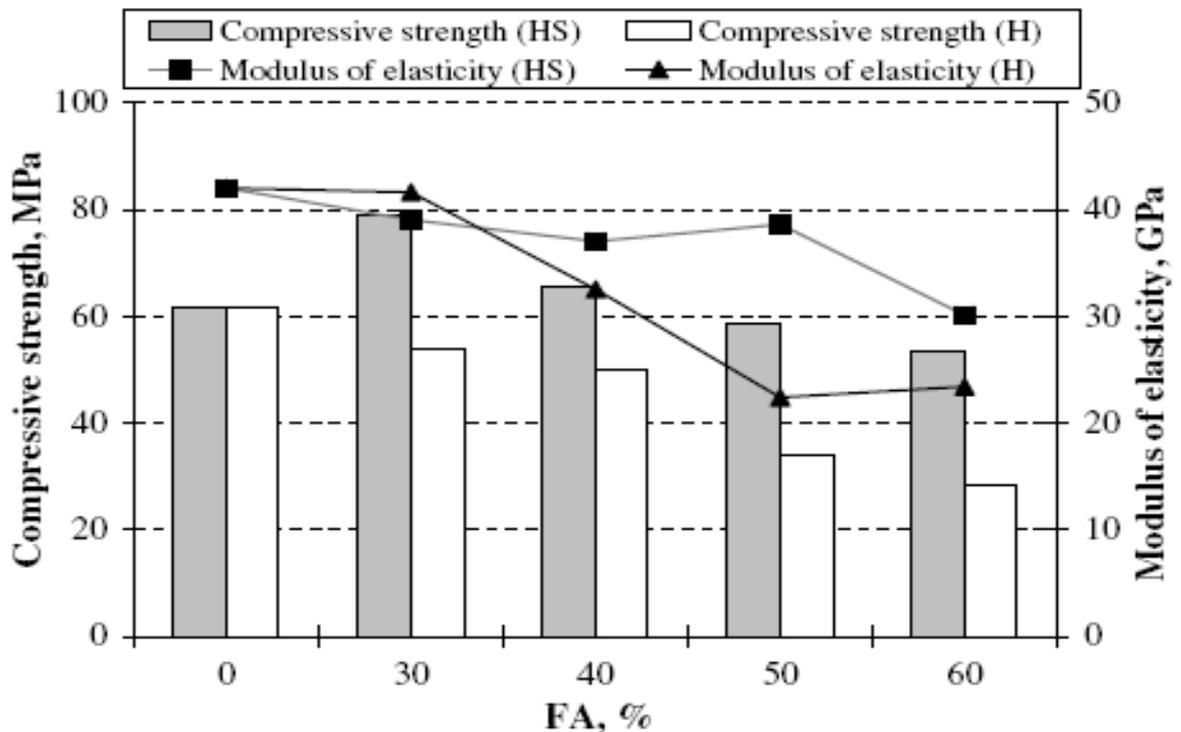


**Figure 1-11** : Comparaison des modules d'élasticité théorique de BAP et de béton vibré avec leurs valeurs expérimentales [35].

TURCRY et al [27] a montré que l'augmentation du volume de la pâte est accompagnée avec une faible diminution de module d'élasticité de BAP. La déformation de la pâte étant beaucoup plus élevée que celle des agrégats, la grande teneur en pâte mène à un moins de rigidité dans le béton [34].

YAZICI [33] a montré qu'un BAP avec 10% du fumé de silice et jusqu'à 50% du cendre volante, n'a pas un effet sur le module d'élasticité. Tandis qu'un pourcentage supérieur

mène à une diminution de ce dernier. Bien que la présence de cendre volante seule mène à une réduction de 30% du module d'élasticité (Figure 1.12).



**Figure 1-12** : Influence des cendres volantes sur la résistance à la compression et module d'élasticité [33].

#### 1-6-4) Retrait

##### 1-6-4-1) Retrait plastique

Le retrait plastique est défini comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage [1]. Ce retrait a lieu avant la prise du ciment, à un moment où la pâte est encore déformable. Il est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques.

GRAM et PIIPARINEN [36] et TURCRY [1] ont observé des retraites plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (Figure 1.13 et 1.14).

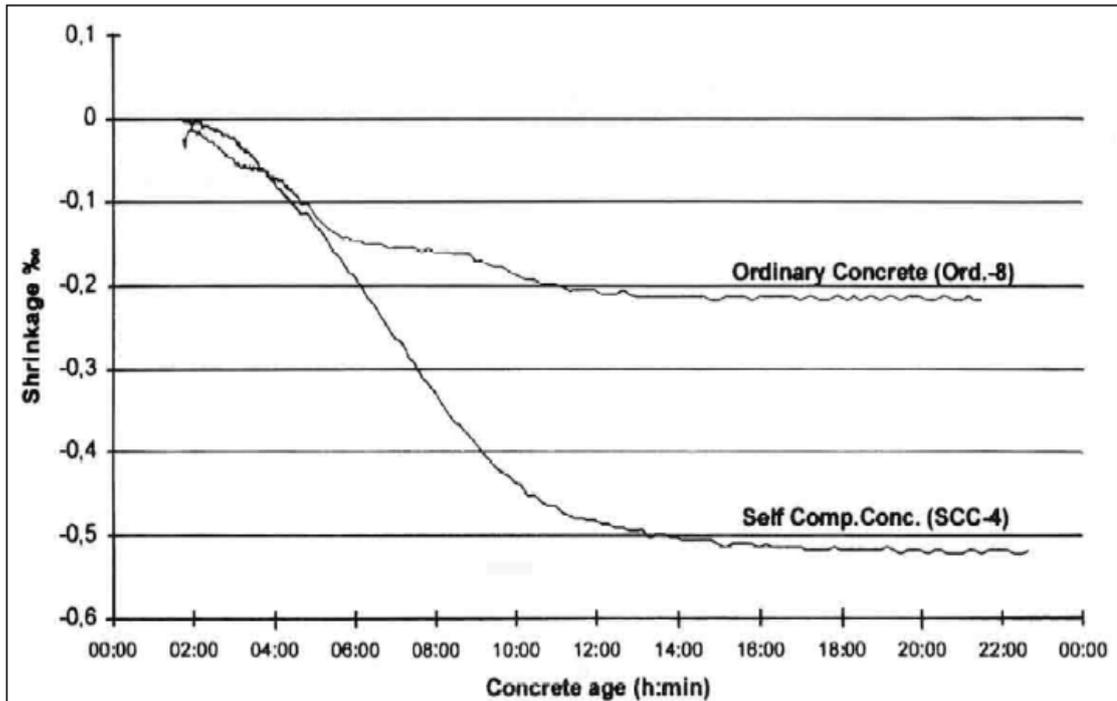


Figure 1-13 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré [36].

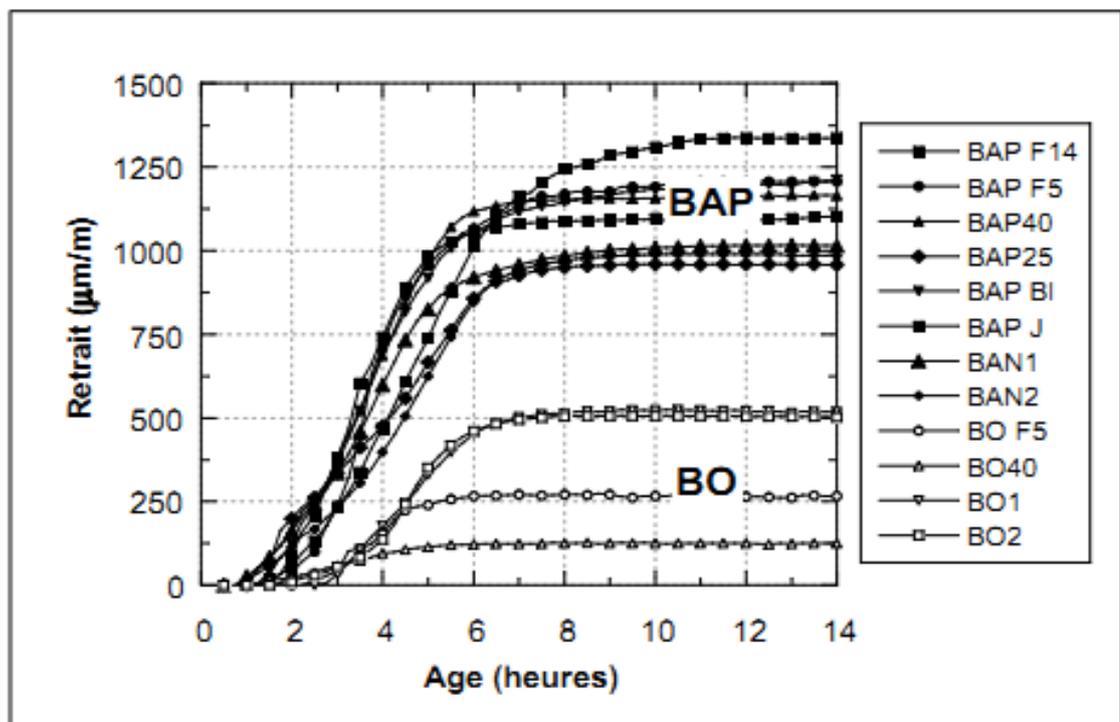


Figure 1-14 : Retrait plastique des BAP et des bétons vibrés [1].

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à un autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus important qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant [37].

#### 1-6-4-2) Retrait endogène

On nomme retrait endogène la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isotherme [1]. Le retrait endogène commence dès la prise du béton, son développement est rapide et il se stabilise après quelques mois.

Comme le retrait plastique le retrait endogène est influencé par plusieurs paramètres :

- ✓ Le rapport E/C : dans les matériaux, plus le rapport E/C est faible et plus la diminution de l'humidité relative est importante par l'auto dessiccation. La diminution du rapport E/C conduit à un raffinement de la porosité capillaire qui favorise la formation de ménisques très courbés et qui engendre des fortes dépressions capillaires.
- ✓ La finesse du ciment : L'augmentation de la finesse du ciment engendre une hydratation plus importante et donc une augmentation du retrait endogène du béton.

Les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. Cependant, certains auteurs HU et BARBIERI [38] trouvent que le retrait endogène dans le BAP est inférieur ou égal à celui des bétons vibrés. (Figure 1-15)

D'autre part, PONS et al [35] contestent cette idée et constatent que le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible donc avec une résistance en compression élevée. (Figure 1.16)

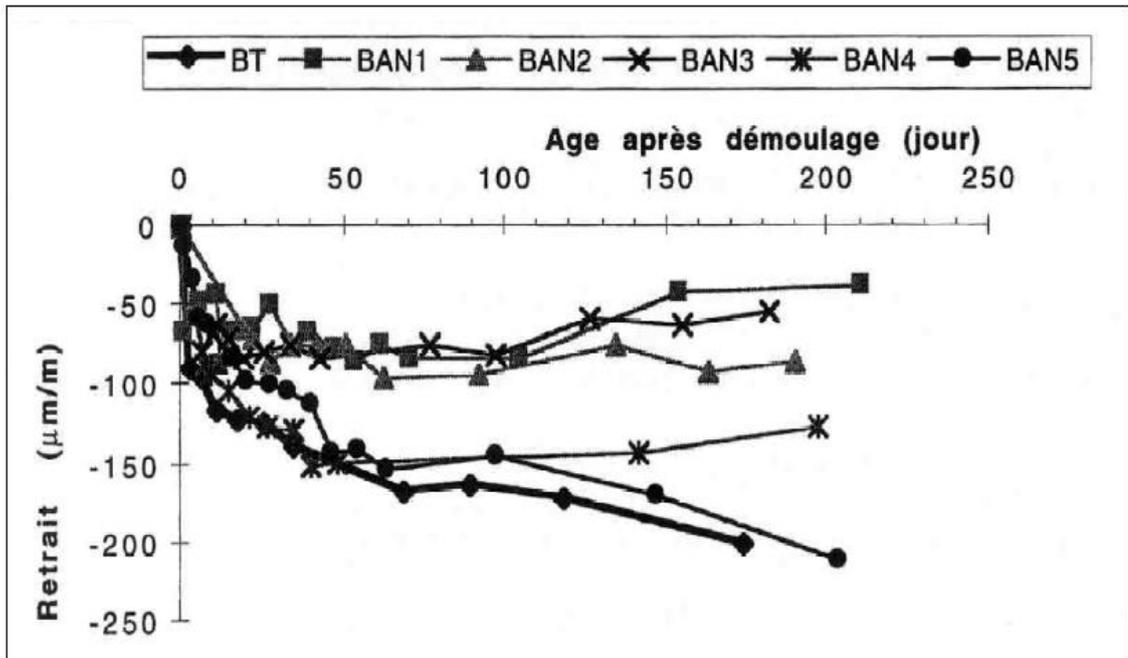


Figure 1-15 : Comparaison des retraits endogène d'un béton vibré et cinq BAP [38].

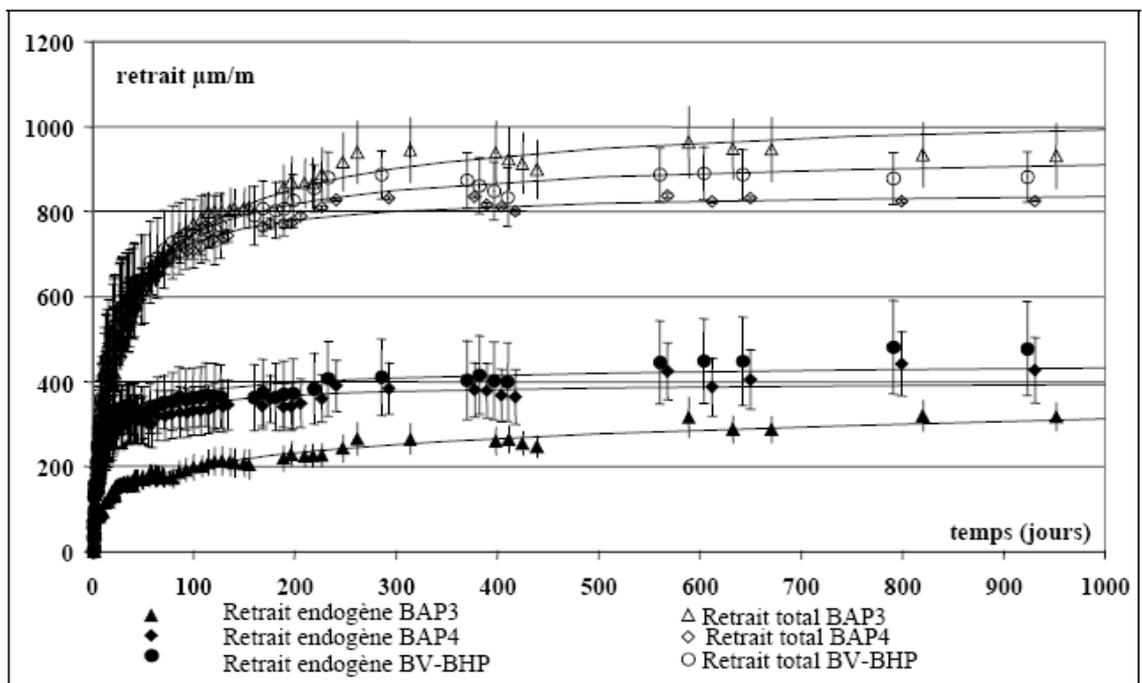
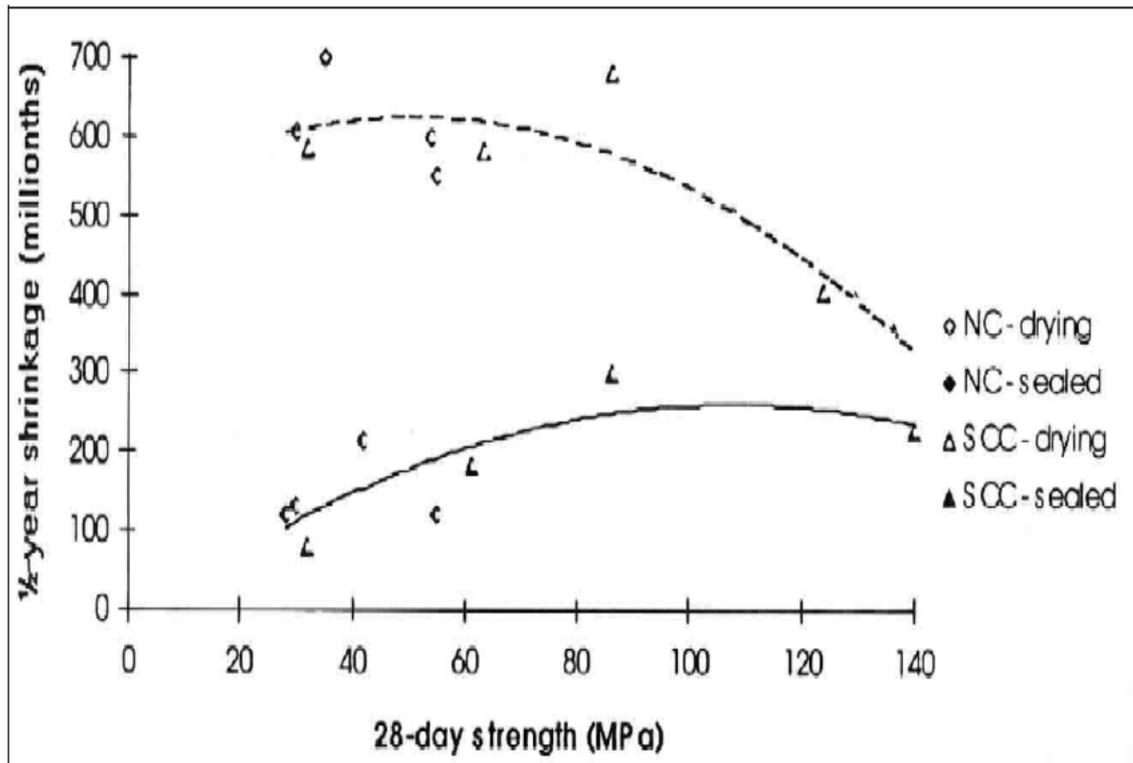


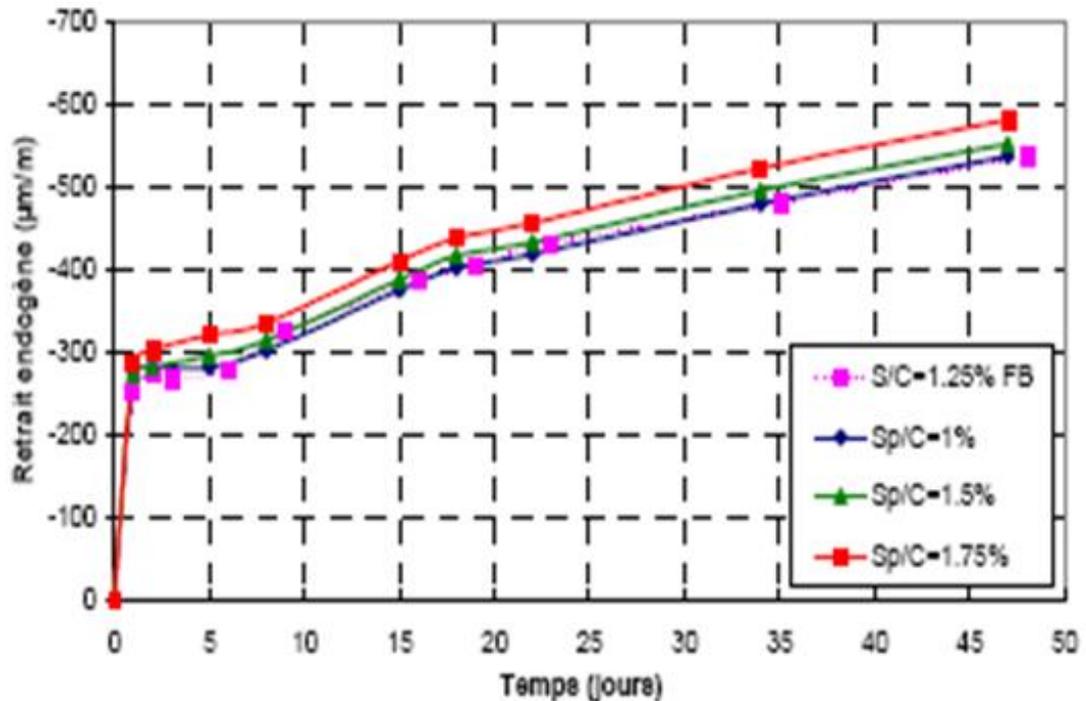
Figure 1-16 : Retraits endogène et retrait total d'un béton vibré et deux BAP de résistance 60 MPa [35].

PERSSON [39] a aussi montré que les BAP sont sujets à des retraits endogène et de dessiccation équivalents à celles des bétons vibrés pour des béton ayant une résistance à la compression allant de 30 à 140 MPa. (Figure 1-17)



**Figure 1-17** : Retrait endogène et de dessiccation à (180 jours) de béton vibré et BAP en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [39].

Comme la formulation de BAP se caractérise par l'utilisation des superplastifiants, ALRIFAI et al [40] ont montré que la variation du dosage en superplastifiant n'a pas d'influence notable sur le retrait endogène, mais il dépend de la nature et du dosage en ciment ainsi que le rapport F/C (filler de calcair/ciment), F/C faible engendre un retrait important (Figure 1.18). Par contre, CRAEYE et al [41] ont montré que le type de filler, (calcaire, cendre volante), dans la composition de BAP n'a pas une influence sur le retrait endogène total. Les différents types de fillers n'ont pas mené à une différence de diamètre des pores de la microstructure.



**Figure 1-18** : Influence de dosage de superplastifiant sur le retrait endogène de BAP [40].

#### 1-6-4-3) Retrait de dessiccation (séchage)

Le retrait de séchage est défini comme une diminution du volume de la pâte provoquée par le départ d'eau libre du béton. L'assèchement (séchage) progressif de la pâte de ciment par évaporation est la cause principale de ce retrait de dessiccation. Il survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible de retrait.

Dans les bétons ordinaires, une diminution du rapport E/C engendre une diminution du retrait de dessiccation et les BAP ne font pas exception à cette règle (Figure 1-19). Des résultats contradictoires sont observés dans la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP en comparaison avec celui des bétons ordinaires. HU et BARBIERI [38] ont trouvé des retraits pour les bétons autoplaçant plus importants que celles mesurées sur des bétons vibrés. Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé (Figure 1-20).

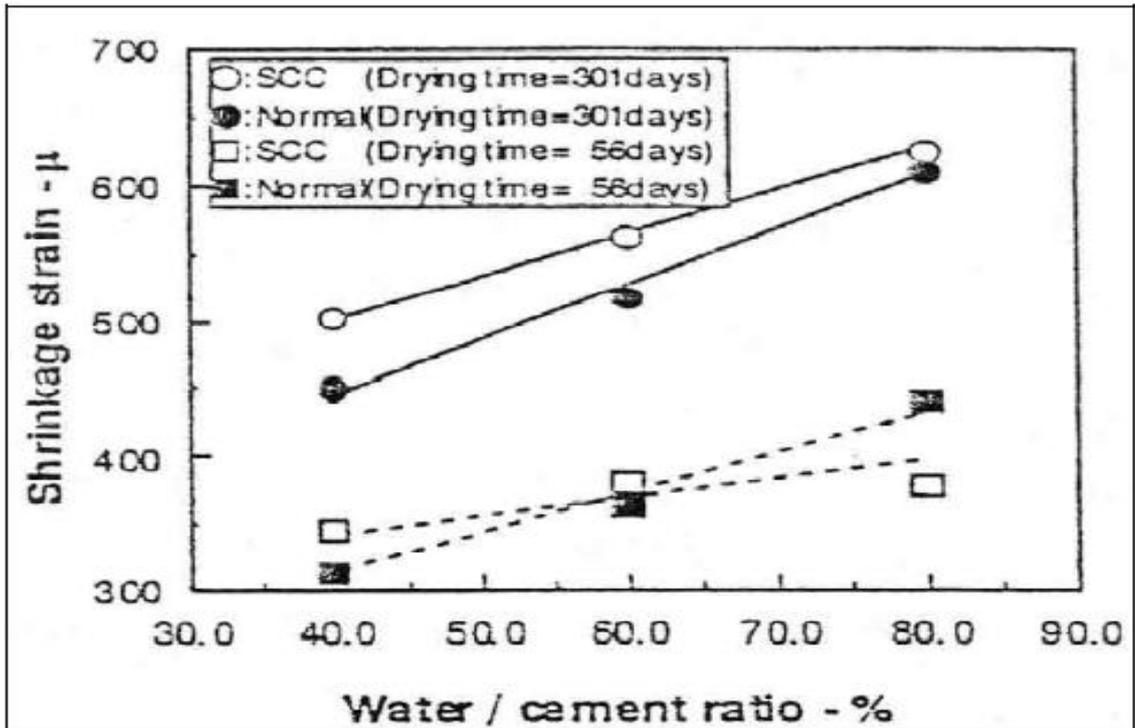


Figure 1-19 : Retrait de dessiccation des BAP et des bétons traditionnel de même rapport E/C [42].

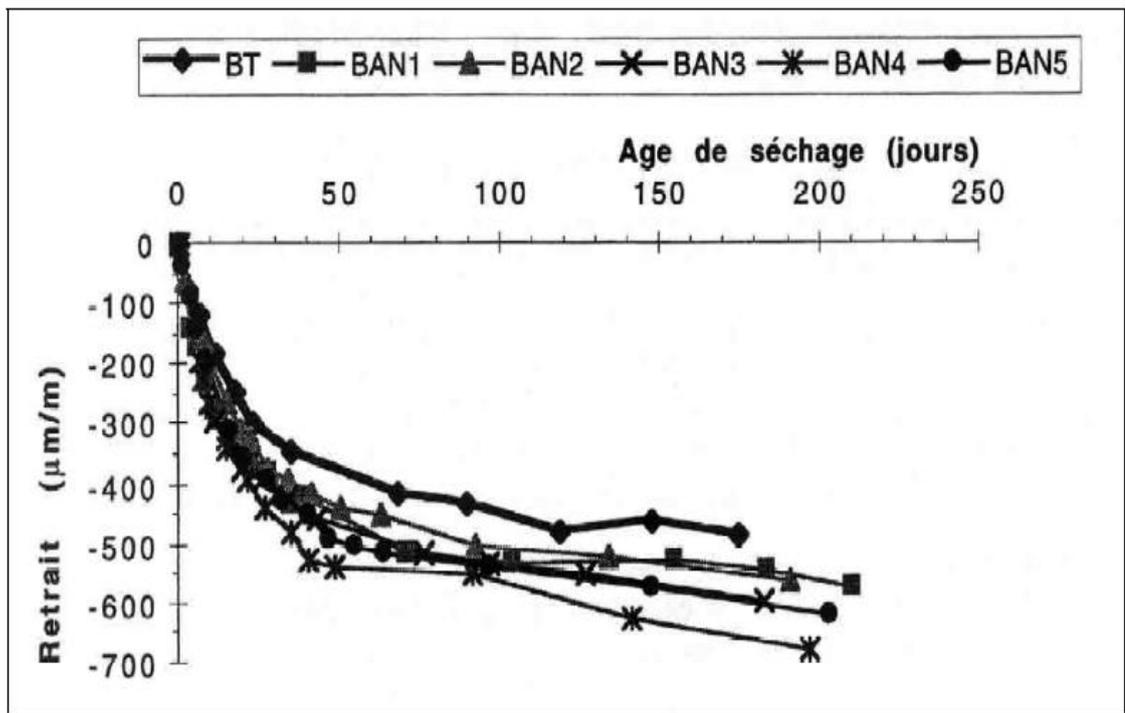
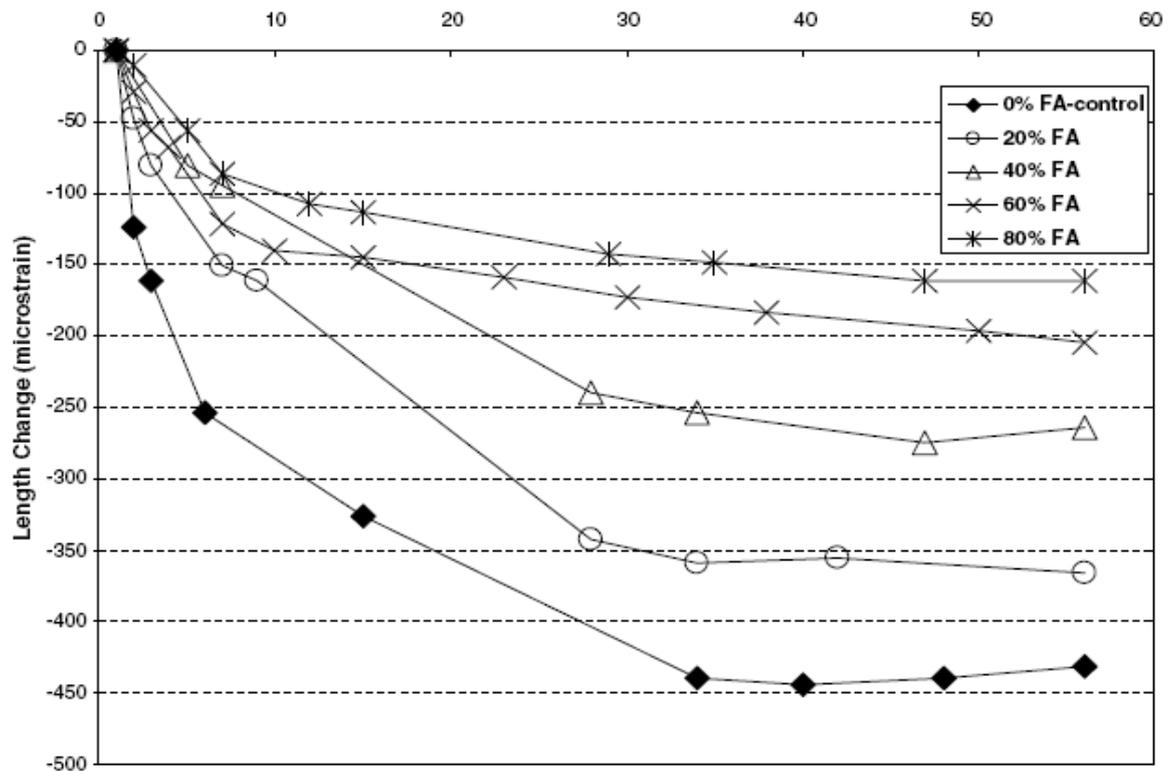


Figure 1-20 : Comparaison de retrait de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP [38].

D'autres auteurs, PERSSON [39] et SAKATA [42] ont trouvé pour une résistance mécanique constante, des retraits équivalents pour les deux types de béton (BO et BAP). Cependant, SONEBI et BARTOS [30] ont observé des retraits de séchage des bétons vibrés plus importants que ceux des BAP. Cette diminution du retrait dans les BAP est due à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L du fait que, l'augmentation de volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [43].

Selon VAN et MONTGOMERY [44], le filler calcaire peut limiter le retrait de séchage des BAP, avec une utilisation adéquate de la finesse et de la proportion. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [45].

L'incorporation des quantités croissantes des cendres volantes dans la composition des BAP, réduit le retrait de séchage (Figure 1-21). Une variation linéaire de retrait avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes a été observée. La substitution de ciment avec un pourcentage de 80% de cendres volante, peut réduire le retrait par deux tiers [46]. Cependant, l'augmentation du volume de la pâte augmente la susceptibilité des fissurations de retrait [47].



**Figure 1-21** : Influence des cendres volantes sur le retrait [46].

#### 1-6-4-4) Retrait thermique et la contraction

Le dégagement de la chaleur causé par la réaction d'hydratation qui est exothermique, dès le début de prise, provoque une dilatation pendant que le béton est encore déformable. Lorsque le refroidissement débute, le béton durci se contracte, alors que la prise a été déjà faite, donc la déformation du béton étant limitée par la pâte durcie, les contraintes de traction se développent, c'est le retrait thermique.

#### 1-6-5) Durabilité

La durabilité du béton est conditionnée par les phénomènes de transport, car ils sont les forces motrices qui vont entraîner la pénétration des agents agressifs extérieurs du béton par capillarité, perméabilité ou diffusion.

##### 1-6-5-1) Perméabilité au gaz et à l'eau

La perméabilité aux gaz ou à l'eau est un indicateur de durabilité du béton, on peut la définir aussi comme la capacité de laisser passer un fluide (liquide ou gaz) à travers un échantillon donné. La perméabilité dépend des caractéristiques du fluide (la nature du fluide, la pression appliquée) et également à la porosité du matériau qui représente le volume relatif des vides dans le béton.

La perméabilité à l'eau dépend des paramètres de la composition, le ciment (type et classe), les types des fillers (cendres volantes, fillers de calcaire), le rapport ciment/fine, le rapport E/C, ainsi que la quantité d'eau et la quantité des fines (ciment et fillers) (Tableau 1.3 et Figure 1.22) [48]. La porosité elle-même est influencée par la teneur en eau du béton, d'où le rapport E/C. PERRATON et al [49] ont constaté que lorsque le rapport E/C augmente la porosité devient plus grande et la structure poreuse plus grossière. Par conséquent, les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie.

DE SCHUTTER et al [40] ont trouvé que pour le même rapport E/C, la perméabilité au gaz de BAP était de 1/2 à 1/6 de la valeur correspondante à un béton ordinaire tandis que la perméabilité à l'eau était légèrement inférieure pour un BAP.

Tableau 1-3 : Composition des mélanges [48]

	CEM I 42.5 R [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM I 52.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM III A 42.5 L.A [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM I 52.5 HSR [kg/m <sup>3</sup> ]	limestone filler S [kg/m <sup>3</sup> ]	limestone filler P2 [kg/m <sup>3</sup> ]	fly ash [kg/m <sup>3</sup> ]	water [kg/m <sup>3</sup> ]	sand 0/5 [kg/m <sup>3</sup> ]	gravel 4/14 [kg/m <sup>3</sup> ]	glenium 51 [l/m <sup>3</sup> ]	W/C [-]	C/P [-]	compr. strength [MPa]
SCC1	360					240		165	853	698	2.3	0.46	0.60	57.3
SCC2		360				240		165	853	698	2.5	0.46	0.60	68.0
SCC3			360			240		165	853	698	2.3	0.46	0.60	66.1
SCC4				360		240		165	853	698	2.2	0.46	0.60	70.1
SCC5	300					300		165	853	698	2.2	0.55	0.50	46.5
SCC6	400					200		165	853	698	2.9	0.41	0.67	64.2
SCC7	450					150		165	853	698	3.0	0.37	0.75	68.7
SCC8	360				240			165	853	698	2.8	0.46	0.60	56.9
SCC9	360						240	165	853	698	2.8	0.46	0.60	66.2
SCC10	300					200		137	923	755	3.4	0.46	0.60	60.1
SCC11	400					300		192	782	640	2.6	0.48	0.57	55.9
SCC12	450					350		220	712	583	2.7	0.49	0.56	50.9
SCC13	360					240		144	865	707	3.6	0.40	0.60	68.7
SCC14	360					240		198	835	683	1.8	0.55	0.60	46.6
SCC15	360					240		216	825	675	2.0	0.60	0.60	40.3
TC1	360							165	640	1225		0.46	1.00	48.6
TC2	400							165	626	1200		0.41	1.00	53.7

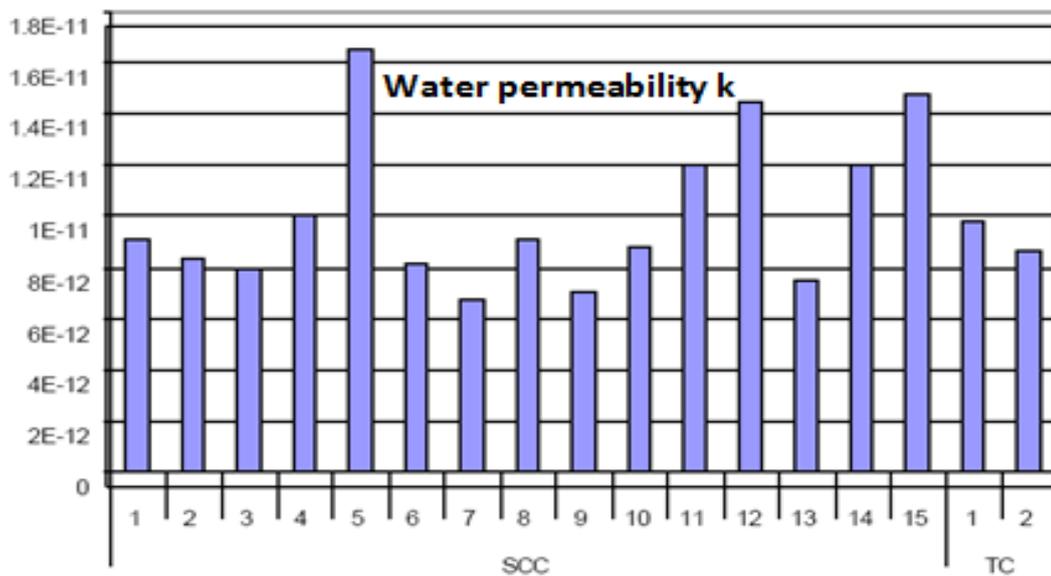
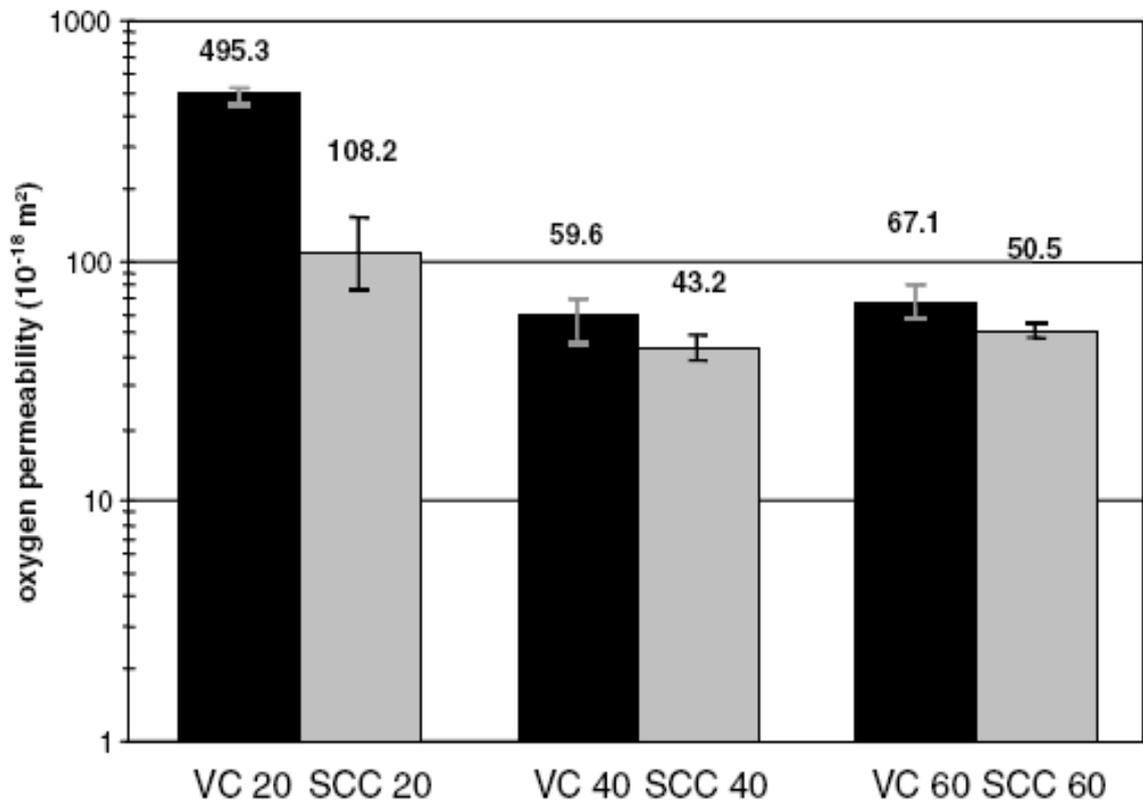


Figure 1-22 : Perméabilité à l'eau [48].

La perméabilité à l'oxygène d'un BAP est inférieure à celle d'un béton ordinaire (Figure 1-23) [51]. De même, ASSIE [37] a trouvé que la perméabilité à l'oxygène des BAP est inférieure à celle des bétons ordinaires (BV) à résistance mécanique équivalente. Cependant, la perméabilité à l'eau de BAP ne diffère pas de manière significative de celle de béton ordinaire. Les différences de volume de pâte (et de microstructure) entre les deux types de béton semblent ne pas influencer les propriétés de transfert.



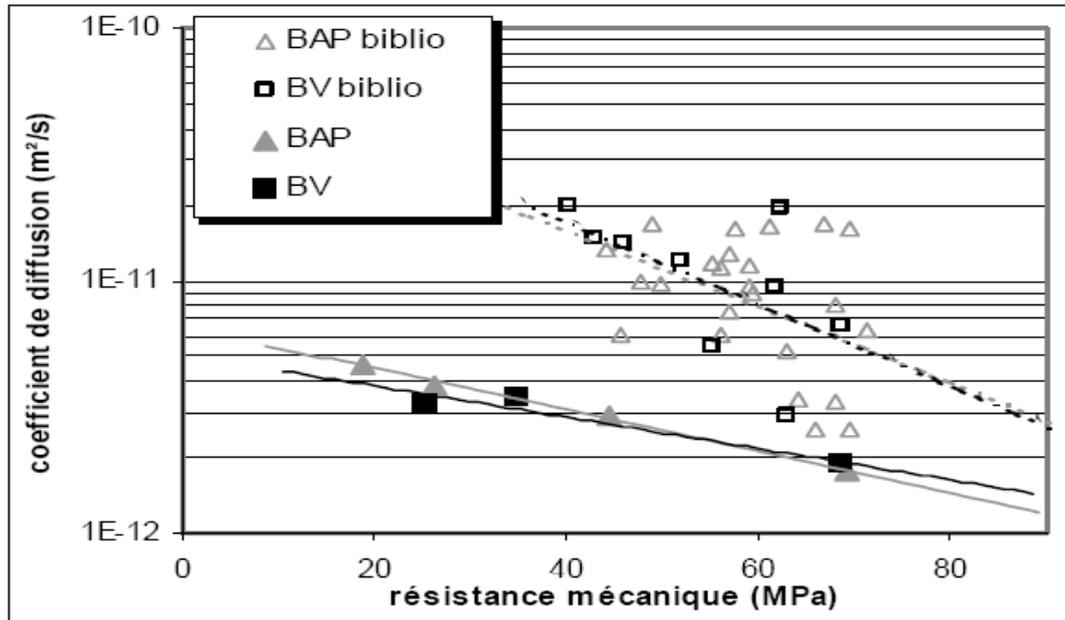
**Figure 1-23** : La perméabilité à l'oxygène d'un BAP et BV [51].

D'autre part, ZHU et BARTOS [52] ont montré que pour la même valeur de résistance à la compression, les BAP contenant un agent de viscosité et sans additions ont un coefficient de perméabilité élevé par rapport aux BAP avec des fillers de calcaire ou des cendres volantes.

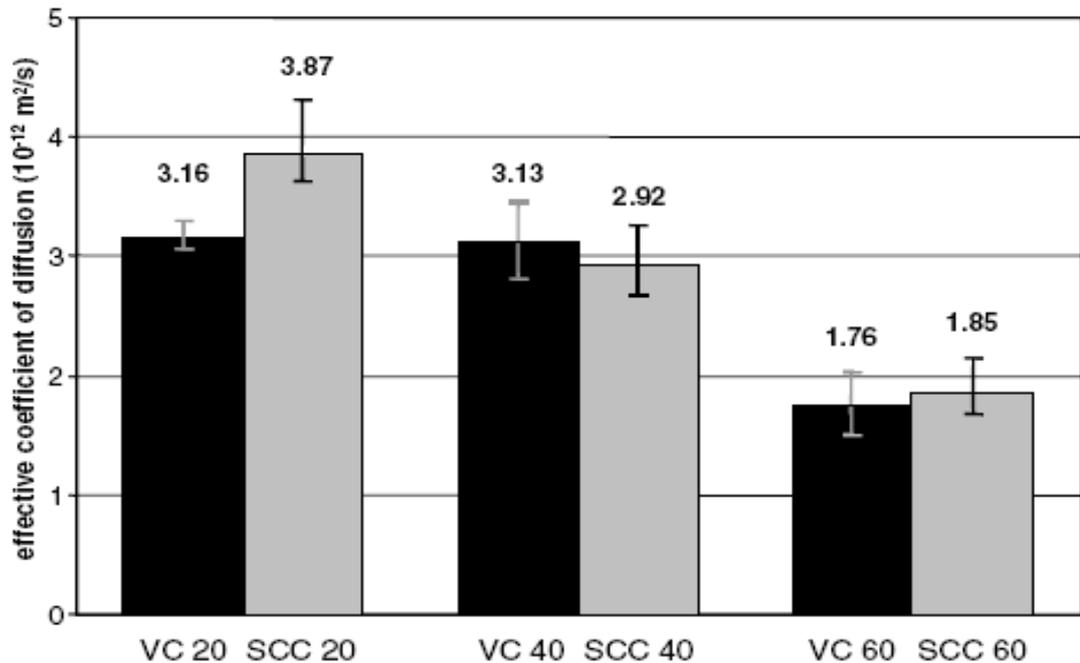
#### 1-6-5-2) Diffusion des ions de chlorure

Pour certains chercheurs, la diffusion des ions de chlorures est équivalente pour les BAP et pour les bétons ordinaires (Figure 1-24 et 1-25). La substitution du volume élevé de ciment

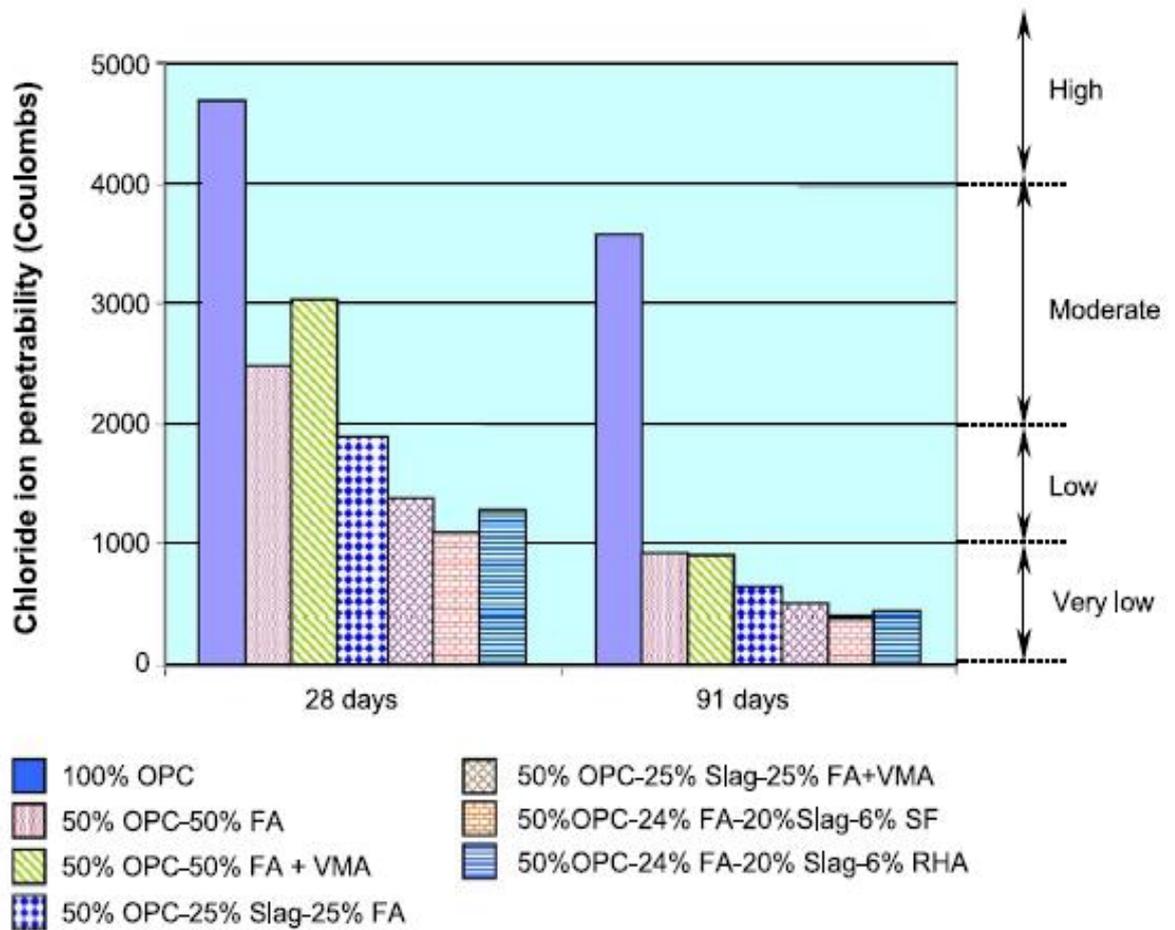
portland ordinaire par des ciments ternaire et quaternaire dans le BAP diminue sensiblement la pénétration des ions de chlorure (Figure 1-26).



**Figure 1-24** : Coefficient effectif de diffusion aux ions de chlore en fonction de la résistance mécanique [37].



**Figure 1-25** : Coefficient effective de diffusion de chlorure [51].



**Figure 1-26** : Pénétration des ions de chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges du BAP [53].

La diffusivité des ions de chlorure dépend elle-même du type des additions utilisées. Le volume élevé des cendres volantes dans le BAP diminue sa perméabilité aux ions de chlorure par rapport aux bétons ordinaires (Figure 1.27), et il présente une diffusivité inférieure par rapport aux BAP aux fillers de calcaire [52].

L'addition des fumées de silice et/ou les cendres volantes engendre une amélioration de la résistance à la pénétration des ions de chlorure. La profondeur de pénétration de chlorure dans le BAP qui contient l'un des deux additions ou les deux en même temps est considérablement plus petite que le BAP contenant seulement le ciment portland (Figure 1.28).

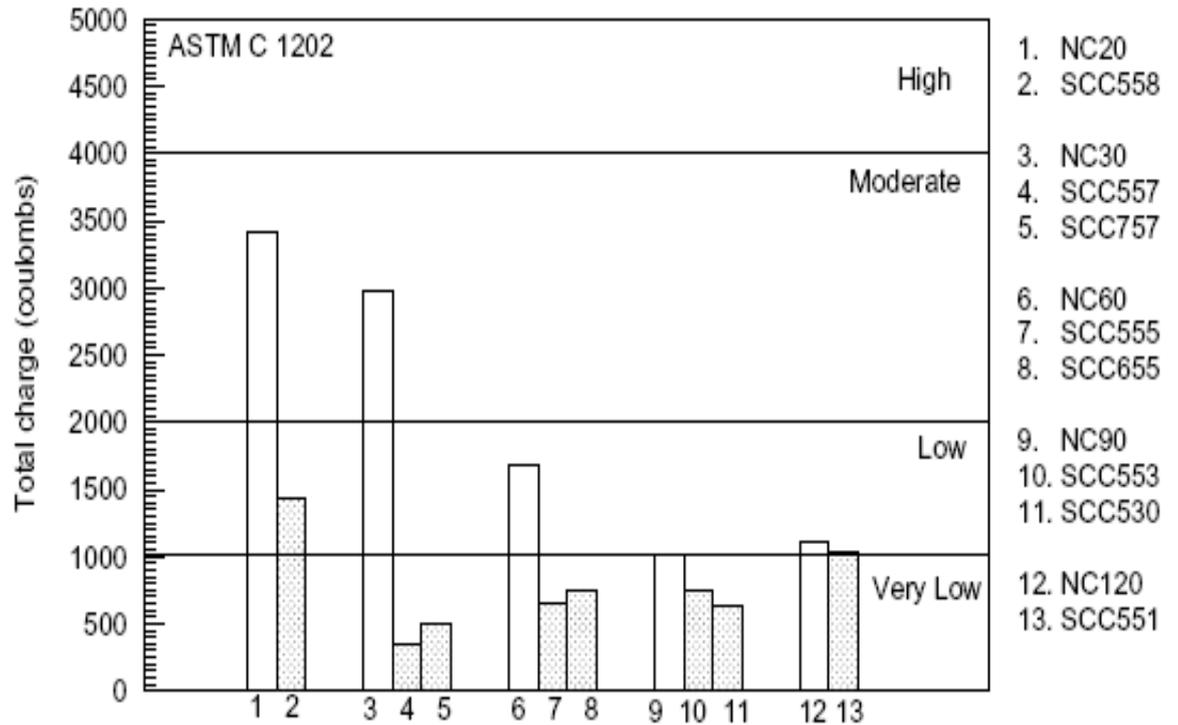


Figure 1-27 : Perméabilité aux ions des chlorures [54].

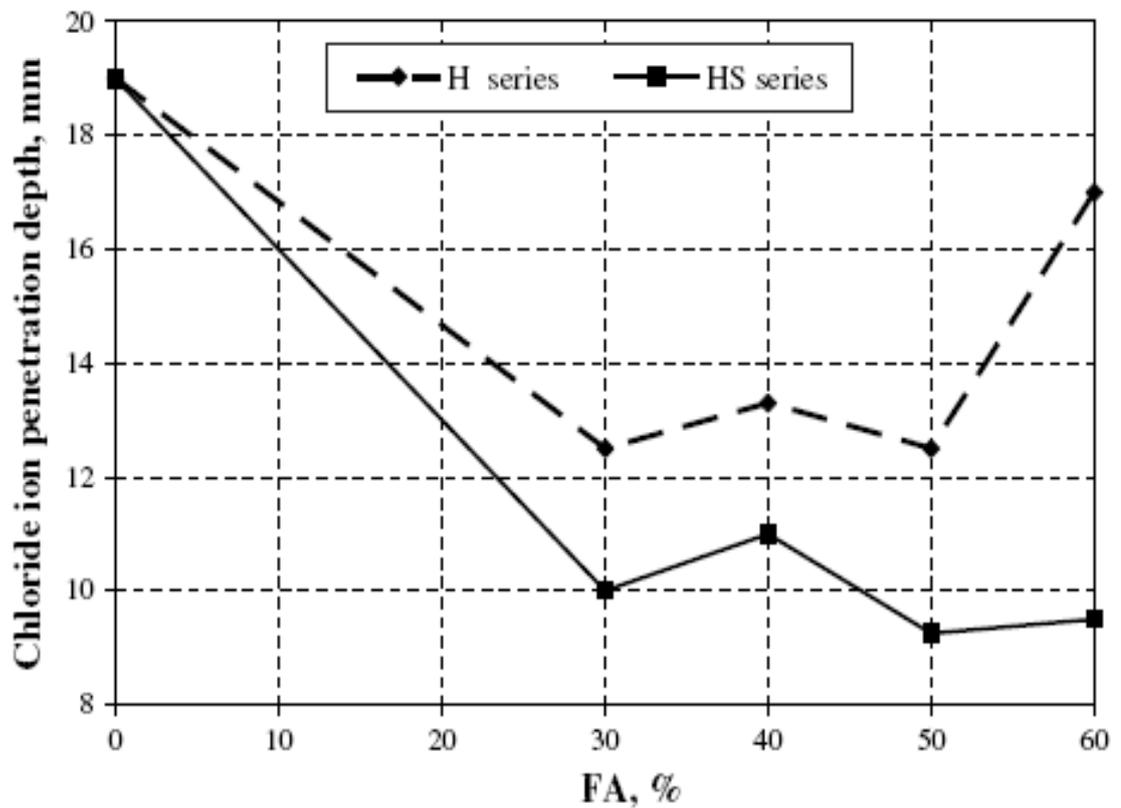


Figure 1-28 : Effet des cendres volantes sur la pénétration de chlorure [33].

### 1-6-5-3) Carbonatation

Le BAP et le béton ordinaire ayant la même classe de résistance à la compression, ont une résistance similaire à la détérioration par les agents agressifs tel que le l'anhydride carbonique (Figure 1-29).

VALCUENDE et PARRA [55] ont constaté que le taux de carbonatation est inférieur dans le BAP que dans le BO, ceci est probablement dû à sa faible porosité et la structure des pores fine (Figure 1-30 et 1-31). Par contre ASSIE [37] a trouvé que les BAP présentent une vitesse de carbonatation légèrement supérieure à celle du BV à une résistance similaire.

D'autre part il a été révélé que le rapport E/C et le type du ciment utilisé jouent un rôle important dan la carbonatation du béton, par conséquence, un BAP plus durable [56].

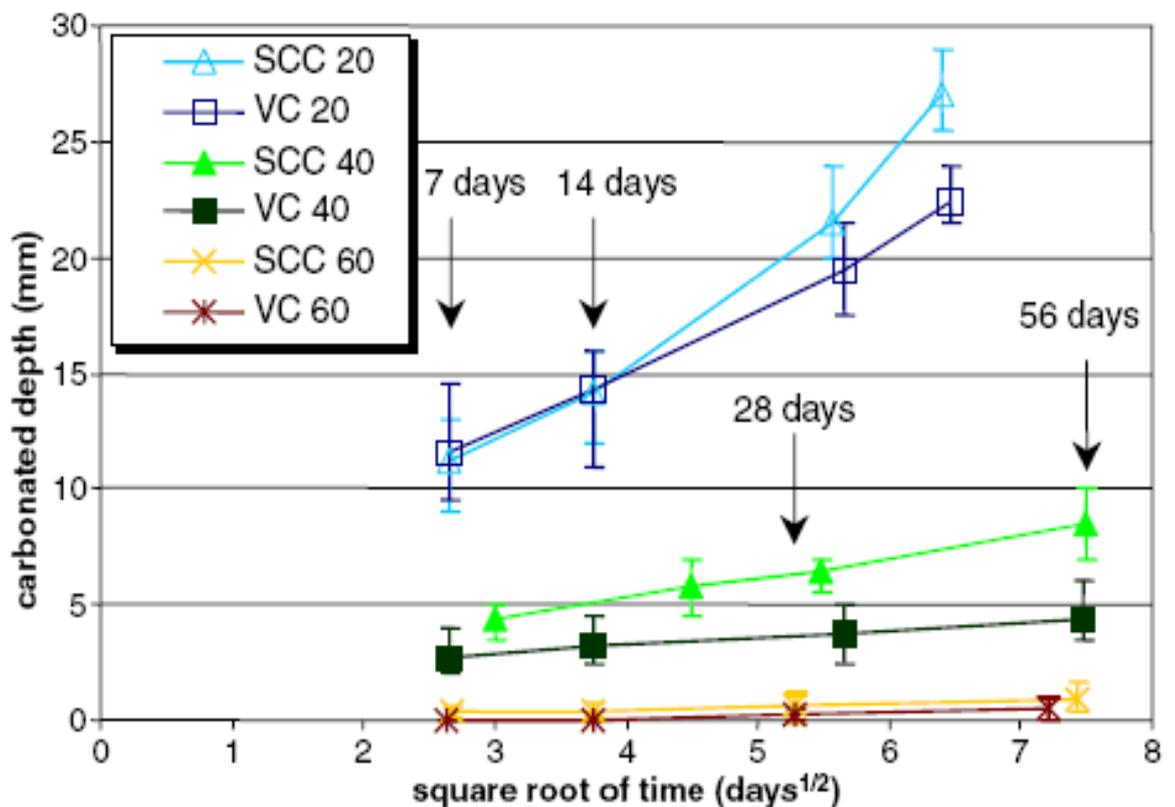
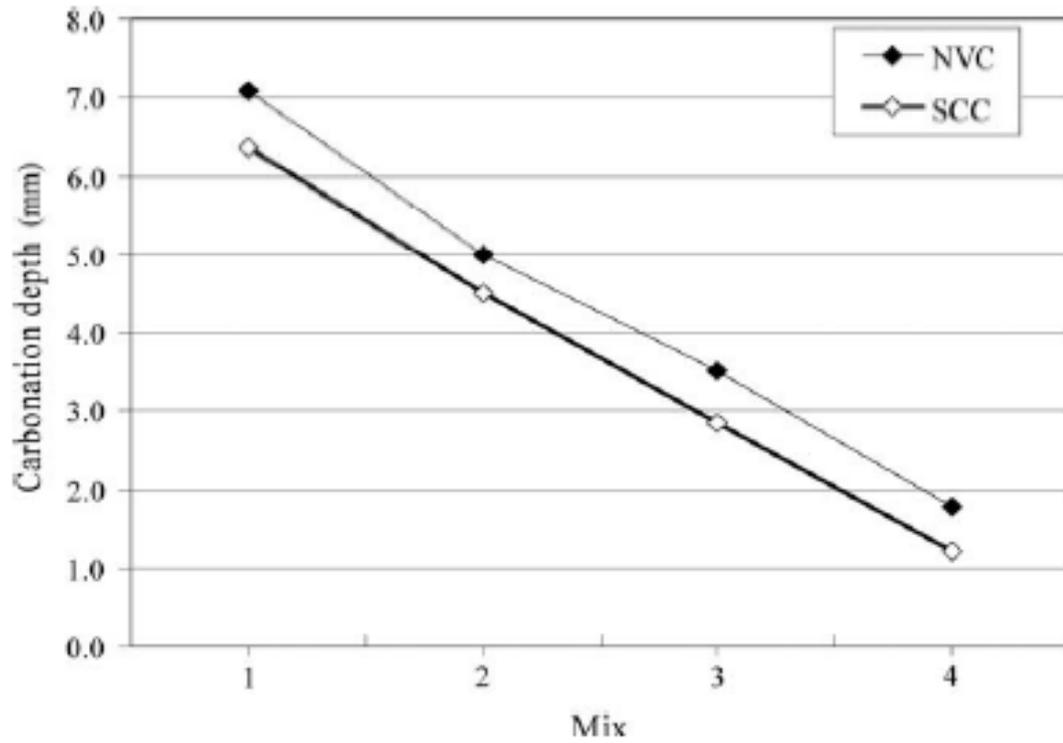
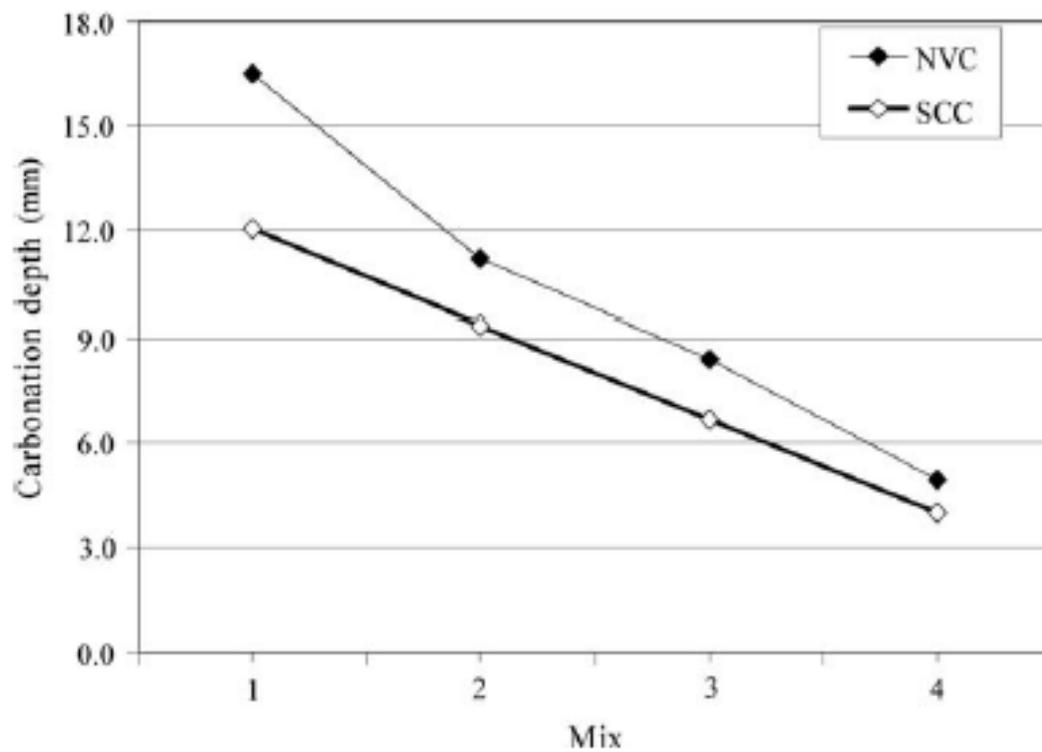


Figure 1-29 : Profondeur de carbonatation des BAP et BO à 28 jours [51].



**Figure 1-30** : Profondeur de carbonatation à 9 mois [55].



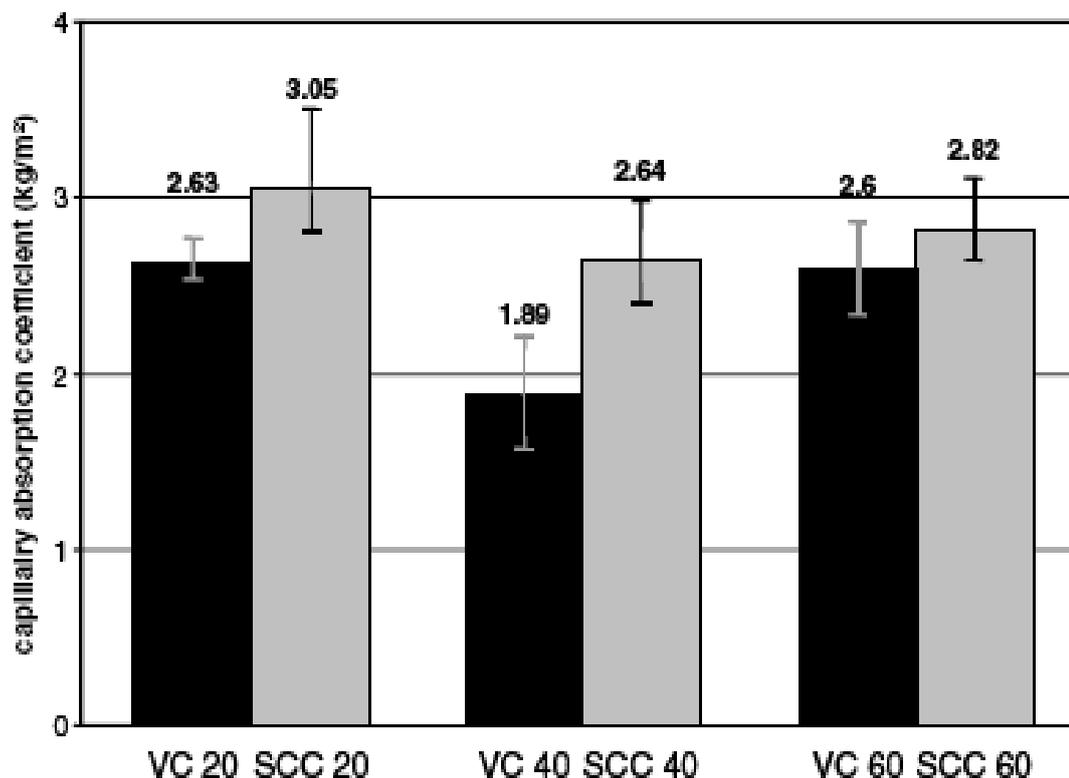
**Figure 1-31** : Profondeur de carbonatation à 42,5 mois [55].

#### 1-6-5-4) Absorption capillaire

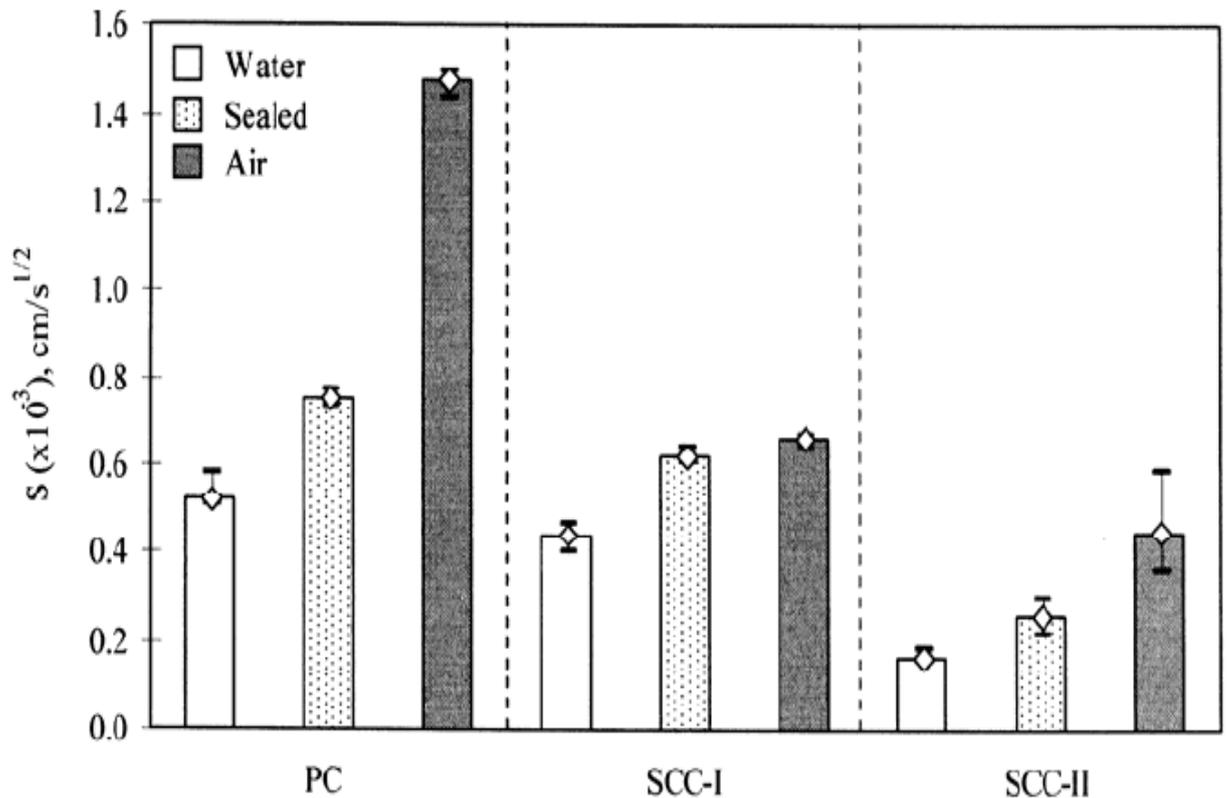
L'absorption d'eau à l'intérieur du béton est connue pour dépendre de deux paramètres : la porosité du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). L'absorptivité est influencée par le rapport E/C, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible [37].

L'absorption d'eau par capillarité est équivalente pour le BAP que pour le BO (Figure 1.32). Les différences du volume de pâte entre les deux types de bétons semblent peu influencer sur les propriétés de transfert lorsque la résistance à la compression est équivalente [37]. Par contre ZHU et BARTOS [52] ont trouvé que les valeurs de l'absorption du BAP sont inférieures à celles du BV.

La valeur du coefficient d'absorption du béton dépend aussi de la durée et des conditions de la cure [57]. Une cure humide diminue l'absorption capillaire (Figure 1.33).



**Figure 1-32** : Absorption capillaire des bétons en fonction de la résistance [51].



**Figure 1-33** : Le total et l'absorption capillaire d'eau en (%) [58].

L'utilisation des agents de viscosité seul sans additions dans le BAP engendre une augmentation de l'absorption capillaire (Figure 1.34).

La capillarité est aussi influencée par le type d'ajout utilisé. Les additions pouzzolaniques comme les fumées de silice ou les cendres volantes diminuent l'absorption capillaire [58].

Par contre TURKEL et ALTUNTAS [59], ont montré que les valeurs d'absorption d'eau totale par capillarité pour les mortiers autoplaçants (MAP) à base des cendres volantes et/ou les fillers de calcaire seule sont élevées, cependant, elles sont moins importantes pour les MAP à base de fumées de silice et/ou les cendres volantes et/ou les fillers de calcaire. Ce résultat peut mettre en évidence l'opinion que les fillers de calcaire et les cendres volantes ne peuvent pas bloquer suffisamment les pores capillaires aussi bien que l'utilisation des fumées de silice seule à 28 jours (Figure 1.35).

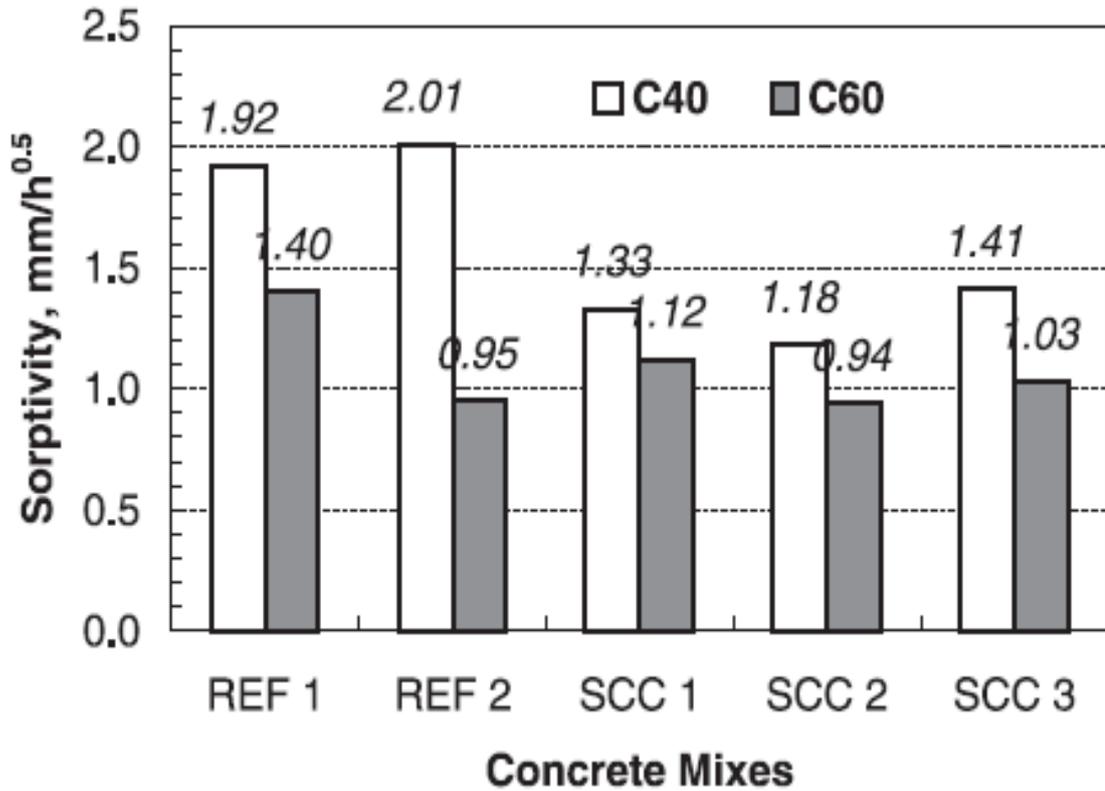


Figure 1-34 : Absorption capillaire d'eau [52].

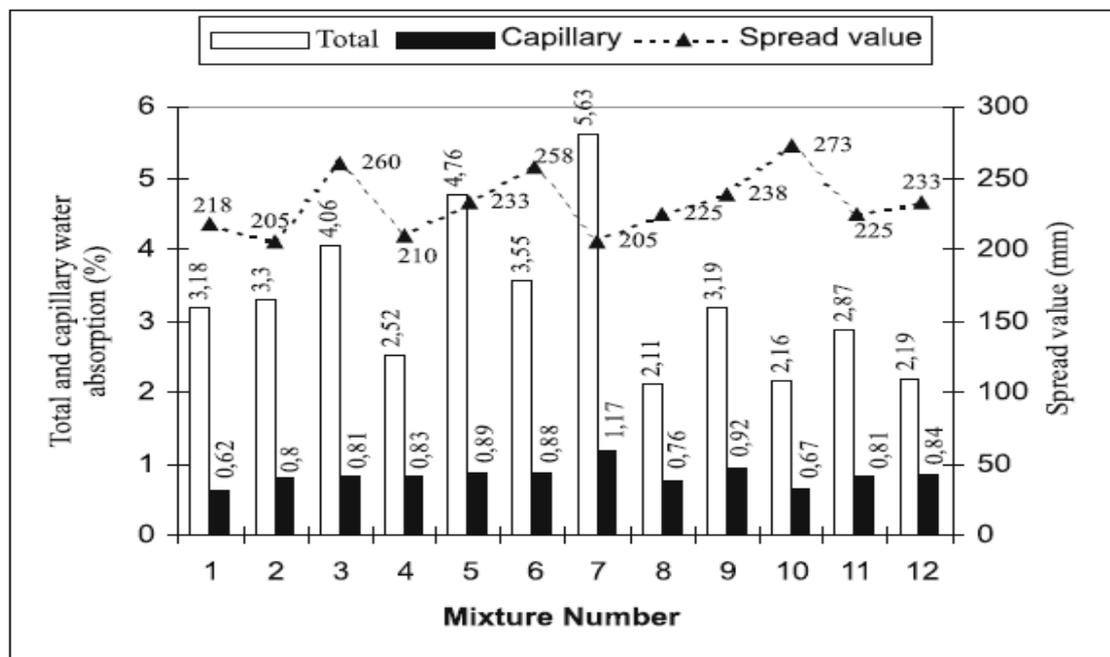


Figure 1-35 : Le total et l'absorption capillaire d'eau en (%) [59].

## **1-7) CONCLUSION**

Le BAP diffère du béton ordinaire par ces propriétés à l'état frais, cette particularité est définie par une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation. Par conséquent, la formulation doit pouvoir concilier ces deux propriétés contradictoires. En général, la résistance à la compression et à la traction ainsi que le module d'élasticité d'un BAP sont comparable à celles du béton ordinaire. Par contre, le retrait plastique dans le BAP est plus important que dans le béton ordinaire en raison du volume élevé de la pâte dans le BAP. La durabilité du BAP et d'un béton ordinaire est comparable, pour un béton de même âge et de même résistance, mais elle peut présenter une différence en fonction de type d'ajout utilisé et son pourcentage dans la formulation.

**Chapitre II : Revue bibliographique Granulats recyclés  
et  
BAP à base de granulats recyclés**

## CHAPITRE 2

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE GRANULATS RECYCLES ET BAP A BASE DE GRANULATS RECYCLES

#### 2-1) INTRODUCTION

Comme les granulats conventionnels s'épuisent de plus en plus avec les années, et les infrastructures routières et urbaines vieillissent très vite et nécessiteront des travaux de réfection ou de démolition, des quantités importantes de résidus sont générés. Ces matériaux de démolition peuvent être une source alternative des granulats (granulats recyclés) pour béton [60]. La majorité des applications de granulats recyclés issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats (béton recyclé) peut contribuer au développement de cette application [61].

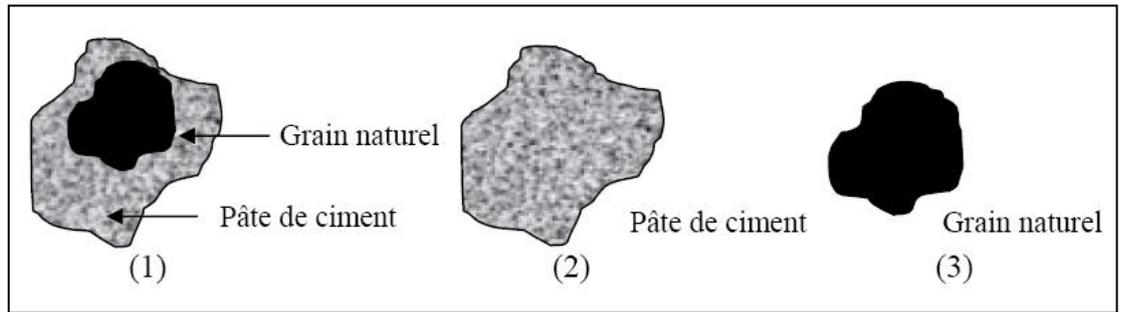
#### 2-2) CARACTERISTIQUES DES GRANULATS RECYCLES

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton.

Pour obtenir une bonne qualité de béton contenant des granulats recyclés, il faut que ces derniers soient aussi de bonne qualité. Les propriétés acceptables des granulats sont un élément de base pour un béton recyclé de qualité. Cependant, les proportions adéquates de mélange et la méthode de production sont aussi importantes pour avoir la qualité recherchée du béton.

Les granulats recyclés, fabriqués à partir des déchets de démolition des constructions, ont plusieurs formes (Figure 2-1)

- (1) Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment ;
- (2) Une pâte de ciment seule ;
- (3) Un grain de gravier naturel.

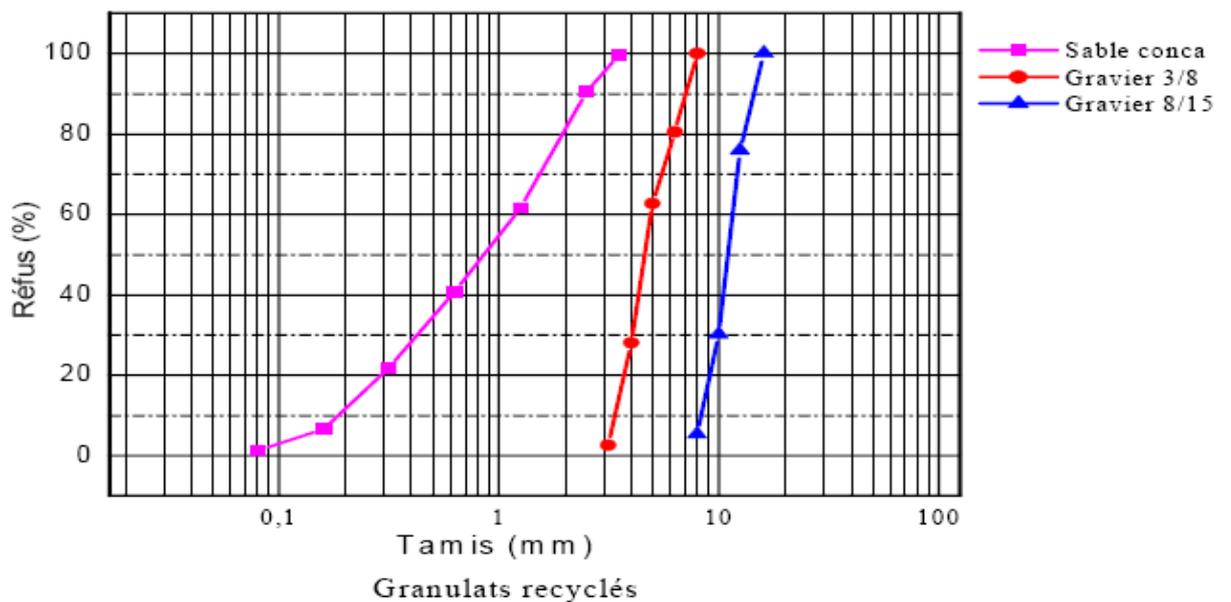


**Figure 2-1** : forme des granulats recyclés [62].

La présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats complique la caractérisation exacte des granulats recyclés. Cette présence est inévitable et les propriétés physico mécaniques des granulats de démolition seront dépendantes du volume de mortier collé aux granulats [61]. HANSEN [63] a montré que la quantité du mortier attaché aux granulats est proportionnelle à la fraction fine et elle croît en fonction de la résistance du béton concassé.

#### 2-2-1) La granulométrie

Les courbes granulométriques des granulats recyclés ont la même distribution granululaire que les granulats naturels (Figure 2-2).



**Figure 2-2** : Courbes granulométriques des granulats recyclés [62].

DEBIEB [64] a trouvé que le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel et il est constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

DOUARA et al [62] ont trouvé que le module de finesse du sable recyclés (2,69) est inférieur à celui de sable naturel (3,47). Par contre, DEBIEB [64] a constaté que le module de finesse de sable recyclé est supérieur à celui de naturel (3,33 et 2,72) respectivement. Des résultats similaires ont été reporté par GASTI [65], dont un module de finesse de 5,80 a été trouvé pour le sable recycle et de 2,59 pour le sable naturel.

### 2-2-2) Equivalent de sable (Es)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable. Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée. DOUARA et al [62] ont observé que le sable concassé recyclé ayant une propreté de l'ordre de 92 % supérieure à celle du sable concassé naturels 83%. Cette différence est due à la présence des fines autour des grains de sable (Tableau 2-1). Des résultats similaires ont été trouvé par DEBIEB [64] ( $E_s = 78,8\%$  pour le sable naturel et  $E_s = 84\%$  pour le sable recyclé), mais cette remarque n'est pas valable pour le  $E_{sv}$  d'où il a trouvé ( $E_{sv} = 90,6\%$  pour le sable naturel et  $E_{sv} = 84,8\%$  pour le sable recyclé)

**Tableau 2-1 :** Equivalent de sable et module de finesse [62]

		<i>S.C.N</i>	<i>S.C.R</i>
<i>Equivalent de sable [%]</i>	<i>Visuel</i>	83.13	91.47
	<i>Avec piston</i>	82.81	90.65
<i>Module de finesse</i>		3.47	2.69

Par contre, BERREDJEM et ARABI [61] ont trouvé un ES de l'ordre (65,4%) pour le sable recyclé, une valeur inférieure à celle d'un sable roulé (82,4%) et un sable naturel concassé (81,9%).

### 2-2-3) Masse volumique

Une chute de la masse volumique des granulats recyclés qui sont assez peu compacte et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au gravier naturel a été reporté (Tableau 2-2).

**Tableau 2-2 :** Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés  
[66]

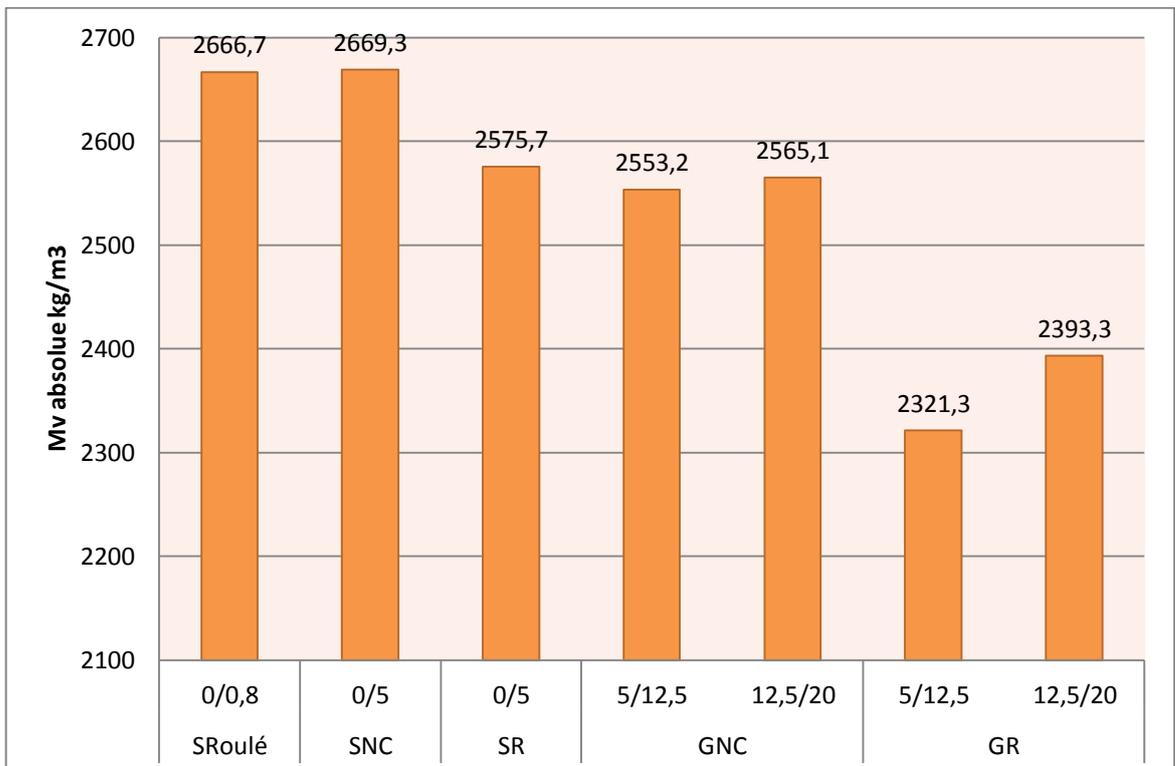
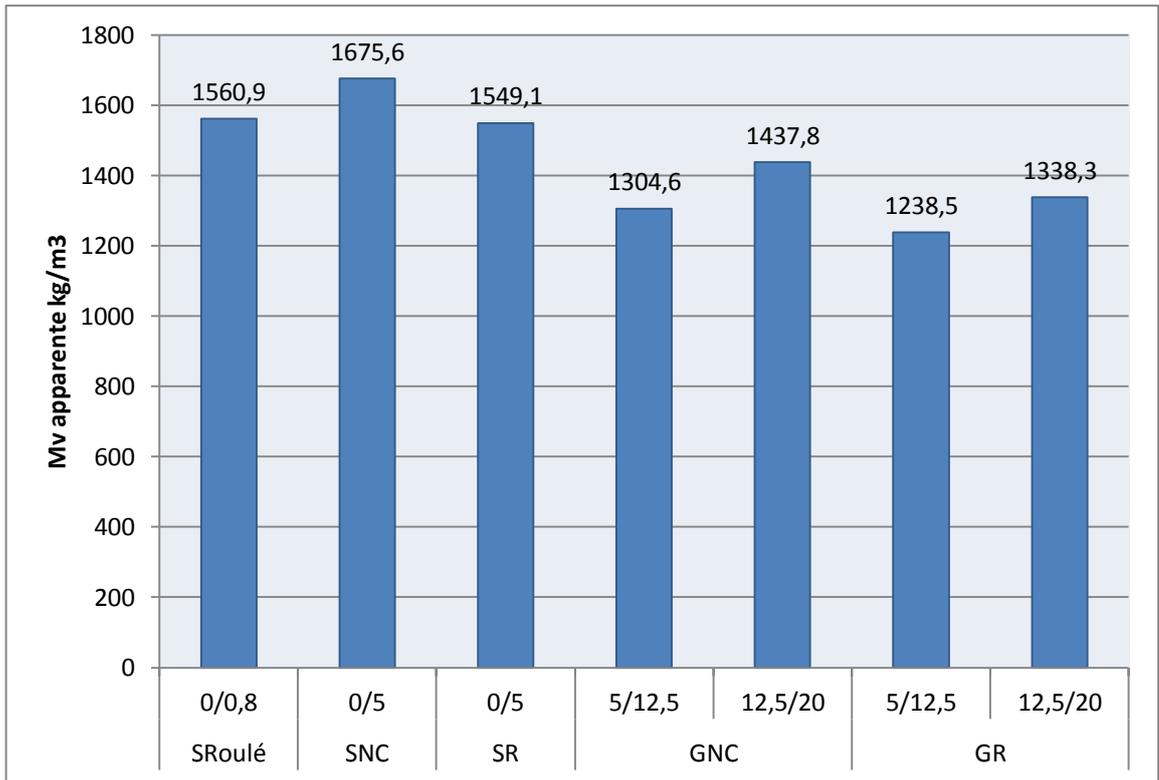
	Granulats naturels	Granulats de béton recyclés
Mv apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1600	1244
Mv absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2650	2500

Les masses volumiques (apparente et absolue) diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire [62]. Aussi, les granulats naturels et les granulats recyclés ayant des masses volumiques absolues semblables. Par contre, les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieures à celles des granulats naturels (Tableau 2-3).

**Tableau 2-3 :** Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés  
[62]

	<i>Granulats Naturels</i>			<i>Granulats Recyclés</i>		
	<i>8/15</i>	<i>3/8</i>	<i>S.C.N</i>	<i>8/15</i>	<i>3/8</i>	<i>S.C.R</i>
$Mv_a$	1.33	1.36	1.30	1.18	1.22	1.18
$Mv_s$	2.46	2.54	2.65	2.43	2.56	2.52

Une diminution des masses volumiques absolues et apparentes a été observée sur le sable (SR) et le gravier (GR) recyclé en comparant avec les sables et les graviers naturels (Figure 2-3). Les masses volumiques des granulats recyclés sont nettement plus faible que celles des granulats naturels [64]. Des résultats similaires ont été rapportés par GASTI [65] et PANI et al [67]. Cette diminution peut être expliquée par la présence des pores dans les granulats recyclés. Selon HADJIEVA.Z [68], la masse volumique du béton source des granulats recyclés peut influencer la masse volumique de ces dernières, avec un rapport E/C inférieur à 0,70.



**Figure 2-3 :** Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [61].

#### 2-2-4) Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. La propriété principale des granulats recyclés est la capacité élevée d'absorption d'eau en comparaison avec les granulats naturels. Ceci est dû à la présence de la pâte de ciment autour d'un granulat recyclé [69]. Les bétons des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau plus importante, pour maintenir le même affaissement (étalement), par rapport à un béton à base de granulats naturel [70].

Le taux élevé de l'absorption d'eau des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels complique la mise en œuvre d'un tel béton de granulats recyclés (Tableau 2-4).

Une valeur élevée du coefficient absorption d'eau (environ de 7%) a été trouvée pour les granulats recyclés en comparaison avec les granulats naturels (environ de 1%) (Tableau 2-5). Des résultats similaires ont aussi été observés par d'autres chercheurs ( $A_{bGN} = 1,3\%$  et  $A_{bGR} = 6\%$ ) [66]. TU et al [71] ont trouvé un coefficient d'absorption d'eau égal à 5% pour les gros granulats recyclés et à 10% pour les fines recyclés, contre 1% pour les fines naturelles. DEBIEB [64] a trouvé que un coefficient d'absorption de 6 et 4,92% pour le gravier recyclés de fraction granulaire (14/20) et (4/14) respectivement, l'absorption de sable reste la plus élevée ( $A_b = 9,20\%$ ). PANI et al [67] ont obtenu un coefficient d'absorption du gravier (4/16) recyclé supérieur à celui du gravier naturel.

On peut conclure que le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés est toujours supérieur à celui des granulats naturels. Ce coefficient est proportionnel à la dimension des granulats.

**Tableau 2-4 :** Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [61]

	Sable roulé	Sable Naturel concassé	Sable recyclé	Gravier naturel concassé		Gravier recyclé	
	0/0,8	0/5	0/5	5/12,5	12,5/20	5/12,5	12,5/20
Absorption (%)	0,50	1,91	7,09	0,73	0,46	6,25	5,36

**Tableau 2-5** : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [62]

	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	8/15	3/8	8/15	3/8
Absorption (%)	0,81	0,91	5,65	6,60

2-2-5) Dureté

La résistance à la fragmentation (dureté) est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée. Le coefficient de Los Angeles trouvé pour les granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturel (Tableau 2-6). Même résultats ont été rapporté par DEBIEB [64], GASTI [65] ET PANI et al [67]. HACHANA et al [66] ont aussi remarqués que la valeur du coefficient de Los Angeles des granulats du béton concassé (31,62%) est supérieure à celle des granulats naturels (23,50%). Par conséquent, les granulats recyclés sont moins résistant que les granulats naturels, mais acceptable selon la norme qui exige  $LA < 40\%$ .

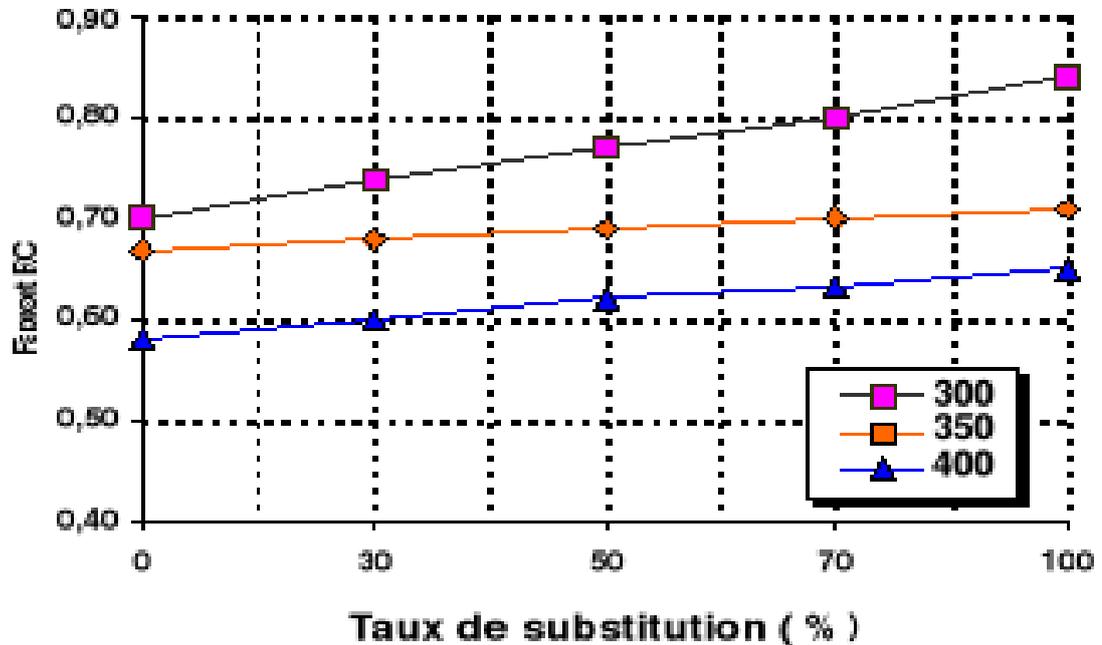
**Tableau 2-6** : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [61]

	<i>Essai Micro-Deval (MDE)</i>		<i>Essai Los-Angeles (L.A)</i>	
	<i>G. Naturel</i>	<i>G. Recyclé</i>	<i>G. Naturel</i>	<i>G. Recyclé</i>
Fraction (4 - 6,3)	18,4	36,5	--	--
Fraction (6,3 - 10)	24,04	38,6	31,4	38,88
Fraction (10 - 14)	--	--	30,58	36,52

**2-3) PROPRIETES DU BETON ORDINAIRE (VIBRE) A BASE DE GRANULATS RECYCLES**2-3-1) Quantité d'eau pour affaissement constant

La quantité d'eau réellement utilisée (eau de gâchage) pour assurer un affaissement constant (50 à 90 mm) s'accroît suivant le taux de substitution en granulats recyclés. Cela

se traduit par la présence de l'ancien mortier qui recouvre les granulats provenant du concassage de béton qui est caractérisé par sa forte absorption d'eau (6%) et sa forte porosité et par conséquent une baisse de résistance (Figure 2.5).



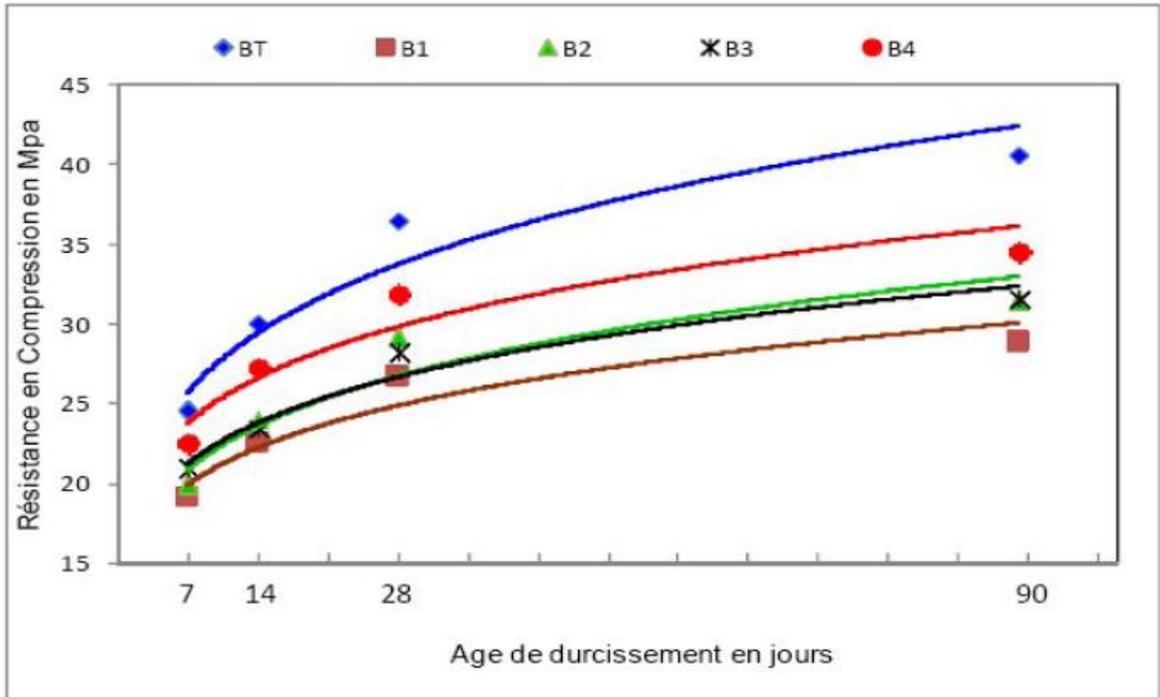
**Figure 2-4 :** Rapport E/C des bétons partiellement composés des granulats de béton pour des dosages de ciment respectifs 300, 350, 400 kg/m<sup>3</sup> [66].

### 2-3-2) La résistance à la compression et à la traction

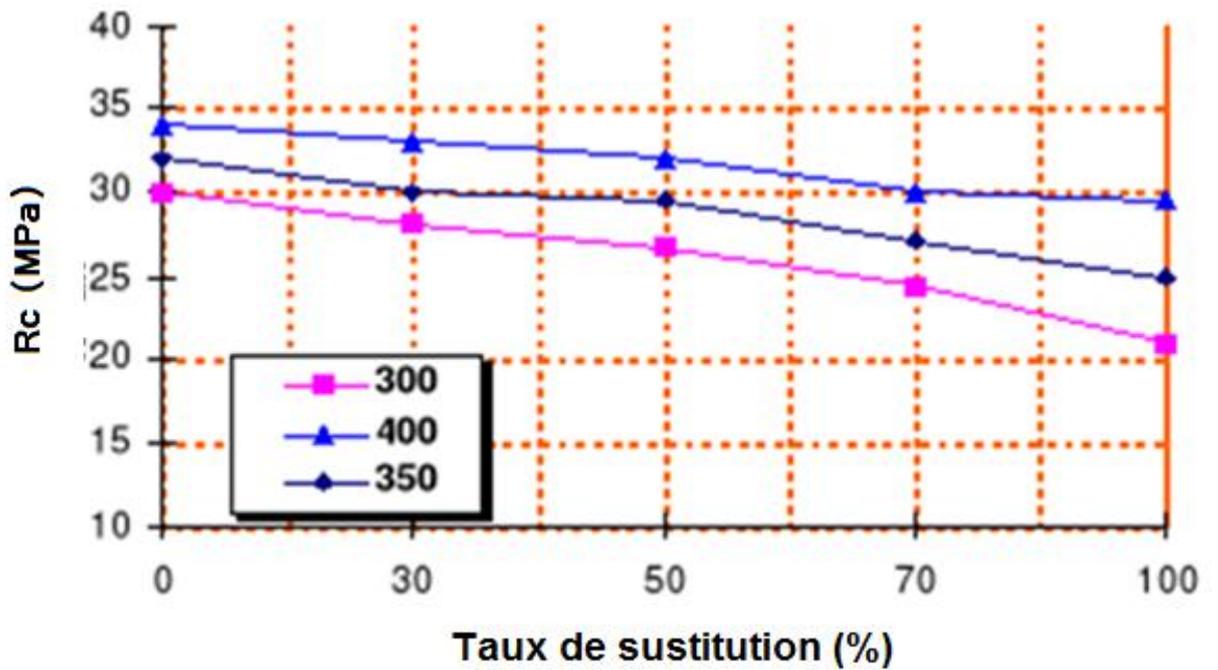
L'utilisation des granulats recyclés a permis d'obtenir un béton de résistance caractéristique à 28 jours bien supérieure à 20 MPa (Figure 2-5).

D'autre part, les bétons à base de 30% de béton concassé présentent une chute de résistance de 11, 8 et 6% respectivement pour un dosage de ciment de 300, 350 et 400 kg /m<sup>3</sup> (Figure 2-6). Pour les bétons à 100% d'agrégats de béton concassé la perte de résistance commence par 20% à jeune âge et arrive à l'ordre de 23% à 180 jours [66].

L'évolution de la résistance suivant l'âge des bétons à base des agrégats recyclés se comporte d'une manière analogue que celle du béton conventionnel (Figure 2-7). KHATIB [72] ont trouvés que la résistance à la compression du béton de granulats recyclés diminue les 7 premiers jours, et présente une résistance à la compression similaire quelque soit le pourcentage du béton concassé utilisé. A 28 jours, la résistance est équivalente pour le béton contenant 25 à 75% des granulats recyclés mais elle est inférieure pour un pourcentage de 100% du granulat recyclé (Figure 2-8).



**Figure 2-5 :** Evolution de la résistance en compression en fonction des échéances pour les bétons à différentes combinaisons granulaires [61].



**Figure 2-6:** Résistance à la compression des bétons à base des granulats de béton concassé [66].

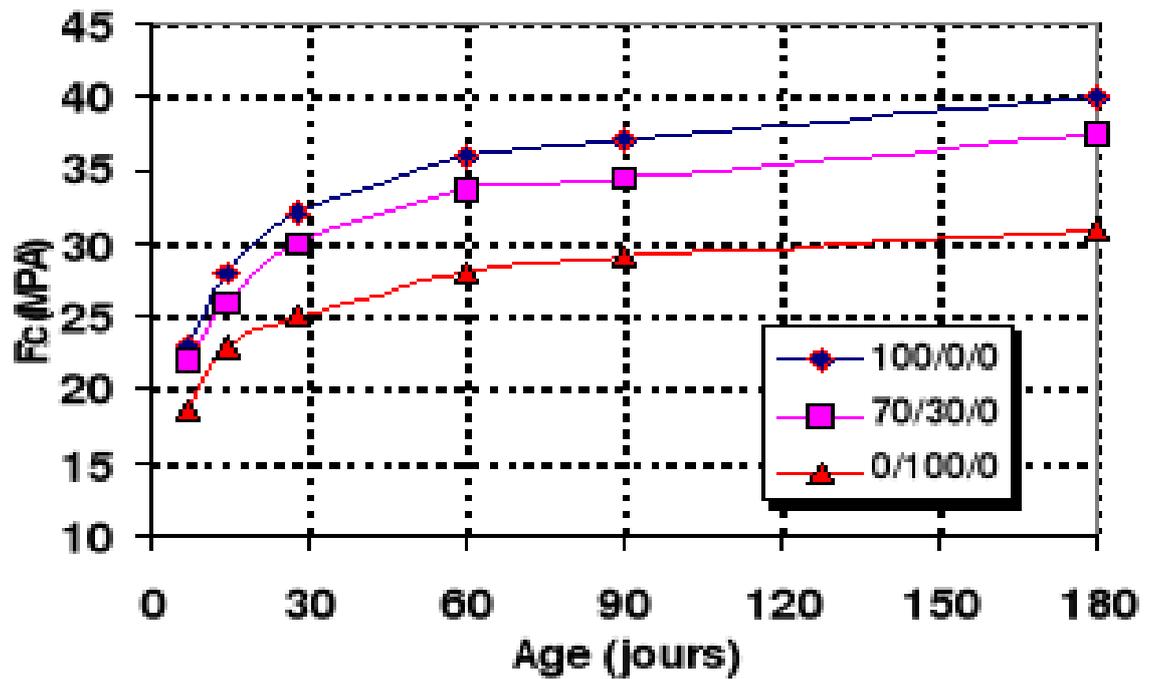


Figure 2-7: Développement de la résistance des bétons à base des agrégats de béton de démolition [66].

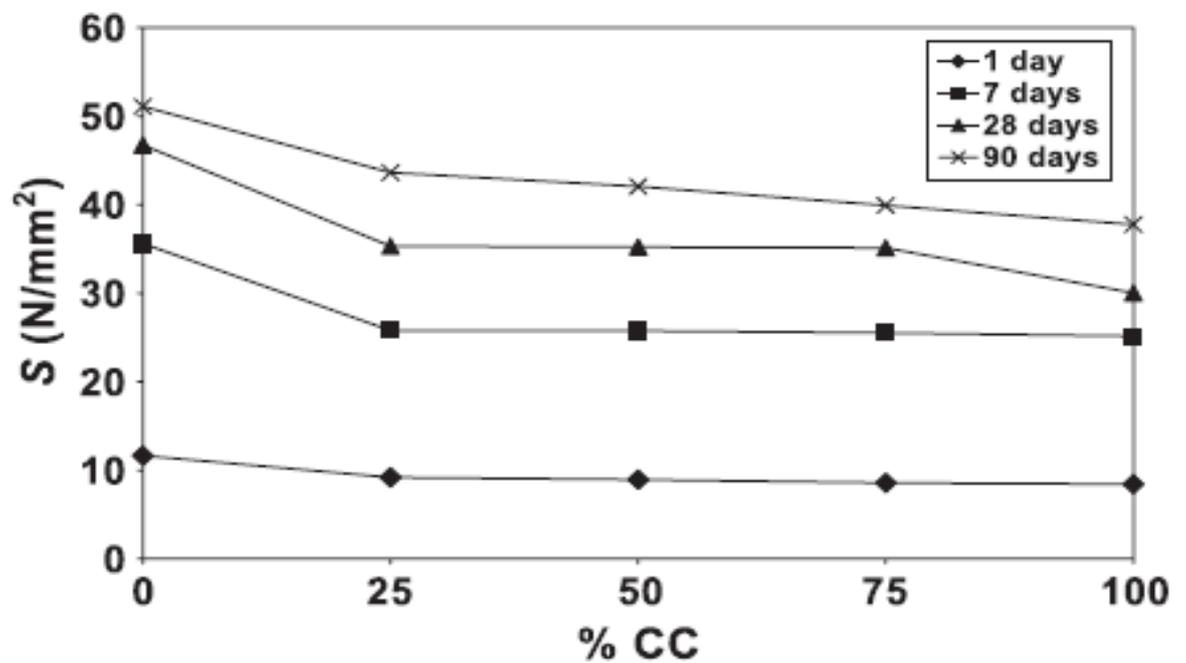
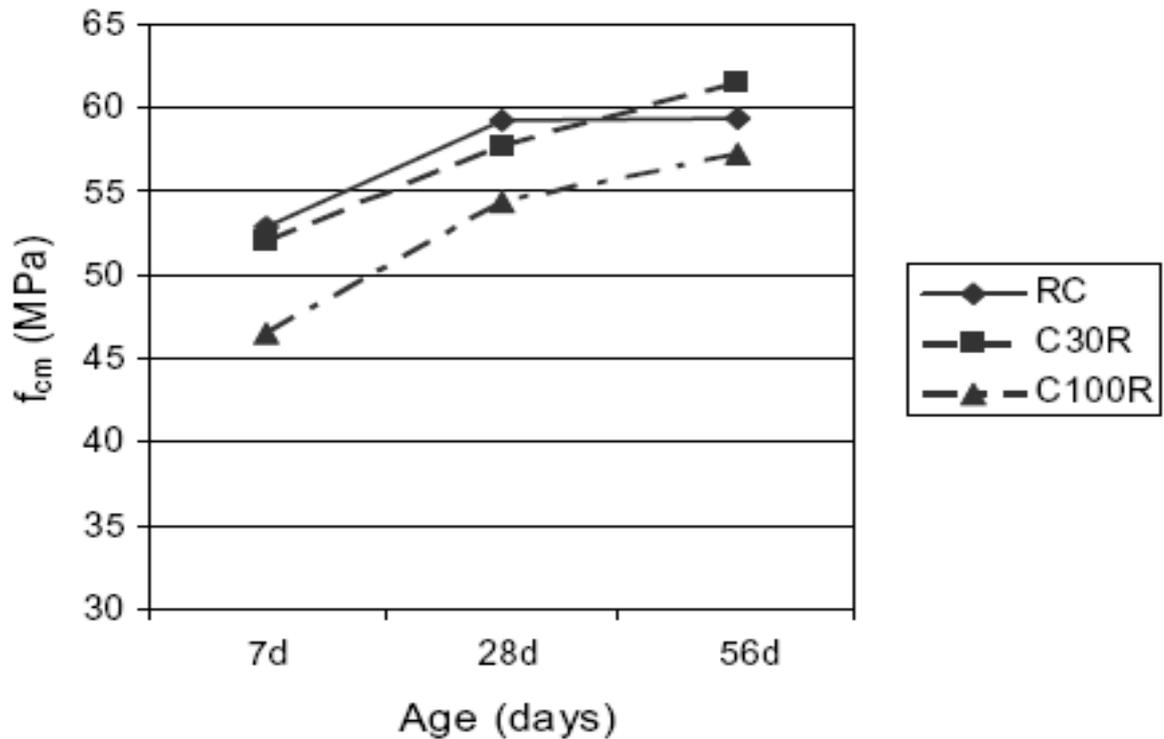


Figure 2-8 : L'effet de béton concassé sur la résistance à la compression ( $S$ ) [72].

D'autres auteurs, le béton avec 100% de gravier recyclé présente une réduction de résistance à la compression de 20 à 25% par rapport à celle du béton conventionnel à 28 jours, avec le même rapport E/C ( $E/C=0,5$ ) et le même dosage en ciment ( $325 \text{ kg/m}^3$ ) [73]. Ce béton nécessite une quantité importante du ciment pour atteindre une résistance à la compression comparable.

Par contre, la substitution de seulement 30% de granulats fins recyclés n'affecte pas la résistance à la compression (Figure 2-9).

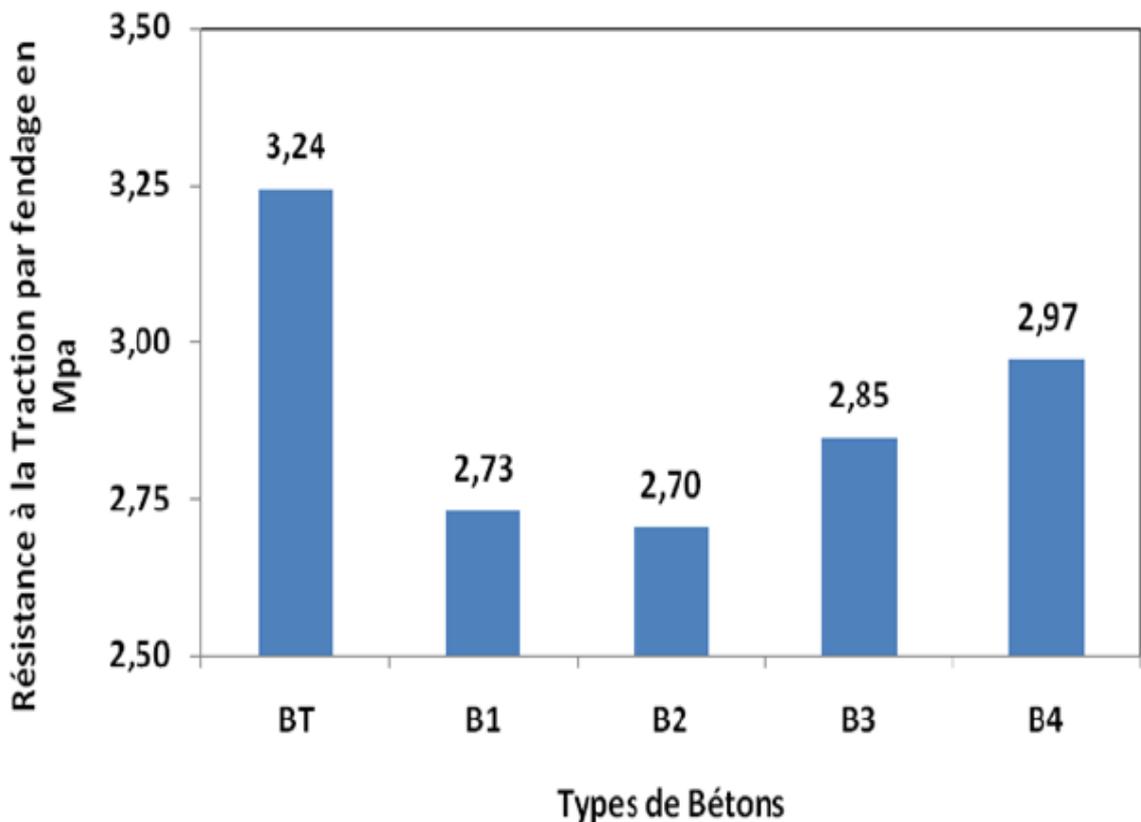


**Figure 2-9:** Variation de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours [74].

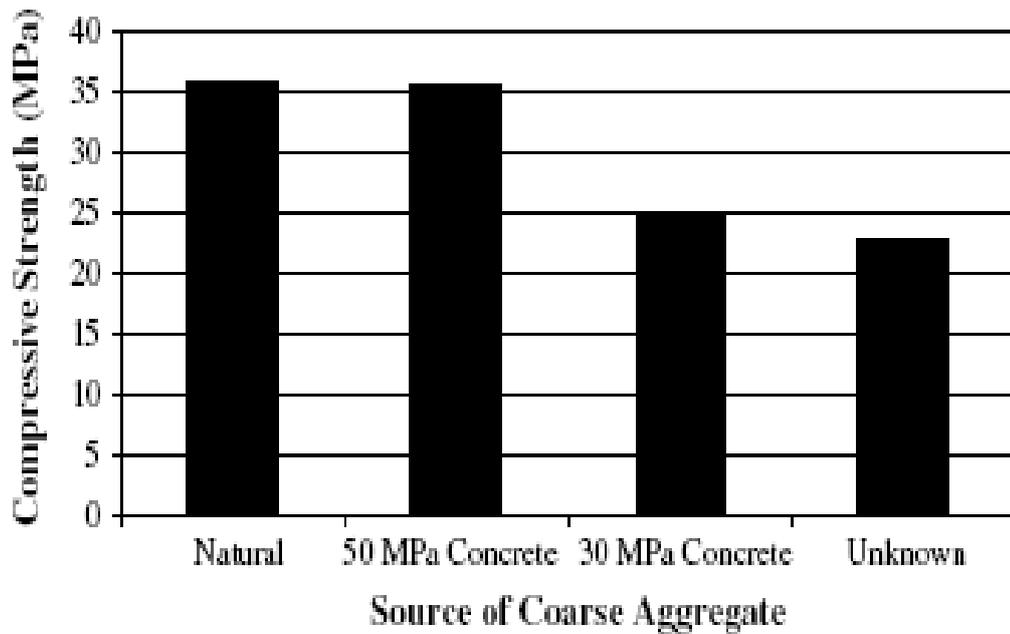
L'écart de résistance en traction entre les bétons naturels et recyclés est assez faible par rapport à celui observé en compression. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important dans la résistance à la traction car la rugosité des granulats recyclés est très importante et par conséquent a amélioré l'adhérence pâte granulat (Tableau 2.7 et Figure 2-10).

**Tableau 2-7** : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [61]

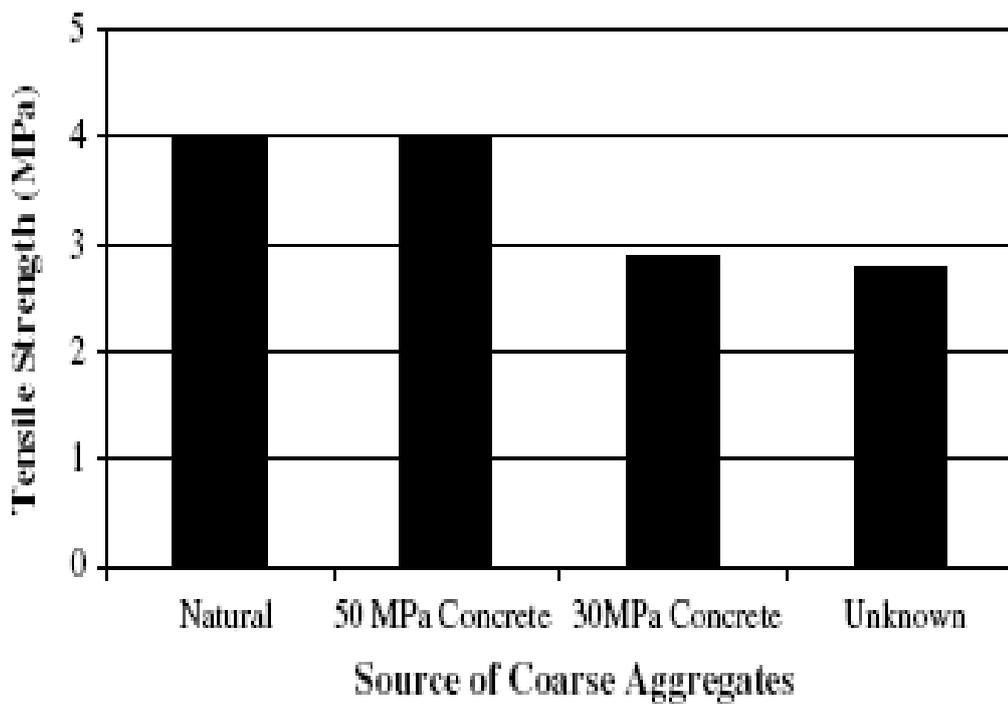
Composants		Unité	Types de Béton				
			BT	B1	B2	B3	B4
CEM II 42,5		kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350	350
Sable Roulé		kg/m <sup>3</sup>	627	--	--	--	--
Sable Naturel			--	837	--	818	--
Sable Recyclé			--	--	667	--	588
Gravier Naturel 5/12,5		kg/m <sup>3</sup>	565	400	--	--	493
Gravier Naturel 12,5/20			630	542	--	--	720
Gravier Recyclé 5/12,5			--	--	380	317	--
Gravier Recyclé 12,5/20			--	--	620	571	--
Eau:	Calculée	litres	193	163	163	193	193
	Ajoutée		0	63	52	22	43
	Totale		193	226	215	215	236
Affaissement au cône		cm	6,5	7,5	6,5	8,0	7,5

**Figure 2-10** : Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires [61].

La perte de la résistance à la traction et à la compression due à l'utilisation des granulats recyclés, est plus significative dans un béton à faibles résistance que dans un béton à haute résistance. La résistance à la compression du béton dont sont issues les granulats recyclés affecte sensiblement la résistance à la compression et à la traction du béton recyclé (Figure 2-11 et 2-12).

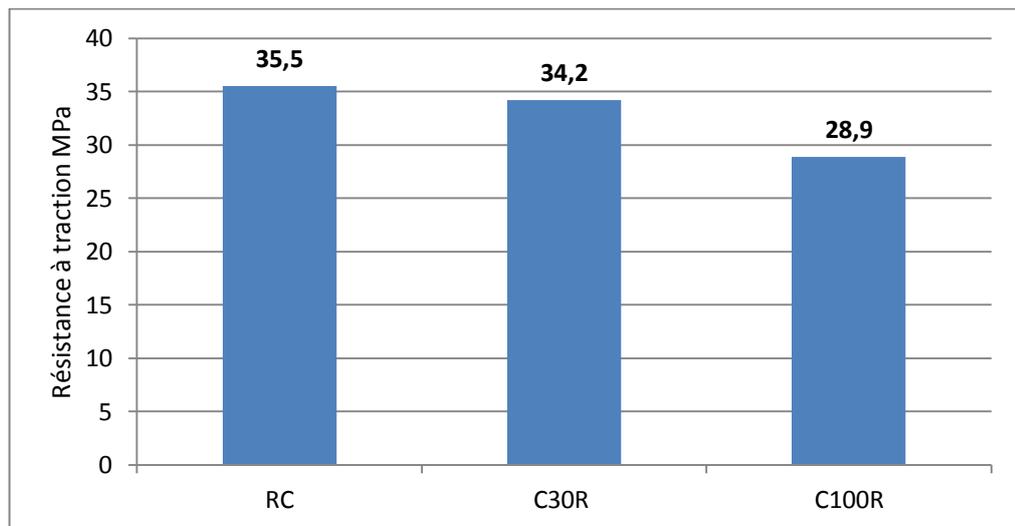


**Figure 2-11** : Résistance à la compression du béton à granulats recyclés [70].

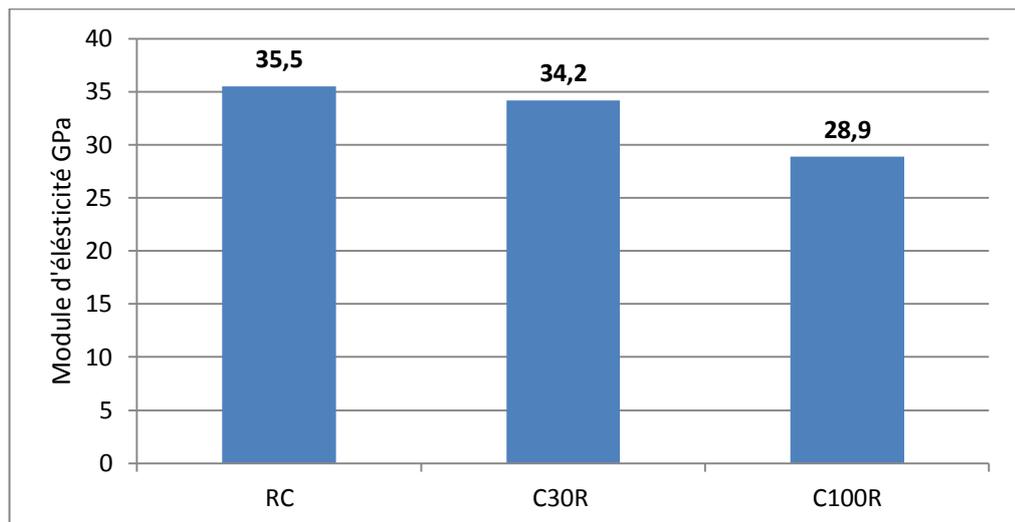


**Figure 2-12** : Résistance à la traction du béton à granulats recyclés [70].

La résistance à la traction diminue avec l'augmentation du rapport de substitution des granulats fins recyclés dans le béton. Cependant les valeurs obtenues restent acceptable jusqu'à un taux de substitution de 30% (Figure 2-13). Et comme la résistance à la compression du béton est affecté par la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés et le module d'élasticité est en fonction de cette résistance, donc ce dernier est aussi affecté. Le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés dans le béton, mais cette diminution est acceptable pour un pourcentage maximal qui égale à 30% (Figure 2-14).



**Figure 2-13 :** Résistance à la traction du béton à 0, 30 et 100% de granulats fins recyclés [74].



**Figure 2-14 :** Module d'élasticité pour 0, 30 et 100% de remplacement des granulats recyclés [74].

KOU et al [75], ont montré qu'un béton de granulats recyclés présente une résistance à la compression inférieure à celle d'un béton de granulats naturel et une résistance élevée à la traction, après 5 ans de cure dans l'eau. De 28 jours à 5 ans, l'augmentation de la résistance à la compression et à la traction pour le béton à base de granulats recyclés est supérieure à celle du béton à base de granulats naturels. De plus, le béton préparé avec 100% de granulats de béton concassé a une faible porosité (Une diminution de 45% entre 28 jours et 5 ans).

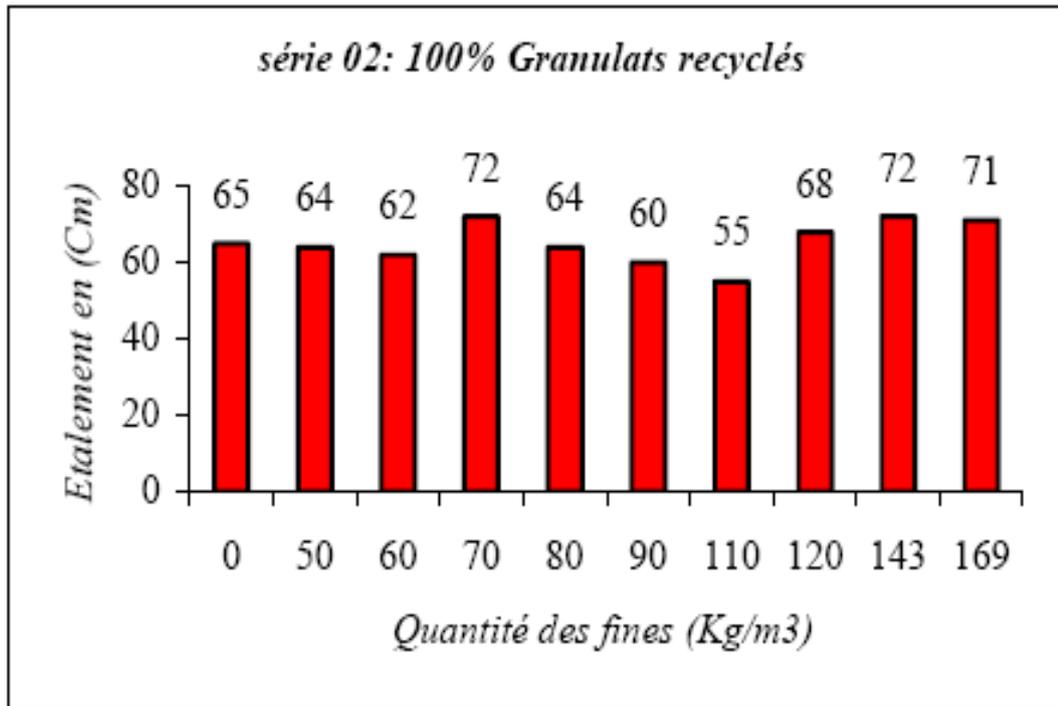
## **2-4) PROPRIÉTÉ DU BAP A BASE DE GRANULATS RECYCLÉS**

### 2-4-1) A l'état frais

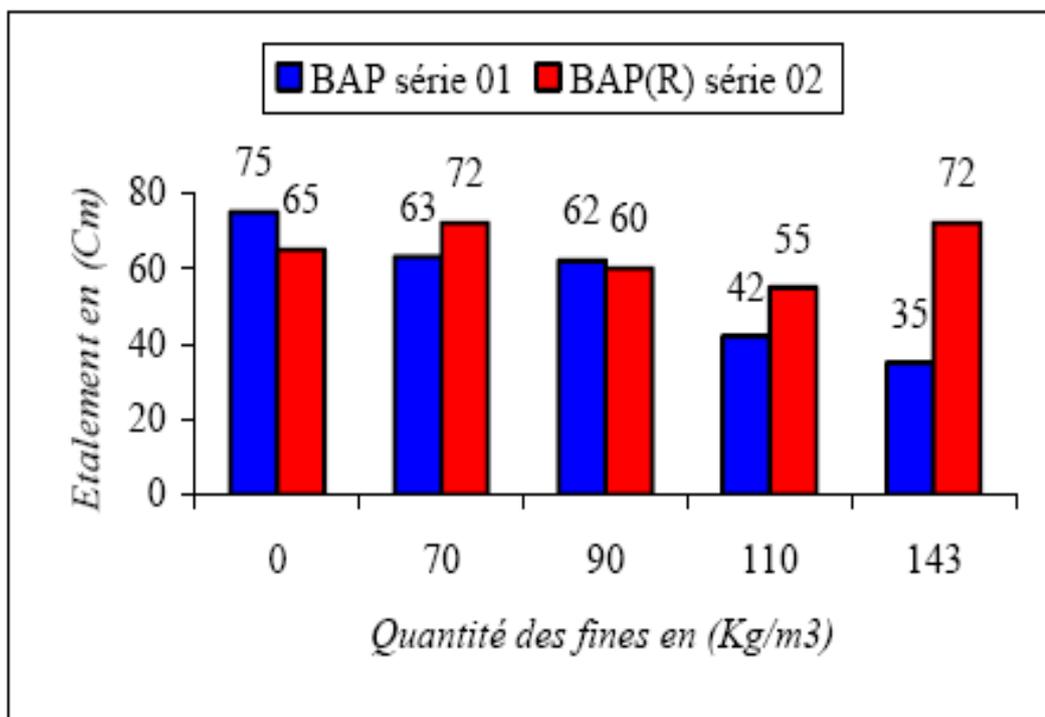
Le critère d'ouvrabilité pour un BAP ou le critère d'écoulement non confiné représente le paramètre le plus important pour caractériser un BAP. BENHOUNA et al [76] ont étudié l'effet des granulats recyclés sur l'écoulement non confiné. Ils ont constaté que les fines ayant une influence significative sur l'étalement du béton avec 100% de granulats naturels qui contiennent 22,5% de fines recyclés présentent un bon étalement sans ségrégation et sans ressuage et avec un temps d'écoulement  $T_{50}$  inférieur à 5 secondes. Pour le béton avec 100% granulats recyclés, ils ont constaté que les compositions contenant 22,5 et 29% de fines recyclés ont un bon étalement sans ségrégation ni ressuage et avec un temps d'écoulement  $T_{50}$  inférieur à 5 secondes (Figure 2-15). Une comparaison entre l'étalement d'un BAP à base de granulats naturels et un BAP à base de granulats recyclés est donnée sur la figure 2-16. Le béton avec 50% de granulats naturels et 50% de granulats recyclés présente un étalement supérieur à celui du béton avec 100% granulats naturels et 100% granulats recyclés, pour un rapport E/L égal à 0,46 et 0,47 (Figure 2.17).

D'autre part, KOU et POON [77] ont constaté que l'étalement d'un BAP des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats fins recyclés, l'étalement minimal est de 760mm et le rapport de blocage varie entre 0,85 et 0,94. L'addition des cendres volantes de classe F augmente l'étalement du BAP (Figure 2.18).

De plus, GRDIC et al [69], ont trouvé que l'étalement des BAP avec 50 et 100% granulats recyclés (gravier) est très comparable à l'étalement du BAP à base de granulats naturels.



**Figure 2-15** : Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de la quantité des fines [76].



**Figure 2-16** : Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR) [76].

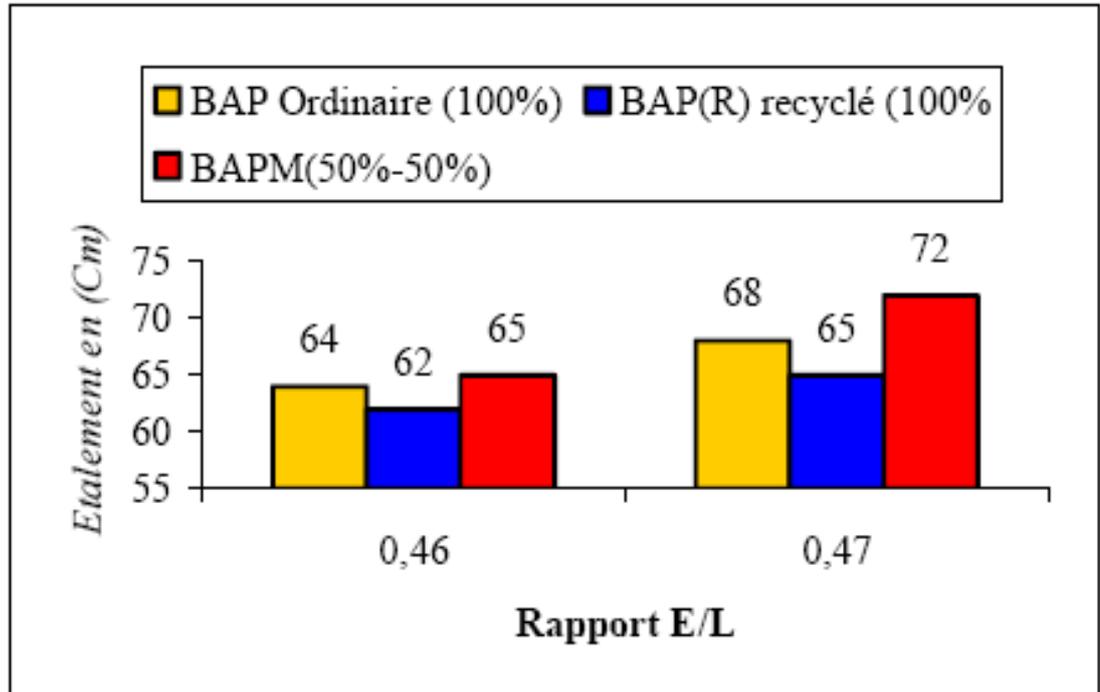


Figure 2-17 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés [76].

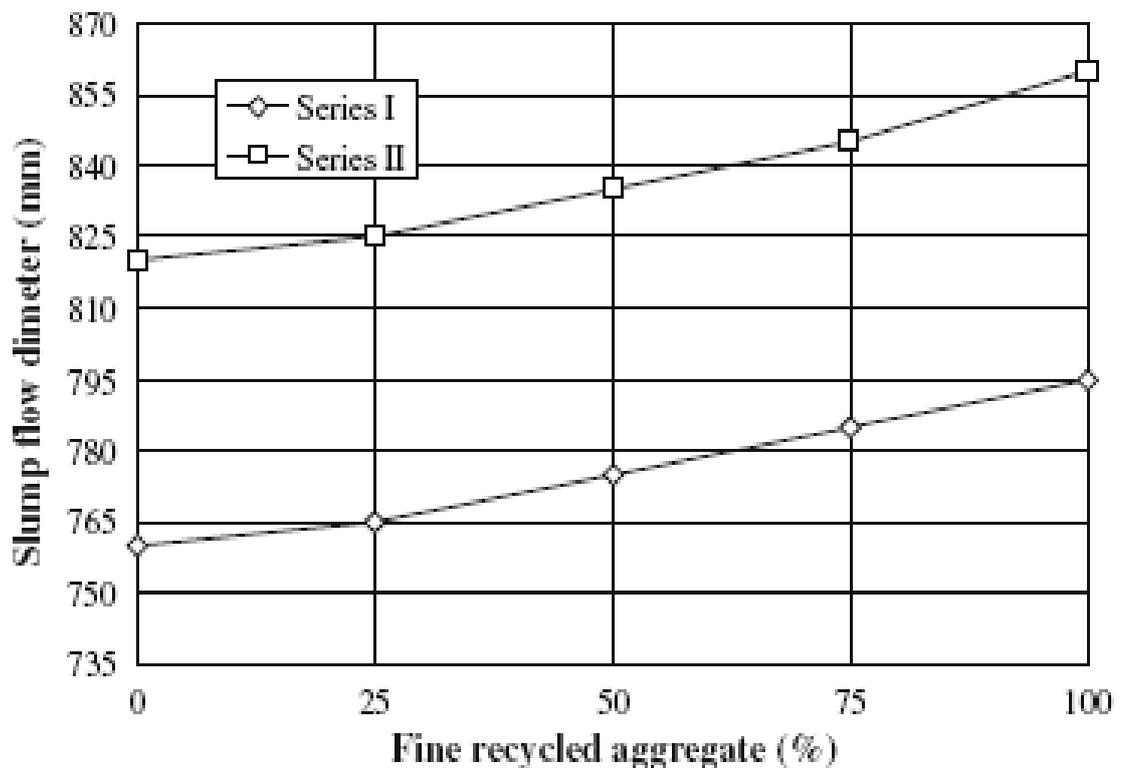
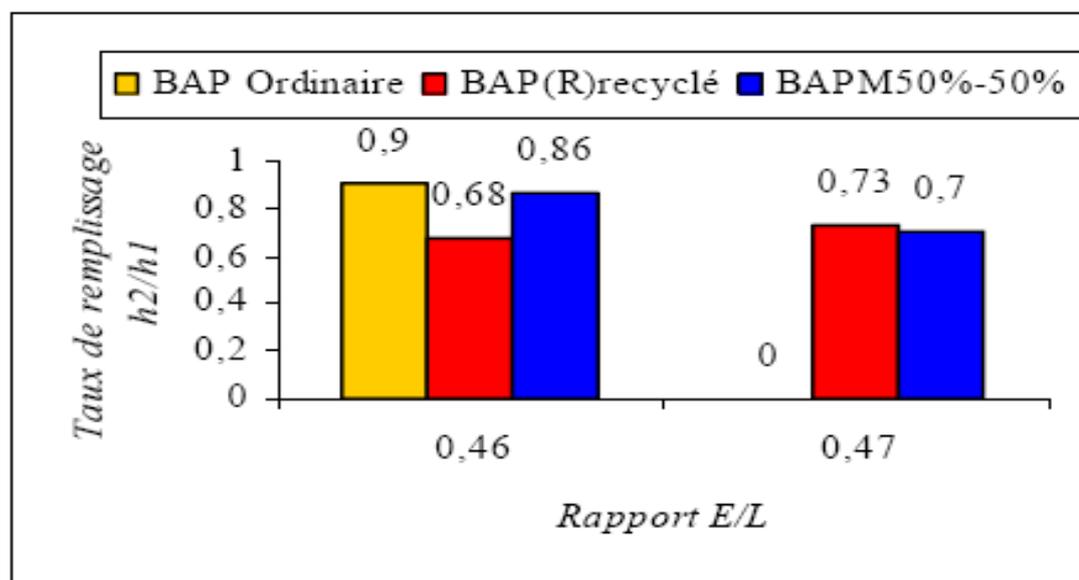


Figure 2-18 : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de granulats recyclés [77].

L'essai à la boîte en L a aussi montré que le BAP contenant des granulats fins recyclés a une fluidité suffisante, ainsi qu'une viscosité et une résistance à la ségrégation adéquate [78]. Cependant, BENHOUNA et al [76] ont trouvé que les résultats des essais de la boîte en L ne satisfait pas les exigences requises pour un BAP avec un rapport  $E/L = 0,45$  à  $0,47$  et 100% de granulats recyclés (Tableau 2-8). Pour un BAP avec un mélange de granulats naturels et recyclés. (50% des granulats naturels, 50% des granulats recyclés), ils ont constaté que pour un rapport  $E/L$  égal à  $0,46$  le béton présente un taux de remplissage pareil au BAP ordinaire  $H_2/H_1 = 0,86$  (limite minimale) (Figure 2.19). D'autre part, GRDIC et al [69], ont trouvé un taux de remplissage équivalent pour les BAP avec granulats naturels et 50, 100% granulats recyclés (0,94, 0,95 et 0,98) respectivement.

**Tableau 2-8** : Résultats d'essai de la boîte en L [76]

compositions	$\frac{E}{L}$	Fine (kg)	$H_2$ (Cm)	$H_1$ (Cm)	$\frac{H_2}{H_1}$	Temps d'écoulement (s)			
						$T_{20}$	$T_{40}$	$T_{60}$	
GN	BAP3-1	0.45	90	8.5	11	0.77	1.10	2.41	3.66
	BAP3-2	0.46	90	9	10	0.90	1.01	1.82	2.66
GR	BAP(R) 6-1	0.45	90	8,5	13,5	0,63	2.13	3.06	4.37
	BAP(R) 6-2	0.46	90	8.5	12.5	0.68	1.95	2.80	4.02
	BAP(R) 6-3	0.47	90	8	11	0.73	1.13	2.46	3.79



**Figure 2-19** : Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés [76].

La substitution de 50 et 100% de granulats naturels par des granulats recyclés a donné un béton avec une stabilité satisfaisante pour un rapport E/L=0,46, mais il est moins stable pour un rapport E/L=0,47 (Tableau 2.9). Par contre GRIDC et al [69], ont constaté que le BAP à base de granulats naturels est moins stable vis-à-vis de la ségrégation par rapport aux BAP avec 50 et 100% granulats recyclés.

**Tableau 2-9** : Résultats de l'essai de stabilité au tamis [76]

<i>composition</i>	<i>BAP3-1</i>	<i>BAP(R) 6-2</i>	<i>BAPM-1</i>	<i>BAP(R)6-3</i>	<i>BAPM-2</i>
type de granulats	100% GN	100% GR	50%-50%	100% GR	50%-50%
E/L	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47
P <sub>LAITENCE</sub> (%)	6.98	10.23	9.84	12.40	16.56

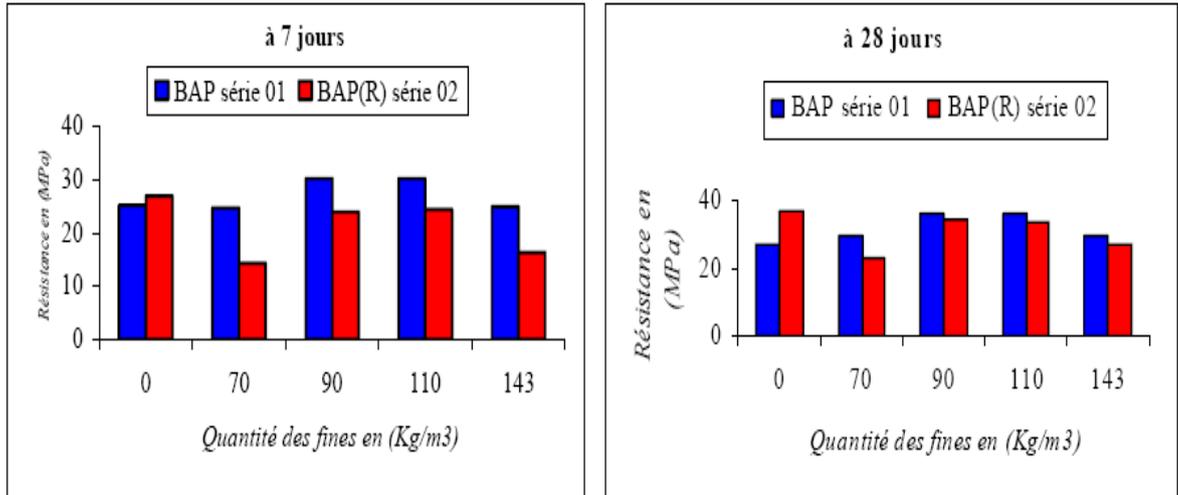
L'effet de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur la densité du BAP est donné par le tableau 2-10. On remarque une diminution d'environ 2% de la densité pour 50% de gravier recyclés et de 4% pour 100% de gravier recyclés.

**Tableau 2-10** : Densité de BAP avec 50 et 100% de granulats recyclés [69].

Type of concrete	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Slump-flow test (cm)	T <sub>500</sub> (s)	L-box test	Sieve segregation (%)	$\omega_c$ (water-cement factor)	$\omega_p$ (water-powder factor)
E	2391	73.5	5.60	0.94	11.7	0.41	0.25
P50	2366	73.5	5.40	0.95	9.31	0.43	0.26
P100	2355	72.5	6.00	0.98	5.2	0.45	0.27

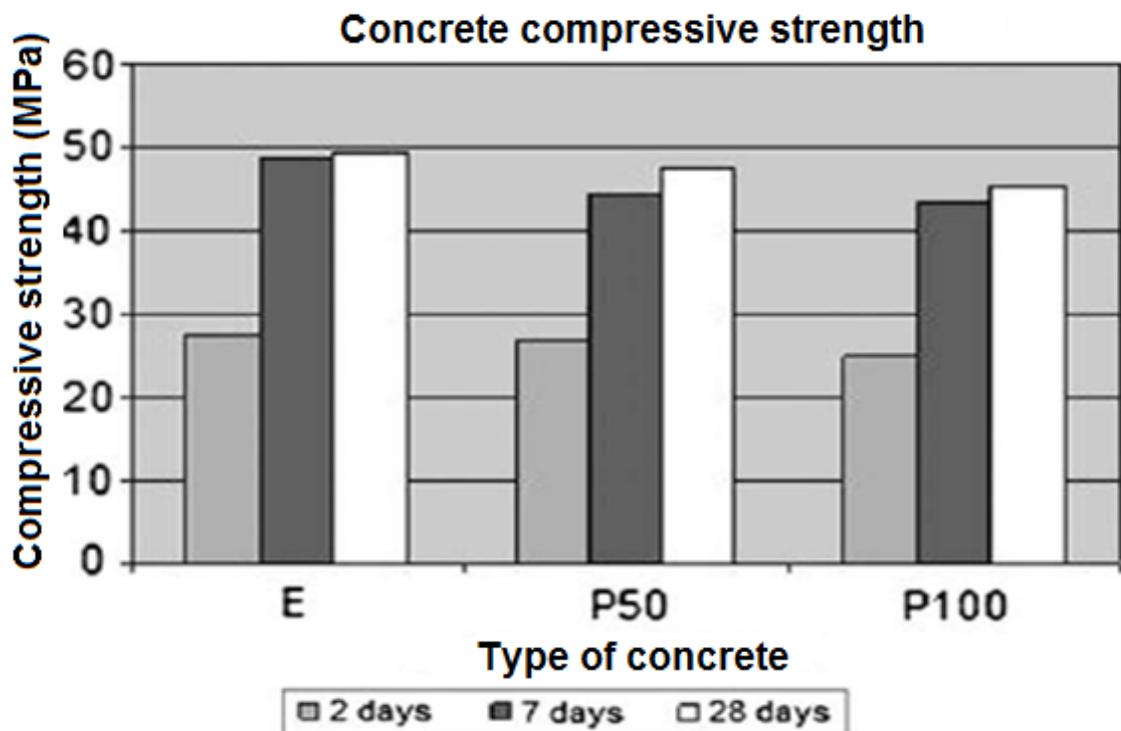
#### 2-4-2) Résistance à la compression et à la traction

La résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours pour le BAP à 100% de granulats recyclés est similaire à celle d'un BAP de granulats naturels lorsqu'une quantité de fines de 22.5% est utilisée (Figure 2.20).



**Figure 2-20 :** Comparaison entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les deux types du BAP [76].

D'autres chercheurs, ont montré que la qualité des granulats recyclés a un effet direct sur la résistance à la compression ainsi que la substitution de 50% et 100% de gravier naturel par un gravier recyclé réduit la résistance de 3,88% et de 8,55% respectivement (Figure 2-21).

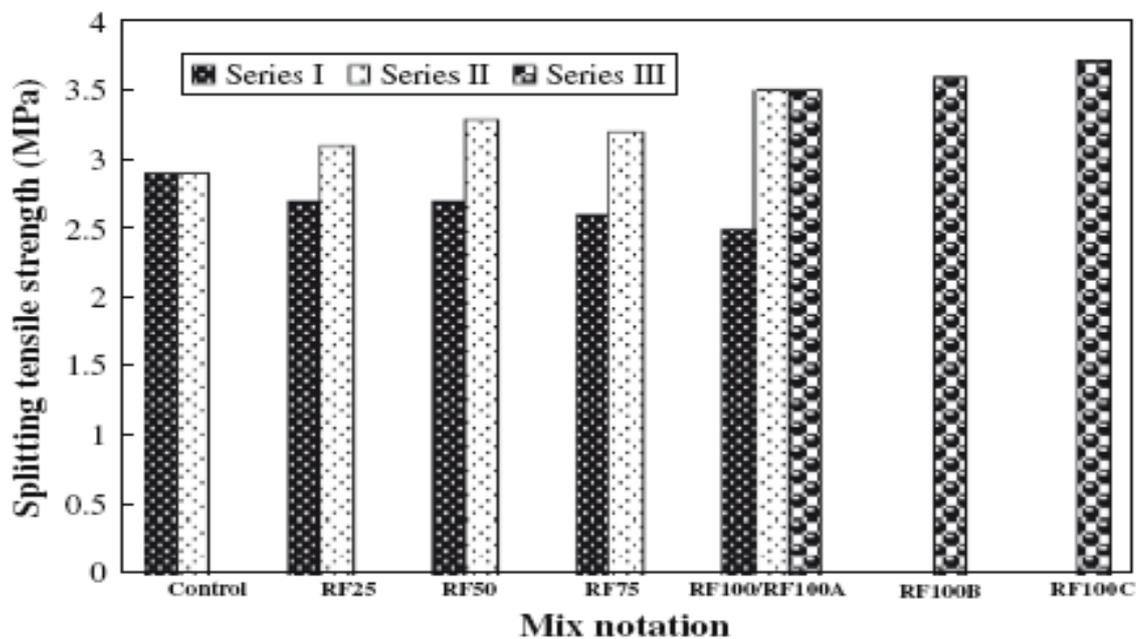


**Figure 2-21 :** Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés [69].

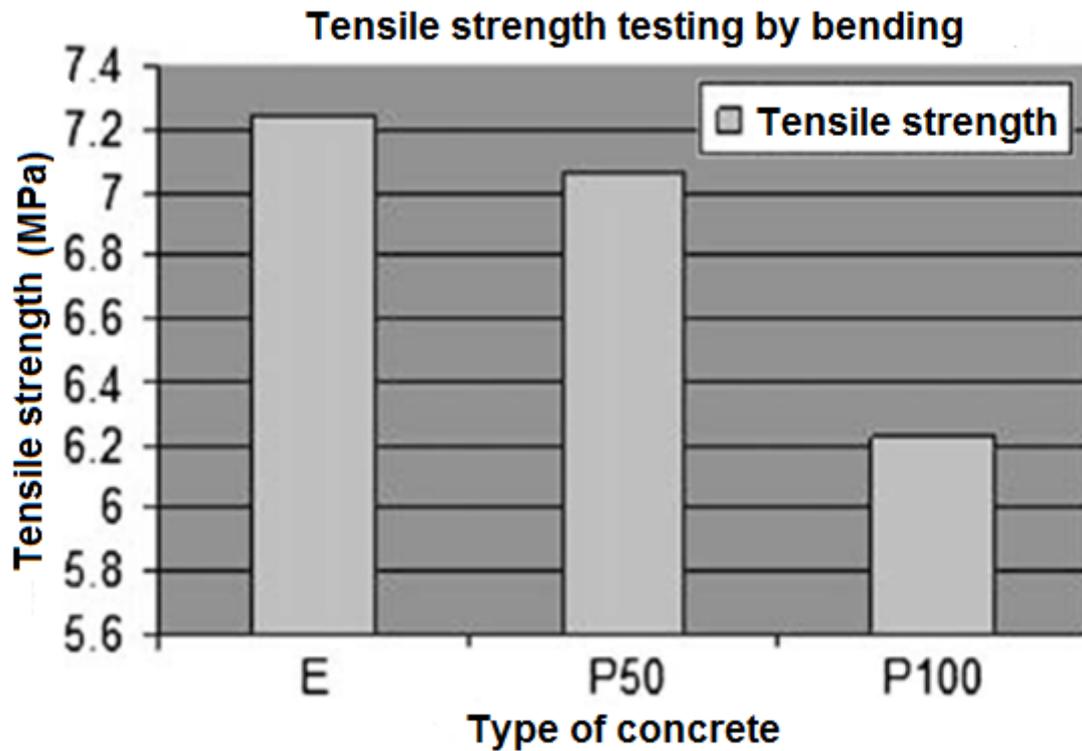
La résistance à la compression et à la traction pour un BAP contenant des granulats recyclés et sans les cendres volantes diminue avec l'augmentation des granulats fins recyclés. La résistance à la compression et à la traction maximale ont été atteintes avec un taux de substitution de 25-50% de sable de rivière par un sable recyclé (Tableau 2-12 et figure 2-22). Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés a été aussi observée avec de BAP (Figure 2-23).

**Tableau 2-11 : Résistance à la compression [77]**

Mix code	Recycled agg. fine (%)	W/B	Compressive strength (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
<i>Series I</i>							
Control-1	0		10.3	26.8	32.9	44.3	56.5
RF25	25		11.2	29.0	34.0	44.5	54.7
RF50	50	0.53	8.8	25.3	31.1	43.4	55.7
RF75	75		9.4	26.0	29.7	41.3	50.8
RF100	100		9.8	23.6	29.2	38.7	50.1
<i>Series II</i>							
Control-2	0		11.1	30.3	36.8	53.7	78.9
RF25	25		13.8	38.3	43.9	64.3	82.6
RF50	50	0.44	17.5	38.4	42.1	62.3	81.4
RF75	75		13.8	32.3	40.9	56.3	75.3
RF100	100		15.1	29.2	38.3	53.2	71.7
<i>Series III</i>							
RF100A	100	0.44	15.1	29.2	38.3	53.2	71.7
RF100B	100	0.40	15.6	33.1	44.0	59.1	77.0
RF100C	100	0.35	16.6	39.8	43.8	64.2	81.8



**Figure 2-22 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés [77].**



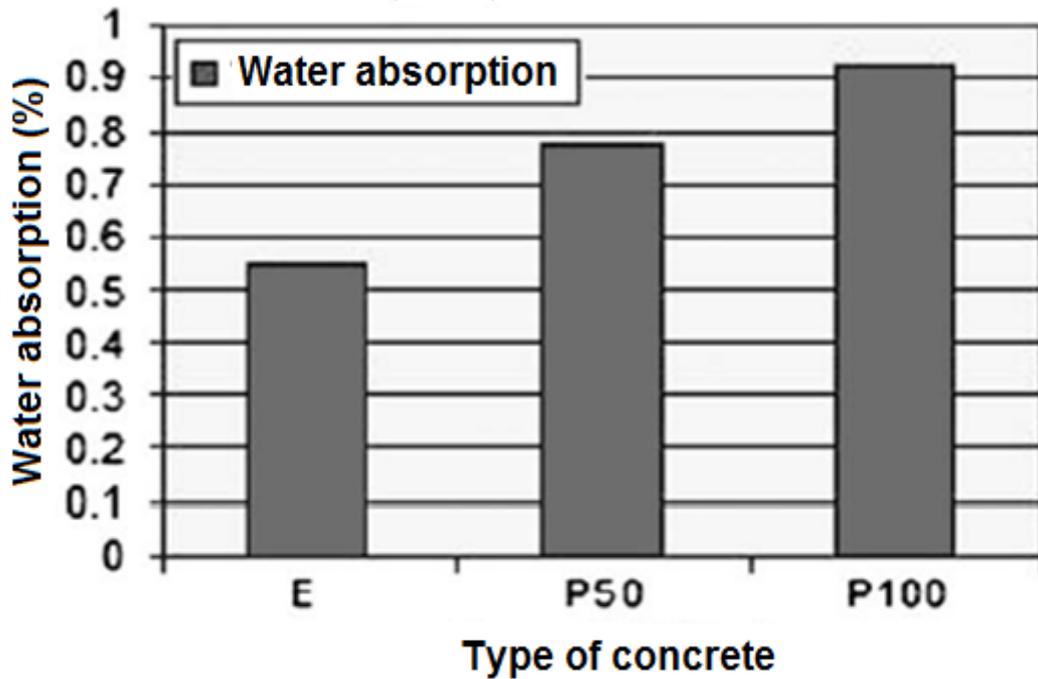
**Figure 2-23 :** Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés. [69]

#### 2-4-3) Absorption d'eau

La propriété la plus importante qui différencie les granulats recyclés des granulats naturels est leur forte absorption d'eau.

L'augmentation de la quantité de granulats recyclés augmente l'absorption d'eau. L'utilisation de 50 à 100% du gravier recyclé augmente l'absorption d'eau de 0,15 à 0,37% (Figure 2-24).

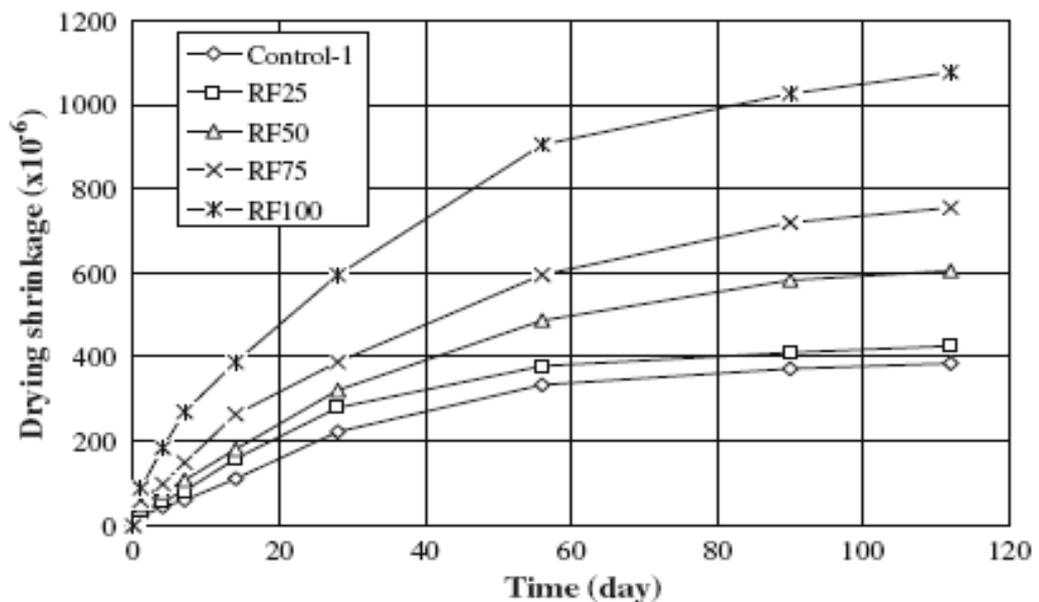
La perméabilité du BAP avec les granulats recyclés est affectée en même temps par les pores capillaires de l'ancien mortier recouvrant les granulats recyclés et par les pores capillaires du nouveau mortier. Si les agrégats obtenus à partir du béton concassé ont une faible porosité, l'absorption d'eau du nouveau béton dépendra de la structure du ciment obtenu.



**Figure 2-24 :** Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés [69].

#### 2-4-4) Retrait de séchage

Le retrait de séchage du BAP avec des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité des fines recyclées mais il peut être contrôlé par l'utilisation d'un rapport E/L faible (Figure 2-25 à 2-27).



**Figure 2-25 :** Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,53 [77].

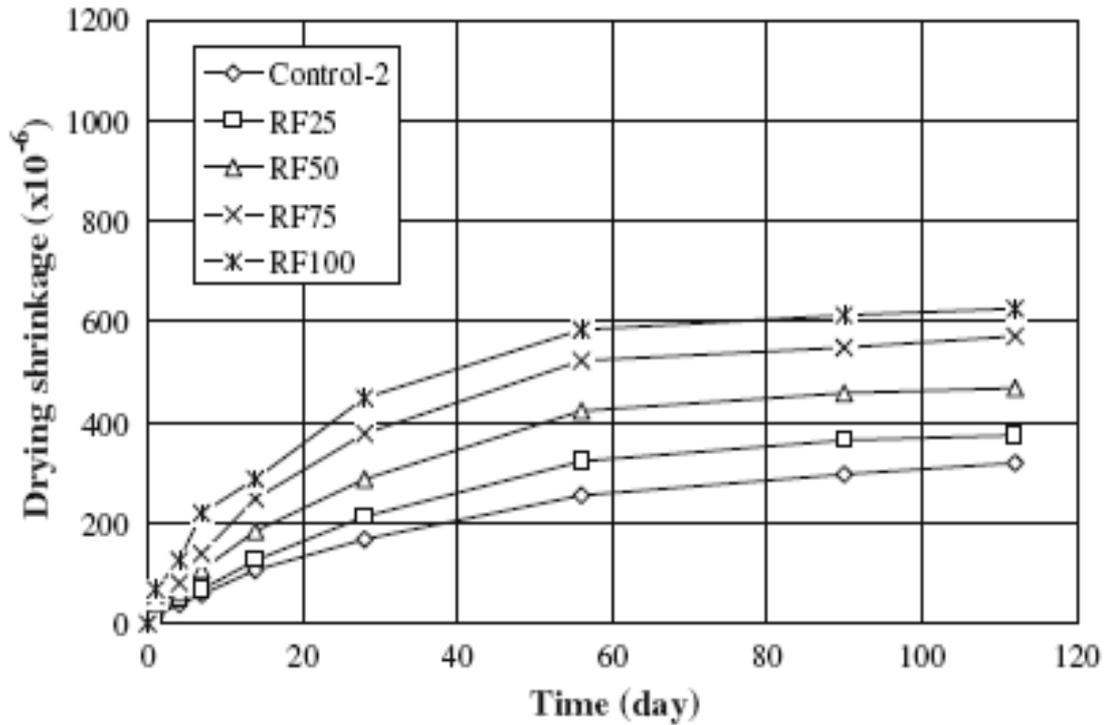


Figure 2-26 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport  $E/L=0,44$  [77].

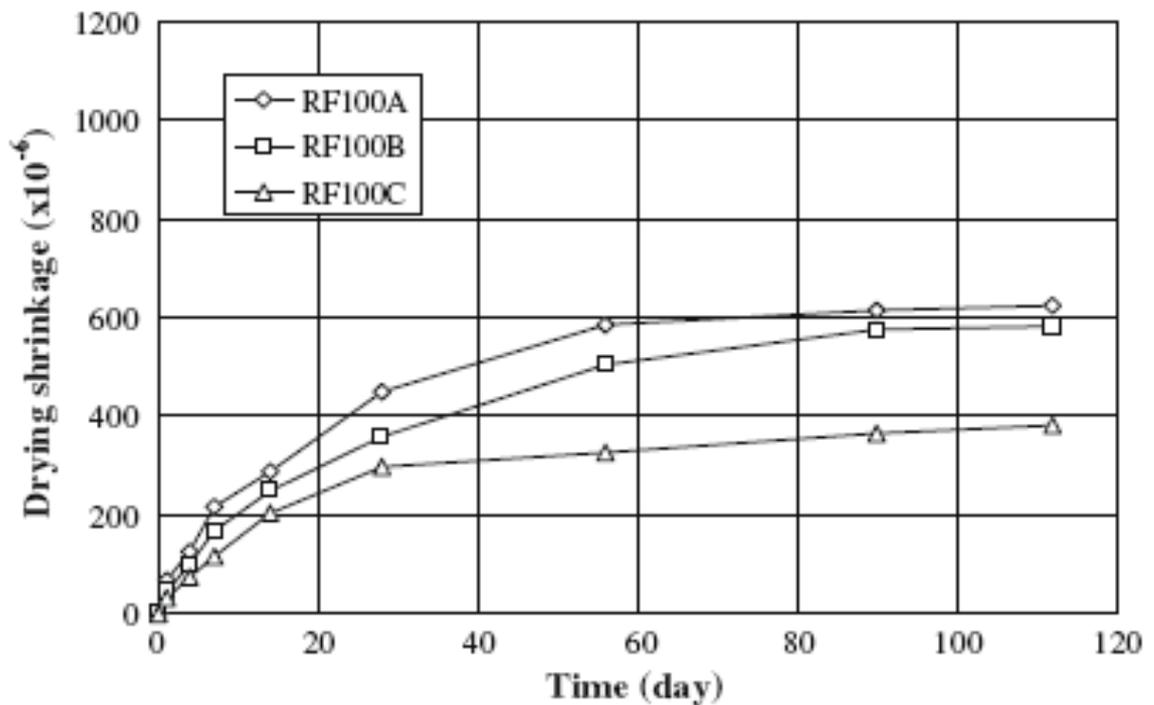
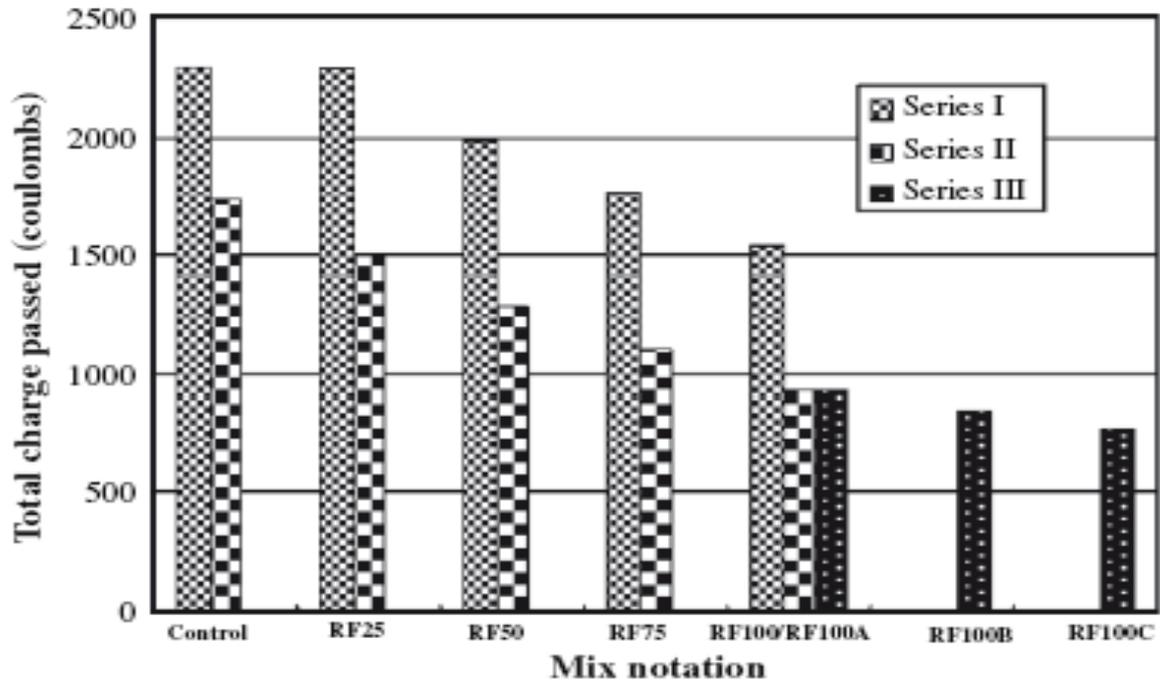


Figure 2-27 : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport  $E/L$  ( $A=0,44$ ,  $B=0,40$  et  $C=0,35$ ) [77].

### 2-4-5) Diffusion des ions de chlorures

La résistance à la pénétration de chlorure d'un BAP basé sur des granulats recyclé augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés (Figure 2-29).



**Figure 2-28:** Charge totale passée (coulomb) à 28 jours [77].

### 2-5) CONCLUSION

Les granulats recyclés se caractérisent généralement par une porosité plus élevée et une absorption d'eau plus importante en raison de l'ancien mortier cohérent à la surface. Le BAP à base de granulats recyclés a un comportement rhéologique comparable à celle de granulats naturels mais la résistance à la compression diminue, le retrait augmente, l'absorption augmente et la diffusion des ions de chlorure augmente. Peu de travaux ont été reportés dans la littérature sur la substitution simultanée des granulats recyclés et la pouzzolane naturelle ou le laitier.

# **Partie 2**

## **Etude expérimentale**

## CHAPITRE 3

### MATERIAUX ET ESSAIS

#### 3-1) INTRODUCTION

Dans cette partie on présente les caractéristiques des matériaux utilisés, les essais réalisés au laboratoire ainsi que la procédure expérimentale.

#### 3-2) MATERIAUX UTILISES

##### 3-2-1) Le ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment du type CEM I 42.5, « une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa » et une masse volumique de 3050 kg/m<sup>3</sup> et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3000 cm<sup>2</sup>/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le tableau 3-1.

**Tableau 3-1** : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment

<i>Composition chimique (%)</i>									
<i>CaO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MgO</i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>PAF</i>	<i>RI</i>
<i>63,40</i>	<i>21,06</i>	<i>3,60</i>	<i>4,47</i>	<i>1,85</i>	<i>2,00</i>	<i>0,13</i>	<i>0,57</i>	<i>2,53</i>	<i>0,65</i>
<i>Composition minéralogique (%)</i>									
<i>C<sub>3</sub>S</i>		<i>C<sub>2</sub>S</i>		<i>C<sub>3</sub>A</i>		<i>C<sub>4</sub>AF</i>			
<i>67,40</i>		<i>9,89</i>		<i>1,98</i>		<i>13,59</i>			

##### 3-2-2) Les Ajouts minéraux

L'utilisation des additions minérales dans la composition du béton peut améliorer ses caractéristiques ou de lui confère des propriétés spécifiques. Deux ajouts ont été utilisés :

##### 3-2-2-1) Le laitier

Le laitier de haut fourneau utilisé provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair (Figure 3.1).

La masse volumique absolue du laitier est de  $2850 \text{ kg/m}^3$  et sa surface spécifique de Blaine est de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  et pozzolanité de 80% et une résistance mécanique de  $45 \text{ kg/cm}^2$ . Les caractéristiques du laitier sont données dans le tableau 3.2.



**Figure 3-1 :** Laitier (non broyé/broyé).

**Tableau 3-2 :** Caractéristiques chimiques du Laitier d'El Hadjar

<i>Composition chimique (%)</i>									
<i>Si O<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></i>	<i>Ca O</i>	<i>Mg O</i>	<i>MnO</i>	<i>K<sub>2</sub> O</i>	<i>S O<sub>3</sub></i>	<i>TiO<sub>2</sub></i>	<i>total</i>
40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	101,15

### 3-2-2-2) La pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée provient de Beni Saf de couleur grise (Figure 3.2). Elle est caractérisée par une masse volumique absolue de  $2810 \text{ kg/m}^3$ , une surface spécifique de Blaine  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

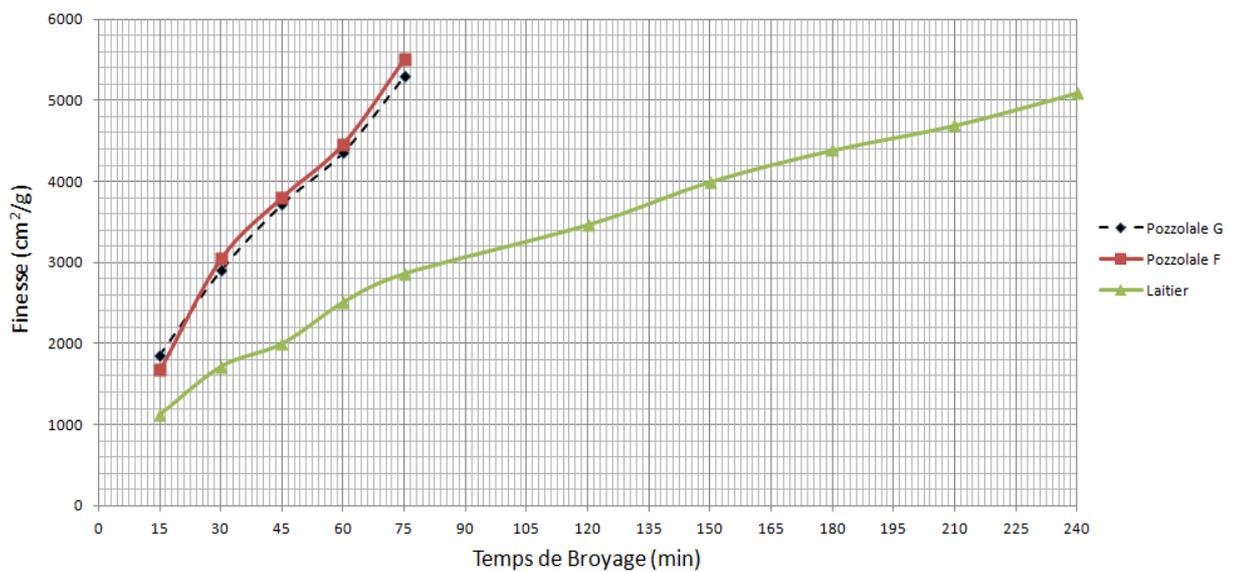


**Figure 3-2 :** Pouzzolane (non broyée/broyée).

**Tableau 3-3** : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane

<i>Composition chimique (%)</i>									
<i>Si O<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></i>	<i>Ca O</i>	<i>Mg O</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>CaCO<sub>3</sub></i>	<i>S O<sub>3</sub></i>	<i>HCl</i>	<i>Ia</i>
45,67	15,10	10,14	8,98	3,45	3,00	-	0,19	nul	0,81

Le broyage des ajouts a été fait à l'aide d'un broyeur à boules (Figure 3.3). En basant sur la courbe de broyage présentée dans la figure 3.4 qui donne le temps de broyage nécessaire en fonction de la finesse.

**Figure 3-3** : Broyeur à boules pour poudre.**Figure 3-4** : Temps de broyage en fonction de la finesse des ajouts.

### 3-2-3) Granulats naturels

#### 3-2-3-1) Le sable

Le sable utilisé provient de la région de Baghlia (Figure 3.5). Il est caractérisé par une masse volumique absolue de  $2560 \text{ kg/m}^3$  et une masse volumique apparente de  $1450 \text{ kg/m}^3$ . Le sable a un équivalent de sable de 82.6%, une taille granulaire 0/5, et de coefficient d'absorption de 1,1% et une humidité de 1,70% et un module de finesse de 3,32.



**Figure 3-5 :** Sable de Baghlia.

#### 3-2-3-2) Le gravier

Le gravier utilisé est un gravier composé de deux classes granulaires classe 3/8 et 8/15 (Figure 3.6 et 3.7). Les caractéristiques principales des graviers utilisés sont présentées dans le tableau 3-3. Les courbes granulométriques du sable et du gravier utilisés sont données dans la figure 3.8.

**Tableau 3-4 :** Caractéristiques des granulats naturels

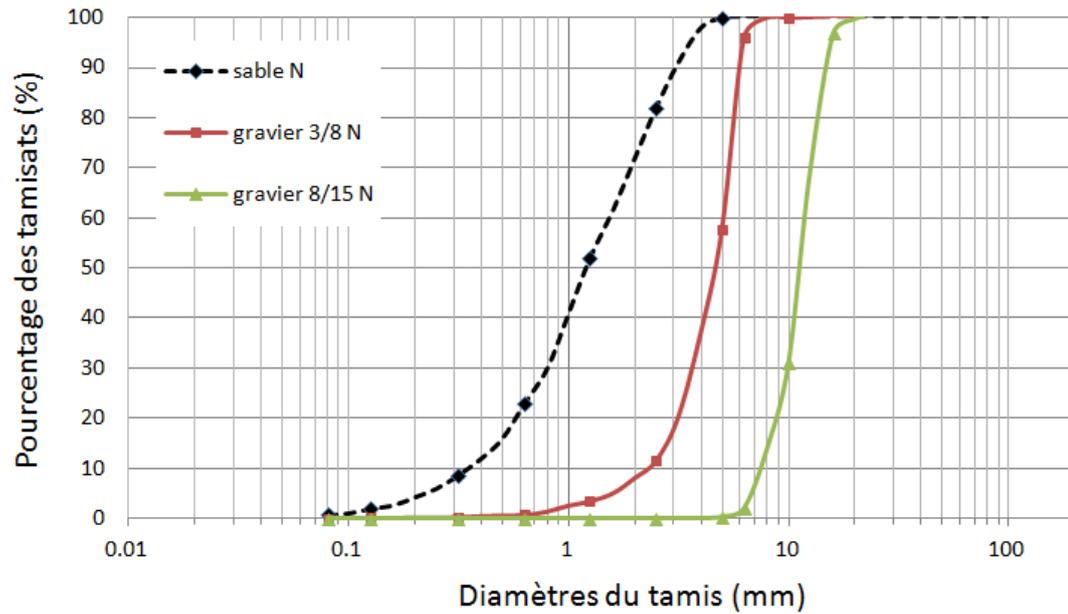
<i>Granulats</i>	<i>Classe granulaire (mm)</i>	<i>Masse volumique absolue (<math>\text{kg/m}^3</math>)</i>	<i>Masse volumique apparente (<math>\text{kg/m}^3</math>)</i>	<i>Coefficient d'absorption (%)</i>	<i>Humidité (%)</i>
<i>Gravier</i>	<i>3/8</i>	<i>2730</i>	<i>1475</i>	<i>0,5</i>	<i>0,13</i>
	<i>8/15</i>	<i>2700</i>	<i>1465</i>	<i>0,5</i>	<i>0,30</i>



**Figure 3-6 :** Gravier 8/15 de Setif.



**Figure 3-7 :** Gravier 3/8 de Setif.



**Figure 3-8 :** Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.

#### 3-2-4) Granulats recyclés

Les granulats recyclés (gravier et sable) ont été obtenus par un concassage et criblage des dalles de 1mx1m et d'une épaisseur de 10 cm en béton. Les dalles ont été fabriquées en laboratoire et conservées pendant 28 jours dans l'eau afin de subir un concassage préliminaire qui a été fait manuellement, et un concassage final à l'aide d'un concasseur mécanique. Le matériau concassé est passé à travers des tamis pour obtenir les différentes fractions de granulats recyclés (Figure 3.9 et 3.10). Le module de finesse du sable est égal à 3,48. Les courbes granulométrique sont présentées dans la figure 3.11. La caractérisation des granulats sont représentés dans le tableau 3.4 :

**Tableau 3-5 :** Caractéristiques des granulats recyclés.

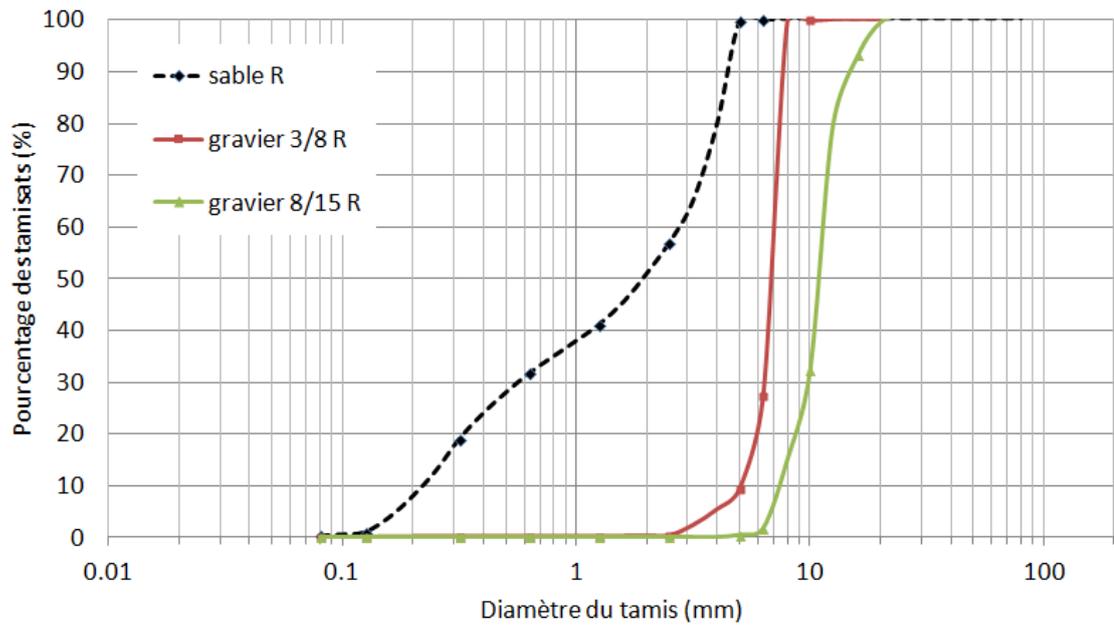
	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Masse Volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient d'absorption (Ab) (%)	Humidité (%)
<b>Sable</b>	1389.93	2290	7.03	4.70
<b>Gravier 3/8</b>	1241.10	2310	6.50	3.84
<b>Gravier 8/15</b>	1278.03	2330	4.67	2.29



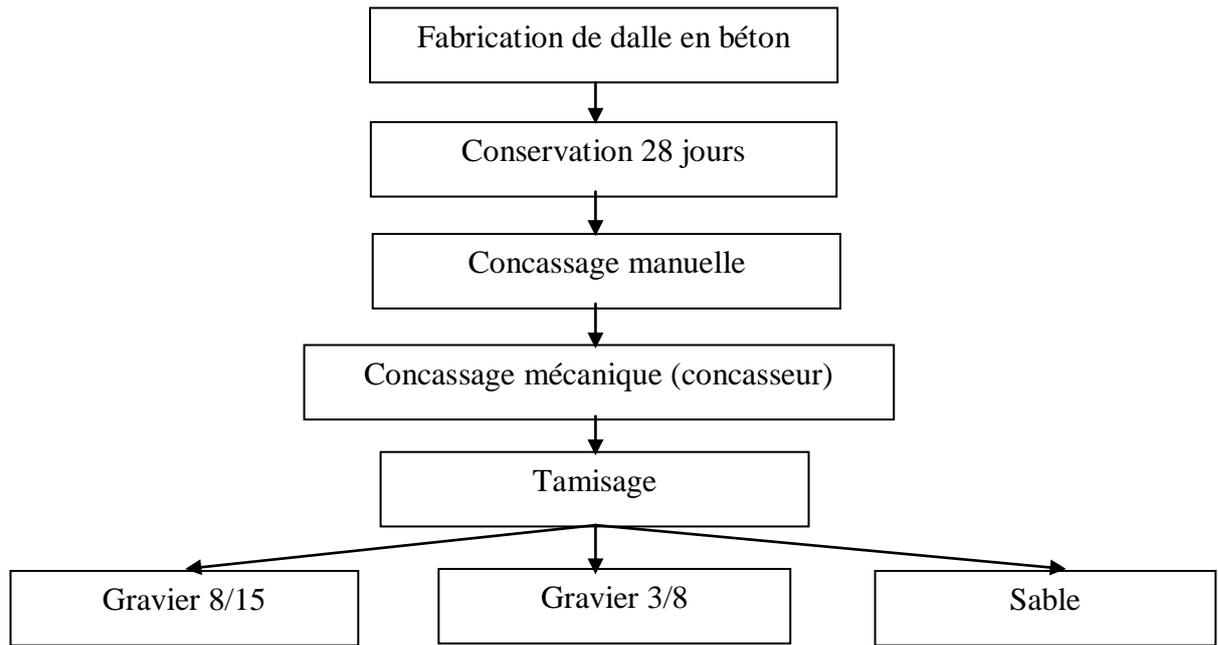
**Figure 3-9 :** Gravier 8/15 et 3/8 recyclés.



**Figure 3.10 :** sable recyclés.

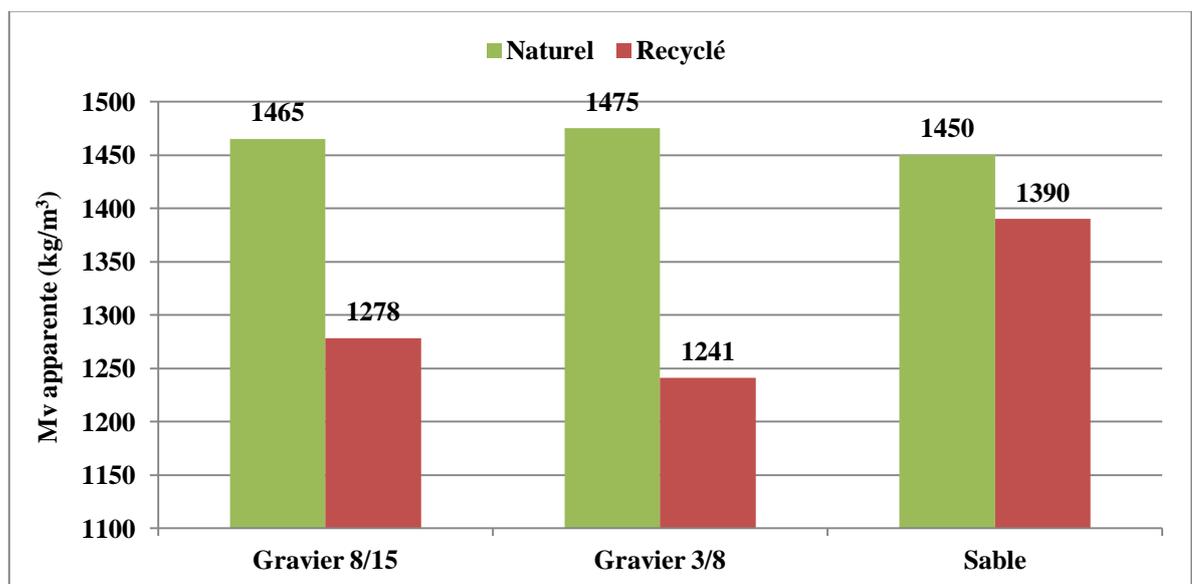


**Figure 3-11 :** Courbe granulométrique du sable et gravier recyclés.

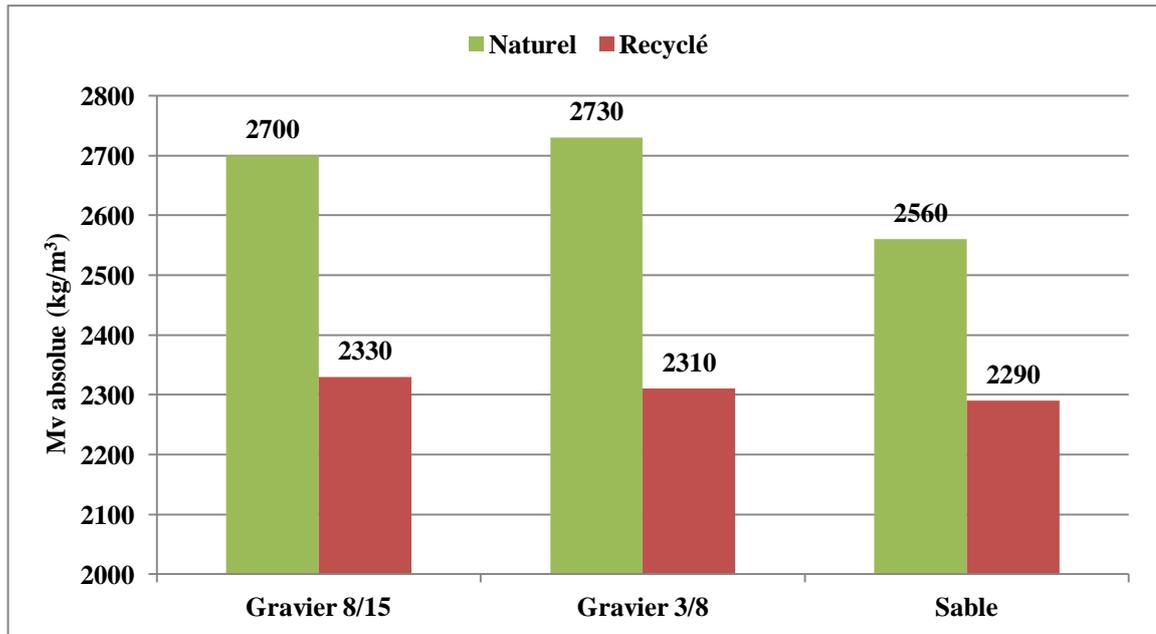


**Figure 3-12 :** Procédure de fabrication de granulats recyclés.

Les figures 3.13 et 3.14 présente la différence entre les masses volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés. En comparant les masses volumiques (absolue et apparente) des granulats naturels et des granulats recyclés, on remarque une chute de la masse pour les trois fractions granulaires. Cette diminution est peut être due à la faible densité de la pâte d'ancien mortier recouvrant le granulats. Des résultats similaires ont été trouvés par [62, 64,65, 67].

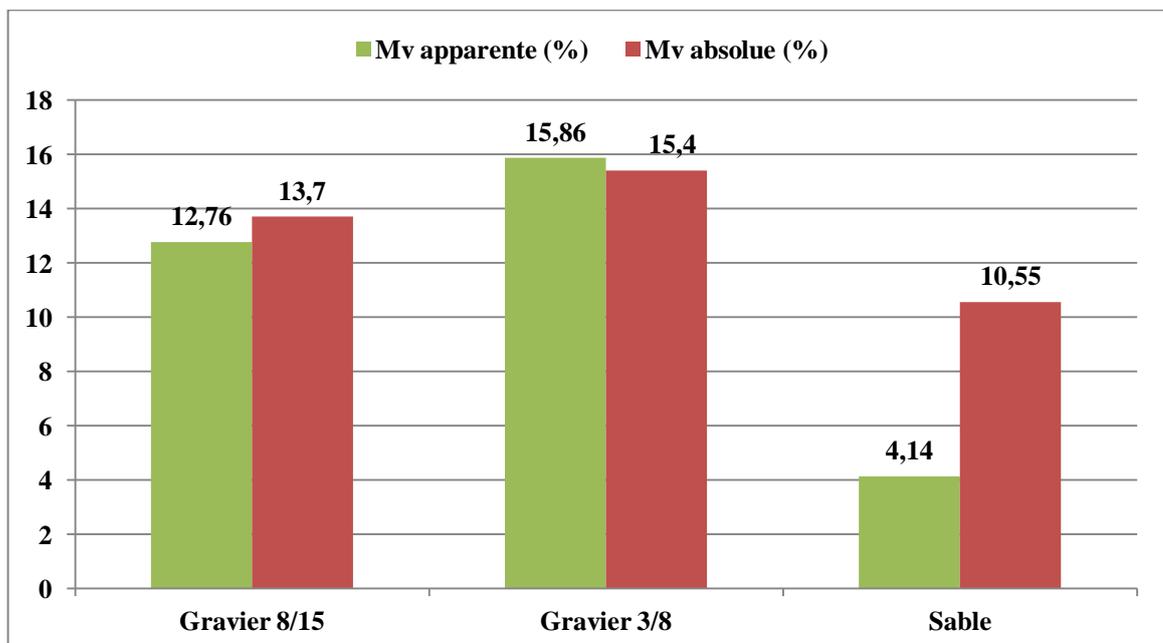


**Figure 3-13 :** Comparaison entre la Mv apparente des granulats naturels et recyclés.



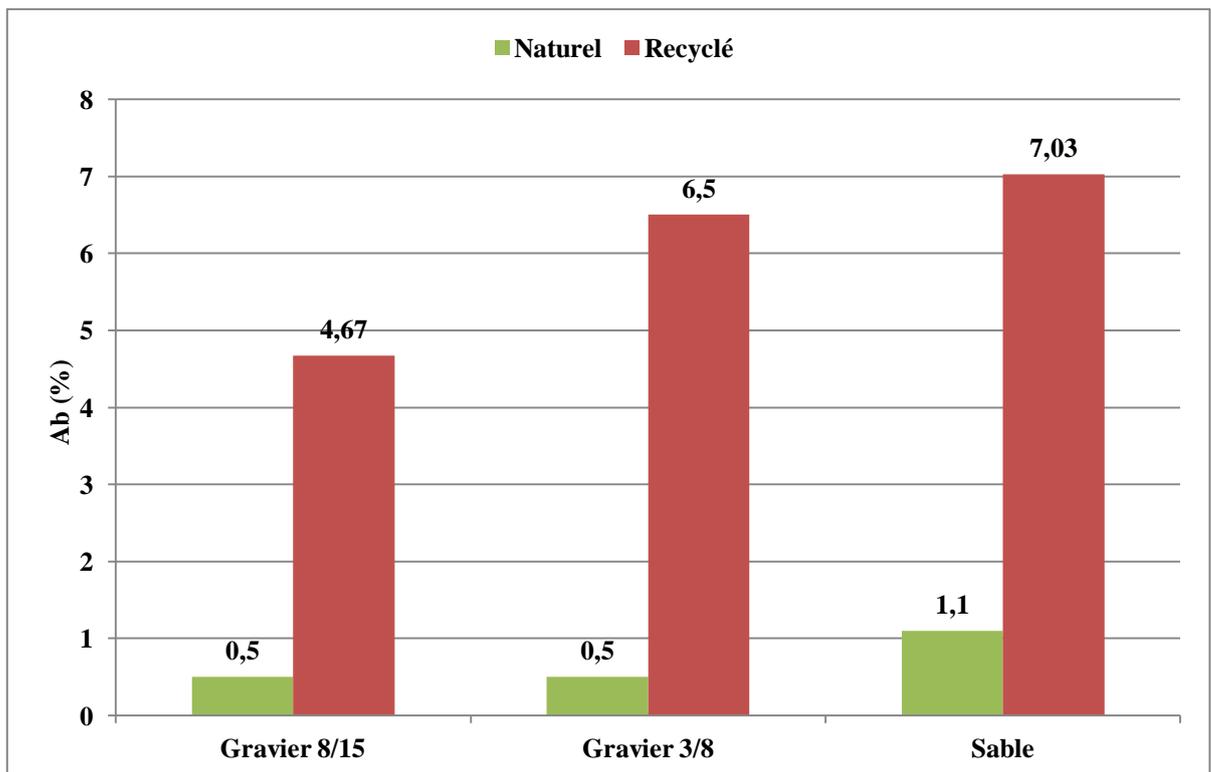
**Figure 3-14 :** Comparaison entre la Mv absolue des granulats naturels et recyclés.

La figure 3.15 présente le pourcentage de la chute de la masse pour les des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. On remarque que les masses volumiques (Mv et Ma) des granulats recyclés sont inférieur de l'ordre de 4 à 16% à celles des granulats naturels. Cependant, la densité des granulats du béton recyclés est inférieur de l'ordre de 5 à 10% à celles des granulats naturels [79, 80].



**Figure 3-15 :** Pourcentage de diminution des masses volumiques (absolue et apparente) pour les granulats recyclés.

D'autres paramètres se différencient entre les granulats naturels et les recyclés. Le paramètre le plus important est le coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ). La figure 3.16 présente la différence entre les coefficients d'absorption d'eau ( $A_b$ ) des granulats naturels et recyclés. On a remarqué un coefficient d'absorption d'eau élevé pour les granulats recyclés. Cette remarque a été observée par [61, 62, 64, 66 et 71]. La différence entre les coefficients est de l'ordre de 9 à 13 fois plus grande pour le gravier recyclé (3/8 et 8/15) et de 6 fois pour le sable.



**Figure 3-16 :** Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) des granulats naturels et recyclés.

### 3-2-5) Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est de type MEDAFLOW 30 fabriqué par Granitex, c'est un haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates. La plage de dosage recommandée est de 0,5 à 2,00% du poids du ciment.

### 3-2-6) Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau du robinet de laboratoire.

### **3-3) FORMULATION ADOPTÉE**

La formulation adoptée est la formulation appelée la méthode générale, c'est une méthode de formulation japonaise proposée par OKAMURA. Le choix des différentes quantités des constituants (S/M, E/P) a été fait sur la base de travail de Boukendakdji dans sa thèse de doctorat [11].

Le rapport E/P a été maintenu fixe à 0,40, le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable (sans ressuage). Le pourcentage du superplastifiant obtenu sur mortier a été obtenu sur béton.

### **3-4) FABRICATION DU MORTIER**

Le but de réaliser les essais sur mortier et d'optimiser le dosage en superplastifiant, en gardant les rapports S/M et E/P constants (S/M=0,50 et E/P=0,40) et faire varier le pourcentage du superplastifiant de 1,20 à 2,20% afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un diamètre d'étalement entre 270 et 330 mm, sans ségrégation et sans ressuage. Les quantités des constituants du mortier (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide d'un programme Excel (Annexe A). La procédure du malaxage du mortier adoptée est celle de DOMONE et JIN [81] où ils proposent d'introduire le superplastifiant à partir de la 2<sup>ème</sup> minute après le commencement du malaxage (Figure 3.17).

La procédure est comme suit :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

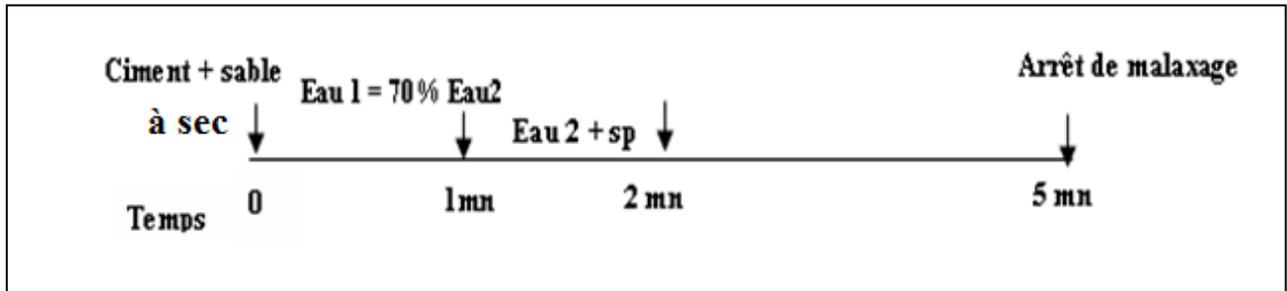


Figure 3-17 : Séquence du malaxage du mortier.

### 3-5) ESSAIS REALISES SUR MORTIER

Les essais réalisés sur le mortier à l'état frais sont présentés dans section :

#### i) Essai d'étalement au mini cône

Le dispositif de l'essai est montré dans la figure 3.18 et 3.19. L'essai consiste à remplir le mini cône par le mortier, après le soulèvement du moule on mesure les deux diamètres perpendiculaires. Le diamètre de la galette du mortier doit être compris entre 270 et 330 mm pour avoir un mortier autoplaçant.

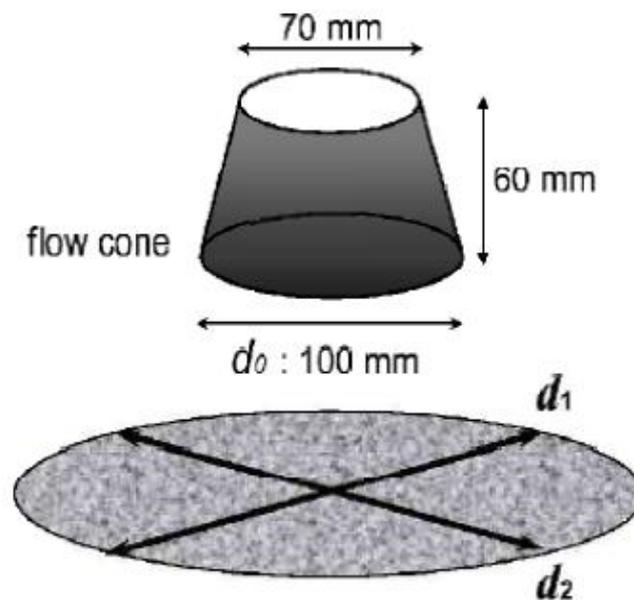


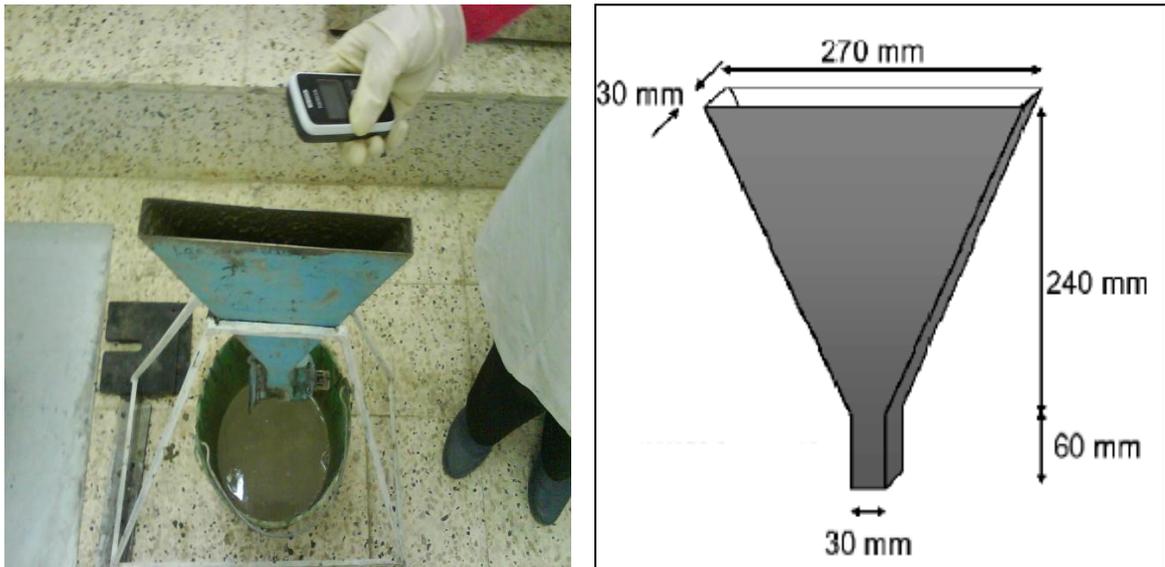
Figure 3-18 : Mini cône pour mortier.



**Figure 3-19** : Mesure de diamètre de la galette de mortier.

## ii) Essai d'écoulement V-funnel

Le dispositif d'essai est montré dans la figure 3.20. Dans cet essai on calcule le temps d'écoulement, qu'il est calculé entre le moment de l'ouverture de l'orifice et l'apparition de la lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Le temps d'écoulement doit être compris entre 2 et 10 secondes.



**Figure 3-20** : L'entonnoir en V (V - Funnel test) pour mortier.

## 3-6) FABRICATION DU BETON

Une fois le dosage en superplastifiant est optimisé à partir des essais sur mortier, on procédera aux essais sur le béton à l'état frais. La fabrication du béton a été basée sur la méthode japonaise dite la méthode générale, le calcul de dosage des différents constituant (ciment, sable, gravier, ajout, eau et superplastifiant) a été fait à l'aide d'un programme

Excel basé sur cette méthode en tenant compte des caractéristiques des granulats (absorption, humidité...etc.) (Annexe B).

La méthode du malaxage adopté est celle de DOMONE et JIN [81] comme indiquée la figure 3.21 :

- Malaxer le gravier (3/8 et 8/15), le sable, le ciment et l'ajout (laitier et/ou pouzzolane) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

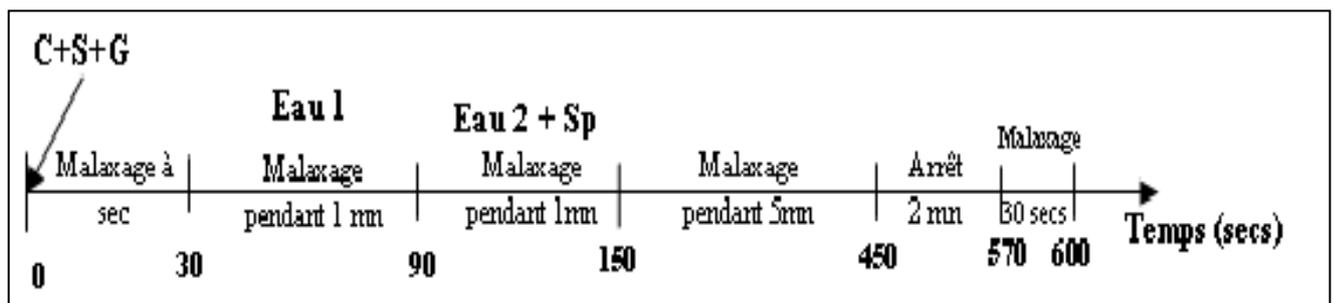
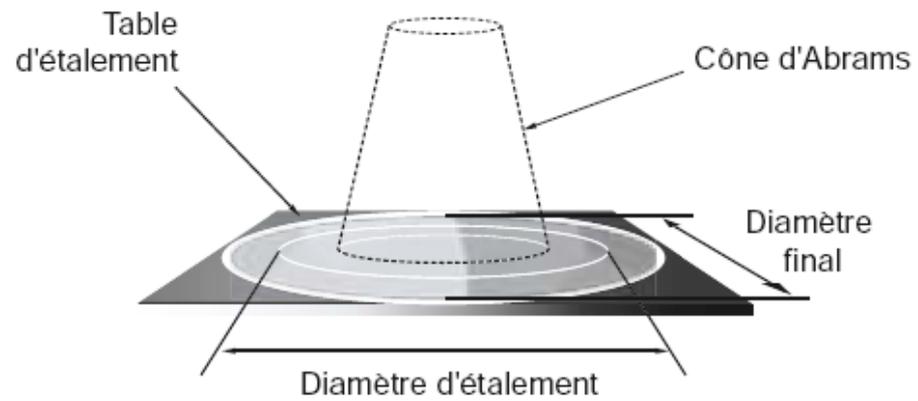


Figure 3-21 : Séquence du malaxage du béton.

### 3-7) ESSAI SUR LE BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT FRAIS

#### 3-7-1) Essai d'étalement (Flow Test)

Cet essai se fait à l'aide de cône d'Abrams, dont le diamètre de base inférieure est de 20,3 cm et le diamètre de la base supérieure est de 10,2 cm et une hauteur de 30,5 cm. Le principe de l'essai reste le même que pour un béton ordinaire (Figure 3.22). Le diamètre de la galette de béton obtenu correspond à la moyenne de deux diamètres perpendiculairement mesurés, après la stabilité de la galette (Figure 3.23).



**Figure 3-22:** Essai au cône d'Abrams.



**Figure 3-23:** Mesure de diamètre à l'essai au cône d'Abrams.

Avec le même essai, on mesure le temps d'écoulement  $T_{50}$ , qui correspond au temps mesuré à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 50 cm. Le même essai est pratiqué sur le mortier de ciment, en utilisant un mini cône dont les dimensions sont les suivantes :

Le tableau suivant présente les trois classes de la mesure d'étalement au cône d'Abrams selon le domaine d'utilisation du BAP :

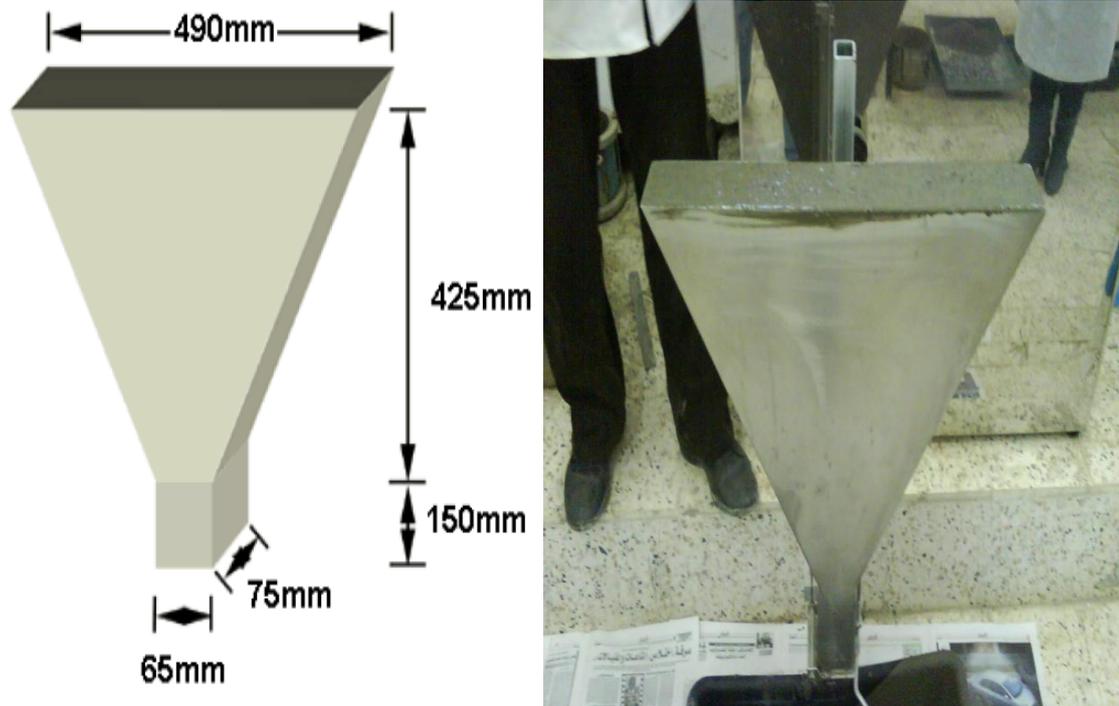
**Tableau 3-6 : Classification des BAP selon domaine d’application**

<b>Classe</b>	<b>Etalement (mm)</b>	<b>Domaine d’utilisation</b>
1	550 - 650	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex : dalle)</li> <li>• Coulage par un système de pompage.</li> <li>• Petites sections</li> </ul>
2	660 – 750	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La majorité des applications</li> </ul>
3	760 – 850	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Application verticale</li> <li>• Structure trop ferrillées</li> <li>• Coulage à partir du dessous du coffrage</li> <li>• Structure de forme complexe</li> </ul>

### 3-7-2) Essai à l’entonnoir en V (V-Funnel test)

Parmi les essais permettent d’évaluer la mobilité du béton en milieu confiné l’essai de l’entonnoir en forme de V (V funnel) est le plus utilisé [37]. Le dispositif d’essai est montré dans la figure 3.23. La quantité du BAP nécessaire pour l’essai est de 12 litre, et les dimensions maximale des agrégats utilisés est de 20 mm. Grâce à la mesure du temps d’écoulement à l’entonnoir, cet essai permet d’évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées. Il permet aussi de mesurer la viscosité du béton (temps important donc viscosité élevée), et il nous renseigne sur la stabilité du mélange (s’il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l’entonnoir).

Le temps d’écoulement du béton autoplaçant à l’entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [11].

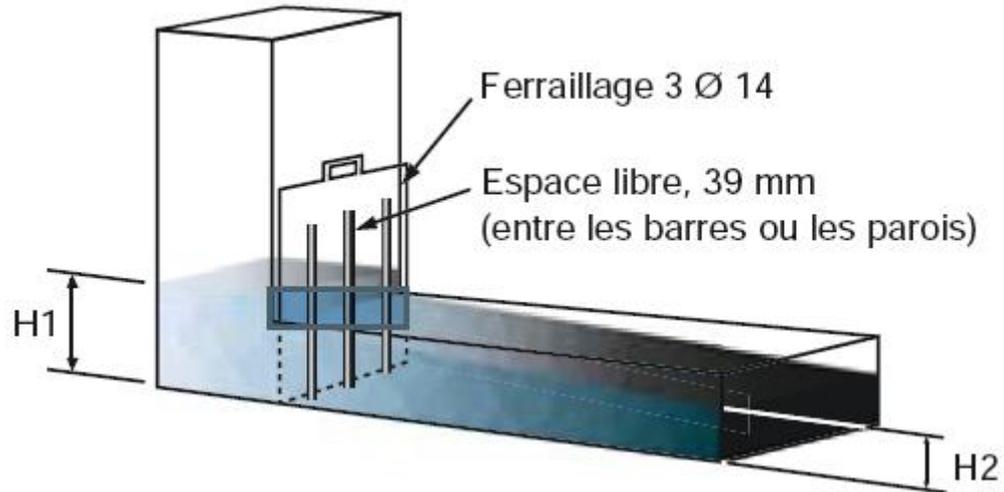


**Figure 3-24** : L'entonnoir en V (V - Funnel test).

### 3-7-3) Essai à la boîte en L (L-Box test)

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP (environ 12,7 litre) la partie verticale d'une boîte (hauteur de 600 mm), puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure) (Figure 3.25). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$ . Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.



**Figure 3-25** : L'essai à la boîte en L (L-Box test).

Autres mesures à prendre :

- $T_{20}$  : le temps d'écoulement du béton pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- $T_{40}$  : le temps d'écoulement du béton pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).

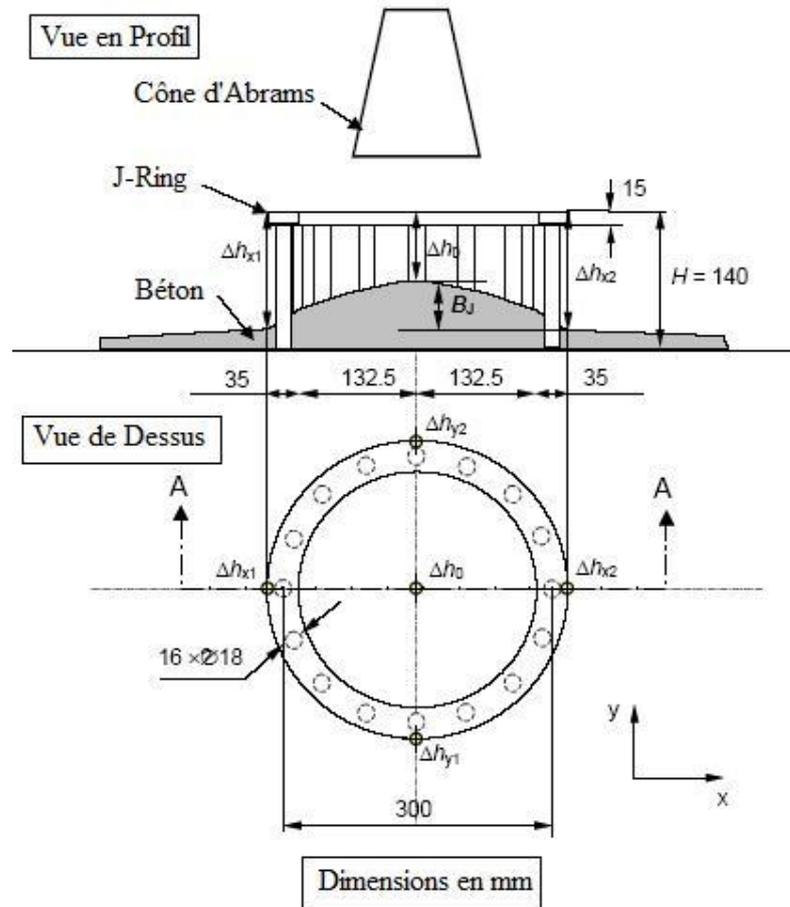
Certains auteurs recommandent de valeurs inférieures à 1,5 secondes pour  $T_{20}$  et inférieur à 3,5 secondes pour  $T_{40}$  afin de rester dans un domaine autoplaçant [11].



**Figure 3-26** : Essai à la boîte en L (L-Box test).

3-7-4) Essai à la couronne (J-Ring test)

Cet essai est utilisé pour évaluer la capacité de passage et la capacité au remplissage du béton autoplaçant. Il peut être utilisé aussi pour étudier la résistance à la ségrégation. L'essai consiste à faire écouler le béton à partir du cône d'Abrams disposé au centre d'un anneau métallique de 300 mm de diamètre, sur lequel sont soudés des barres d'armature Ø16 à 18 mm, régulièrement séparées (Figure 3.27).



**Figure 3-27** : L'essai à la couronne J (J-Ring test) [11].

Comme dans le cas de l'essai d'étalement, on mesure le diamètre maximal et le diamètre perpendiculaire et l'étalement sera calculé à partir de la formule suivante :

$$S_j = \frac{(d_{max} + d_{perp})}{2} \dots \dots \dots (3.1)$$

On mesure aussi le T<sub>50</sub> qui est le temps calculé entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le béton atteint 500 mm de diamètre. Et pour pouvoir confirmer ou infirmer le

blocage, on doit mesurer les différentes hauteurs entre l'intérieur et l'extérieur de l'anneau, afin de calculer le  $B_j$  à partir de la formule suivante :

$$B_j = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \dots \dots \dots (3.2)$$

La différence d'hauteur  $B_j$  ne doit pas dépasser 10 mm.



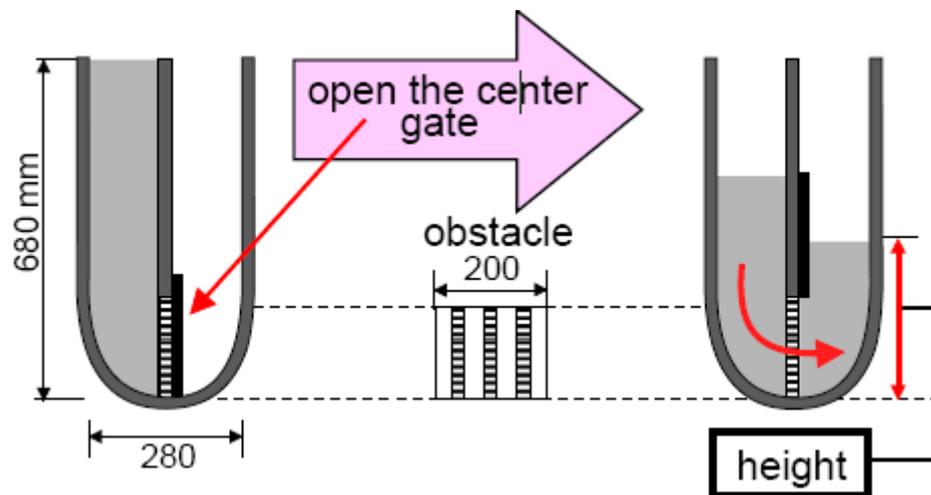
**Figure 3-28** : Mesure du diamètre à l'essai à la couronne J (J-Ring test).



**Figure 3-29** : Mesure la différence de hauteurs  $B_j$  J (J-Ring test).

### 3-7-5) Essai à la boîte en U (U-Box test)

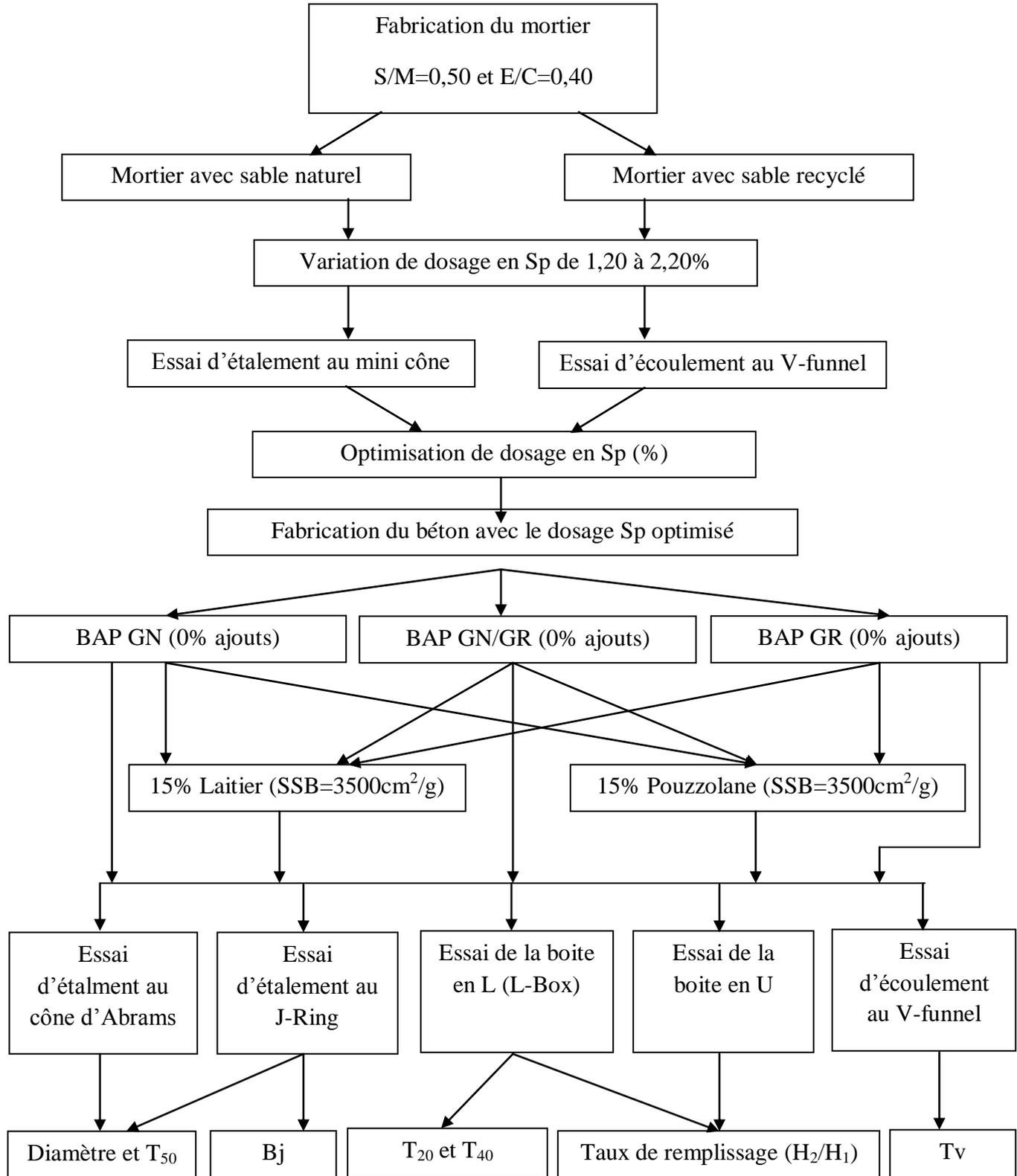
Le dispositif d'essai de l'essai est donné par la figure 3.30. Dans cet essai, le degré de compactibilité peut être indiqué par la hauteur que le béton atteint après l'ouverture de la trappe. Le béton avec la hauteur de remplissage est supérieure à 300 mm peut être jugé comme un béton autoplaçant. Le béton est considéré comme autoplaçant si le rapport de  $H_2$  et  $H_1$  (les hauteurs dans la deuxième et la première partie respectivement) est supérieur à 85%.



**Figure 3-30** : L'essai à la boîte en U (U-Box test).

### **3-8) RECAPITULATIF ET VARIABLES ETUDIÉES**

Deux types de mortiers seront étudiés, un à base de sable naturel et le deuxième à base de sable recyclé. L'objectif des essais sur mortier est d'optimiser le dosage en superplastifiant afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant. La procédure consiste à faire varier le pourcentage en Sp de 1,20 à 2,20% jusqu'à avoir l'étalement et le temps d'écoulement souhaité, sans la présence de ressuage. Le dosage de Sp optimisé sur mortier sera adopté pour béton. Trois bétons de référence seront réalisés à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés et sans ajout afin de connaître l'effet des granulats recyclés seules sur la rhéologie du béton. En suite, une substitution de 15% en poids du ciment par le laitier ou la pouzzolane naturelle, selon le cas, de surface spécifique de Blaine de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$  sera faite afin de pouvoir étudié l'effet des ces deux ajouts sur les propriétés rhéologique des trois bétons (Figure3.27).



**Figure 3-31** : Organigramme de la procédure expérimentale.

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et discussion**

## CHAPITRE 4

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### 4-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présentera les résultats des essais réalisés. Les essais réalisés sur mortier à base de sable naturels et de sable recyclé sont présentés en premier afin d'optimiser le dosage en superplastifiant pour un bon mortier autoplaçant. Ensuite on exposera les essais sur les bétons de références à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés, ainsi que les BAP avec la substitution de 15% du ciment en poids par du laitier ou de la pouzzolane naturelle.

#### 4-2 OPTIMISATION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT

Dans cette première étape on a varié le dosage en superplastifiant de 1,20% à 2,20% de poids du ciment, avec un pas de 0,20 et on a réalisé les deux essais recommandés sur mortier (étalement au mini cône et le V-funnel) cités dans le chapitre 3.

Les différentes compositions du mortier (naturel et recyclé) en fonction de dosage en superplastifiant pour un volume de mélange qui est égale à 1,60 litre, sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2 :

**Tableau 4-1** : Composition de mortier à base de sable naturel

Dosage en Sp (%)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)		Sp (g)
			w1 (g)	w2 (g)	
1,20	1099	2060	293	126	13
1,40	1099	2060	292	125	15
1,60	1099	2060	291	125	18
1,80	1099	2060	290	124	20
2,00	1099	2060	289	124	22
2,20	1099	2060	288	123	24

**Tableau 4-2 : Composition de mortier à base de sable recyclé**

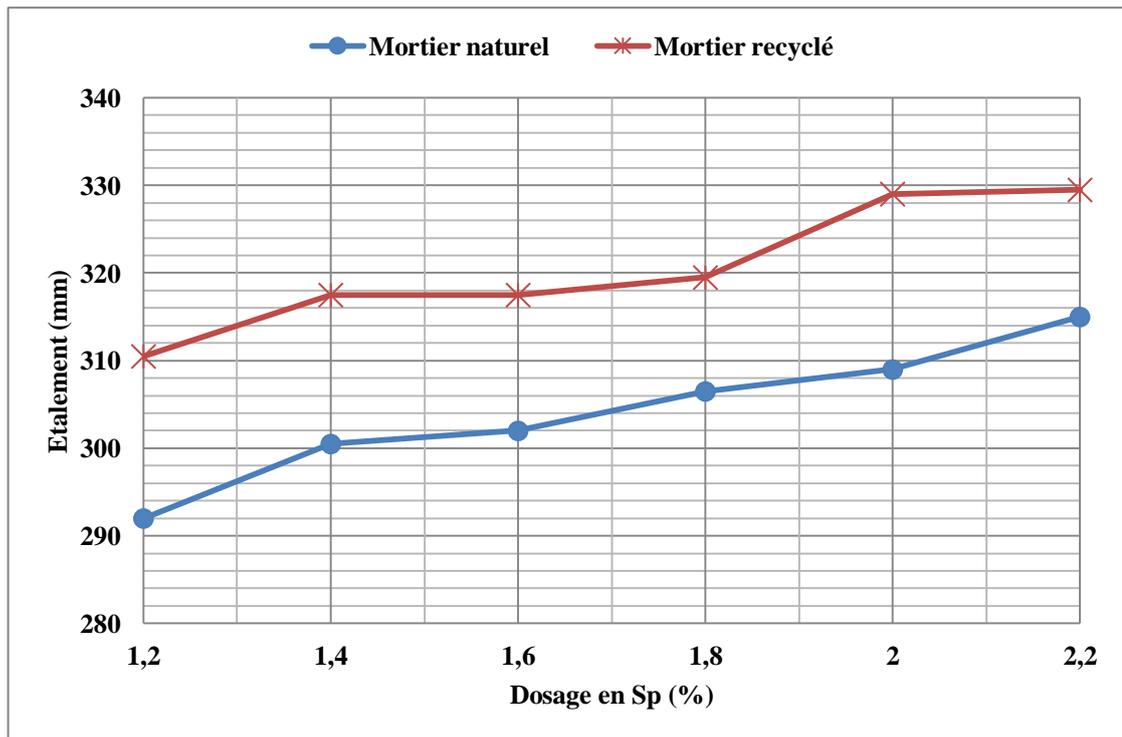
Dosage en Sp (%)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)		Sp (g)
			w1 (g)	w2 (g)	
1,20	1099	1790	331	142	13
1,40	1099	1790	329	141	15
1,60	1099	1790	328	141	18
1,80	1099	1790	327	140	20
2,00	1099	1790	326	140	22
2,20	1099	1790	325	139	24

#### 4-2-1) Etalement au mini cône pour mortier

On remarque que le mortier à base de sable naturel et le mortier à base de sable recyclé ont un comportement similaire en fonction du dosage en superplastifiant (Figure 4.1).

L'étalement augmente avec l'augmentation de dosage en superplastifiant pour les deux mortiers car le superplastifiant disperse les grains du ciment et améliore la fluidité du mélange. Cependant, il faut noter que l'étalement du mortier recyclé reste toujours supérieur par rapport à l'étalement du mortier naturel. A un dosage de superplastifiant de 2 à 2,20% l'étalement a été de 330 mm et il a été accompagné d'un ressuage (Figure 4.2).

La quantité élevée des fines dans le sable recyclé qui provient de l'ancienne pâte du ciment lors de concassage et lors de malaxage, la quantité d'eau élevée en comparaison au mortier naturel due au coefficient élevé d'absorption (7,03 pour le sable recyclé et 1,10 pour le sable naturel) et la différence d'humidité entre les deux sables (4,70 dans le sable recyclé et 1,70% dans le sable naturel) ont contribué à ce comportement.



**Figure 4-1 :** Etalement du mortier en fonction de dosage en Sp.

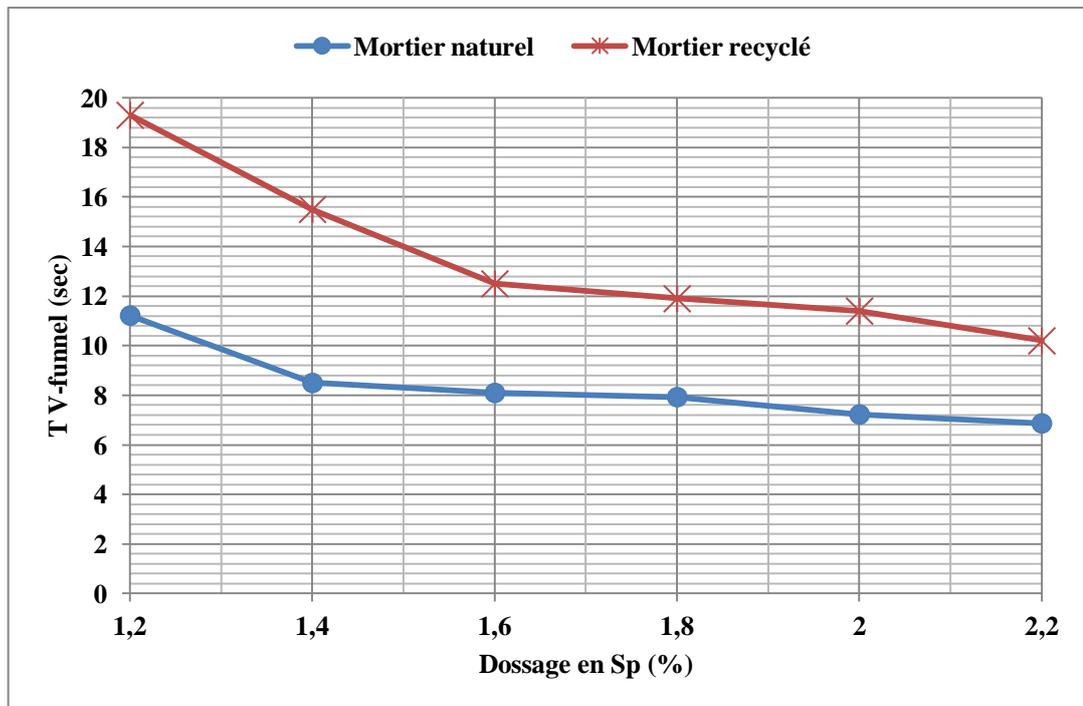


**Figure 4-2 :** Etalement du mortier recyclé à un dosage de 2,20% de Sp.

#### 4-2-2) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel)

Le temps d'écoulement au V-funnel est inversement proportionnel au dosage en superplastifiant, donc T V-funnel diminue de manière remarquable quand le pourcentage de Sp varie entre 1,20% et 1,60% mais reste pratiquement constant entre un dosage de 1,60% et 2,20% de superplastifiant.

Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier à base de sable recyclé est supérieur à celui du mortier à base de sable naturel pour le même pourcentage en superplastifiant ce que signifie que la viscosité du mortier diminue en augmentant le dosage en Sp. Le comportement des deux mortiers reste similaire en fonction de dosage en Sp (Figure 4.3).



**Figure 4-3 :** Temps d'écoulement au V-funnel du mortier en fonction de dosage en Sp.

Par conséquent, on a adopté un dosage en superplastifiant de 1,80% pour les deux mortiers naturels et recyclé car avec ce pourcentage on a obtenu un bon mortier autoplaçant, homogène sans ressuage. Pour ce dosage en Sp, l'étalement et le temps d'écoulement à l'entonnoir en V ont été comme suit :

- Mortier naturel :  $D= 306,5$  mm,  $T=7,83$  sec ;
- Mortier recyclé :  $D= 319,5$  mm et  $T= 11,9$  sec.

Ces valeurs satisfont les exigences normalisées :

- Diamètre d'étalement :  $270$  mm  $< D < 330$  mm.
- Temps d'écoulement au V-funnel :  $2$  sec  $< T < 10$  sec.

#### 4-3) PERFORMANCES DES BAP A BASE DE GRANULATS RECYCLES ET SANS AJOUT CIMENTAIRES A L'ETAT FRAIS

Dans cette partie, on a étudié un BAP nommé GN à base de 100% granulats naturels, un BAP nommé GN/GR avec un pourcentage de 50% granulats recyclé et une troisième composition de BAP nommée GR à base de 100% de granulats recyclés. Le tableau 4.3 présente la composition des différents BAP à base de granulats naturels et recyclés.

Le BAP contient un volume élevé en pâte et moins en gros granulats, donc on peut dire que les propriétés du mortier sont dominantes. Par conséquent, connaître les caractéristiques du mortier à l'état frais a été nécessaire pour assurer un BAP avec une bonne rhéologie. De plus, réaliser des essais sur mortier est plus facile et plus pratique que sur le béton. Le dosage en superplastifiant adopté pour le béton est celui optimisé sur mortier pour les trois compositions du BAP (1,80%). Le dosage en ciment et en granulats est calculé à l'aide d'un programme excel (Annexe B), avec un rapport E/P constant qui est égal à 0,40.

Les résultats d'ouvrabilité obtenus pour les trois BAP sont regroupés dans le tableau 4.4.

**Tableau 4-3 : Composition des BAP sans ajouts**

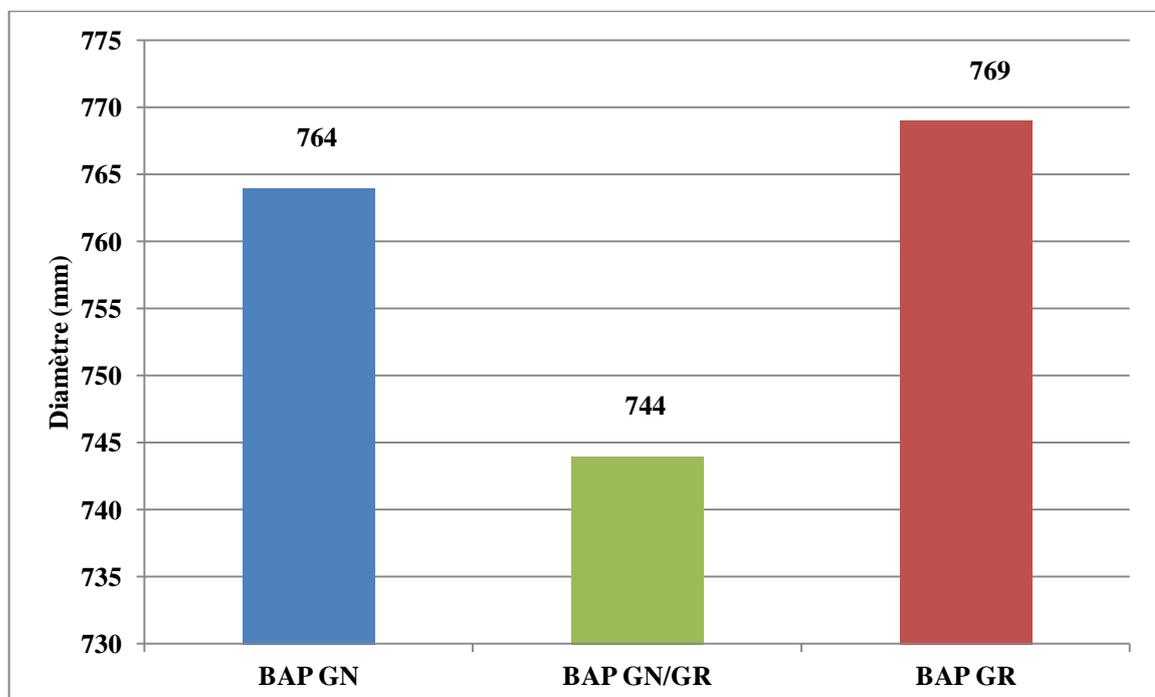
	BAP GN sans ajout	BAP GR sans ajout	BAP GN/GR sans ajout	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	494	494	494	
<b>Gravier 8/15 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	490	420	244,4	203,2
<b>Gravier 3/8 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	245	210	122	103,2
<b>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</b>	921	823	462,8	402
<b>Laitier ou Pouzzolane (kg/m<sup>3</sup>)</b>	/	/	/	
<b>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</b>	198	197	197,5	
<b>Superplastifiant (kg/m<sup>3</sup>)</b>	8,89	8,88	8,88	

**Tableau 4-4** : Résultats d'ouvrabilité des trois compositions de BAP sans ajouts

	<b>BAP GN sans ajouts</b>	<b>BAP GR sans ajout</b>	<b>BAP GR/GN sans ajouts</b>	<b>Exigence</b>
<b>Etalement D (mm)</b>	764	769	744	660-850 mm
<b>T<sub>50</sub> (sec)</b>	2,67	3,29	3.23	
<b>T<sub>v</sub> (Vfunnel) (sec)</b>	9,7	11,00	9.7	5 sec <T <sub>50</sub> < 12 sec
<b>U-Box</b>	0,85	0,43	0.31	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,85
<b>L-Box</b>	T <sub>20</sub> = 2,91	T <sub>20</sub> = 2,2	T <sub>20</sub> = 1,67	T <sub>20</sub> < 1,5 sec
	T <sub>40</sub> = 7,10	T <sub>40</sub> = 5,20	T <sub>40</sub> = 3,94	T <sub>40</sub> < 3,5 sec
	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,63	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,95	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,98	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,80
<b>JRing</b>	T <sub>50</sub> = 3,46 sec	T <sub>50</sub> = 5 sec	T <sub>50</sub> = 7,9 sec	
	D = 684 mm	D = 691 mm	D = 642 mm	660-850
	B <sub>j</sub> = 1,8 cm	B <sub>j</sub> = 2,175 cm	B <sub>j</sub> = 2.9 cm	B <sub>j</sub> < 1 cm

#### 4.3.1) Etalement au cône d'Abrams

Cet essai nous permet de tester la déformation du béton sous l'effet de son poids propre au milieu libre. La figure 4.4 présente les diamètres d'étalement au cône d'Abrams pour les différents BAP. L'étalement des trois BAP étudiés est conforme aux limites exigées par les normes.

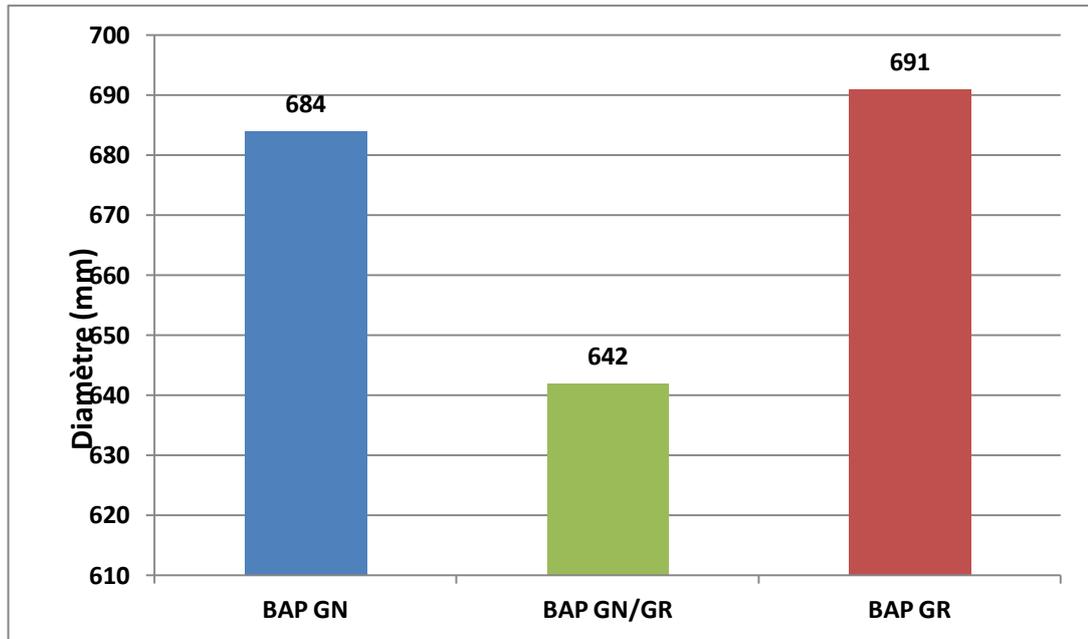
**Figure 4-4** : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams des BAP sans ajouts.

Le diamètre d'étalement du BAP à base de 100% granulats recyclés est supérieur par rapport aux diamètres de BAP GN ainsi qu'au BAP à base de 50% granulats recyclés. TU et al [71] ont obtenu un étalement au cône d'un BHP à base de 100% granulats recyclés supérieur à celui d'un BHP à base de fines naturelles et gravier recyclés, avec une perte d'ouvrabilité rapide. Dans notre cas, on a aussi remarqué un durcissement rapide de BAP GR ainsi qu'un ressuage visible après quelques minutes (Figure 4.5). KHATIB [72] a trouvé que l'affaissement au cône d'un béton ordinaire augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats recyclés dans le mélange. Par contre, YONG et TEO [82] ont trouvé que la substitution de 50 et 100% de granulats naturels par les recyclés diminue l'affaissement du BO. D'autre part, GRDIC et al [69] ont remarqué que le diamètre d'étalement des BAP à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés sont très comparable (735, 725 et 735) mm.

Le temps d'écoulement  $T_{50}$  pour les trois bétons est inférieur à la limite maximale tolérée de 5 secondes pour les BAP. On remarque aussi que le BAP à base de granulats naturels représente le  $T_{50}$  le plus petit 2,67 secondes suivi de BAP (GN/GR) et le BAP (GR) avec un  $T_{50}$  égal à 3,23 et 3,29 secondes respectivement. GRDIC et al [69] ont trouvé un  $T_{50}$  qui dépasse les 5 secondes pour les trois types des bétons, mais les valeurs restent très comparables.

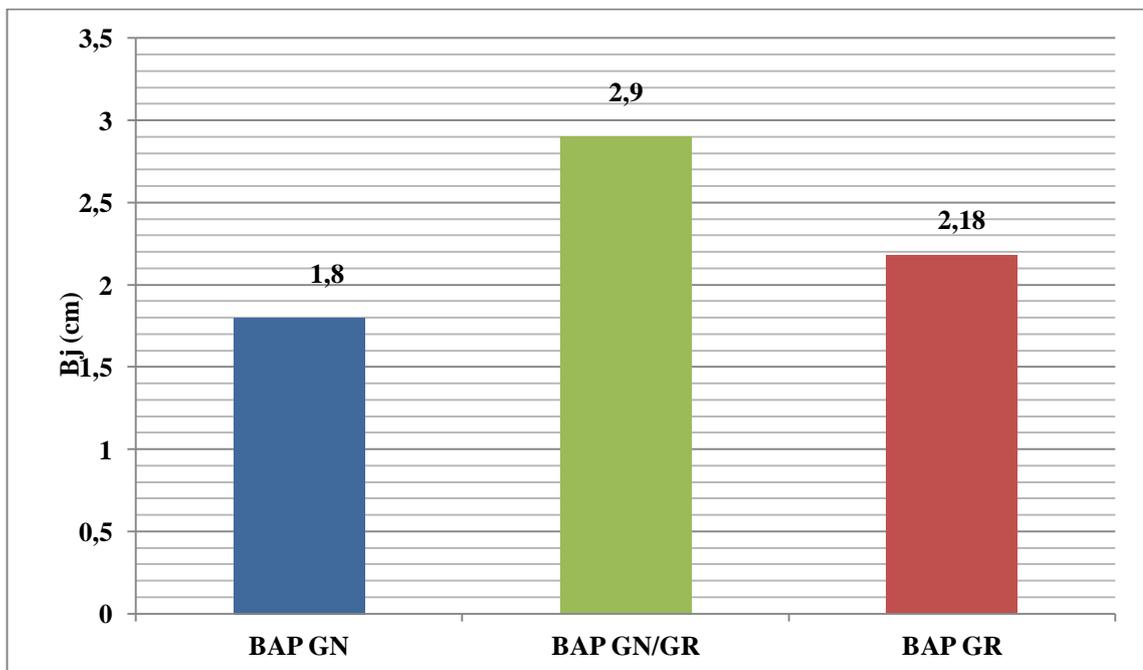
#### 4-3-2) Etalement à la couronne (J-Ring test)

L'essai d'étalement au J-ring permet de tester la capacité de passage et de remplissage du BAP ainsi que le blocage [83] et il peut être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation. La figure 4.5 présente l'étalement au J-Ring des trois BAP étudiés. L'étalement au J-Ring obtenu pour les trois bétons est dans la limite d'un bon BAP (660 à 850 mm). Le BAP à base de 100% granulats recyclés présente toujours l'étalement le plus élevé.



**Figure 4-5:** Diamètre d'étalement au cône d'Abrams et au J-Ring de BAP sans ajouts.

On constate d'après la figure 4.6 que la différence de hauteurs  $B_j$  dépasse pour les trois bétons étudiés la limite maximale de 1,00 cm. Le BAP (GN/GR) et le BAP (GR) présentent une différence de hauteurs  $B_j$  au J-Ring plus important que le BAP (GN). C'est peut être la raison pour la quelle le  $T_{50j}$  est plus élevé dans le BAP (GN/GR) 7,90 sec, BAP (GR) 5,00 sec et BAP (GN) avec 3,46 sec.

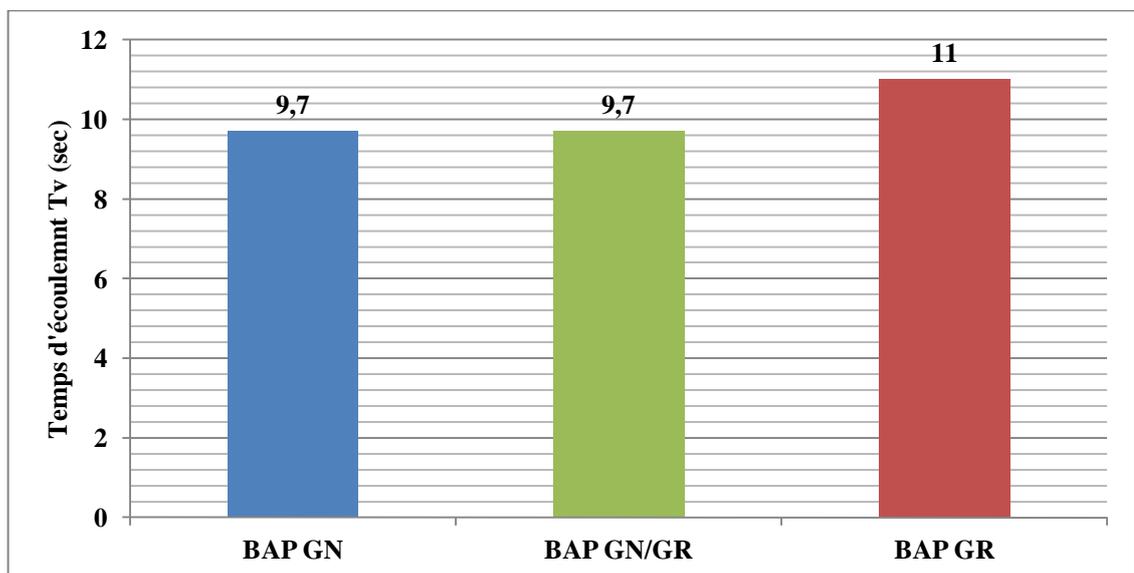


**Figure 4-6 :** Différence de hauteurs  $B_j$  au J-Ring de BAP sans ajouts.

L'augmentation de l'étalement au cône d'Abrams et au J-Ring pour de BAP à base de 100% granulats recyclés peut être expliquée par la quantité élevée des fines provenant de l'ancienne pâte de ciment recouvrant les granulats recyclés. KOU et POON [77] ont trouvé que l'étalement du BAP augmente avec l'augmentation de la quantité des fines recyclés. Il faut noter aussi que La forme des granulats est parmi les paramètres influençant l'ouvrabilité. Les granulats recyclés ont une forme presque sphérique, ce qui améliore l'ouvrabilité, contrairement aux granulats naturels qui ont une forme anguleuse.

#### 4-3-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

Cet essai permet d'évaluer la capacité du passage du béton au milieu confiné et il nous donnera une idée sur la ségrégation. La figure 4.7 donne les valeurs du temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour les trois compositions du béton. Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V reste comparable pour les trois compositions, sans blocage à signaler au niveau de l'orifice. Donc, on peut dire que la viscosité des BAP étudiés est plus au moins identique. Les trois valeurs de  $T_v$  restent inférieures à la limite maximale qui est égale à 12 secondes.



**Figure 4-7 :** Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP sans ajout.

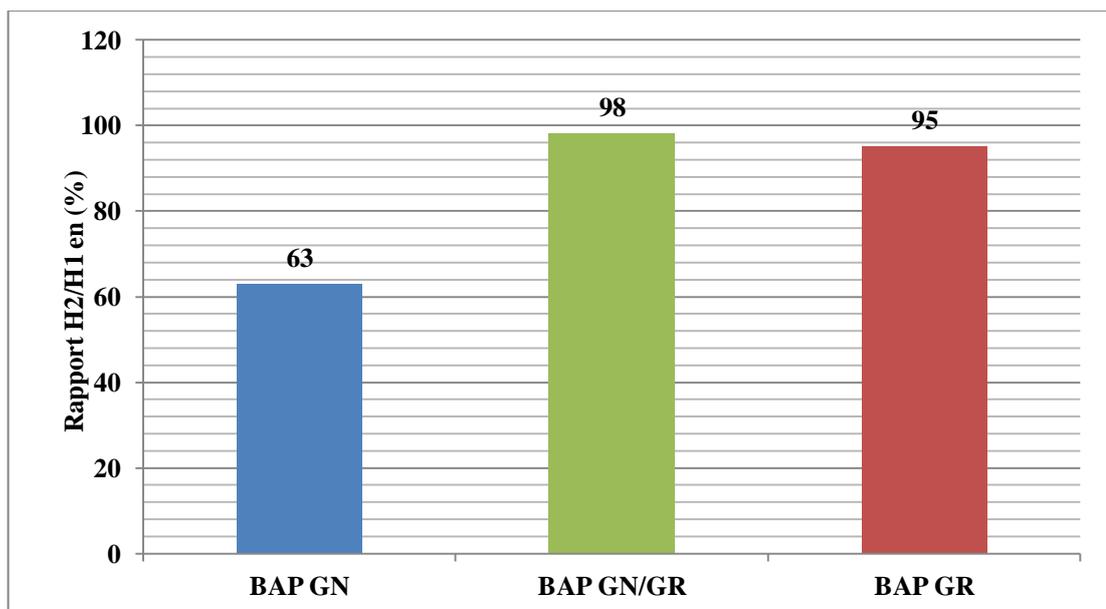
#### 4-3-4) Essai à la boîte en L (L-Box test)

La figure 4.8 représente le rapport  $H_2/H_1$  mesuré à partir de l'essai à la boîte en L. Cet essai permet de mesurer l'aptitude du béton à traverser une zone ferrillée, et il permet aussi de tester la capacité de remplissage.

On a observé que le rapport  $H_2/H_1$  ne dépasse pas 65% pour le BAP (GN) avec un léger blocage au niveau des armatures. Par contre, le rapport est très élevé pour les BAP (GR) et BAP (GN/GR), 95% et 98%, respectivement et sans présence de blocage. Des résultats similaires ont été rapportés par GRDIC et al [69], avec un taux de remplissage de 94% pour un BAP à base de granulats naturels et un taux de 95% et 98% pour le BAP à base de 50% et 100% de granulats recyclés.

Le temps d'écoulement ( $T_{20}$ ) dépasse la limite maximale recommandée (1,50 seconde). On a trouvé un  $T_{20}$  égal à 2,91 sec, 2,20 sec et 1,67 sec pour le BAP GN, GR et GN/GR respectivement. Une tendance similaire a été observée pour le  $T_{40}$  où les valeurs dépassent toujours la limite maximale (3,50 secondes). 7,10 secondes pour le BAP GN, 5,20 pour le BAP (GR) secondes et 3,94 secondes pour le BAP (GN/GR). On peut conclure que le BAP à base de granulats naturels est plus visqueux.

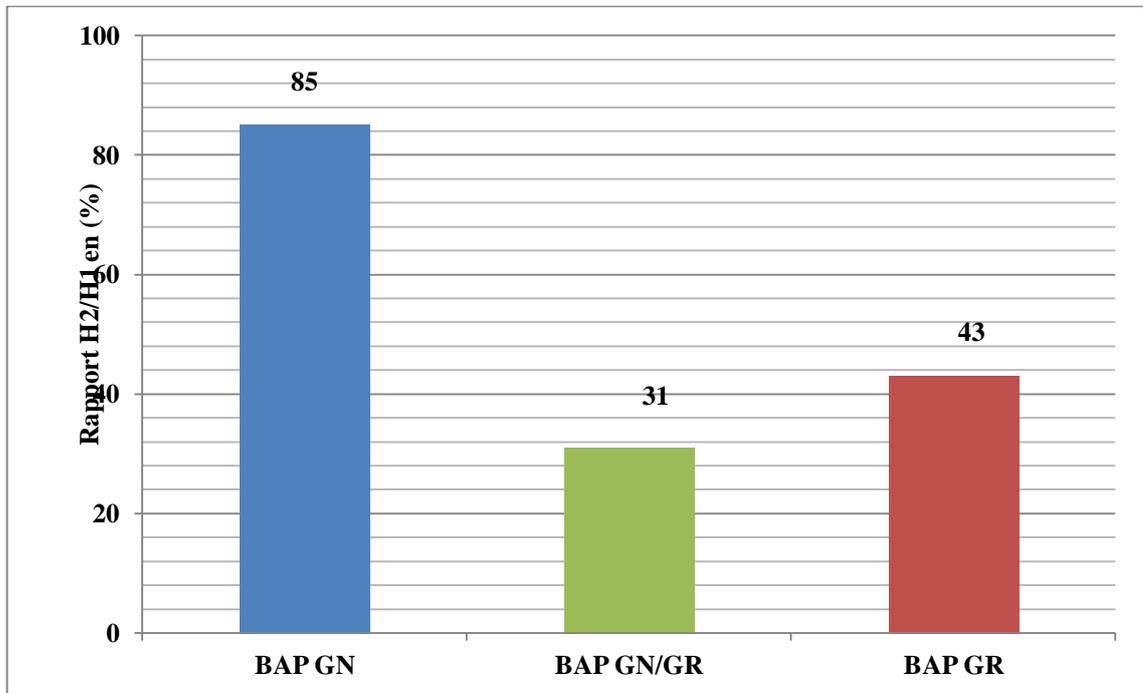
Donc, le BAP à base de 50% et 100% de granulats recyclés dépasse la limite minimale exigée par les normes qui est égale à 85%, contrairement au BAP à base de granulats naturels. Cette capacité élevée de passage et de remplissage du BAP à base de granulats recyclés est peut être due au changement de la granulométrie des granulats lors de malaxage. CORINALDES et al [84] ont montré en termes d'étalement et L-Box que le BAP à base de granulats recyclés a un comportement satisfaisant.



**Figure 4-8 :** Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP sans ajouts.

#### 4-3-5) Essai à la boîte en U (U-Box test)

L'essai à la boîte en U permet de tester le taux de remplissage du béton par la mesure du rapport  $H_2/H_1$  ainsi que la capacité du passage à travers les armatures. La figure 4.9 présente le taux de remplissage pour les trois BAP étudiés.



**Figure 4-9 :** Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en U de BAP sans ajouts.

On remarque que la capacité de remplissage n'a pas dépassée les 43% pour le BAP à base de 100% de granulats recyclé et les 31% pour le BAP (GN/GR), par contre elle a atteint les 85% pour le BAP de référence. Le taux de remplissage du BAP (GR) et (GN/GR) est inférieur de la limite donnée par les normes (80%).

#### 4.4) EFFET DES AJOUTS SUR L'ETAT FRAIS DU BAP A BASE DE 100% GRANULATS NATURELS

Dans cette partie, on substituera 15% du poids de ciment par du laitier ou de la pouzzolane naturelle afin de connaître l'effet de ces ajouts sur le comportement du béton à l'état frais. Les compositions des trois BAP sont représentées dans le tableau 4.5.

**Tableau4-5** : Composition des BAP à base de granulats naturels sans et avec ajouts

	<b>BAP GN sans ajout</b>	<b>BAP GN 15% laitier</b>	<b>BAP GN 15% pouzzolane</b>
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	494	422	422
<b>Gravier 8/15 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	490	490	490
<b>Gravier 3/8 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	245	245	245
<b>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</b>	921	921	921
<b>Laitier ou Pouzzolane (kg/m<sup>3</sup>)</b>	/	70	69
<b>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</b>	198	197	197
<b>Superplastifiant (kg/m<sup>3</sup>)</b>	8,89	8,86	8,84

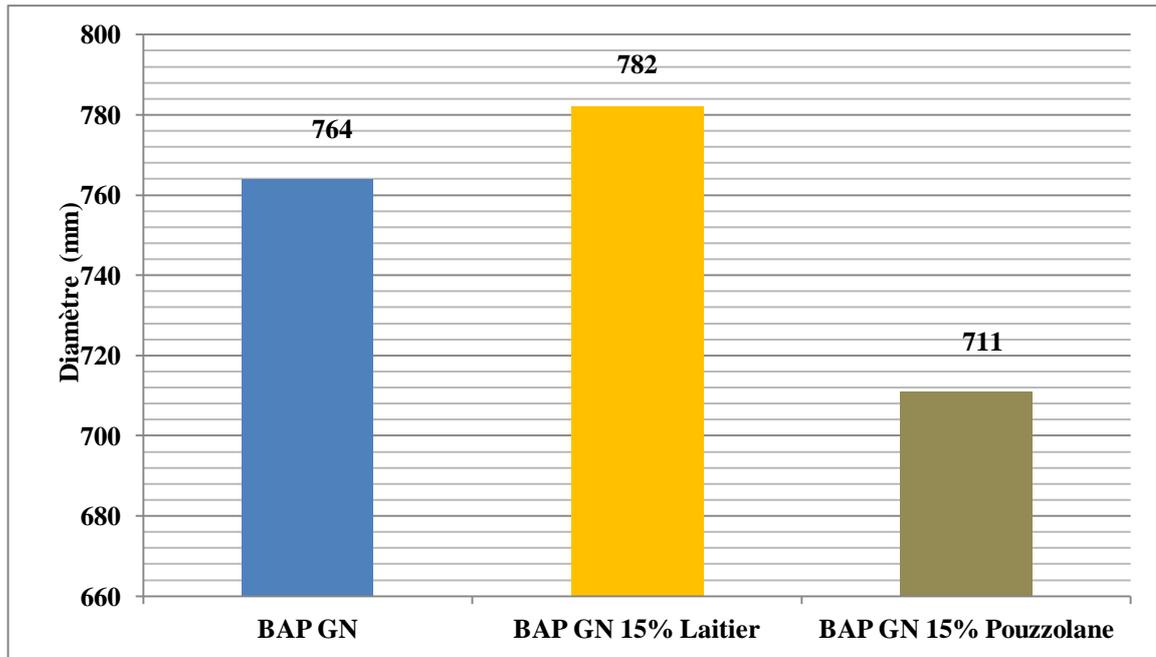
Les essais réalisés à l'état frais pour les compositions citées ci dessus ont donné les résultats regroupés dans le tableau 4.6 :

**Tableau 4-6** : Résultats des BAP à base de granulats naturels sans et avec ajouts

	<b>BAP Référence sans ajouts</b>	<b>BAP Référence 15% Laitier</b>	<b>BAP Référence 15% Pouzzolane</b>	<b>Exigence</b>
<b>Etalement D (mm)</b>	764	782	711	660-850 mm
<b>T<sub>50</sub> (sec)</b>	2,67	1,98	3,35	
<b>T<sub>v</sub> (V-Funnel) (sec)</b>	9,7	6,85	12,8	5 sec < T <sub>50</sub> < 12 sec
<b>U-Box</b>	0,85	0,94	0,82	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,85
<b>L-Box</b>	T <sub>20</sub> = 2,91	T <sub>20</sub> = 1,71	T <sub>20</sub> = 1,42	T <sub>20</sub> < 1,5 sec
	T <sub>40</sub> = 7,10	T <sub>40</sub> = 2,78	T <sub>40</sub> = 2,12	T <sub>40</sub> < 3,5 sec
	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,63	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,83	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,60	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,80
<b>J-Ring</b>	T <sub>50</sub> = 3,46 sec	T <sub>50</sub> = 2,53 sec	T <sub>50</sub> = 4,15 sec	
	D = 684 mm	D = 744 mm	D = 607 mm	660-850
	B <sub>j</sub> = 1,8 cm	B <sub>j</sub> = 0,98 cm	B <sub>j</sub> = 2,1 cm	B <sub>j</sub> < 1 cm

#### 4-4-1) Etalement au cône d'Abrams

Comme une première remarque en observant les histogrammes indiquant l'étalement, (figure 4.10), on constate que les trois BAP (GN, GN 15% Laitier et GN 15% Pouzzolane), répondent aux exigences données par les normes.



**Figure 4-10** : Diamètre d'étalement au cône d'Abrams des BAP (GN) avec et sans ajouts.

Le BAP GN à base de 15% du laitier donne l'étalement le plus élevé (782 mm), suivi de BAP GN sans ajout et du BAP GN avec 15% de pouzzolane (764 et 711 mm) respectivement. BOUKENDAKDJI [11] a trouvé qu'un BAP avec 15% du laitier présente un étalement élevé par rapport à un BAP sans ajout.

NECIRA et al [85] ont montré que la substitution de 15% du ciment par le laitier donne un étalement qui ne dépasse pas les 625 mm. KHAYAT [86] a montré que l'utilisation du laitier avec les fumées de silice dans la composition du BAP donne un étalement de 630 à 660 mm pour un rapport E/C de 0,35 et 0,41 respectivement. D'autre part, TOMASIELLO et FELITTI [87] ont substitués la fraction granulaire (4-8) mm par le laitier combiné avec les fillers de calcaire et ont montrés que ceci engendre une augmentation du diamètre d'étalement (dépasse les 700 mm) en comparaison avec les BAP à base de gravier naturel et avec les fillers de calcaire seuls.

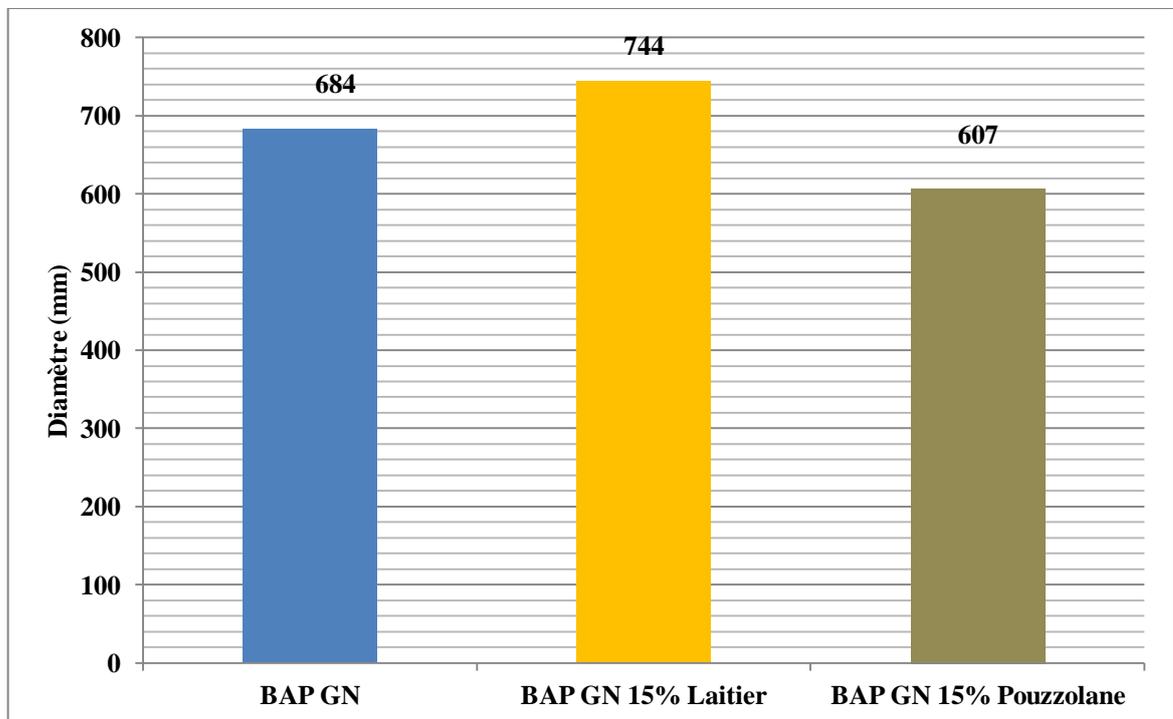
Par contre, BOUDCHICHA [88], a constaté que l'affaissement du béton à base du laitier augmente jusqu'à un taux de 10% de substitution du ciment et commence à diminuer au-delà de cette valeur. L'étalement d'un mortier et béton à base de la pouzzolane croit avec 10% de substitution de ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange.

Les BAP sont caractérisés par un volume élevé de pâte et l'addition de la pouzzolane augmente la porosité de cette pâte et par conséquent son besoin en eau et cela peut être expliqué la chute de l'ouvrabilité du BAP à base de la pouzzolane naturelle [89,90]. Par contre, ARYA et al [91] ont montré que les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité.

Le temps d'écoulement  $T_{50}$  dans ce cas est inversement proportionnel à l'étalement. On a remarqué que  $T_{50}$  du BAP (GN) à base de 15% de la pouzzolane est le plus élevé (3,35 secondes), donc on peut dire que c'est le BAP le plus visqueux. Par contre, le BAP (GN) à base de 15% du laitier présente le temps d'écoulement  $T_{50}$  le plus bas (1,98 seconde) suivi de BAP (GN) avec (2,67 seconde).

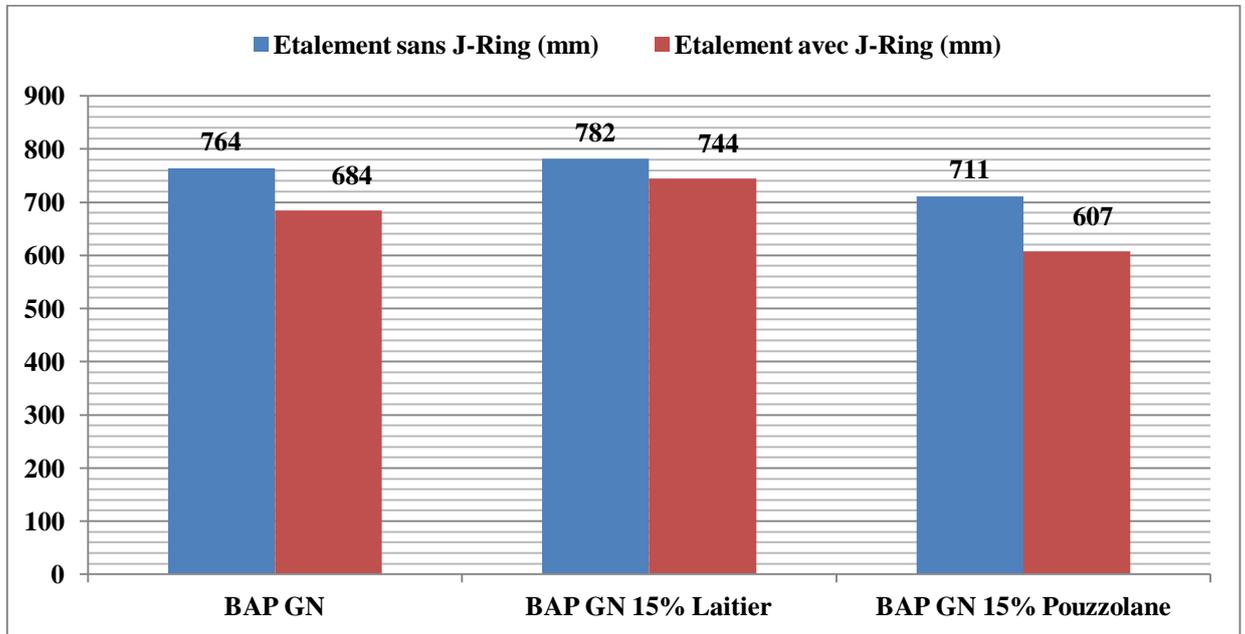
#### 4-4-2) Etalement à la couronne (J-Ring test)

La figure 4.11 présente l'étalement au J-Ring. On a observé que l'étalement du BAP (GN) avec 15% du laitier reste toujours le plus élevé et le BAP (GN) à base de 15% de la pouzzolane reste le plus faible par rapport au BAP (GN) sans ajout. Le temps d'écoulement au J-Ring  $T_{50J}$  est de 2,53 secondes pour le BAP au laitier et de 3,46 et 4,15 secondes pour le BAP sans ajout et le BAP avec la pouzzolane respectivement.

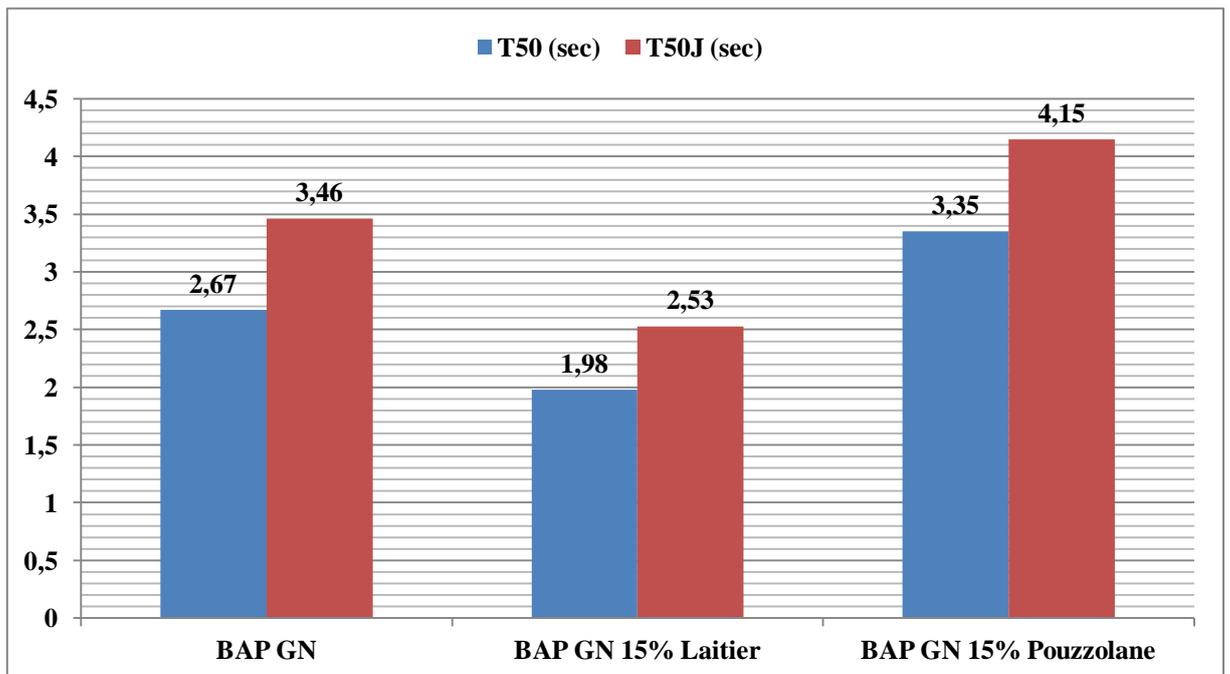


**Figure 4-11 :** Diamètre d'étalement à la couronne J-Ring de BAP (GN) sans et avec ajout.

En comparant l'étalement avec et sans le J-Ring ainsi que les temps d'écoulement  $T_{50}$  et  $T_{50J}$  on constate que l'étalement sans le J-Ring est supérieur à l'étalement avec J-Ring et le  $T_{50}$  est inférieur au  $T_{50J}$  (Figure 4.12 et 4.13). Des résultats semblables ont été rapportés par BOUKENDAKDJI [11] et TOMASIELLO et FELILLI [87].

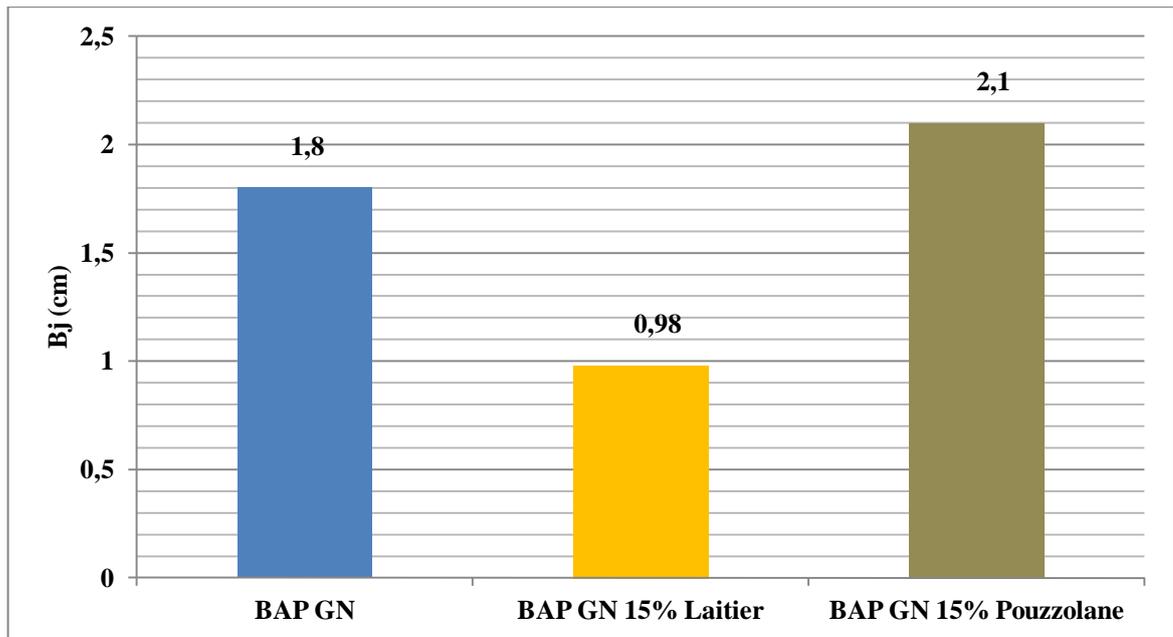


**Figure 4-12 :** Comparaison entre le diamètre d'étalement avec et sans le J-Ring de BAP (GN) sans et avec ajouts.



**Figure 4-13 :** Comparaison entre le  $T_{50}$  et le  $T_{50J}$  de BAP (GN) avec et sans ajouts.

La figure 4.14 présente la différence de hauteurs  $B_j$  calculée à l'intérieur et à l'extérieure de la couronne de J-Ring. Plus le  $B_j$  est élevée plus la ségrégation dans le mélange est importante. Les valeurs de  $B_j$  pour le BAP (GN) sans ajout et avec 15% de la pouzzolane dépassent la limite maximal d'un bon BAP et un blocage est observé au milieu de la couronne (Figure 4.15). Par contre, le BAP (GN) à base du laitier vérifie cette condition avec une différence de hauteurs égale à 0,98 cm.



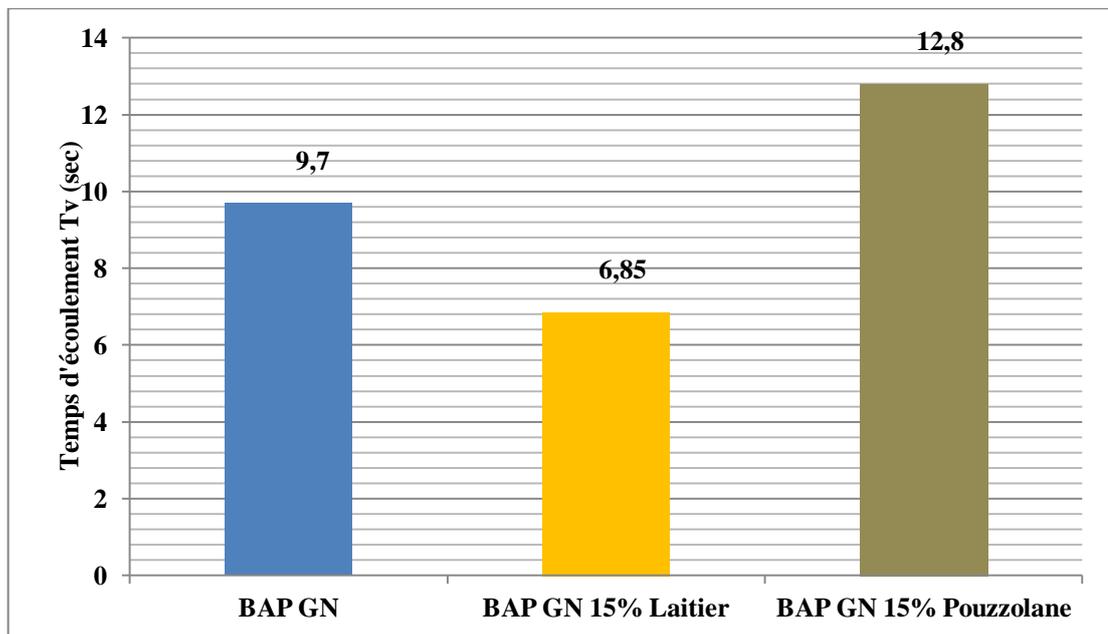
**Figure 4-14** : Différence de hauteurs  $B_j$  de BAP (GN) avec et sans ajouts.



**Figure 4-15** : Blocage au milieu de la couronne de BAP (GN) avec ajouts.

#### 4-4-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V- funnel test)

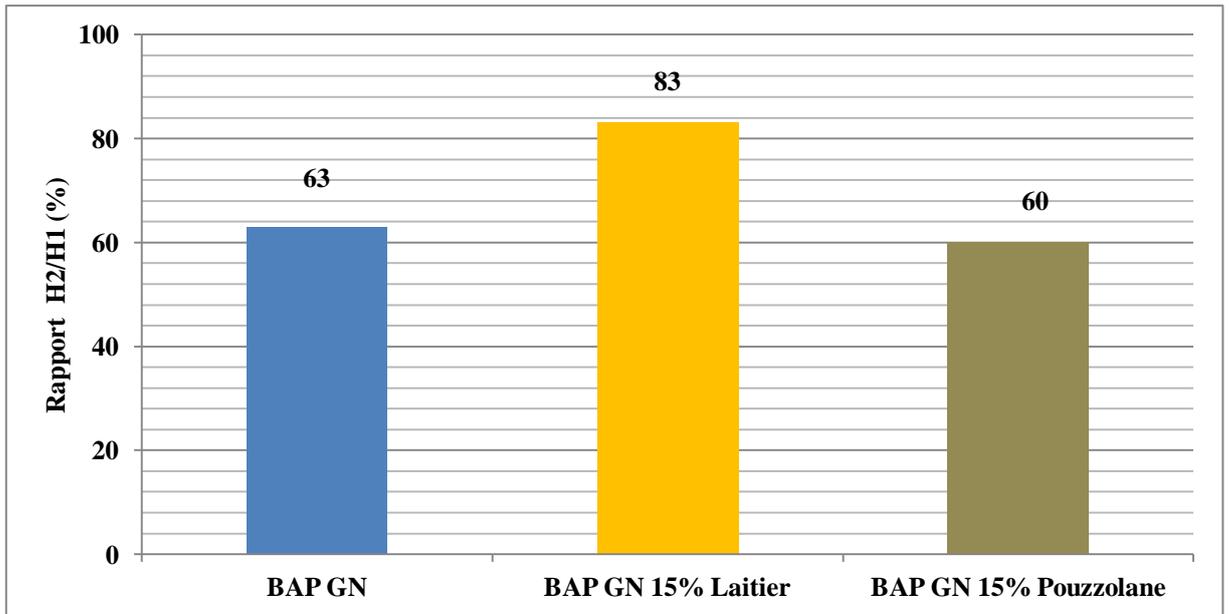
Les résultats obtenus de l'essai à l'entonnoir en V sont présentés dans la figure 4.16. On remarque que le temps d'écoulement  $T_v$  du BAP (GN) avec 15% de la pouzzolane est supérieur à celui du BAP (GN) et du BAP (GN) avec 15% du laitier. Mais les valeurs restent acceptables pour les trois compositions. Le BAP (GN) avec 15% du laitier présente le  $T_v$  le plus bas, donc le BAP le moins visqueux. Selon PARK et al [92], la viscosité plastique diminue en fonction de l'augmentation de taux de substitution de ciment par l'addition de laitier.



**Figure 4-16 :** Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GN) avec et sans ajouts.

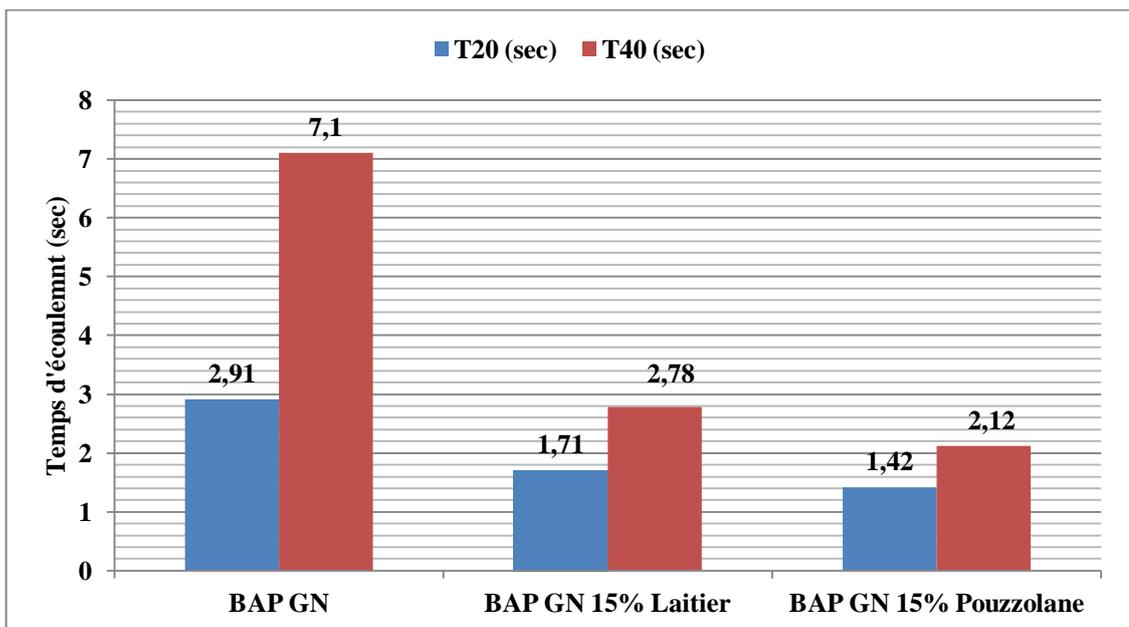
#### 4-4-4) Essai à la boîte en L (L-Box test)

Les résultats obtenus à l'essai de la boîte en L sont présentés dans la figure 4.17. L'essai à la boîte en L a donné un rapport de remplissage  $H_2/H_1$  qui ne dépasse pas les (63%) pour le BAP (GN) et le BAP (GN) avec 15% de pouzzolane, mais ce rapport est de 83% pour le BAP (GN) à base de 15% du laitier. Un léger blocage a été remarqué au niveau des armatures pour les trois compositions du BAP. Pour un pourcentage de 15% du laitier NECIRA et al [85] et SONEBI et BARTOS [30] ont obtenu un rapport  $H_2/H_1$  égal à 78% et 80% respectivement.



**Figure 4-17 :** Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP (GN) avec et sans ajouts.

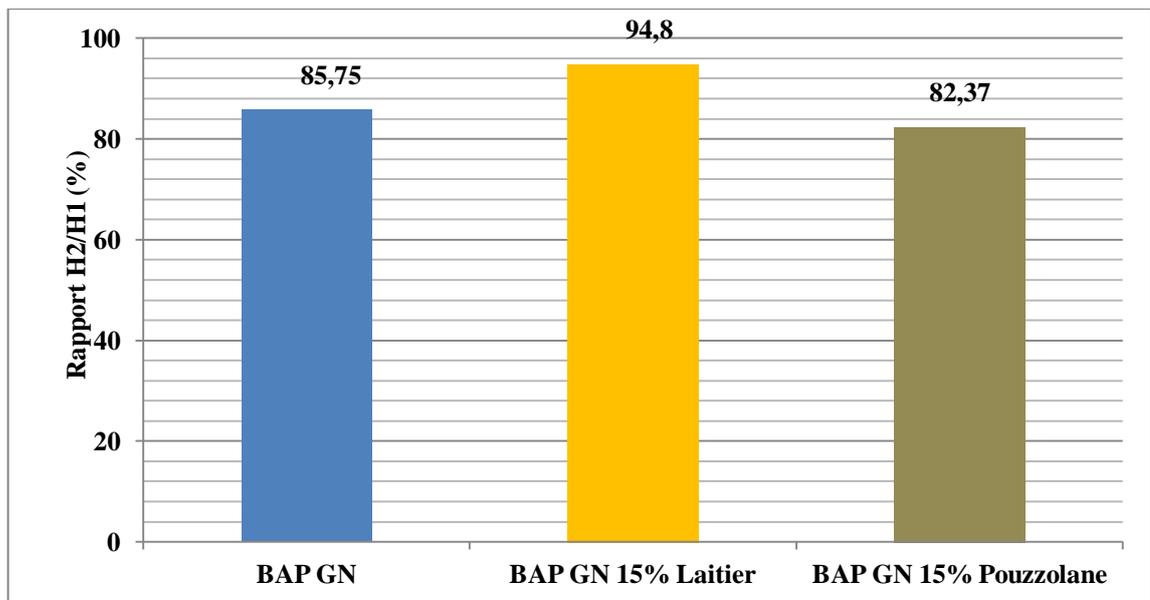
La figure 4.18 présente les valeurs du temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  mesurés à l'essai de la boîte en L. Le temps d'écoulement  $T_{20}$  est vérifié seulement pour le BAP (GN) avec 15% de la pouzzolane, où il n'a pas dépassé 1,50 seconde exigée, et il est inférieur par rapport au temps d'écoulement de BAP (GN) sans ajout et BAP (GN) avec 15% du laitier. Les valeurs de  $T_{40}$  sont vérifiées pour les deux BAP avec 15% du laitier et 15% de la pouzzolane mais pas pour le BAP (GN) sans ajout où la valeur du  $T_{40}$  dépasse les 3,50 secondes.



**Figure 4-18 :** Temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  de BAP (GN) avec et sans ajouts.

#### 4-4-5) Essai à la boîte en U (U-Box test)

Le taux de remplissage à l'U-Box est présenté dans la figure 4.19. On remarque que le pourcentage dépasse les 85% qui est la limite exigée par les recommandations, pour les trois bétons, elle est plus importante pour le BAP avec 15% du laitier (94%) et moins pour le BAP GN et BAP GN 15% pouzzolane (85%) et (82%) respectivement, mais les résultats sont très comparable.



**Figure 4-19 :** Rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> de l'essai à la boîte en U de BAP (GN) avec et sans ajouts.

L'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment. L'amélioration de l'ouvrabilité du BAP à 15% du laitier est peut être due à la réaction d'hydratation retardé par la présence de ce dernier. Car le laitier ne contribue pas aux réactions d'hydratation au jeune âge [93].

#### 4-5) EFFET DES AJOUTS SUR L'ETAT FRAIS DU BAP A BASE DE 50% GRANULATS NATURELS ET 50% GRANULATS RECYCLES

Dans cette partie, on a substitué 50% de granulats naturels par des granulats recyclés (gravier et sable) dans le béton autoplaçant, ainsi que 15% du poids du ciment par le laitier ou la pouzzolane naturelle afin de pouvoir étudier l'effet de ces ajouts sur les performances du BAP à base de 50% granulats recyclés à l'état frais. Les compositions des BAP à 50% granulats recyclés et 50% granulats naturels sans et avec ajout sont regroupés dans le tableau 4.7.

**Tableau 4-7:** Compositions des BAP à base de 50% granulats naturels et de 50% granulats recyclés sans et avec ajouts.

	BAP GN/GR sans ajout		BAP GN/GR 15% Laitier		BAP GN/GR 15% Pouzzolane	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	494		422		422	
<b>Gravier 8/15 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	244,4	203,2	244,4	203,2	244,4	203,2
<b>Gravier 3/8 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	122	103,2	122	103,2	122	103,2
<b>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</b>	462,8	402	462,8	402	462,8	402
<b>Laitier ou Pouzzolane (kg/m<sup>3</sup>)</b>	/		70		69	
<b>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</b>	197,5		196,5		196,5	
<b>Superplastifiant (kg/m<sup>3</sup>)</b>	8,88		8,84		8,84	

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 4.8.

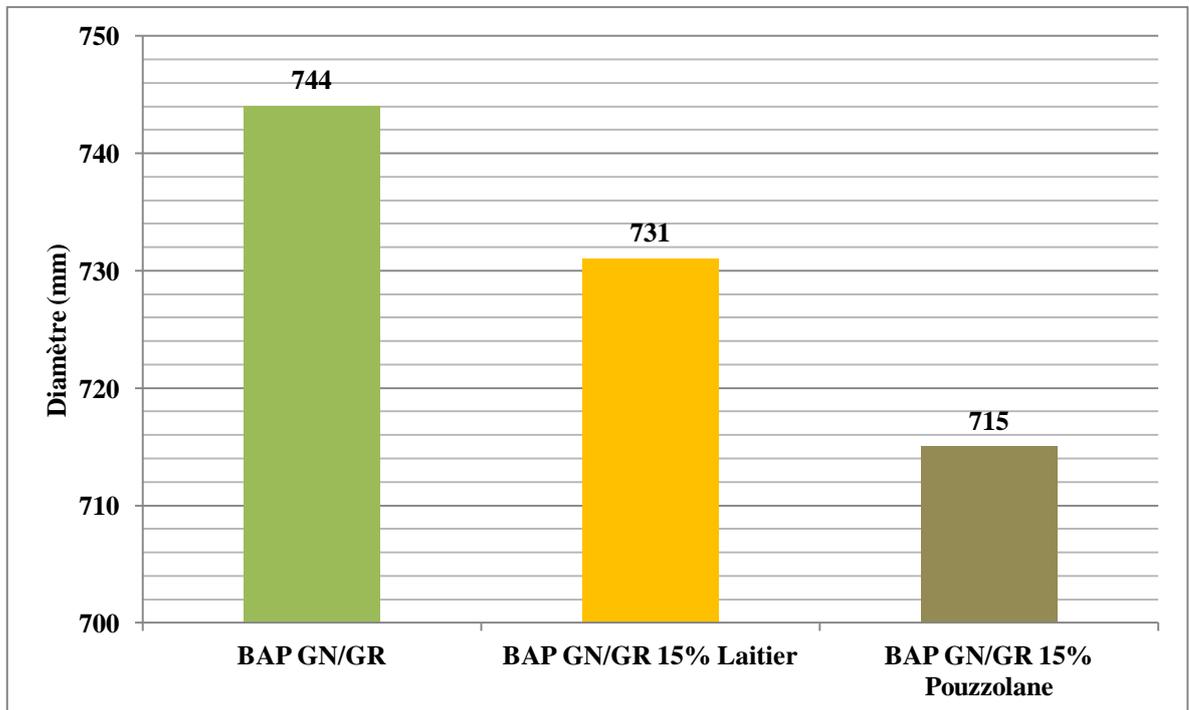
**Tableau 4-8 :** Résultats des BAP à base de 50% granulats naturels et de 50% granulats recyclés sans et avec ajouts.

	BAP GN/GR sans ajouts	BAP GR/GN 15% Laitier	BAP GR/GN 15% Pouzzolane	Exigence
<b>Etallement D (mm)</b>	744	731	715	660-850 mm
<b>T<sub>50</sub> (sec)</b>	3.23	5.5	5.20	
<b>T<sub>v</sub> (V-funnel) (sec)</b>	9,7	14,1	38,6	5 sec < T <sub>50</sub> < 12 sec
<b>U-Box</b>	0.31	1	0.53	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,85
<b>L-Box</b>	T <sub>20</sub> = 1,67	T <sub>20</sub> = 0,91	T <sub>20</sub> = 2,01	T <sub>20</sub> < 1,5 sec
	T <sub>40</sub> = 3,94	T <sub>40</sub> = 3,41	T <sub>40</sub> = 8,25	T <sub>40</sub> < 3,5 sec
	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,98	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,91	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,83	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,80
<b>J-Ring</b>	T <sub>50</sub> = 7,9 sec	T <sub>50</sub> = 5,9 sec	T <sub>50</sub> = 8,73 sec	
	D = 642 mm	D = 749 mm	D = 630 mm	660-850
	B <sub>j</sub> = 2,9 cm	B <sub>j</sub> = 1,15 cm	B <sub>j</sub> = 2,40 cm	B <sub>j</sub> < 1 cm

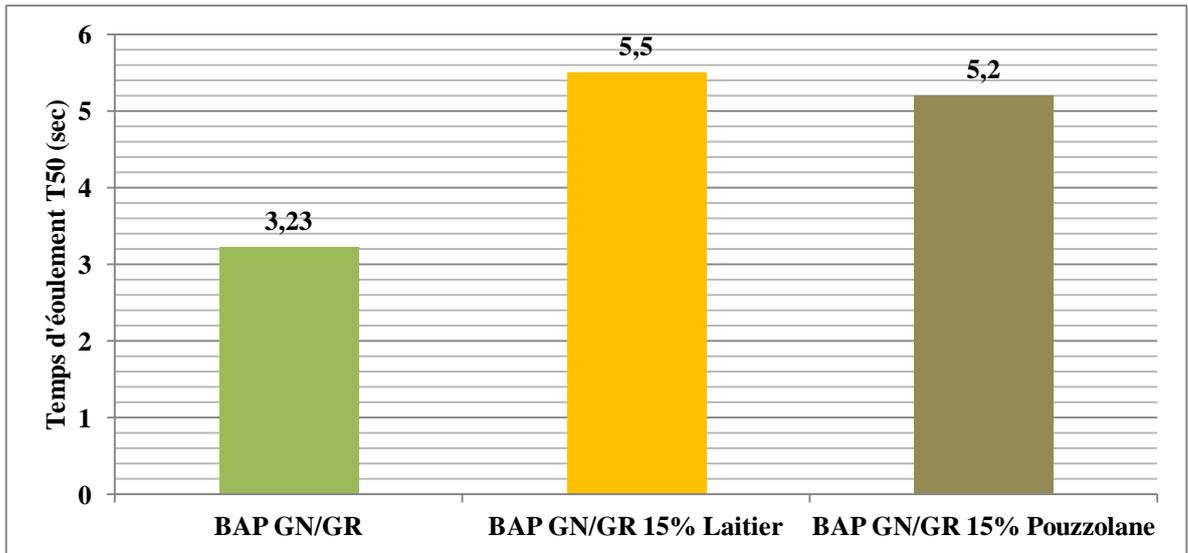
#### 4-5-1) Etalement au cône d'Abrams

La figure 4.20 indique le diamètre d'étalement au cône d'Abrams. On remarque une diminution de l'ouvrabilité pour les BAP (GN/GR) avec ajouts (laitier et pouzzolane), mais cette diminution reste toujours plus importante pour la pouzzolane que pour le laitier. Les valeurs restent acceptables et dépassent la limite minimale exigée de 660 mm. Un léger ressuage a été observé pour le BAP (GN/GR) sans et avec 15% du laitier accompagné d'un durcissement rapide, contrairement au BAP (GN/GR) avec de la pouzzolane qui a été plus homogène.

La figure 4.21 présente le temps d'écoulement  $T_{50}$  pour les trois BAP étudié. On a observé un temps d'écoulement élevé pour le BAP (GN/GR) à base du laitier et de la pouzzolane et qui dépasse les 5 secondes. Contrairement au temps d'écoulement du BAP (GN/GR) sans ajouts qui est égal à 3,23 secondes. On constate que le laitier et la pouzzolane augmentent la viscosité du BAP (GN/GR).



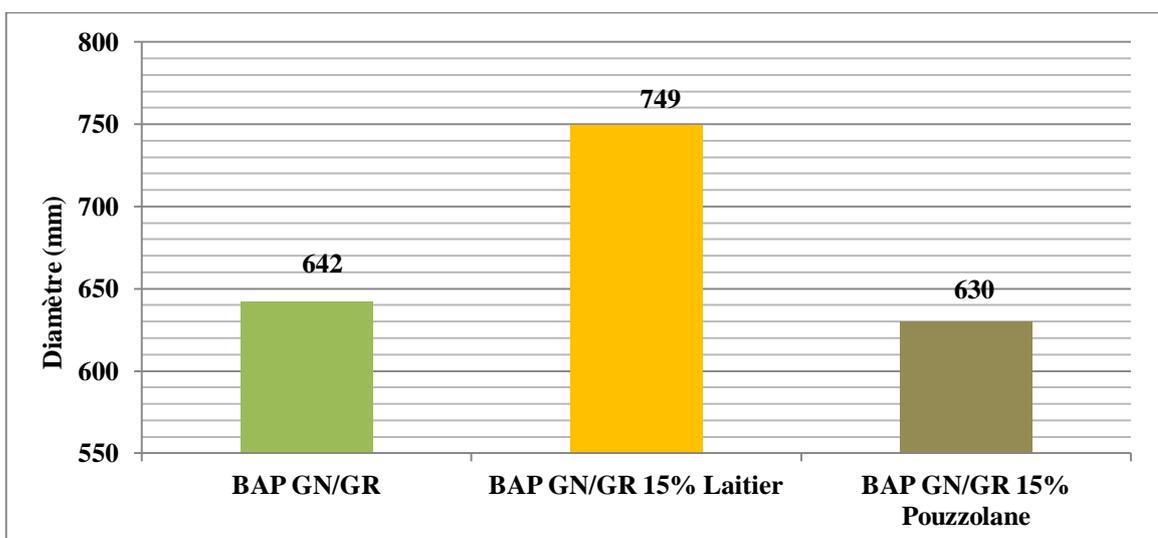
**Figure 4-20 :** Diamètre d'étalement au cône d'Abrams de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.



**Figure 4-21 :** Temps d'écoulement T<sub>50</sub> de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

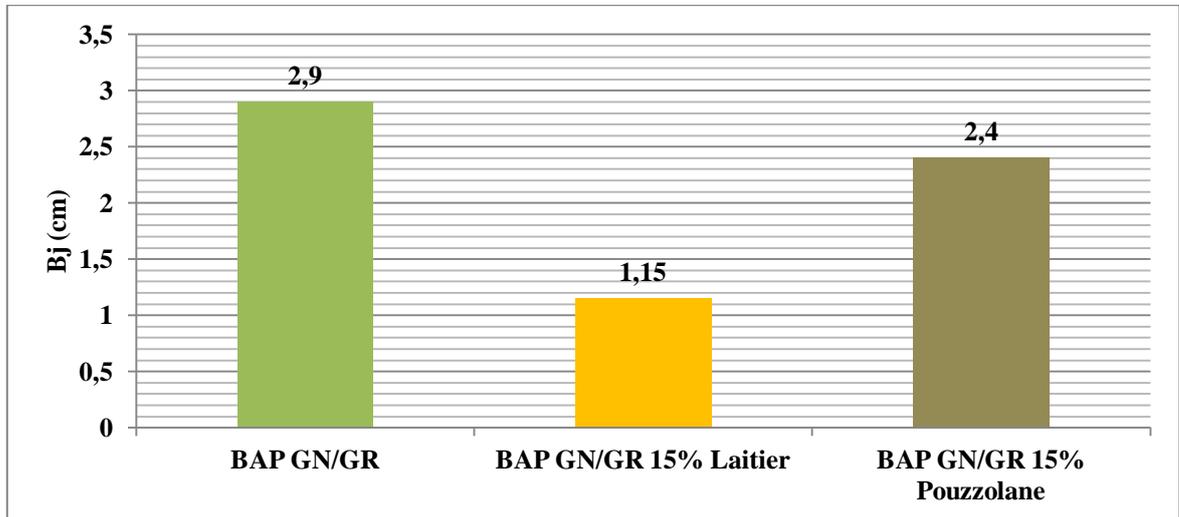
#### 4-5-2) Étalement à la couronne (J-Ring test)

La figure 4.22 présente les valeurs d'étalement à la couronne. On remarque un meilleur étalement pour le BAP (GN/GR) à base de laitier par rapport à celui de BAP (GN/GR) sans ajout ou avec 15% de pouzzolane, avec un diamètre qui dépasse les 745 mm, accompagné d'un léger blocage au milieu de l'anneau. Le temps d'écoulement au J-Ring T<sub>50J</sub> dépasse les 5 secondes pour les trois BAP étudiés. On mesure un T<sub>50J</sub> de 8,73 secondes pour le BAP (GN/GR) à base de 15% de pouzzolane, ce qui représente une valeur supérieure à celle du BAP (GN/GR) à base de 15% du laitier et du BAP (GN/GR) sans ajouts, (5,90 et 7,90) secondes respectivement.



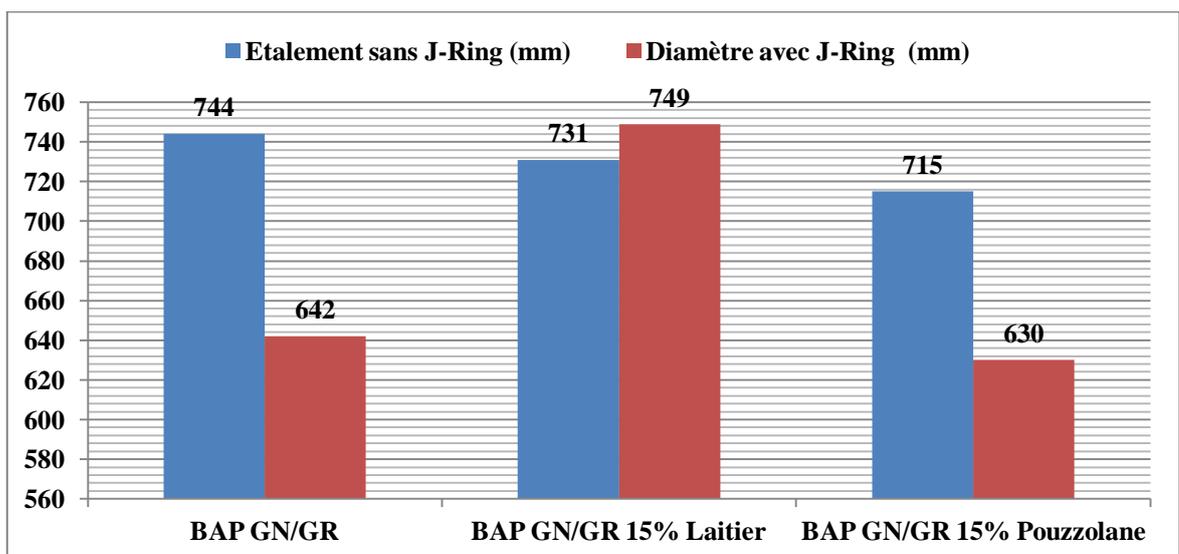
**Figure 4-22 :** Diamètre d'étalement au J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

On remarque que la différence de hauteurs  $B_j$  BAP (GN/GR) à base de laitier présente moins de blocage au milieu de la couronne que le BAP (GN/GR) sans ajout et le BAP (GN/GR) avec 15% de pouzzolane (Figure 4.23). L'étalement élevé du BAP à base du laitier peut être expliqué par la différence de hauteurs  $B_j$  la moins importante par rapport aux deux autres BAP ce qui signifie moins de blocage au milieu de la couronne.



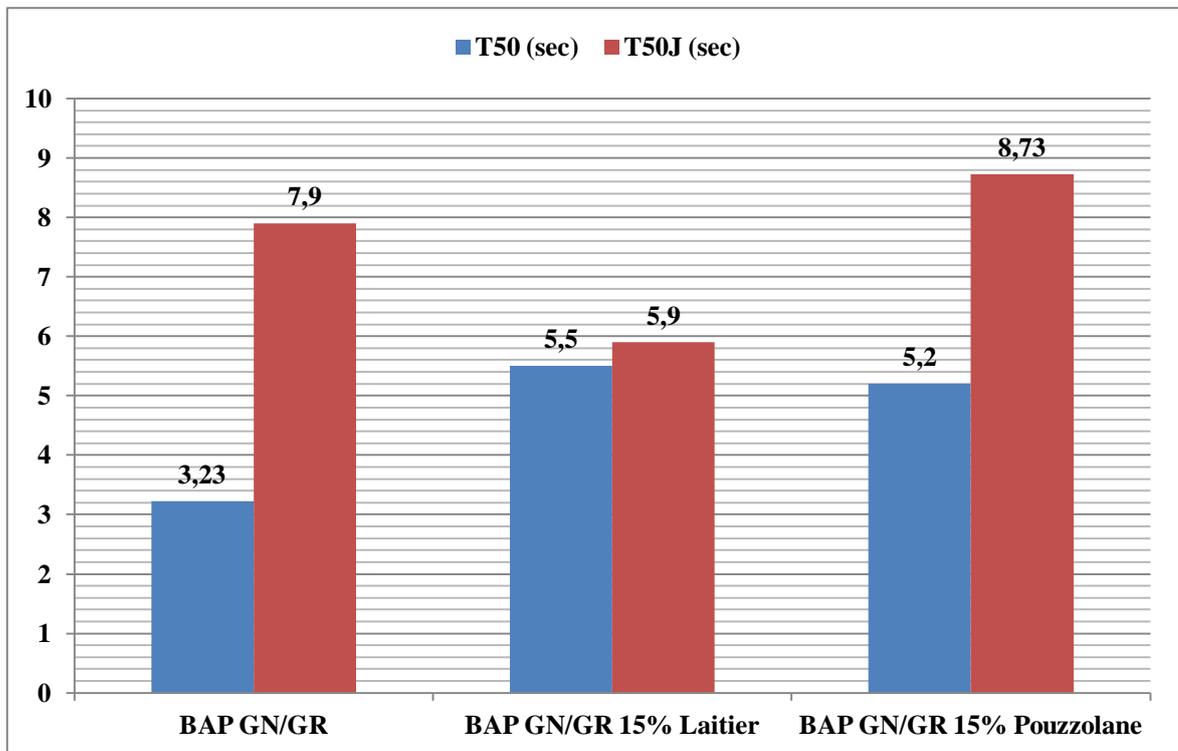
**Figure 4-23 :** Différence de hauteurs de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

La différence entre l'étalement sans et avec le J-Ring est présenté dans le figure 4.24. On remarque que l'étalement avec le J-Ring n'est pas forcément inférieur toujours à l'étalement sans le J-Ring. On observe un étalement avec le J-Ring du BAP (GN/GR) avec 15% du laitier supérieur à l'étalement sans le J-Ring.



**Figure 4-24 :** Différence entre l'étalement avec et sans le J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

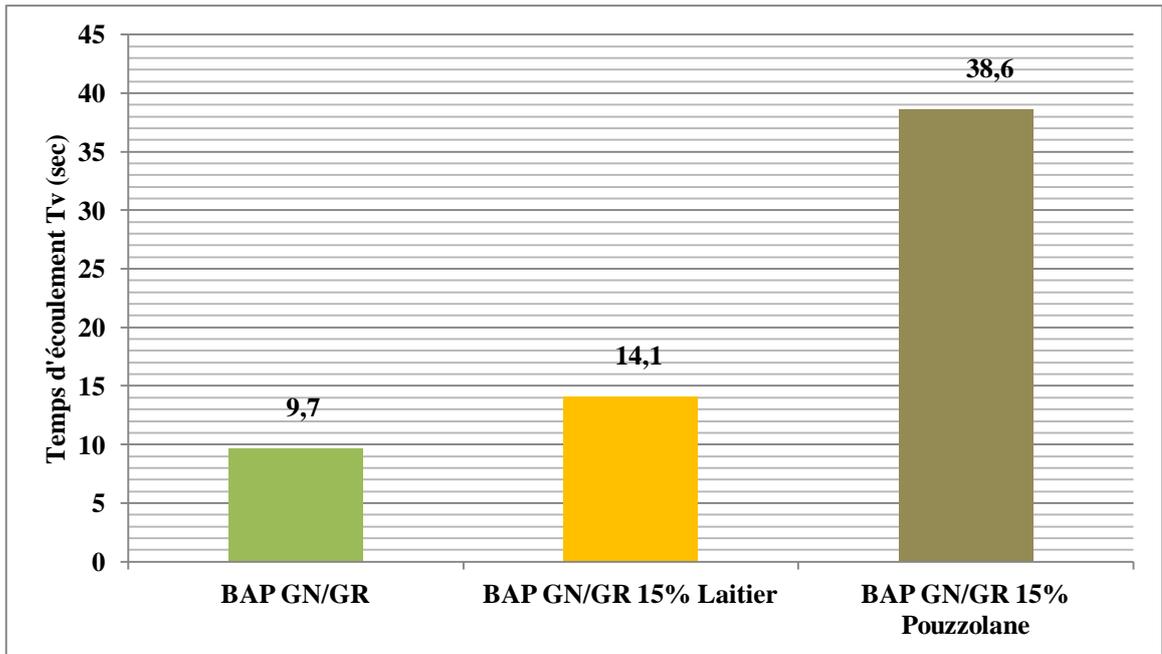
La comparaison entre le temps d'écoulement sans le J-Ring  $T_{50}$  et le temps d'écoulement avec le J-Ring  $T_{50J}$  (figure 4.25) pour les trois BAP étudiés, on montre que le  $T_{50J}$  est supérieur à  $T_{50}$ . Les valeurs de  $T_{50}$  et  $T_{50J}$  pour le BAP (GN/GR) avec 15% du laitier sont très comparables ( $T_{50}=5,50$  sec et  $T_{50J} = 5,90$  sec).



**Figure 4.25** : Différence entre le temps d'écoulement avec et sans le J-Ring de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

#### 4-5-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

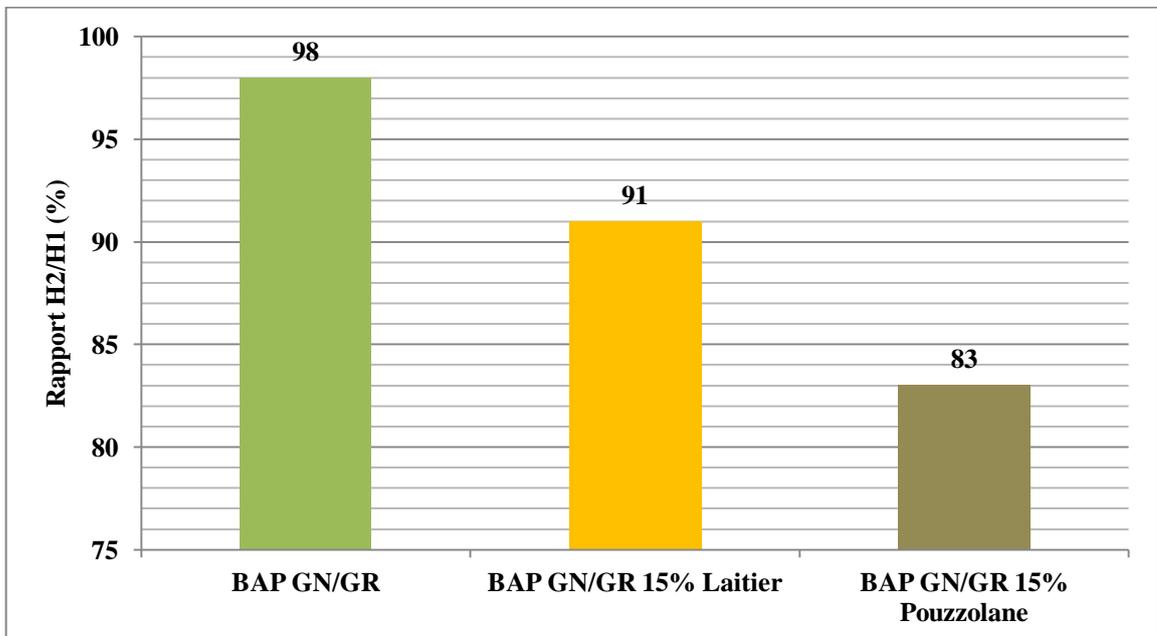
Les valeurs de temps d'écoulement à l'entonnoir en V ( $T_v$ ) sont présentées dans la figure 4.26. On remarque que le  $T_v$  du BAP (GN/GR) à base de 15% de pouzzolane atteint 38 secondes, dépassant ainsi la limite maximale de 12 secondes pour un bon BAP. Les BAP (GN/GR) sans ajout et à base de 15% du laitier présentent un temps d'écoulement beaucoup moins important que celui du BAP à base de pouzzolane.



**Figure 4-26 :** Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

#### 4-5-4) Essai à la boîte en L (L-Box test)

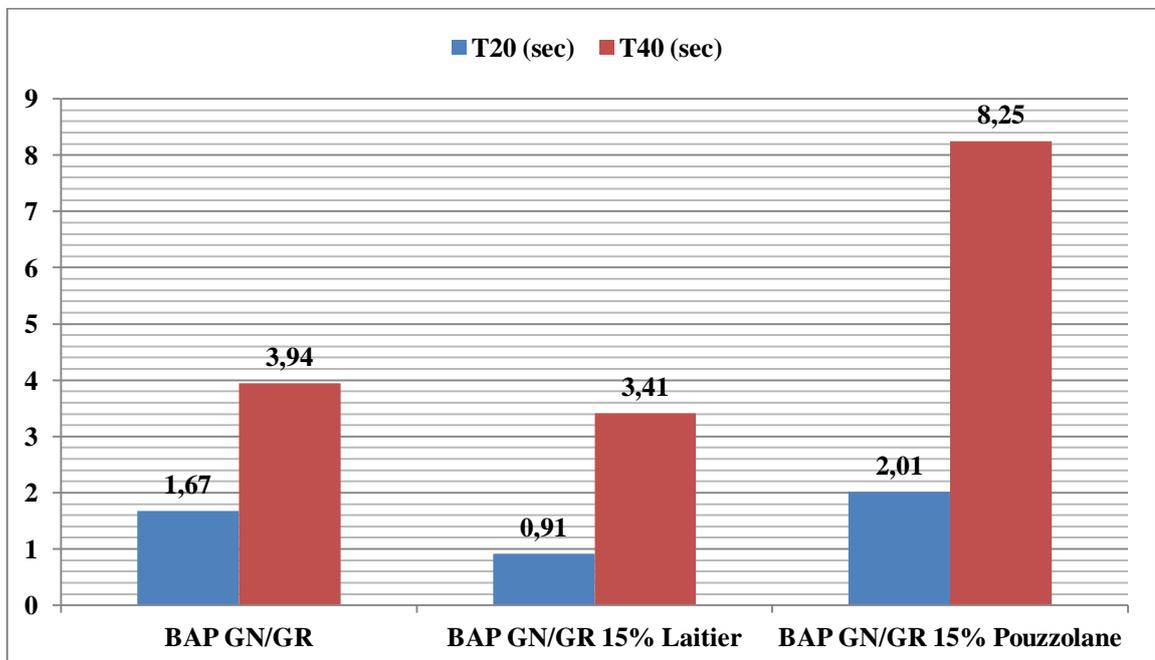
La figure 4.27 représente la capacité du passage à la boîte en L.



**Figure 4-27 :** Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.

On remarque que le rapport  $H_2/H_1$  est élevé pour le BAP (GR/GN) sans ajout et pour le BAP (GN/GR) avec BAP 15% du laitier de plus 90%. Par contre, ce rapport est de l'ordre de 83% pour le BAP GR/GN avec 15% de pouzzolane accompagné d'un blocage au niveau des armatures.

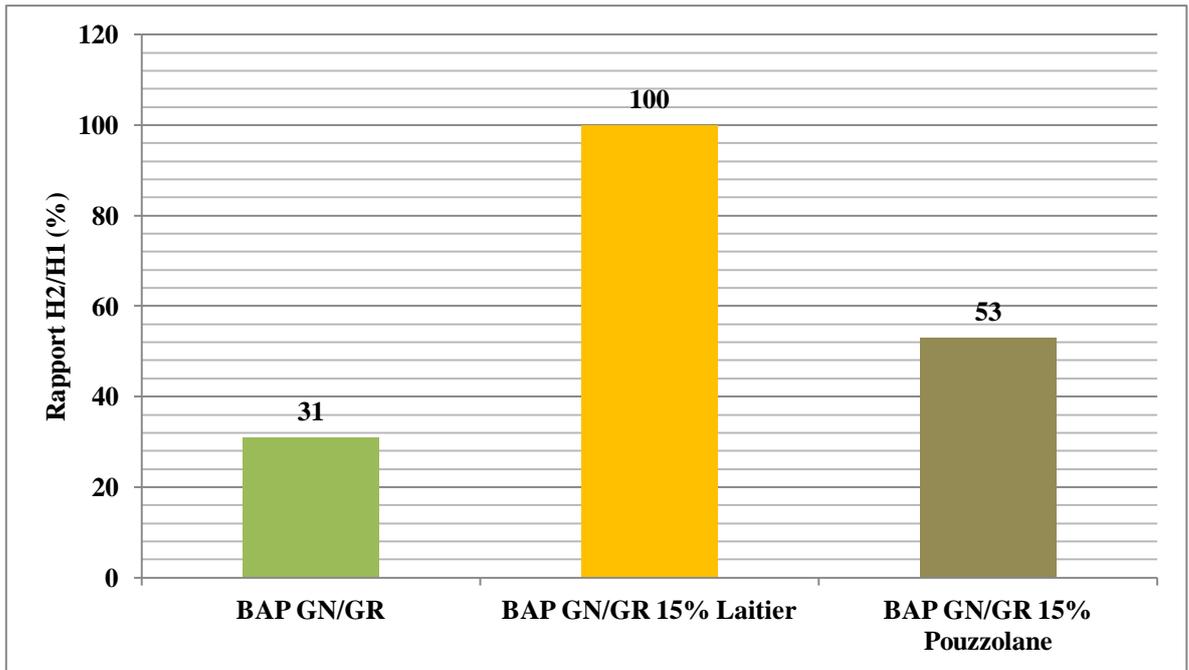
Les  $T_{20}$  et  $T_{40}$  trouvés par l'essai à la boîte en L confirment les de  $T_{50}$  et  $T_{50J}$  (Figure 4-28). On remarque que les temps d'écoulement les plus élevés sont toujours présentés par le BAP (GN/GR) avec 15 de pouzzolane ( $T_{20} = 2,01$  sec et  $T_{40} = 8,25$  sec) et qu'ils dépassent la limite maximale tolérée ( $T_{20} = 1,50$  sec et  $T_{40} = 3,50$  sec). Ceci est peut être dû à la présence de blocage au niveau des armatures. Les temps d'écoulement pour le BAP (GN/GR) sans ajout et avec 15% du laitier sont comparables.



**Figure 4-28** : Temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  de BAP (GN/GR) avec et sans ajout.

#### 4-5-5) Essai à la boîte en U (U-Box test)

Le rapport  $H_2/H_1$  pour le BAP (GR/GN) sans ajout et avec 15% de pouzzolane sont de (31% et 53%) respectivement (Figure 4.29). Par contre, la capacité de remplissage pour le BAP (GR/GN) avec 15% du laitier atteint la limite supérieure d'où la différence d'hauteur calculée est égale à zéro, ce qui indique un rapport  $H_2/H_1$  de 100%.



**Figure 4-29 :** Rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> de l'essai à la boîte en U de BAP (GN/GR) avec et sans ajouts.



**Figure 4-30 :** Essai à la boîte en U de BAP (GN/GR) sans et avec ajouts.

#### 4-6) EFFET DES AJOUTS SUR L'ETAT FRAIS DU BAP A BASE DE 100% GRANULATS RECYCLES

On a étudié dans cette partie l'effet des ajouts sur les performances du BAP à base de 100% granulats recyclés à l'état frais. En substituant 15% du poids de ciment par le laitier ou la pouzzolane naturelle. Les compositions des BAP à base de 100% granulats recyclés sans et avec ajouts sont regroupées dans le tableau 4.9.

**Tableau 4-9 :** Compositions des BAP à base de 100% granulats recyclés sans et avec ajouts

	<i>BAP GR sans ajout</i>	<i>BAP GR 15% laitier</i>	<i>BAP GR 15% pouzzolane</i>
<i>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</i>	494	422	422
<i>Gravier 8/15 (kg/m<sup>3</sup>)</i>	420	420	420
<i>Gravier 3/8 (kg/m<sup>3</sup>)</i>	210	210	210
<i>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</i>	823	823	823
<i>Laitier ou Pouzzolane (kg/m<sup>3</sup>)</i>	/	70	69
<i>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</i>	197	196	196
<i>Superplastifiant (kg/m<sup>3</sup>)</i>	8,88	8,85	8,83

Les essais réalisés à l'état frais ont donné les résultats récapitulés dans le tableau 4.10 :

**Tableau 4-10 :** Résultats des BAP à base de 100% granulats recyclés sans et avec ajouts

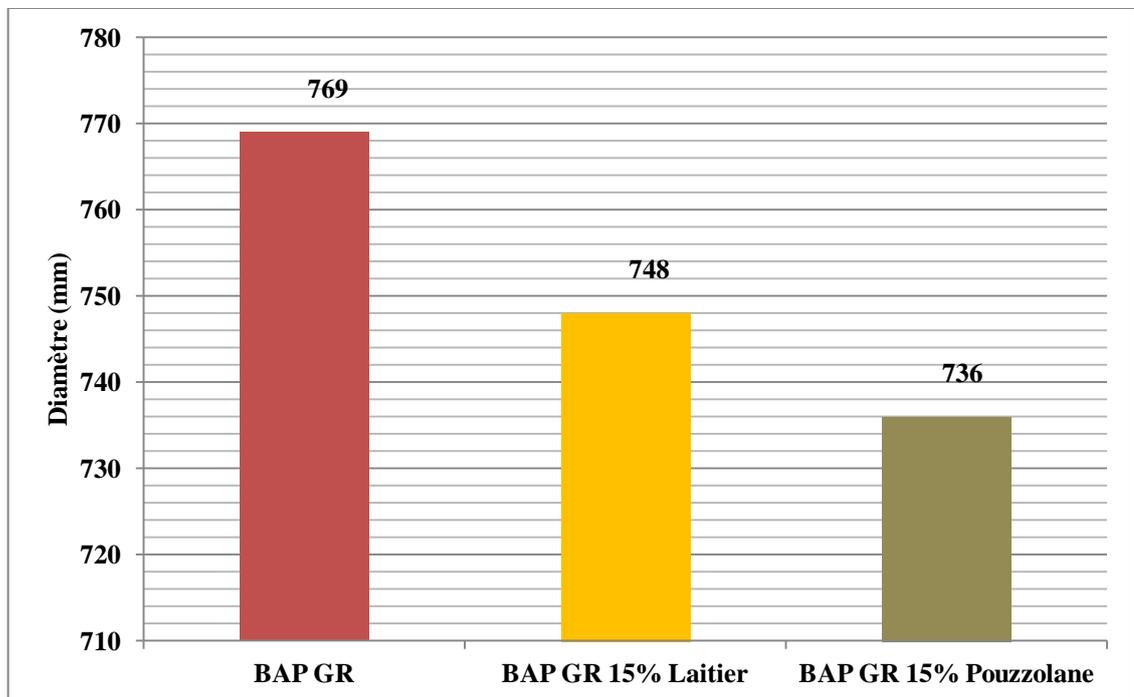
	<b>BAP GR</b>	<b>BAP GR 15% Laitier</b>	<b>BAP GR 15% Pouzzolane</b>	<b>Exigence</b>
<b>Etallement D (mm)</b>	769	748	736	660-850 mm
<b>T<sub>50</sub> (sec)</b>	3,29	4,60	6,20	
<b>Tv (V-Funnel) (sec)</b>	11,00	19,50	14,40	5 sec < T <sub>50</sub> < 12 sec
<b>U-Box</b>	0,43	0,37	0,98	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,85
<b>L-Box</b>	T <sub>20</sub> = 2,2	T <sub>20</sub> = 2,5	T <sub>20</sub> = 2,7	T <sub>20</sub> < 1,5 sec
	T <sub>40</sub> = 5,20	T <sub>40</sub> = 6,82	T <sub>40</sub> = 5,90	T <sub>40</sub> < 3,5 sec
	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,95	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,85	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> = 0,97	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,80
<b>J-Ring</b>	T <sub>50</sub> = 5 sec	T <sub>50</sub> = 4,70 sec	T <sub>50</sub> = 7 sec	
	D = 691 mm	D = 705 mm	D = 781 mm	660-850
	Bj = 2,175 cm	Bj = 2,14 cm	Bj = 0,50 cm	Bj < 1 cm

#### 4-6-1) Etalement au cône d'Abrams

Le BAP (GR) sans ajout représente un étalement supérieur à celui du BAP (GR) avec 15% de laitier ou de pouzzolane (Figure 4.31). L'addition du laitier ou de la pouzzolane engendre une diminution de l'étalement. Durant l'essai on a remarqué un ressuage visible pour le béton sans ajouts et le béton avec 15% du laitier. Le BAP à base de 15% de pouzzolane a été plus homogène. ARYA et al [91] ont trouvé que les pouzzolanes améliorent la plasticité ainsi que la rétention d'eau et donne une bonne homogénéité couplée à une réduction de tendance au ressuage.

La réaction d'hydratation retardée par la présence du laitier engendre un excès d'eau dans le mélange est peut être la cause de l'augmentation de l'ouvrabilité du BAP à base de 100% granulats naturels. Par contre, pour le cas du BAP à base de 100% granulats recyclés, ce phénomène ne se produit pas à cause du coefficient élevé d'absorption des granulats recyclés. Au contraire, une chute d'ouvrabilité a été observée

Le  $T_{50}$  du BAP (GR) à base de la pouzzolane est supérieur à celui de BAP (GR) avec 15% du laitier et BAP(GR) sans ajout (6,20 sec, 4,60 sec et 3,29 sec) respectivement.

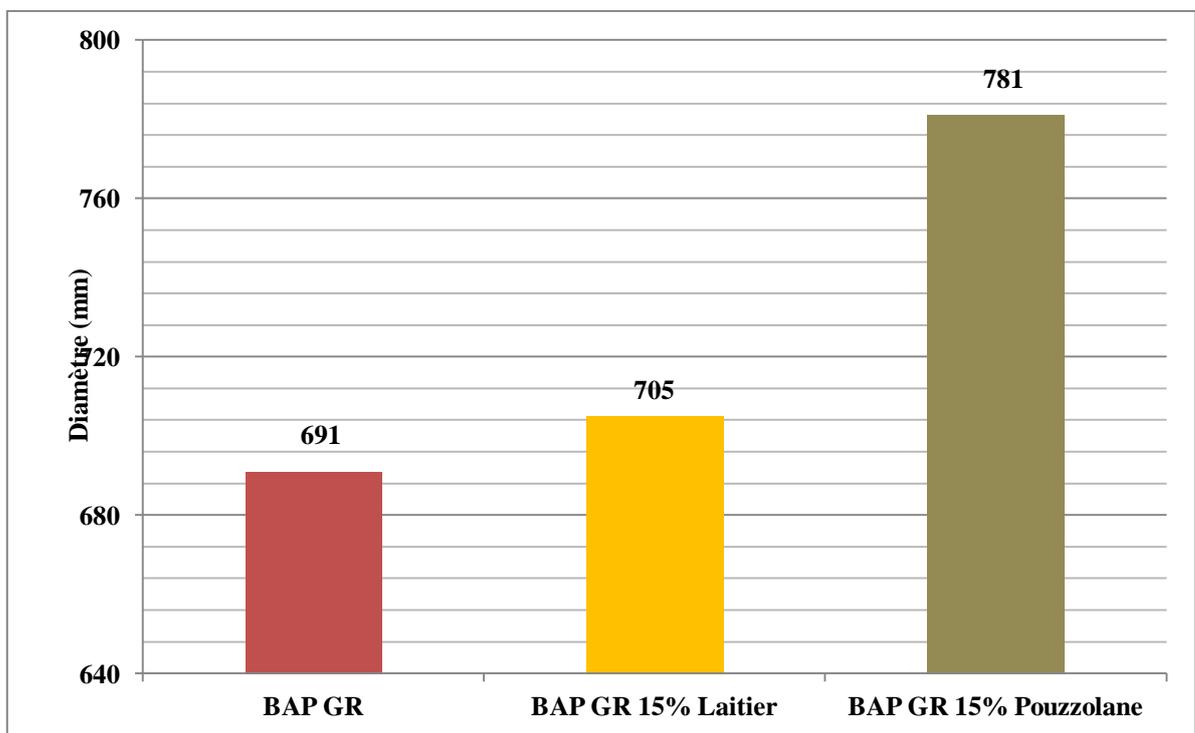


**Figure 4-31:** Diamètre d'étalement au cône d'Abrams BAP (GR) avec et sans ajouts.

#### 4-6-2) Étalement à la couronne (J-Ring test)

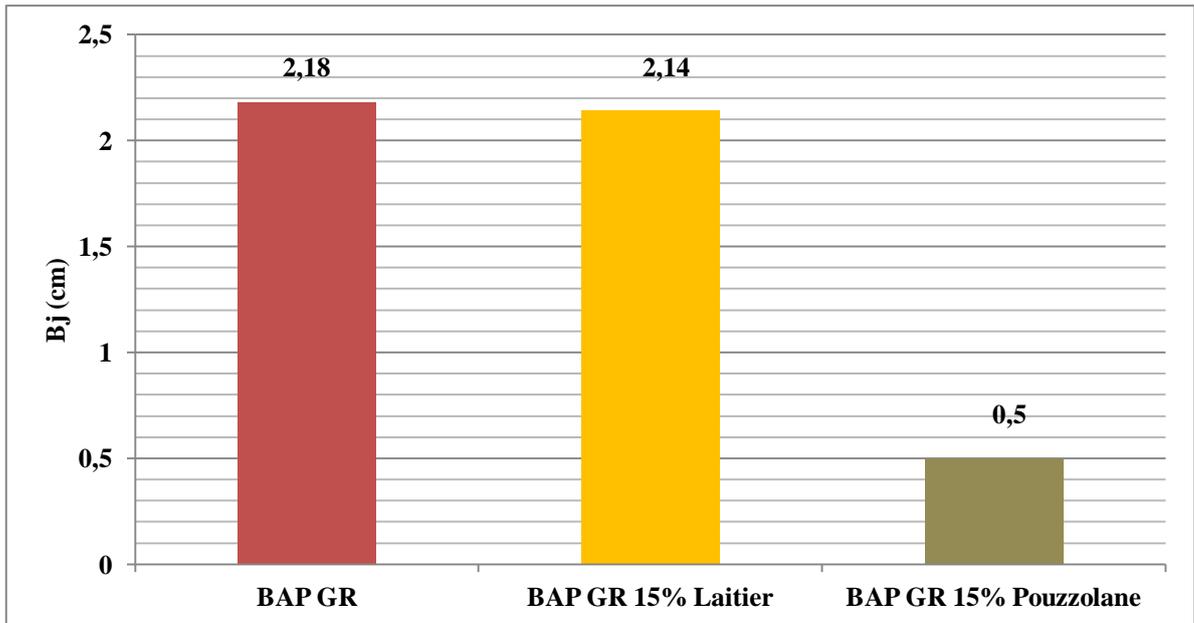
L'étalement au J-Ring des trois BAP est supérieur à la limite minimale (660 mm) (Figure 4.32). Contrairement à l'étalement au cône d'Abrams, on remarque que le diamètre d'étalement du BAP (GR) à base de 15% de pouzzolane est supérieur à celui du BAP (GR) et du BAP (GR) avec 15% du laitier.

Le  $T_{50}$  du BAP (GR) à base de la pouzzolane est toujours supérieur à celui de BAP (GR) avec 15% du laitier et BAP (GR) sans ajout (7,00 sec, 4,70 sec et 5,00 sec) respectivement.



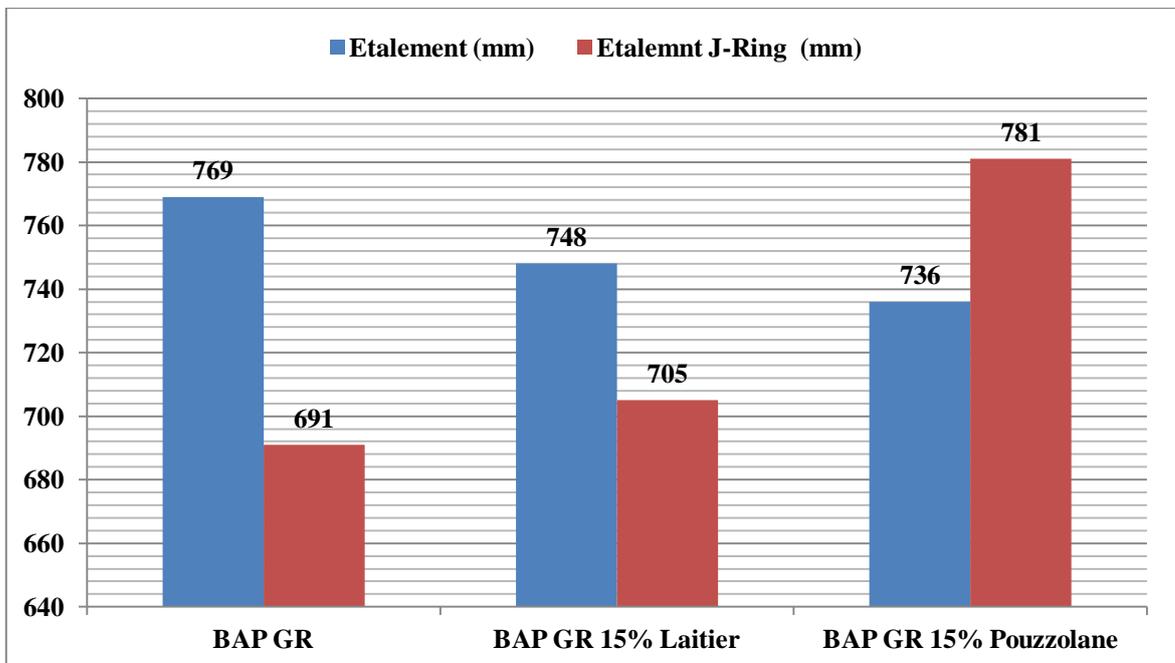
**Figure 4-32 :** Diamètre d'étalement au J-Ring BAP (GR) avec et sans ajouts.

La différence importante entre les diamètres peut être justifiée par la différence de hauteurs  $B_j$  (Figure 4.33), d'où on a observé un blocage moins important pour le BAP (GR) avec 15% de pouzzolane au milieu de la couronne avec une différence de hauteurs égale à 0,50 cm. Cette valeur est inférieure à la limite imposée par les recommandations qui est égale à 1,00 cm, contrairement aux BAP (GR) sans ajout et BAP (GR) avec 15% du laitier qui ont un  $B_j$  qui dépasse les 2,00 cm.

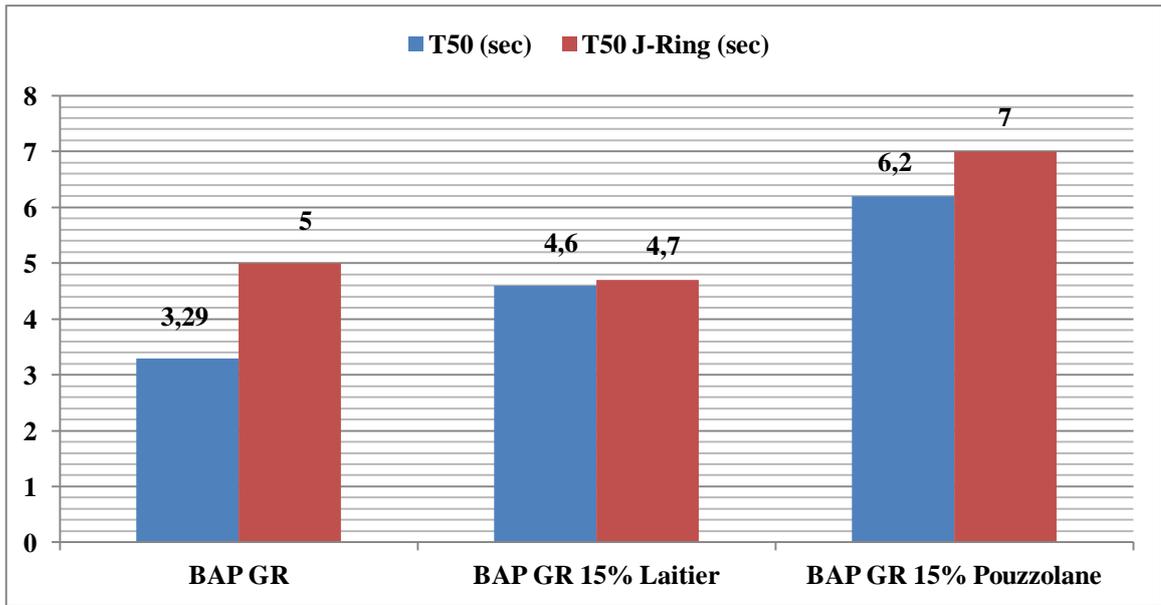


**Figure 4-33** : Différence de hauteurs Bj de BAP (GR) avec et sans ajouts.

En comparant les valeurs d'étalement des BAP étudiés sans et avec le J-Ring, on remarque que le diamètre du BAP (GR) sans ajout et du BAP (GR) avec 15% du laitier avec le J-Ring sont inférieurs par rapport aux diamètres sans le J-Ring (Figure 4.34). Le  $T_{50J}$  est supérieur à  $T_{50}$  pour les trois BAP étudiés (Figure 4.35). Cependant, cette remarque n'a pas été observée pour le BAP (GR) avec 15% de pouzzolane le contraire a été observé.



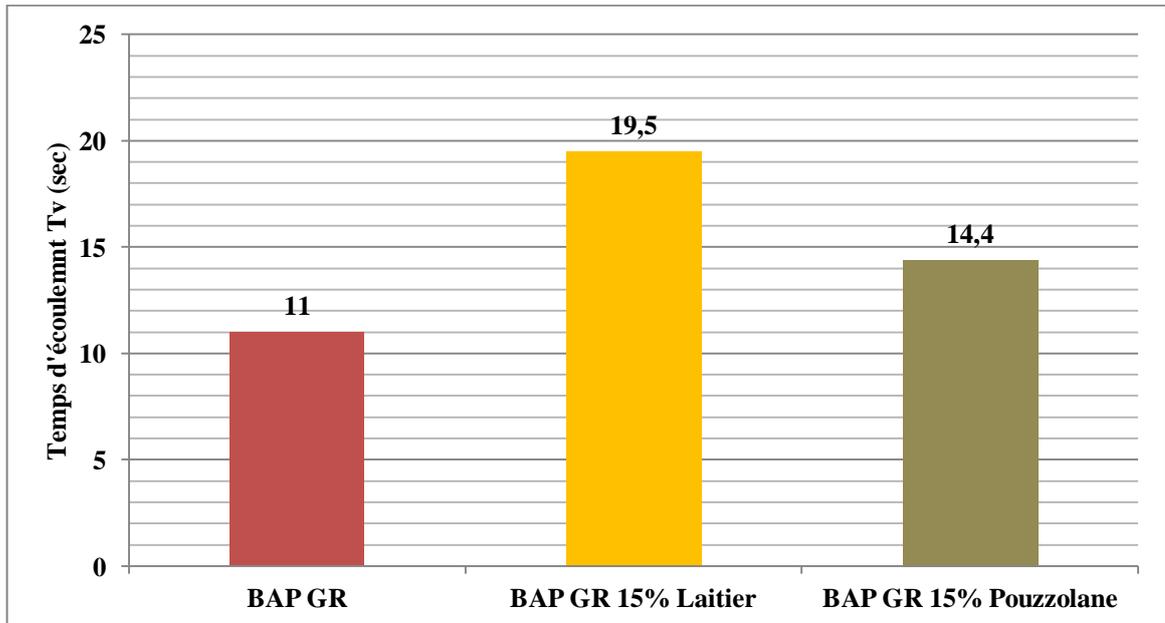
**Figure 4-34** : Différence entre l'étalement sans et avec le J-Ring de BAP (GR) avec et sans ajouts.



**Figure 4-35** : Différence entre  $T_{50}$  et le  $T_{50J}$  de BAP (GR) avec et sans ajouts.

#### 4-6-3) Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V ( $T_v$ ) obtenu a été de 19,5 secondes et de 14,4 secondes pour le BAP (GR) 15% laitier et 15% pouzzolane respectivement, dépassant ainsi la limite recommandée ( $5 \text{ sec} < T_v < 12 \text{ sec}$ ).



**Figure 4-36** : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP (GR) avec et sans ajouts.

#### 4-6-4) Essai à la boîte en L (L-Box test)

On a remarqué un taux de remplissage important pour les trois BAP. Ce taux dépasse les 85%, sans blocage à signaler au niveau des barres, avec un temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  très comparable (Figure 4.37 et 4.38).

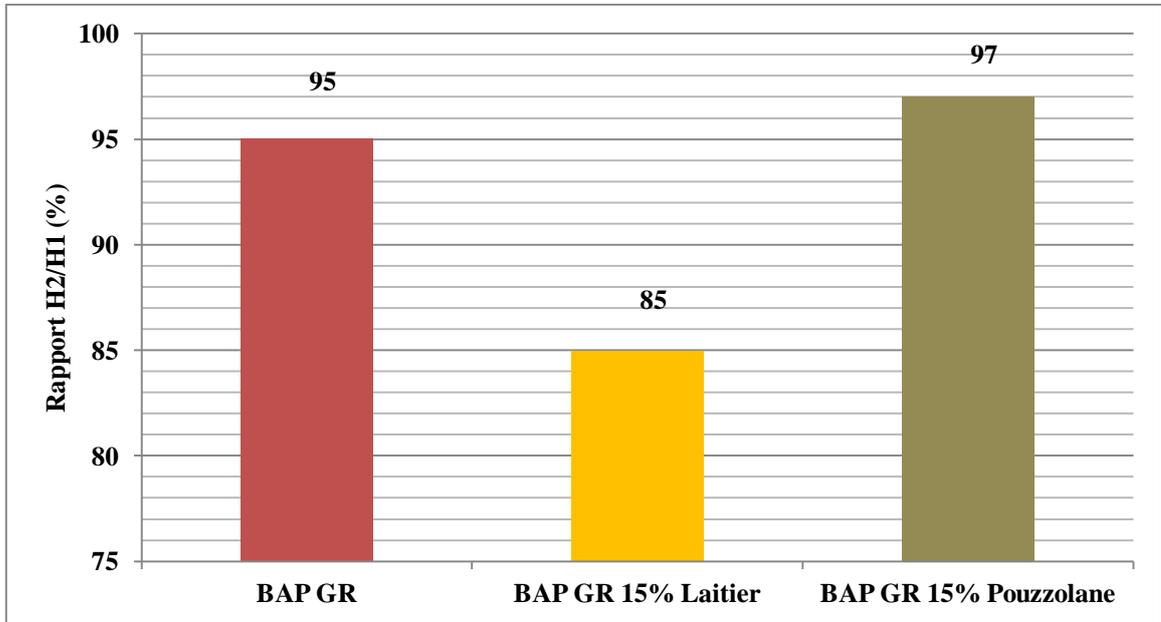


Figure 4-37 : Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP (GR) avec et sans ajouts.

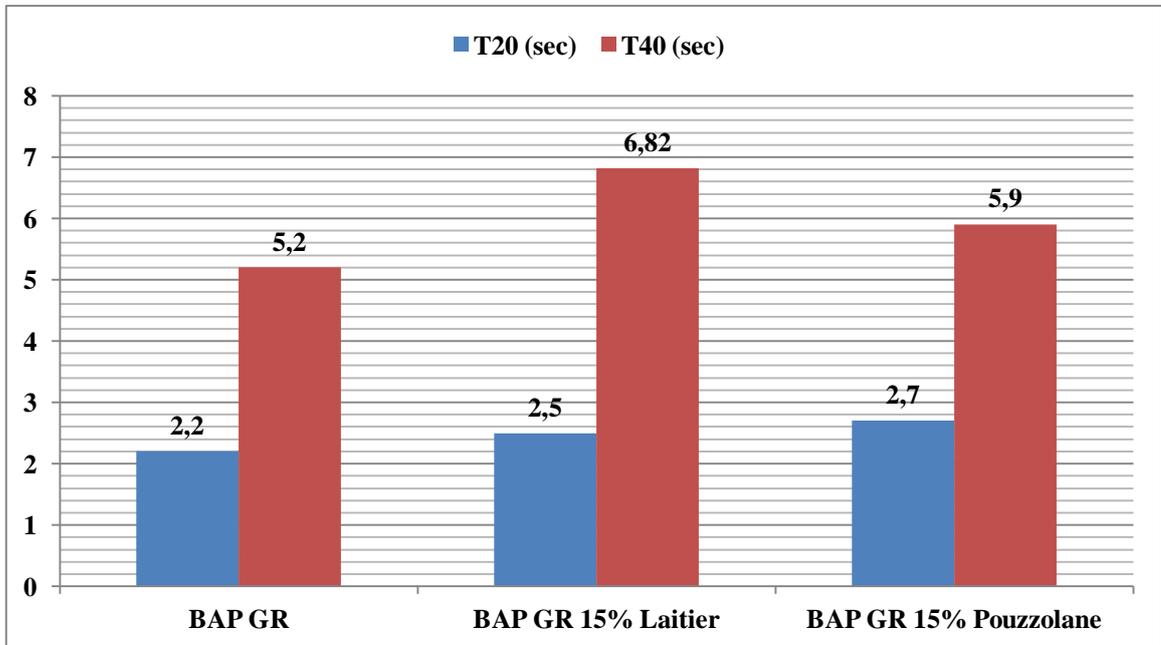
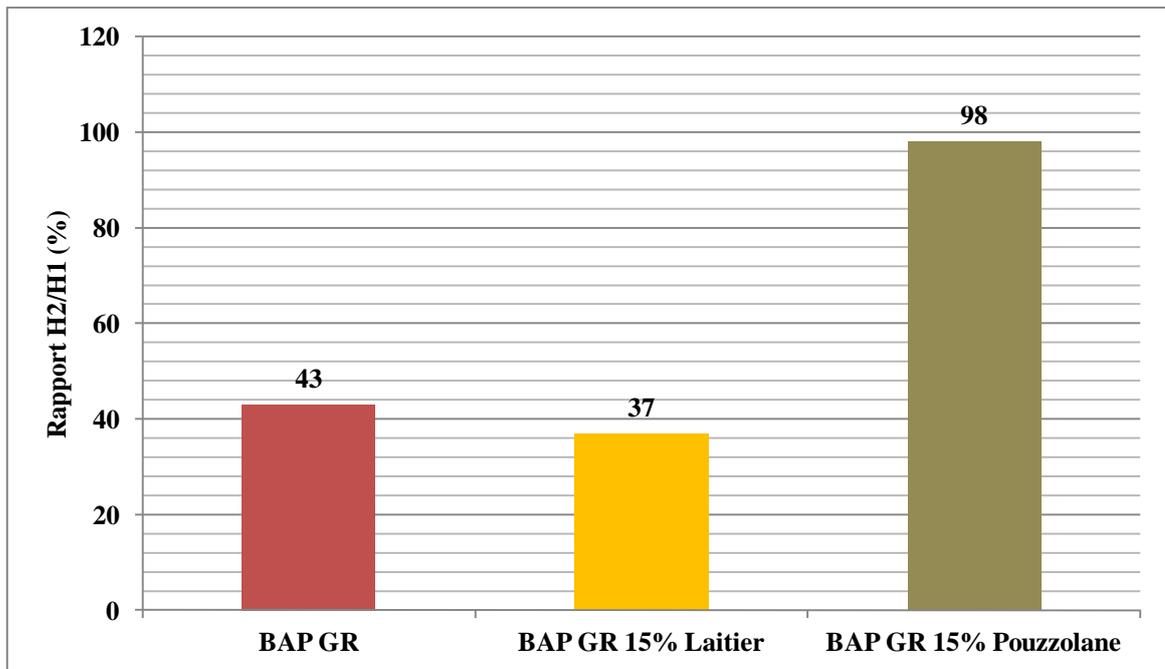


Figure 4-38 : Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en L de BAP (GR) avec et sans ajouts.

#### 4-6-5) Essai à la boîte en U (U-Box test)

Le taux de remplissage à la boîte en U (U-Box test) représenté par le rapport  $H_2/H_1$  reste très faible et ne dépasse pas les (45%) pour le BAP (GR) sans ajouts et le BAP (GR) avec 15% du laitier. Par contre, le BAP (GR) 15% de pouzzolane présente un taux de remplissage très élevé de 98% (Figure 4.39).



**Figure 4-39 :** Rapport  $H_2/H_1$  de l'essai à la boîte en U de BAP (GR) avec et sans ajouts.

#### 4-7) CONCLUSION

- Le BAP à base de 50 et 100% granulats recyclés possède des propriétés comparables à celles du BAP à base de granulats naturels.
- Le laitier engendre une amélioration de l'ouvrabilité pour le BAP à base de granulats naturels et une chute d'ouvrabilité pour le BAP à base de 50 et 100% granulats recyclés.
- La pouzzolane naturelle diminue l'ouvrabilité des BAP à base de granulats naturels et à base de 50 et 100% granulats recyclés.

# Conclusion générale

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de connaître l'effet de substitution de 50 et 100% de granulats naturels par des granulats recyclés ainsi que la substitution de 15% du ciment par le laitier et la pouzzolane naturelle sur les performances du béton autoplaçant à base de 100% granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés à l'état frais.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- 1) Pour les BAP sans ajouts, on constate que le laitier donne une meilleure ouvrabilité pour le béton, contrairement à la pouzzolane qui diminue l'ouvrabilité au niveau de tous les essais réalisés, mais malgré cette diminution les valeurs obtenues restent plus au moins acceptable.
- 2) La substitution de 15% du ciment par le laitier dans le BAP à base de granulats naturels engendre une amélioration très remarquable de l'ouvrabilité (étalement, capacité de passage et de remplissage), cette amélioration est peut être due à la réaction d'hydratation retardée du laitier, le faite qui ne contribue pas aux réactions d'hydratation au jeune âge, ce qui engendre un excès d'eau dans le mélange du béton, d'où une ouvrabilité améliorée.
- 3) L'effet de la pouzzolane sur le BAP à base de granulats naturels et le BAP à base de granulats recyclés est similaire. La substitution de 15% du ciment par la pouzzolane provoque une chute d'ouvrabilité. Le besoin d'eau d'un BAP à base de la pouzzolane et plus important que le BAP à base de laitier.
- 4) La pouzzolane possède une propriété d'amélioration de la rétention d'eau et donne une bonne homogénéité couplée à une réduction de la tendance au ressuage.
- 5) La substitution totale ou partielle des granulats naturels par des granulats recyclés donne un BAP dont les propriétés et les caractéristiques à l'état frais restent plus au moins comparable à celles du BAP à base de granulats naturels.

- 6) Le coefficient élevé d'absorption est la propriété principale qui diffère les granulats recyclés des granulats naturels, cette augmentation dans les valeurs du coefficient d'absorption est peut être due à la porosité de la pâte de l'ancien ciment recouvrant le granulat. En plus, la forme des granulats, elle aussi a une influence sur l'ouvrabilité du béton, la forme presque sphérique des granulats recyclés à participer dans l'amélioration de l'ouvrabilité.
- 7) L'absence du blocage au niveau des armatures (L-Box) pour les BAP à base de 50% et 100% granulats recyclés peut être expliquée par le changement de la granulométrie des granulats lors du malaxage. Le granulat recyclé est constitué de l'ancien gravier qui est entouré par l'ancienne pâte du ciment, cette dernière est poreuse et moins dure que le granulat lui même. Par conséquent, le granulat se casse encore une fois dans le malaxeur et donc change de nouveau sa granulométrie initiale.
- 8) L'effet des ajouts est similaire sur BAP GN/GR que sur le BAP GR, d'où le BAP GN/GR sans ajouts et à base de 15% du laitier donne une meilleure ouvrabilité et une meilleure capacité de passage sans blocage au niveau des armatures à signaler.
- 9) Le BAP GR sans ajouts et à base de 15% du laitier représentent une ouvrabilité acceptable sur tous les essais mais ils sont moins stable vis-à-vis du ressuage ainsi que vis-à-vis du durcissement qui est très rapide en comparant avec le BAP à base de granulats naturels.
- 10) L'effet de la pouzzolane sur le BAP à base de granulats naturels et le BAP à base de granulats recyclés est similaire. La substitution de 15% du ciment par la pouzzolane provoque une chute d'ouvrabilité. L'addition de la pouzzolane dans le BAP à base de granulats recyclés (50 et 100%) donne un béton plus homogène que l'addition de laitier.
- 11) La substitution du ciment par la pouzzolane engendre une amélioration dans la stabilité du BAP à base de 100% de granulats recyclés vis-à-vis du ressuage et du blocage au milieu confiné, ainsi que le l'homogénéité du mélange.
- 12) Contrairement au BAP à base de granulats naturels, la substitution de 15% de ciment par le laitier dans le BAP à base de 50% et 100% granulats recyclés a engendré une

diminution plus au moins importante dans l'ouvrabilité. L'effet de la réaction d'hydratation retardée par la présence du laitier n'a pas eu une influence, car l'excès d'eau qui provient cette réaction retardée est peut être absorbé par les granulats recyclés, qui présente un coefficient d'absorption d'eau très élevé.

## **PERSPECTIVES**

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire ont été limités à étudier les performances du BAP à base de granulats recyclés, laitier et la pouzzolane naturelle à l'état frais. D'autres aspects restent à aborder, nous recommandons ce qui suit pour les futures études :

- Etudier un BAP à base de granulats recyclés et avec un pourcentage varié des ajouts ;
- Etudier les performances des BAP à base de granulats recyclés à l'état durci (résistance à la compression et à la traction, retrait) ;
- Etudier la durabilité des BAP à base de granulats recyclés (perméabilité au gaz, à l'eau, porosité...etc.)
- Utiliser d'autres ajouts minéraux tels que les fillers calcaire ou les fumées de silice dans la formulation du BAP.

# Annexes

## ANNEXE A

### EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

#### A.1. Les Données :

Pour un volume du mortier de  $V=1.6l$  (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment :  $\rho_C = 3050 \text{ kg/m}^3$
- Sable :  $\rho_S = 2630 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant :  $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau :  $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable  $A_b = 1.1$

On fixe le rapport Sable/Mortier  $S/M = 0.50$  (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids)  $E/C = 0.40$  ou (par volume)  $E/C = 1.22$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de :  $\%Sp = 1,8\%$  du poids de ciment (ou poudres).

#### A.2. Calcul d'humidité du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse  $M_1 = 321$  grs (par exemple), on le met dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse  $M_2 = 320$  grs et on calcul l'humidité du sable  $\mu_s$

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_s - A_b$$

#### A.3. Calcul des quantites de chaque constituant :

##### A.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment  $\%C$ :

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C \text{ par volume})} * 100$$

La quantité de ciment  $C$  en **kg**:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E / C_{\text{parvolume}}}{100} \times \rho_c$$

### A.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{Correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100}\right)$$

### A.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

### A.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier ( $E$ ) est divisée en deux parties une première partie  $E_1$ , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité  $E_2$  (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume :  $\%E_{vol}$

$$\%E_{vol} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E / C_{\text{parvolume}}}{(1 + E / C_{\text{parvolume}})}$$

La quantité d'eau globale  $E$  en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{vol} \times \rho_E}{100 \times 1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s \times \text{correction}}{1000 \times 100}\right)$$

**Eau1**

$$E_1 = E \times 0.70$$

**Eau2**

$$E_2 = E \times 0.30$$

## ANNEXE B

### EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (*ANNEXE A*) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

#### B.1. Les Données

Pour un volume de béton de  $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
  - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) :  $\rho_G = 1470 \text{kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) :  $\rho_{AG} = 2715 \text{kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2560 \text{kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3050 \text{kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
  - Coefficient d'absorption du sable :  $AbS = 1.1$
- Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage :  $A=1\%$  du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de  $E/C_{\text{volume}}=1.22$  par unité de volume de ciment et  $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.40$  par unité de poids de ciment.
- 
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) :  $\%Sp= 1,8\%$  du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

## B.2. Calcul d'humidite

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse  $M_1$  et un échantillon de gravier de masse  $M'_1$  et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse  $M_2$  et  $M'_2$  les masses respectives du gravier et du sable.

$$\text{L'humidité du sable : } \mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

$$\text{L'humidité du gravier : } \mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

## B.3. Calcul des differents composants

### B.3.1. Gravier

La quantité  $G$  en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton  $V$  :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

### B.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume  $V$  de béton (S) :

Le pourcentage du gravier  $G$  dans le béton :

$$\%G = \frac{G(kg/m^3)}{\rho_{AG}} \times 10$$

Le pourcentage du volume de mortier  $M$  par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable  $S$  dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable  $S$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

### B.3.3. Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment  $C$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

### B.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton  $Sp$  (kg/m<sup>3</sup>)

$$Sp(kg/m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant  $Sp$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

### B.3.5. Eau :

L'eau ajoutée au béton ( $E$ ) est divisée en deux parties : la première partie ( $E_1$ ) est de 70% de ( $E$ ) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie ( $E_2$ ), elle de 30% de ( $E$ ) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{\text{volume}}}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable :  $e_1$

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier :  $e_2$

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000} \left( \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenu dans le superplastifiant :  $e_3$

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

**Eau1**

$$E_1(kg) = 0.70 \times E$$

**Eau2**

$$E_2(kg) = 0.30 \times E$$

# Références

## REFERENCES

- [1] Turcry P., « Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants Influence de la formulation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2004, 213 pages.
- [2] Fares H., « Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, 2009, 206 pages.
- [3] Cimbéton., « Béton et Génie Civil, Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi », Collection Technique Cimbéton, 66 pages.
- [4] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M., "Self-compacting concrete", Structural Concrete, 2000, Vol. 1, PP. 3-17.
- [5] Ouchi M. et Edamastu Y., "A simple evaluation method of interaction between coarse aggregate and mortar particles in self compacting concrete", Proceedings of the first international RILEM symposium on self compacting concrete, 1999, pp. 121-130.
- [6] Oh S.G., Nogushi T. and Tomosawa F., "Toward mix design for rheology of self compacting concrete", Proceedings of the first international RILEM symposium on self compacting concrete, 1999, pp. 361-372.
- [7] Bui V.K. and Montgomery D., "Mixture proportioning method for self compacting concrete high performance concrete with minimum past volume", Proceedings of the first international RILEM symposium on self compacting concrete, 1999, pp. 373-384.
- [8] Tangtermsirikul S., and Van B.K., "Blocking criteria for aggregate phase of self compacting concrete high performance concrete", Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering, December 1995, Bangkok, pp. 58-69.
- [9] Peterson P., Billberg P. et Van B.K., "A model for self compacting concrete", Proceedings of Production Methods and Workability of Concrete, 1996, pp. 483-492.

[10] Sedran T. et de Larrard F., « Manuel d'utilisation de RENE-LCPC », Logiciel d'optimisation granulaire, version 6.1d. LCPC 2000.

[11] Boukendakdji O., « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat de l'Université Saad Dahled Blida, 2010, 199 pages.

[12] Bethmont S., « Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants. Etude expérimentale des interactions granulaire », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005, 166 pages.

[13] Girish S., Ranganath R.V. and Vengala J., « Influence of powder and past on flow properties of self compacting concrete », Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, pp. 2481-2488.

[14] Felekoglu B., Turkel S. and Baradam B., "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self compacting concrete", Building and Environment, 2007, Vol. 42, pp. 1795-1802.

[15] Carlsward J., Emborg M., Utsi S. and Oberg P., "Effect of constituents on workability and rheology of self compacting concrete", Proceedings of the third international RILEM conference on self compacting concrete, 17-20 August 2003, pp. 143-153.

[16] Abib Z., "formulations et caractérisation des bétons autoplaçants" Mémoire de Magister de USTHB., Juillet 2004, 114 pages.

[17] Bouzoubaa N. and Lachemi M., "Self compacting concrete incorporating high volume of class F fly ash : Preliminary results", Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, pp. 413-420.

[18] Shadle R. and Somerville S., "The benefits of utilizing fly ash in producing self compacting concrete", First American Conference on the Design and use of self consolidating concrete, Chicago 2002, pp. 235-241.

[19] Borsoi A., Collepari M., Collepari S., Troli R. and Zanardi L. "Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes" 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland, 2007, pp. 399-409.

[20] Heru Ari C., "Effect of mineral admixtures on the fresh properties of self compacting concrete mortar", Memoire de Master de Graduate School of Natural and Applied Sciences, August 2004, 66 pages.

[21] Zhu W. and Gibbs J.C., "Use of different limestone and chalk powder in self compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2005, Vol.35, pp. 1457-1462.

[22] Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A et Yahia A., « Influence des paramètres de composition sur le comportement de béton autoplaçant à l'état frais », Afrique Science, 2008, pp. 1-20.

[23] Ferraris F., Obla H. and Hill R., "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement past and concrete", Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, pp. 245-255.

[24] Druta C., "Tensile strength and bonding characteristics of self compacting concrete", Mémoire de Master de l'Université de Louisiana State, Août 2003, 98 pages.

[25] Felekoglu B., Yardimci M. Y. and Baradan B., "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete", Proceedings of third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 17-20 août 2003, pp. 446-456.

[26] Shi C., Wu Y., Shao Y. et Riefler M., "Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete", First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, 12-13 novembre 2002, pp. 349-354.

[27] Turcry P., Rozière E., et Loukili A., « Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants », XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble, 2005.

[28] Domone P.L., “A review of the hardened mechanical properties of self compacting concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 2007, vol. 29, pp. 1-12.

[29] Gibbs J.C. and Zhu W., “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, 13-15 septembre 1999, pp. 199-209.

[30] Sonebi M. and Bartos P.J.M., “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Sweden, 13-15 septembre 1999, pp. 275-289.

[31] Peterson Ö., “Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength”, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, 23-25 octobre 2001, pp. 277-284.

[32] Ayed K., Benaïssa A., Vidal T., Pons G. et Abidlah A., « Etude de comportement du BAP. Influence de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur le retrait du béton autoplaçant », *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009*.

[33] Yazici H., “The effect of silica and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, pp. 456-462.

[34] Parra C., Vacuende M. and Gomez F., “ Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self compacting concrete “, *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 25, pp. 201-207.

[35] Pons G., Proust E. and Assié S., “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behavior compared with vibrated concrete”, *Proceedings of third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33)*, Reykjavik, Iceland, 17-20 août 2003, pp. 645-645.

- [36] Gram H.E. and Piiparinen P., “Properties of SCC- Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, sweden, 13-15 September 1999, pp. 211-225.
- [37] Assié S., « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de l’Institut National Des Science Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 254 pages.
- [38] Hu C. et Barbieri B., « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d’un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, Première Rencontre International, Toulouse, 1998, pp. 265-272.
- [39] Persson B., “ Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, 13-15 septembre 1999, pp. 239-250.
- [40] Alrifai A., Aggoun S. et Cabrillac R., « Influence des paramètres de formulation sur le retrait endogène des pâtes et mortiers issus de BAP », XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008, pp. 1-8.
- [41] Craeye B., De Schutter G., Desmet B., Vantomme J., Heirman G., Vandewalle L., Cizer O., Aggoun S. et Kadri E.H., “Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research, 2010, Vol 40, pp. 908-913.
- [42] Sakata K., “Durability of self compacting concrete and low heat performance concrete”, CONSEC 98, International Conference 2, Tronso, GB, pp. 2057-2064.
- [43] Neville A. M., “Propriétés des bétons”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Edition Paris Eyrolles 2000.
- [44] Van B.K. and Montgomery D., “Drying shrinkage of self compacting concrete containing milled limestone”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, sweden, 13-15 September 1999, pp. 227-238.

[45] Hasni L., « Bétons Autoplaçants », Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999.

[46] Khatib J.M., “Performance of self compacting concrete containing fly ash”, *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, pp. 1963-1971.

[47] Rozière E., Granger S., Turcry P. and Loukili A., “Influence of past volume on shrinkage cracking and fracture properties of self compacting concrete”, *Cement and Concrete Composite*, 2007, Vol. 29, pp. 626-636.

[48] Audenaert K. and De Schutter G., « Water permeability of self compacting concrete », Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, Belgium, 9 pages.

[49] Perraton D., Aitcin P.C. et Carles-Gibergues A., « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : Perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », *Bulletin de Laboratoires des Ponts et Des Chaussées*, 1999, Vol 221, pp. 69-78.

[50] De Schutter G., Audenaert K., Boel V., Vandewalle L., Dupont D., Heirman G., Vantomme J. et D’hemricourt J., “Transport properties in self compacting concrete and relation with durability : Overview of a Belgian research project”, *Proceedings of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 033)*, 2003, pp. 799-807.

[51] Assié S., Escadeillas G. and Waller V., « Estimates of self compacting concrete ‘potentiel’ durability », *Construction and Building Materials*, 2007, Vol. 21, pp. 1909-1917.

[52] Zhu W. and Bartos P.J.M., “Permeation properties of self compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol. 33, pp. 921-926.

[53] Nehdi M., Pardhan M. and Koshowski S., “Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cement”, *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, pp. 2103-2112.

**[54]** Dinakar P., Babu K.G. et Manu Santhanam., “Durability properties of high volume fly ash self compacting concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 2008, Vol. 30, pp. 880-886.

**[55]** Valcuende M. et Parra C., “Natural carbonation of self compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, 2010, Vol. 24, pp. 848-853.

**[56]** Heirman G., Vandewalle L., Boel V., Audenaert K., De Schutter., D’hemricourt J., Desmet B. et Vantomme J., “Chloride penetration and carbonation in self compacting concrete”, *International RILEM-JCI Seminar on concrete Durability and Service Life Planning (Concrete ’06)*, 2006, pp.13-23.

**[57]** Turkmen I. and Kantarci A., “Effect of expanded perlite aggregate and different curing condition on the physical and mechanical properties of SCC”, *Building and Environment*, 2007, Vol. 42, pp. 2378-2383.

**[58]** Turk K., Caliskan S. and Yazicioglu S., “Capillary water absorption of self compacting concrete under different curing conditions”, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Octobre 2007, Vol. 14, pp. 365-372.

**[59]** Turkel S. and Altuntas Y., “The effect of limestone powder, fly ash and silica fume on the properties of self compacting concrete repair mortars”, *Sadhana*, April 2009, Vol. 34, part 2, pp. 331-343.

**[60]** Cimpelli C., « Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’île de France : les bétons et produits de démolition recyclés », Décembre 1996, 43 pages.

**[61]** Berredjem L. et Arabi N., « Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : Formulation et caractérisation d’un béton à base de ces recycles », *SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, Octobre 12-14, 2009, pp. 255-262.

**[62]** Douara T.H., Benhoua M. et Nezerghi B., « Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et des granulats naturels », *SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, Octobre 12-14, 2009, pp. 289-294.

[63] Hansen T.C., “Recycling of demolished concrete and masonry”, RILEM Report 06, Published by E & FN Spon, London, 1992.

[64] Debieb F., “Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates”, Thèse de Doctorat de l’USTHB, 2007, 163 pages.

[65] Gasti T., « Caractérisations et formulation d’un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés », Mémoire de Magister de l’Université Yahia Fares – Médéa, 2010, 112 pages.

[66] Hachana AK., Benaichi E., Mezguiche B. et Melles M., « Etude des bétons à base des agrégats des déchets de démolition », Université Mohamed Khider Biskra, 2008.

[67] Pani L., Francesconi L. and Concu G., « Influence of replacement percentage of recycled aggregate on recycled aggregate concrete properties », fib Symposium PRAGUE 2011, pp.1-10.

[68] Hadjieva Zaharieva R., “Durabilité des bétons à base de granulats recyclés”, Thèse de Doctorat de l’Université d’Artois, France, 1998.

[69] Grdic Z.J., A. Topilic-Curcic G., Despotovic I.M. and Ristic N.S., « Properties of self compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate », Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, pp. 1129-1133.

[70] Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., “Influence of recycled aggregate on strength properties of concrete”, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, pp. 1163-1167.

[71] Tu T-Y., Chen Y-Y. and Hwang C-L., “ Properties of HPC with recycled aggregates”, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, pp. 943-950.

[72] Khatib J.M., “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate”, Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, pp. 763-769.

[73] Etxeberria M., Vazquez E., Mari A. and Barra M., “Influence of amount of recycled aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2007, Vol. 37, pp. 735-742.

[74] Evangelista L. de Brito J., “Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 2007, Vol. 29, pp. 397-401.

[75] Kou S.-C., Poon C.-S. and Etxeberria M., “ Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 2011, Vol. 33, pp. 286-291.

[76] Benhoua M., Nezergui B. et Boudraa S., « Valorisation des granulats recyclés dans la formulation d’un béton autoplaçant », *SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, Octobre 12-14, 2009, pp. 295-301.

[77] Kou S.C. and Poon C.S., ”Properties of self compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, pp. 622-627.

[78] Corinaldesi V. and Moriconi G., “ Self compacting concrete : A great opportunity for recycling materials”, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 8-11 Novembre 2004, Spain, pp. 600-609.

[79] Melton J.S., “Guidance for recycled concrete aggregate use in the highway environment”, in *Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Development*, ACI International, Special Publication SP-219, Edited by T. C. Liu and Ch. Meyer, Published by ACI, USA, 2004, pp. 47-60.

[80] RILEM TC 121-DRG : Recommandation pour la démolition et le recyclage du béton et des maçonneries, « Spécifications for concrete with recycled aggregate », *Materials and Structures*, 1994, pp. 557-559.

- [81] Domone P.L.J. and Jin J., « Properties of mortar for self compacting concrete », Proceedings of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 07), 1999, pp. 109-120.
- [82] Yong P.C. and Teo D.C.L., “Utilization of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete”, UNIMAS E-Journal of civil engineering, 2009, Vol. 1, pp. 1-6.
- [83] De Schutter G. « Guidelines for testing fresh self-compacting concrete » European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, September 2005, 23 p, Available in [www2.cege.ucl.ac.uk/research/oncrete/Testing-SCC](http://www2.cege.ucl.ac.uk/research/oncrete/Testing-SCC).
- [84] Corinaldesi V., Ortand G. and Moriconi G., “Self compacting concrete incorporating recycled aggregate”, 2002, pp. 455-464.
- [85] Necira B., Guettala A. et Chabi S. “Formulation des bétons autoplaçants: Effet des ajouts minéraux et des adjuvants” Sciences Technologies et Développement – ANDRU, 2007, N°2, pp. 66-79.
- [86] Khayat K.H., ”Workability, testing and performance of self compacting concrete”, ACI Materials Journal, Technical Paper, May-June 1999, pp. 346-354.
- [87] Tomasiello S. and Felitti M., “EAF slag in self compacting concrete”, Facta UNIVERSITATIS, Architecture and Civil Engineering, 2010, Vol. 8, pp. 13-21.
- [88] Boudchicha A., « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l’amélioration des propriétés rhéologiques et mécanique des bétons », Thèse de Doctorat de l’Université Mentouri Constantine, 2007, 285 pages.
- [89] Colak A, “ Characteristics of pastes from a portland cement containing different amount of naturel pozzolan”, Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 585-593.
- [90] Ali Aichouba A., Ghrici M. et Benaissa A., “Effet de la pouzzolane naturelle de Beni saf sur les propriétés d’un ciment à base calcaire”, Colloque méditerranéen sur les matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005.

[91] Arya C., Buenfeld N. R. and Newman J. B., "Factors influencing chloride-binding in concrete", *Cement and Concrete Research*, 1990, Vol. 20, pp. 291-300.

[92] Park C.K., Noh M.H. and Park T.H., « Rheological properties of cementitious material containing mineral admixtures », *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, pp. 842-849.

[93] Kelouche Y., Bougara A. et Ezzian K., « Présentation et réalisation d'un essai thermogravimétrique sur le laitier d'El hadjar », *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique SICZS, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26-27 Octobre 2010.*