

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat  
Département : Génie Civil  
Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Génie Civil  
Spécialité : Matériaux de Génie Civil

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**INFLUENCE DU VOLUME DE PÂTE SUR LA  
PERFORMANCE RHÉOLOGIQUE DU BÉTON  
AUTOPLAÇANT ET LE MORTIER DE BÉTON ÉQUIVALENT**

Présenté par : *KHADRAOUI Safa – GHRIB Chahinda*

Encadrant : *ARABI Nourredine Professeur Université Badji Mokhtar - ANNABA*

### Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
ACHOURA Djamel	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Président
ARABI Nourredine	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
MELAIS Fatma Zohra	M.C.B	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

# **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions DIEU qui nous a aidés à accomplir ce modeste travail.*

*La première personne que nous voulons remercier est bien notre encadreur monsieur le professeur **ARABI Nourredine** (professeur à l'université d'Annaba), pour nous avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour son aide précieuse, pour ses conseils constructifs et pour le temps qu'il nous a consacré. En fin, nous avons été extrêmement sensibles à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à remercier fortement madame **AMARA Hanane**, dont nous n'oublierons jamais son aide, sa présence permanente pour nous, ses conseils et son soutien morale.*

*Nos vifs remerciements aux membres de jury, au Professeur **ACHOURA Djamel** et au Dr. **MELAIS Fatma Zohra**, pour l'honneur qu'ils nous font d'examiner ce travail.*

*Nous remercions nos chers parents et familles pour leur encouragements et leurs soutiens.*

*Enfin, nous n'oublierons pas de remercier tous nos camarades et amis. Demandons à DIEU de leur donner la santé, le bien-être et une longue vie.*

## *Dédicace*

Au nom de dieu le tout-puissant, le tout-compatissant, je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenue durant toute ma vie, et mon père qui est sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci à mes parents.

A mes très chers frères et sœurs : Imen, Riheb, Rihem, Massilva, Aymen, Kouki et surtout mes nièces Rodaina Lamar, Tasnim Sajida .

A mon fiancé Hamza qui m'a toujours aidé et encouragé

A toutes ma famille, mes oncles et tantes.

A toutes mes chères amies : Halla, Aya et mes camarades de la promotion 2021

A toute personne qui m'ont aidé pour faire ce modeste travail.

*GHRIB CHAHINDA*

## *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

A mon père mon support dans la vie, qui m'a appris, m'a supporté et ma dirigé vers la réussite

A ma mère celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espairs son amour a fait de moi ce que je suis  
aujourd'hui.

A ma grand-mère ma profonde gratitude pour son éternel amour, que ce mémoire soit le meilleur  
cadeau que je puisse l'offrir.

A mes frères (Rayene edine et Ramy, Sofiane) et mes sœur (Marwa, Amina, Meriem) qui m'ont  
toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A tata Dalila qui m'a toujours supporté et soutenu tout au long de ce parcours.

A mes chères copines (Meriem, Yassmine , Chaima ,Nardjes et Jihane ) pour leurs encouragements.

Je dédie ce travail aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes  
côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, mes aimables amis, collègues  
d'étude.

*KHADRAOUI SAFA*

## Résumé

Cette étude a pour objet d'étudier l'influence de la variation du volume de pâte sur la performance rhéologique du BAP et le mortier de béton équivalent correspondant (MBE) à base de granulats naturels et recyclés. Cinq différents volumes de pâte ont été testés. L'approche entreprise est de faire augmenter le volume de pâte au dépend du volume des granulats.

La performance rhéologique est approchée par des essais recommandés par l'EFNARC (les lignes directrices européennes pour le béton autoplaçant). Ces essais concernent l'étalement au cône d'Abrams, le temps d'écoulement (T500) pour apprécier la viscosité, la mobilité dans la boîte en L, l'étalement dans la boîte LCPC et la résistance à la ségrégation. Tandis que les essais de caractérisation du MBE et en absence d'outils normalisés pour cet usage, des outils non conventionnels ont été préconisés et il s'agit du mini cône, la mini boîte en L, le temps d'écoulement (T250), la mini boîte LCPC et la résistance à la ségrégation au tamis 2 mm. Également, des tests de résistance mécanique en compression et en traction ont été réalisés sur des spécimens de BAP et MBE.

Il en ressort des résultats obtenus que l'augmentation du volume de pâte apporte une amélioration des propriétés rhéologiques des BAP formulés. Les mélanges à base de granulats recyclés se comportent mieux que ceux à base de granulats naturels. Pour les mélanges MBE, c'est l'inverse qui est observé, la supériorité est assurée par l'utilisation des sables naturels. Le sable recyclé utilisé dans le MBE est à forte absorption d'eau. Les corrélations faites entre les BAP et les MBE sont acceptables pour le cas du comportement à l'état frais. Les coefficients de corrélations trouvés sont plutôt bons. Par contre en résistance mécanique, les corrélations sont inexistantes avec des coefficients ( $R^2$ ) trop médiocres.

**MOTS-CLES** : Béton autoplaçant Mortier de béton équivalent, Granulats recyclés, Propriétés.

## ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو التحقيق في تأثير الاختلاف في حجم العجين على الأداء الريولوجي لـ BAP والملاط الخرساني المكافئ المقابل (MBE) على أساس الركام الطبيعي والمعاد تدويره. تم اختبار خمس حجوم مختلفة من العجين. النهج المتبع هو زيادة حجم العجين اعتمادا على حجم المجاميع.

يتم تقريب الأداء الريولوجي من خلال الاختبارات التي أوصت بها EFNARC المبادئ التوجيهية الأوروبية للخرسانة ذاتية التزجيج. تتعلق هذه الاختبارات بالانتشار في cône d'Abrams، ووقت التدفق (T500) لتقييم اللزوجة، والتنقل في صندوق L، والانتشار في صندوق LCPC ومقاومة الفصل. في حين أن اختبارات توصيف MBE وفي غياب أدوات موحدة لهذا الاستخدام، فقد تم التوصية بأدوات غير تقليدية وهذه هي mini cône، mini L-box و (T250)، صندوق LCPC المصغر ومقاومة الفصل مع غربال 2 مم. أيضا، تم إجراء اختبارات القوة الميكانيكية في الضغط والشد على عينات من BAP و MBE.

ويترتب على النتائج التي تم الحصول عليها أن الزيادة في حجم العجين تجلب تحسنا في الخصائص الريولوجية للـ BAPS التي تم إنجازها. مخالط على أساس المجاميع المعاد تدويرها أداء أفضل من تلك التي تستند إلى المجاميع الطبيعية. بالنسبة للخائط، لوحظ العكس، يتم ضمان التفوق من خلال استخدام الرمال الطبيعية. الرمال المعاد تدويرها المستخدمة في MBE هو امتصاص الماء عالية. الارتباطات التي تتم بين BAPS و MBES مقبولة لحالة السلوك الجديد. معاملات الارتباط وجدت جيدة جدا. من ناحية أخرى من حيث القوة الميكانيكية، لا توجد ارتباطات مع معاملات (R2) متواضعة للغاية.

الكلمات الرئيسية: BAP، MBE، الركام المعاد تدويره، الخصائص

## **Abstract**

The aim of this study was to investigate the influence of varying paste volume on the rheological performance of SCC and the corresponding concrete equivalent mortar (CEM) based on natural and recycled aggregates. Five different paste volumes were tested. The approach taken is to increase the paste volume at the expense of the aggregate volume.

The rheological performance is approximated by tests recommended by EFNARC (the European guidelines for self-compacting concrete). These tests include Abrams cone spread, flow time (T500) to assess viscosity, mobility in the L-box, spread in the LCPC box and segregation resistance. While the MBE characterization tests and in the absence of standardized tools for this purpose, non-conventional tools were recommended and these are the mini cone, the mini L-box, the flow time (T250), the mini LCPC box and the resistance to segregation with a 2 mm sieve. Also, compressive and tensile strength tests were carried out on BAP and MBE specimens.

From the results obtained, it was found that increasing the volume of the paste improves the rheological properties of the SCC formulated. Mixtures based on recycled aggregates perform better than those based on natural aggregates. For CEM mixtures, the opposite is observed, the superiority is ensured by the use of natural sands. The recycled sand used in CEM is highly water absorbent. The correlations made between SCC and CEM are acceptable for the case of fresh behaviour. The correlation coefficients found are quite good. On the other hand, in the case of mechanical resistance, the correlations are non-existent with coefficients ( $R^2$ ) that are too poor.

**KEYWORDS:** Self compacting concrete, Concrete equivalent mortar, Recycled aggregates, Properties

# Sommaire

Introduction générale :.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
Introduction :.....	3
Partie 01 : Généralités sur les BAP.....	3
I-1.1 Qu'est-ce qu'un béton Autoplaçant ?.....	3
I-1.1.1 Avantages techniques :.....	4
I-1.1.2 Avantages économiques :.....	4
I-1.1.3 Avantages écologiques :.....	4
I-1.2 Domaines d'application :.....	4
I-1.3 Composition d'un BAP.....	5
I-1.4.1 Les granulats :.....	5
I-1.4.2 La pâte :.....	6
I-1.4.3 Les ajouts minéraux :.....	6
I-1.4.4 Superplastifiant (SP).....	6
I-1.5 Caractéristiques Rhéologiques Fondamentales Des BAP :.....	7
I-1.5.1 Caractérisation d'un BAP a l'état frais :.....	7
I-1.5.1.1 Mesure d'étalement au cône d'Abrams :.....	7
I-1.5.1.2 Essaie de la boite en L :.....	8
I-1.5.1.3 Essaie de la stabilité au tamis :.....	9
I-1.5.1.4 La boite LCPC.....	9
I-1.6 influence des paramètres de composition sur la rhéologie du BAP :.....	10
I-1.6.1 Influence du volume de pâte sur les propriétés des BAP :.....	10
Conclusion :.....	10
Introduction :.....	11
I-2 Recyclage des déchets :.....	11
I-2.1 Définition :.....	11
I-2.2 L'intérêt du recyclage :.....	12
I-2-3 Déchets de la construction/démolition :.....	13
I-2.4 Granulats de déchets de production de l'industrie du béton.....	13
I-2.5 Influence de l'ancien mortier colle au granulats de béton recyclé :.....	14
I-2.6 Incorporation de granulats recyclés dans les bétons.....	14
Conclusion.....	14

Partie 3 : La méthode de mortier de béton équivalent.....	15
Introduction : .....	15
I-3.3 Principe de la méthode : .....	16
I-3.4 COMPOSITION D'UN MBE ; .....	17
I-3.5.1 Les étapes de la méthode : .....	17
Conclusion : .....	19
CHAPITRE II Matériaux et méthodologie Expérimentales.....	
Partie 1 : Matériaux utilisés.....	20
Introduction : .....	20
II.1. Les matériaux : .....	20
II.1.1. Ciment : .....	20
II.1.2. L'eau : .....	21
II.1.3. Les additions minérales : .....	21
II-1.4L'adjuvant : .....	22
II-1.5 Préparation des granulats : .....	22
II-1.2. Caractérisation physique des granulats : .....	23
II-1.2.1. Masse volumique apparente (Mvapp) : .....	23
II-1.2.2 Masse volumique absolue (Mvabs) : .....	23
II-1.2.3 Le coefficient d'absorption d'eau.....	24
II-1.2.4 La propreté : .....	24
II-1.2.5 L'analyse granulométrique : .....	26
Partie 2 : Formulation et méthodologie expérimentale .....	32
II-2.1. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE : .....	32
II-2.2 Le Béton Autoplaçant (BAP) : .....	32
II-2.2.1 Méthode de formulation de (BAP) : .....	32
II.2.3. Malaxage de béton (BAP) et préparation des éprouvettes : .....	35
II-2.4 La masse volumique de béton durci : .....	36
II.2.5. Caractérisation des BAP à l'état durci : .....	37
II.2.5.1. Résistances mécaniques à la compression : .....	37
II-2.6 L'absorption d'eau par immersion totale : .....	37
Partie 3 : Le mortier de béton équivalent MBE.....	38
II.3.1. Méthode de formulation de (MBE) : .....	38
II.3.2. Calcule les compositions des (MBE) : .....	38
II-3.2 Malaxage de mortier de béton équivalent (MBE) et préparation des éprouvettes : .....	40
II-3.3 Caractérisation de MBE à l'état frais : .....	41

II.3.3.1 Essais d'étalement :	41
II.3.3 .3 Essais du mini boite en L :	42
II-3.3.4 Essais de stabilité au tamis :	42
II-3.4 Caractérisation des MBE à l'état durci :	43
II-3.4.1 Résistances mécaniques à la compression :	43
II-3.4.2 La résistance en traction :	43
II-3.5 L'absorption d'eau par immersion :	44
Conclusion :	44
CHAPITRE III :	45
<b>Partie 01 :</b>	46
<b>Introduction</b>	46
<b>III.1.1 Caractérisation à l'état frais :</b>	46
<b>III.1.1.1 Mobilité au milieu non confiné :</b>	46
III.1.1.2 Mesure du temps d'écoulement (T500) :	48
III.1.1.3 Estimation du seuil de cisaillement	52
III.1.1.45 Résistance à la ségrégation statique :	53
III.1.1.56 La masse volumique à l'état frais :	54
III.1.2 Caractérisation à l'état durci :	55
III.1.2.1 La capacité d'absorption :	55
III.1.2.2 La résistance à la compression :	55
Conclusion :	56
Partie 02 :	57
Introduction :	57
III.2.1 À l'état frais :	57
III.2.1.1 Mobilité en milieu non confiné :	57
III.2.3 A L'état durci :	63
III.2.3 La résistance en compression :	64
Conclusion	68
Partie 3	68
Introduction :	68
III.3.1.Corrélation entre le BAP (100% granulats naturels) et le MBE (remplacement les granulats naturels 100% par un sable de carrière):	68
III.3.1 à l'état frais :	68
III.3.1.1 Etalement :	68
III.3.1.2 Temps d'écoulement T500 / T250 :	69

III.3.1.3 La boîte en LCPC : .....	70
III.3.1.4 La boîte en L : .....	70
III.3.1.5 Stabilité au tamis : .....	71
III.3.1.6 Résistance en compression : .....	71
III.3.2 l'état frais : .....	72
III.3.2.1 Etalement : .....	72
III.3.2.2 Temps d'écoulement T500 / T250 : .....	73
III.3.2.3 La boîte en LCPC : .....	73
III.3.2.4 La boîte en L : .....	74
III.3.2.5 Stabilité au tamis : .....	75
III.3.2.6 Résistance en compression : .....	75
Conclusion : .....	76
Conclusion Générale .....	77
Références bibliographiques .....	81

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Composition d'un béton ordinaire « BO » et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO et d'un BAP. [HAI6046 .pdf].	5
<b>Figure 2.</b> Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement au cône d'Abrams.[4]	7
<b>Figure 3.</b> Des BAP à l'état frais des BAP.	8
<b>Figure 4.</b> Représente Boite en L [35].	8
<b>Figure 5.</b> Dispositif de l'essai de stabilité au tamis.	9
<b>Figure 6.</b> LCPC box [5].	9
<b>Figure 7.</b> Dispersion des granulats par excès de pâte.	10
<b>Figure 8.</b> Les étapes de la production des granulats recyclés. [35].	12
<b>Figure 9.</b> Représentation du cône et mini cône d'Abrams [36].	17
<b>Figure 10.</b> Passage d'un béton à un MBE.	18
<b>Figure 11.</b> Essai de équivalent sable.	25
<b>Figure 12.</b> Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.	31
<b>Figure 13.</b> Outils utilisés pour la caractérisation à l'état frais du BAP.	35
<b>Figure 14.</b> Essai stabilité au tamis.	36
<b>Figure 15.</b> Résistances mécaniques à la compression.	37
<b>Figure 16.</b> la masse de 3éprouvettes.	38
<b>Figure 17.</b> la masse sèche des 3 éprouvettes.	38
<b>Figure 18.</b> Les essais du MBE à l'état frais.	41
<b>Figure 19.</b> Essai d'étalement pour MBE.	41
<b>Figure 20.</b> La masse volumique de MBE frais.	43
<b>Figure 21.</b> Evolution de l'étalement en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et BAP à RG.	47
<b>Figure 22.</b> Evolution du temps d'écoulement (T500mm) en fonction du volume de pâte pour les BAP à GN et BAP à GR.	48
<b>Figure 23.</b> Evolution du rapport de remplissage en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et à RG.	49
<b>Figure 24.</b> Evolution du LCPC en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et BAP à GR.	50
<b>Figure 25.</b> Evolution du temps De la viscosité en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et BAP à RG.	51
<b>Figure 26.</b> Seuil de cisaillement en fonction du volume de pâte pour les BAP à GN et RG.	52
<b>Figure 27.</b> Evolution de stabilité au tamis en fonction du volume de la pâte pour les BAP à RN et à RG.	53
<b>Figure 28.</b> Evolution de la masse volumique en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et à RG.	54
<b>Figure 29.</b> Evolution de l'absorption d'eau en fonction du volume de la pâte pour les BAP à RN et à RG.	55
<b>Figure 30.</b> Evolution de la résistance en compression en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et à RG. (Avec et sans l'absorption d'eau)	56
<b>Figure 31.</b> Etalements MBE naturels et recycle en fonction d'étalement.	58
<b>Figure 32.</b> Temps d'écoulement T250 MBE naturels et recycle en fonction du volume de pâte.	59
<b>Figure 33.</b> Mini boîte LCPC MBE naturels et recycle en fonction du volume de pâte.	60

<b>Figure 34.</b> Influence de changement du volume de sur le rapport H2/H1 pour le mini boîte en L pour MBE.....	61
<b>Figure 35.</b> Essaie de la stabilité au tamis. ....	62
<b>Figure 36.</b> Variation du % de laitance MBE Nat,Recy. ....	62
<b>Figure 37.</b> Masse volumique du MBE à l'état frais. ....	63
<b>Figure 38.</b> Capacité d'absorption d'eau du MBE naturels et recyclé en fonction du volume de pate. ....	64
<b>Figure 39.</b> Evolution du MBE naturels et recyclés à la résistance en compression à 28 jours en fonction du volume de pâte (éprouvettes saturées d'eau). ....	65
<b>Figure 40.</b> Evolution du MBE naturels et recyclés à la résistance en compression à 28 jours en fonction du volume de pâte. ....	66
<b>Figure 41.</b> Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé en fonction du volume de pate (Ab). ....	67
<b>Figure 42.</b> Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé en fonction du volume de pate . ....	67
<b>Figure 43.</b> Corrélation Etalement vs Etalement MBE. ....	69
<b>Figure 44.</b> Temps T500 BAP vs Temps T250 MBE.....	70
<b>Figure 45.</b> Corrélation LCPC BAP vs LCPC MBE. ....	70
<b>Figure 46.</b> Boîte en L BAP vs Mini boîte en L MBE. ....	71
<b>Figure 47.</b> Corrélation Stabilité BAP vs Stabilité MBE. ....	71
<b>Figure 48.</b> Corrélation résistance à la compression à 28 j BAP vs résistance à la compression MBE. ....	72
<b>Figure 49.</b> Corrélation Etalement BAP vs Etalement MBE.....	73
<b>Figure 50.</b> Temps T500 BAP vs Temps T250 MBE.....	73
<b>Figure 51.</b> Corrélation LCPC BAP vs LCPC MBE. ....	74
<b>Figure 52.</b> Corrélation H2/H1 BAP vs H2/H1 MBE. ....	74
<b>Figure 53.</b> Corrélation Stabilité BAP vs Stabilité MBE. ....	75
<b>Figure 54.</b> Corrélation résistance à la compression à 28 j BAP vs résistance à la compression MBE. ....	76

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1 : Composition chimique du ciment utilisé.....</b>	<b>20</b>
<b>Tableau 2 : Composition minéralogique du ciment utilisé.....</b>	<b>20</b>
<b>Tableau3 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre .....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau 4: Composition chimique de la poudre de marbre.....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau 5: Composition minéralogique de la poudre de marbre.....</b>	<b>22</b>
<b>Tableau 6 : les masses volumiques apparentes du gravier naturel et recyclé .....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 7 : Les masses volumiques apparentes des sables : de dune, carrier et recyclé .....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 8 : les masses volumiques absolues du gravier naturel et recyclé.....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 9: les masses volumiques absolues des sables : de dune, carrier et recyclé .....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 10: Le coefficient d'absorption d'eau pour les gravies recyclés .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 11: Equivalent de sable de carrière .....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 12 : Equivalent de sable recyclé .....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 13 : Analyse granulométrique du sable de dune .....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau 14: Analyse granulométrique .....</b>	<b>28</b>
<b>Tableau 15 : Analyse granulométrique du sable de recyclé.....</b>	<b>29</b>
<b>Tableau 16 : Analyse granulométrique de gravier naturel (3/8) .....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau 17 : Analyse granulométrique de gravier naturel (8/16).....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau 18: Analyse granulométrique de la fraction 3/8 recyclée .....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau 19: Analyse granulométrique de la fraction recyclée 8/16 mm.....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau 20 : plans expérimentaux de cette étude : .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau 21 : Compositions des BAP avec granulats naturels pour 1 m<sup>3</sup> : en Kg.....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau 22 : Compositions des BAP avec granulats recyclés pour 1 m<sup>3</sup> : Kg .....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau 23 : Valeurs préconisées pour les essais [AFGC] et [EFNARC].....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau 24: La surface totale développée par la fraction granulaire (Sable de carrière) :(de masse volumique absolue : 2,6 g/cm<sup>3</sup>).....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau 25 :: Les surfaces totales développées pour tous les granulats .....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau 26 : Compositions des MBE (avec remplacement les granulats naturelles pour 1 m<sup>3</sup> _Kg _.....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 27 : Compositions des MBE (avec les granulats recyclés pour 1 m<sup>3</sup> : _Kg .....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 28. Résultats de l'étalement au cône et le T500mm des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau 29. Résultats des tests dans la boîte en L et dans le canal LCPC BOX des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau 30. Calcul de la viscosité selon la formule de Sedran (1999).....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau 31. Résultats de Stabilité au tamis pour le BAP naturel et le BAP recyclé. ....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau 32. Résultats de la masse volumique de BAP à GN et BAP à GR. ....</b>	<b>54</b>
<b>Tableau 33. Résultat de l'absorption d'eau pour le BAP à GN et les BAP à GR.....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau 34. Résultat de résistance à la compression a 28 j pour le BAP à GN et les BAP à GR. ...</b>	<b>55</b>
<b>Tableau 35. Résultats de l'étalement au cône et le T250 mm des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau 36. Résultats de LCPC BOX des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés. ....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 37. les résultats de l'essai mini boîte en L pour des MBE .....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 38. Les résultats d'essai de la stabilité sur tamis pour MBE.....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau 39. Masses volumiques à l'état frais pour MBE. ....</b>	<b>63</b>

<b>Tableau 40.</b> la capacité d'absorption d'eau MBE naturels et recyclés. ....	64
<b>Tableau 41.</b> Résultats de la résistance à la compression du MBE naturels et recyclés (Ab) .....	64
<b>Tableau 42.</b> Résultats de la résistance à la compression du MBE naturels et recyclés. ....	65
<b>Tableau 43.</b> Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé.....	66
<b>Tableau 44.</b> Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé .....	67

## **Introduction générale :**

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. Dans ce but, les recherches continues ont permis de mettre au point plusieurs types de bétons selon les domaines d'utilisation et les objectifs souhaités : les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Le béton autoplaçant (BAP), « self-compacting-concrete (SCC) en anglais », constitue une véritable révolution des bétons. Il se distingue par sa fluidité, sa déformabilité et sa facilité de mise en place sans vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrages à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité.

Le béton est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences à l'état frais et à l'état durci. Ainsi, sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité

L'objectif principal de ce travail est de l'influence de l'augmentation du volume de pâte sur la performance rhéologique et mécanique du béton autoplaçant et le mortier de béton équivalent, et l'évaluation de la possibilité d'utiliser les mortiers pour l'étude du comportement du BAP de granulats recyclés. Détermination des paramètres rhéologiques des BAP et MBE. Mise en place d'outils de mesure correspondant aux dimensions granulaires du MBE pour caractériser l'écoulement en milieux libre et confiné (cône et L-Box) LCPC Box, et la stabilité.

Pour cela, l'étude porte sur un programme expérimental comprenant :

- Etude d'un BAP de granulats recyclés en remplacement des granulats naturels,
- Trouver une possible corrélation des propriétés entre le BAP et le MBE.

Ce document se compose de trois (3) chapitres :

**Le premier chapitre** de ce mémoire présente un état de l'art sur des connaissances générales sur le BAP

En outre, un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci est également développé.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux granulats recyclés, un aperçu général sur les déchets (leur origine, types, et leur recyclage) est présenté, ensuite on mentionne les granulats recyclés et leur processus de fabrication, leurs avantages et leurs inconvénients sont aussi exposés.

Quant à la troisième partie de ce même chapitre est réservée à la présentation de la méthode de mortier du béton équivalent (MBE), le but, le principe et les étapes sont abordés en premier temps,

ensuite vient les détails de calcul de la composition de mortier de béton équivalent et les essais d'évaluation du comportement rhéologique sont présentés, et on termine par un exemple de corrélation entre le BAP et le MBE.

**Le deuxième chapitre** débute par une présentation de la méthode de préparations des matériaux utilisés pour cette étude. Par la suite, une description des différents essais menés sur les échantillons et leurs caractérisations est également mentionnée. Ce chapitre englobe également une description de la formulation ainsi que la préparation de béton autoplaçant à base des graviers naturels et recyclés. Ces bétons seront validés par une série d'essais selon les recommandations de l'AFGC. Par la suite nous nous intéressons à tester l'approche de mortier de béton équivalent afin d'obtenir rapidement des résultats sur les critères à l'état frais, la démarche et le mode opératoire sont détaillés.

**Le troisième chapitre** est consacré à la caractérisation des BAP à base de granulats naturels ainsi des BAP à bases de granulats recyclés, la caractérisation du béton de mortier équivalent (MBE) et la présentation des différentes corrélations trouvées entre le BAP et le MBE pour différentes propriétés

Les conclusions générales clôturent ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus dans le présent travail. Des recommandations de recherche sont aussi présentées pour contribuer à la mise en place de nouvelles informations pertinentes concernant ces nouveaux matériaux du génie civil.



# **CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Introduction :**

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente une amélioration des conditions de travail sur site, ainsi qu'un confort acoustique au voisinage du chantier et plus particulièrement en zone urbaine. Le béton autoplaçant est principalement caractérisé par son comportement à l'état frais et plus particulièrement par sa fluidité élevée et sa résistance suffisante à la ségrégation. Pour satisfaire les exigences d'un BAP, deux paramètres doivent être vérifiés et qui sont : un faible taux de cisaillement et une haute résistance à la ségrégation. Ces deux paramètres sont interdépendants. Ainsi, pour diminuer le taux de cisaillement du mélange, l'eau est ajoutée mais elle peut affecter la viscosité du mélange en diminuant ainsi sa résistance à la ségrégation. De ce fait, le bon choix des constituants s'avère souvent nécessaire pour certaines formulations [1].

## **Partie 01 : Généralités sur les BAP**

### **I-1.1 Qu'est-ce qu'un béton Autoplaçant ?**

Le béton autoplaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable, il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu sans apport d'énergie extérieure (vibration) et reste homogène au cours l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique). La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines (et/ou) l'emploi d'agents de viscosité. La fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement [2].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais.

Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- Une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- Une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point [3].

### **I-1.1.1 Avantages techniques :**

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.

### **I-1.1.2 Avantages économiques :**

- Réduction du coût de la main d'œuvre et du temps de bétonnage ;
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

### **I-1.1.3 Avantages écologiques :**

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).

Cependant, il est à signaler une augmentation du coût des matières premières suite à l'incorporation d'adjuvants et différentes additions minérales.

De nombreuses études se sont intéressées en termes de performance du BAP en prenant comme paramètre la qualité de pâte. Cette dernière ne peut être garantie que par une augmentation de la quantité de ciment et par conséquent c'est une augmentation du volume de pâte qui est visée dans la majorité des cas. Ceci aurait des retombés préjudiciables sur l'environnement (émissions de CO<sub>2</sub> plus accrue) et sur l'économie. L'augmentation du volume de pâte favorise le rendement d'écoulement ce qui améliore le desserrage des gros granulats (graviers). Les aptitudes à l'écoulement et à la stabilité sont fortement exigées dans le cas des bétons autoplaçants.

Dans le présent travail il est question d'améliorer le volume de pâte sans pour autant faire croître la quantité de ciment, il s'agit de le faire à partir de l'augmentation de l'addition minérale tout en assurant une qualité acceptable du béton frais et durci. Les performances à l'état frais doivent obligatoirement être en adéquation avec les exigences requises pour la fluidité du BAP [4].

## **I-1.2 Domaines d'application :**

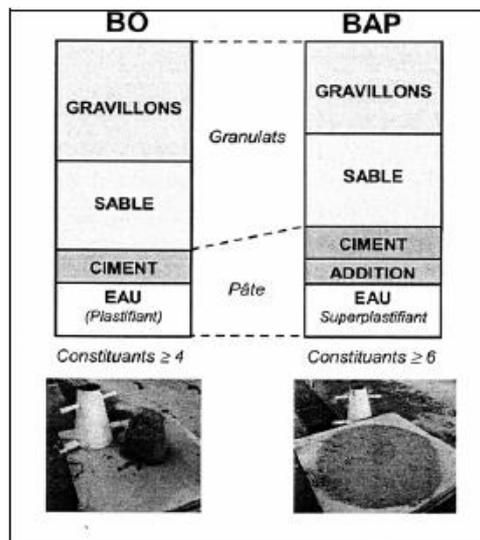
Le BAP est une solution bien adaptée pour

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.

- Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- Rattrapage de niveau en rénovation.
- Fondations superficielles.
- Voiles, poteaux, poutres [5].

### I-1.3 Composition d'un BAP

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte. Par rapport aux bétons ordinaires (BO), les bétons autoplaçants (BAP) ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton. (Voir figure I.1).



**Figure 1.** Composition d'un béton ordinaire « BO » et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO et d'un BAP. [HAI6046 .pdf].

Les constituants du béton autoplaçant ont un rôle très important dans la détermination des propriétés de ce matériau aux états frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des bétons autoplaçants. [6]

### I-1.4 Matières premières utilisées dans les bétons autoplaçants :

#### I-1.4.1 Les granulats :

La nature et la forme des granulats influencent fortement les propriétés des bétons autoplaçants aux états frais et durci [7] Les bétons autoplaçants peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, afin d'éliminer le risque de blocage du béton en zone confiné, il faut limiter le volume des granulats en éliminant les gros diamètres. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité du liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux

facteurs conduisent à prendre, pour les bétons autoplaçants, un rapport gravier/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée [8]

#### **I-1.4.2 La pâte :**

L'eau et le ciment sont les deux principaux constituants de la pâte de ciment qui constituent la matrice d'un béton et leurs influences sur l'écoulement sont implicitement mises en évidence en se basant sur le rapport E/L. Ce paramètre est très relié aux différentes propriétés des bétons à l'état frais et durci. [9]

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment+ additions+ eau efficace) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les bétons autoplaçants est donc élevé (330 à 400l/m<sup>3</sup>) [6]

#### **I-1.4.3 Les ajouts minéraux :**

Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substituées au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier granulé de Haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes. Les deux dernières additions ont des propriétés Pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) dissous issu des réactions d'hydratation, pour former des composés de silicates et d'aluminates de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques [10]

#### **I-1.4 .4 Superplastifiant (SP)**

Les adjuvants les plus couramment utilisés pour les BAP sont les superplastifiants (additifs réducteurs d'eau à haute capacité).

La majorité des superplastifiant sont produits à base de poly carboxylates, leur avantage étant la possibilité de l'obtention d'un garnissage plus dense et d'une porosité plus faible dans le béton en augmentant la fluidité et en améliorant la résistance à la compression et en améliorant l'hydratation par une plus grande dispersion des particules de ciment., ce qui aide à produire des BAP de haute résistance et une bonne durabilité. L'utilisation d'un superplastifiant permet d'atteindre deux objectifs.

Le premier, l'utilisation de SP permet de contrôler les propriétés d'écoulement, qui sont d'une importance majeure pour la conception de produits tels que le béton, le ciment et le béton armé.

D'une importance majeure pour la conception des BAP, et le second, le SP permet de réduire le rapport eau/ciment tout en maintenant la maniabilité. Afin d'atteindre la résistance et la durabilité souhaitées. L'utilisation de SP améliore la fluidité des BAP [12, 13].

En outre, un superplastifiant t améliore l'aptitude à l'écoulement du BAP, Cependant, une quantité élevée peut provoquer une ségrégation et un ressuage.

### **I-1.5 Caractéristiques Rhéologiques Fondamentales Des BAP :**

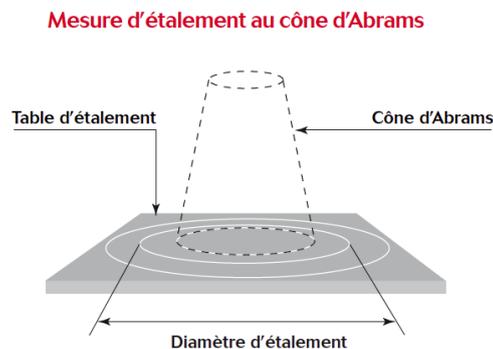
Un mélange de béton ne peut être classé comme un béton autoplaçant que si les conditions relatives aux propriétés à l'état frais telles que la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation sont remplies. Chacune de ces capacités doit être évaluée à l'aide de l'essai d'affaissement et de l'essai de la boîte en Let l'essai de la stabilité aux tamis. Une revue des méthodes d'essai est présentée dans les sections suivantes :

#### **I-1.5.1 Caractérisation d'un BAP a l'état frais :**

Quarts principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP.

##### **I-1.5.1.1 Mesure d'étalement au cône d'Abrams :**

Cet essai est très simple à faire puisque qu'on utilise le même équipement que pour l'affaissement. Il permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant. Plus l'étalement est élevé, meilleure est la déformabilité [14]



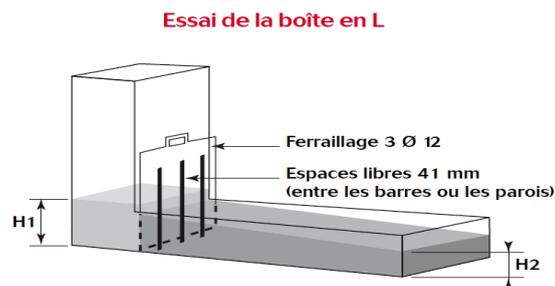
**Figure 2.** Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement au cône d'Abrams.[4]



**Figure 3.** Des BAP à l'état frais des BAP.

### I-1.5.1.2 Essai de la boîte en L :

L'essai de la boîte en L est utilisé pour évaluer la capacité de remplissage et de passage du béton autoplaçant, ou en d'autres termes, la capacité du béton à passer à travers des barres renforcées sans blocage ou ségrégation. Capacité du béton à passer à travers des barres renforcées sans blocage ni ségrégation. Après avoir rempli la colonne verticale de la boîte en L, on soulève la porte pour permettre au béton de s'écouler dans la partie horizontale après avoir traversé les barres d'armature. Deux mesures sont effectuées, (H1, H2) hauteurs de béton au début et à la fin de la partie horizontale, respectivement. Le rapport H2/H1 représente la capacité de remplissage, et cette valeur devrait être de 0,8~1 [15]



**Figure 4.** Représente Boite en L [35].

### I-1.5.1.3 Essai de la stabilité au tamis :

C'est un essai de qualification des bétons autoplaçants face au risque de ségrégation. Il consiste à déposer deux litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5mm d'ouverture. [14] Après 15minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2L donne l'indice de ségrégation. On vise un indice de 15% au plus pour un béton autoplaçant [16]



Figure 5. Dispositif de l'essai de stabilité au tamis.

### I-1.5.1.4 La boîte LCPC

L'essai à la boîte LCPC est une nouvelle méthode alternative de mesure du seuil d'un BAP qui remplit toutes les conditions théoriques pour corrélérer le seuil du matériau à la grandeur mesurée. [5]

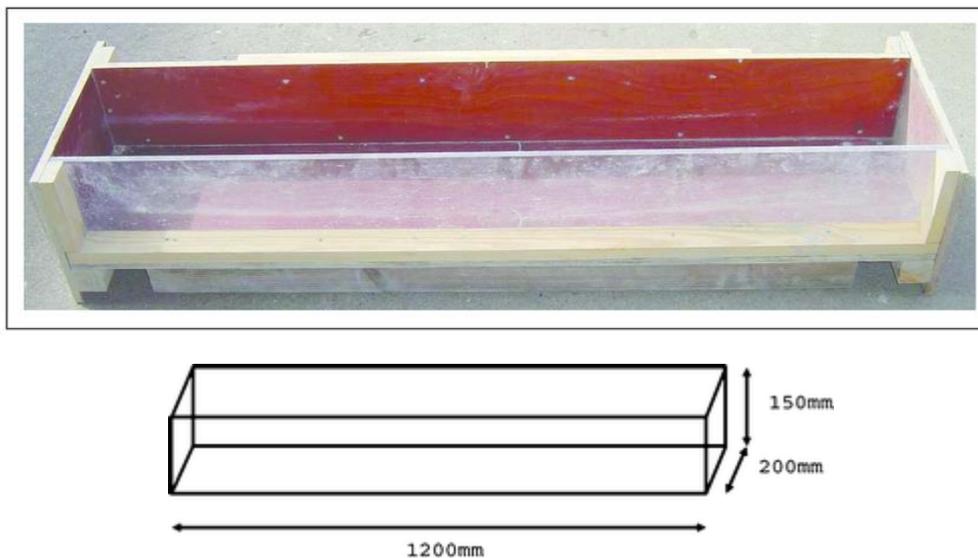


Figure 6. LCPC box [5].

## I-1.6 influence des paramètres de composition sur la rhéologie du BAP :

### I-1.6.1 Influence du volume de pâte sur les propriétés des BAP :

Le volume de pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats. Ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocage de l'écoulement

Un excédent de pâte de ciment dépassant 90 l/m<sup>3</sup> peut s'avérer nécessaire en cas de faible valeur du rapport E/Lou d'une proportion élevée de granulats concassés. L'étanchéité et la résistance à la compression d'un tel béton s'en trouveront améliorées. Si le volume excédentaire de pâte de ciment est nettement inférieur à 90 l/m<sup>3</sup>, on doit s'attendre à un étalement plus faible, ainsi qu'à une tendance accrue à l'apparition de blocages au droit des barres d'armature, de nids de gravier et de bullage sur les parements [17] .

Un volume de pâte important Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé [4]

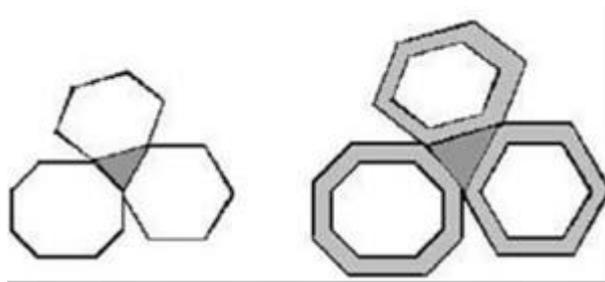


Figure 7. Dispersion des granulats par excès de pâte

### Conclusion :

Le béton auto plaçant (BAP) est un type avancé de béton qui peut couler et se compacter sous son propre poids, sans aide extérieure ni vibration. Traverser des configurations géométriques complexes sans présenter de ségrégation. L'utilisation du BAP présente de nombreux avantages l'augmentation de la productivité de la construction, l'amélioration de la sécurité du chantier et l'amélioration de la qualité du béton.

Ces avantages doivent toutefois être mesurés par rapport aux coûts potentiellement plus élevés des matériaux et à la nécessité d'une plus grande technicité et à la nécessité d'une plus grande expertise technique et de mesures de contrôle de la qualité. Il a été utilisé avec succès pour une large gamme d'applications de béton préfabriqué et de béton prêt à l'emploi.

Ce chapitre a donné une vue d'ensemble du BAP, y compris ses propriétés, le principe de base de la conception de son mélange, le mécanisme d'obtention d'un résultat satisfaisant. Principe de base de la conception de ses mélanges, le mécanisme d'obtention de la capacité d'auto-compactage et l'influence des matériaux de remplacement du ciment et des adjuvants sur le comportement du béton. Des matériaux de remplacement du ciment et des adjuvants sur les caractéristiques du BAP à l'état frais.

Il a été conclu qu'à l'état frais, les additions minérales améliorent la capacité d'auto-compactage, la fluidité et la cohésive, tout en améliorant sa performance dans les conditions d'utilisation tout en améliorant ses performances à l'état durci. [15]

## **Partie 2 : Une revue sur les granulats recyclés**

### **Introduction :**

Depuis des années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de rebuts de fabrication de produits en béton et de déchets divers ne sont pas ou très peu utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil. Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Notre objectif, dans ce premier chapitre, est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les granulats qui ont fait l'objet de recherche comme substitut de granulats naturels. Cette synthèse met en avant l'origine de ces granulats et aussi présente les performances des bétons confectionnés avec ces granulats recyclés.

### **I-2 Recyclage des déchets :**

#### **I-2.1 Définition :**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation [18].



**Figure 8.** Les étapes de la production des granulats recyclés. [35].

### I-2.2 L'intérêt du recyclage :

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats. Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes [19] En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes [20]

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

- Une économie de la ressource naturelle.
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge. Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO<sub>2</sub> du fait que :
- Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO<sub>2</sub> attribuée au transport de granulats ;
- Le béton concassé est susceptible de piéger le CO<sub>2</sub> en se carbonatant [21]
- La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO<sub>2</sub> des cimenteries.

### **I-2-3 Déchets de la construction/démolition :**

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets. Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature [22]

Les bétons armés sans enduit ni plâtre ;

- Les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux ; etc. ;
- Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique ; etc. ;
- Les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10 % ;
- Les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

Les régions françaises productrices de granulats recyclés sont Lille de France (qui produit 52% des granulats recyclés français), la région Nord-Pas-de-Calais (avec la reconversion des friches industrielles), dans une moindre mesure l'Alsace, et depuis 1994 la région Rhône- Alpes [19]

### **I-2.4 Granulats de déchets de production de l'industrie du béton**

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton) ; il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables ; ces types de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 1 % de la masse de béton produite selon les secteurs concernés.
- Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture ; ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 3 % selon les secteurs et selon les conditions imposées par tri [23]
- Lorsqu'ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets (emballages, chiffon, etc.), ces morceaux et débris de béton durcis et propres sont considérés comme des déchets inertes. Ils sont le plus souvent acceptés gratuitement par des entreprises de travaux publics pour constituer des remblais ou par des entreprises de traitement de déchets de chantier. Toutefois, pour certains secteurs de l'industrie du béton (planchers, ossatures, murs, assainissement), les produits défectueux fortement armés ou précontraints et volumineux posent des problèmes d'enlèvement.

## **I-2.5 Influence de l'ancien mortier colle au granulats de béton recyclé :**

L'ancien mortier collé au granulats ne peut être éliminé facilement et sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulats-pâte de ciment et ainsi que de la puissance de concassage lors de la fabrication des recyclés. L'effet de la pâte cimentaire n'influe pas beaucoup la résistance à long terme. Néanmoins, la quantité du mortier attaché aux granulats recyclés influe la résistance à la flexion et l'énergie de rupture qui diminuent avec l'augmentation de la quantité du mortier. Aussi, ils influent sur le rapport E/L parce que les granulats recyclés absorbent beaucoup l'eau. Les bétons à base de granulats recyclés se caractérisent par une densité faible, une plus forte capacité d'absorption d'eau élevée et une forte porosité que le béton naturel. Cela est dû sans doute à la proportion en volume importante des pores capillaires. [24]

## **I-2.6 Incorporation de granulats recyclés dans les bétons**

Les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante [25, 26]. Tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre (Evangelista, 2010) (Gomez, 2002). Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc.) [27]

Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent. Dans cette méthode, on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton [28]

## **Conclusion**

Le béton est un matériau qui est souvent perçu comme un lieu potentiel pour les déchets, en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclées.

Outre l'avantage environnemental, la proximité est également une condition indispensable de la compétitivité des granulats recyclés. Pour développer l'incorporation de granulats recyclés dans la fabrication des bétons pour la construction, il reste à démontrer scientifiquement que ces matériaux ont les qualités techniques requises. Des études sont menées actuellement en ce sens. Et elles consistent à l'élaboration et à la caractérisation des bétons de ces granulats recyclés. [29]

## **Partie3 : La méthode de mortier de béton équivalent**

### **Introduction :**

En raison des critères de performance élevés, la formulation d'un béton de haute performance de fluidité adapté peut nécessiter l'utilisation de plusieurs adjuvants chimiques et ajout cimentaires. L'optimisation du dosage du béton nécessite plusieurs essais sur béton et beaucoup de temps. Afin de faire de choix parmi différents adjuvants pour satisfaire des besoins spécifiques, Schwartzentruber a développé une méthode qui consiste concevoir à partir d'un béton, un mortier de béton équivalent (MBE) dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton. La méthode MBE permet de sélectionner rapidement parmi différents adjuvants celui qui répond le mieux aux exigences d'efficacité (rapport dosage/cout), de maintien rhéologique et de délai de décoffrage. Cette méthode ne remplace pas les études traditionnelles de composition du béton, mais elle améliore, par sa rapidité et sa simplicité, la formulation des bétons. Elle constitue une méthode fiable notamment pour la mise au point des bétons adjuvants, et permet de détecter les éventuelles anomalies rhéologiques pouvant apparaître lors de la mise en œuvre du béton

### **I-3.1 Définition :**

Le MBE a une composition similaire du béton qui le compose. Pour passer du béton au MBE, il faut remplacer les granulats du béton par du sable, parce que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent plutôt que leur volume [36]

Le concept de cette méthode est que la composition du MBE peut être déduite de celle du béton de la manière suivante :

- mêmes nature et dosage en ciment ;
- mêmes natures et dosages en additions minérales ;
- même rapport  $E_{eff}/C$  ;
- mêmes nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction ;
- utilisation du sable du béton ;
- ajout d'une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire que les gravillons retirés.

Cette définition est valable tant que les gravillons ne contiennent pas une part significative d'éléments inférieurs à 5 mm Dans le cas contraire, ces particules doivent être récupérées par tamisage et ajoutées au mortier. [31]

### **I-3.2 But de la méthode MBE :**

L'approche du Mortier de béton Equivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de teste sur béton. En fonction des essais préalable réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours

des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique. [32]

### **I-3.3 Principe de la méthode :**

Le principe de calcul des MBE consiste à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté [33]

Ce principe est basé sur deux réflexions permettant de penser que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent, plutôt que leur volume :

- la première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.

- la seconde a pour origine la chimie de la prise, les hydrates se formant plutôt au niveau des interfaces Le MBE, pour Mortier de Béton Equivalent, est le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie. Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 2 mm Lorsque l'on passe de la formulation d'un béton à celle d'un MBE :

- L'étendue granulométrique est diminuée, ce qui conduit à une augmentation des distances inter-granulaires.

- Les graviers du béton sont remplacés par du sable de même surface. Le rapport surface/volume des petites particules étant plus élevé que pour les grandes, le gravier est remplacé par une masse moindre de sable. Indépendamment de l'air (non contrôlable), la capacité calorifique du MBE est alors plus faible que celle du béton associé, alors que la chaleur d'hydratation produite est conservée (mêmes quantités d'eau et de ciment).

Les MBE devraient donc atteindre des températures plus élevées que leurs bétons associés.

Leurs réactions de prise seront ainsi plus thermos activés que celles des bétons.

On peut penser qu'il existe un lien entre la fluidité initiale des bétons et celle des MBE associés, le volume d'eau et les surfaces de ciment et de granulats étant conservées. Cet aspect a d'ailleurs été vérifié lors du projet Calibré. Les essais ont été réalisés au moyen du classique cône d'Abrams pour les bétons. Un mini-cône a par contre été utilisé pour les MBE, du fait de la diminution du volume de matériau. Une corrélation linéaire a alors été trouvée entre l'affaissement des bétons et l'étalement des MBE. La droite obtenue varie selon les formulations testées et selon les températures de coulée. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,72 (plutôt mauvais) et 0,99 (bonne corrélation) [36]

### I-3.4 COMPOSITION D'UN MBE ;

La composition du mortier de béton équivalent peut être déduite de celle du béton de la manière suivante :

- Même nature et dosage en ciment
- Même nature et dosage en additions minérales
- Même rapport E/L
- Même nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction
- Utilisation du sable du béton [32]

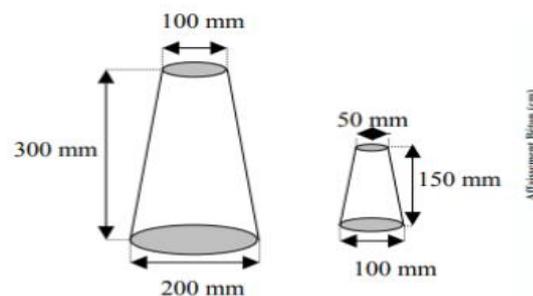


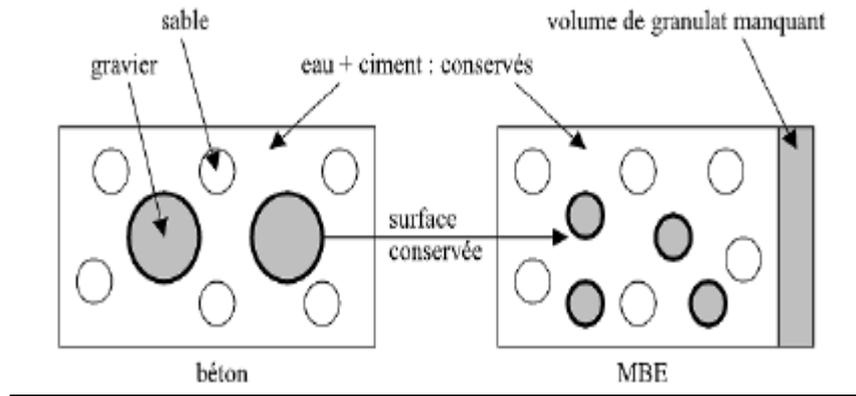
Figure 9. Représentation du cône et mini cône d'Abrams [36].

#### I-3.5.1 Les étapes de la méthode :

Pour contourner la lourdeur des études sur béton, et suite au manque d'appareillage fiable de mesure des déformations dimensionnelles des bétons, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue dans ce présent document consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons retirés. Pour cette raison, la méthode a été appelée méthode du mortier de béton équivalent ou méthode MBE.

La présente méthode d'essai a été élaborée par le groupe de travail traitant des "anomalies de comportement rhéologique du béton" du Projet National Calibré - Opération du Plan Génie Civil. Elle découle de la méthode proposée par le Centre technique de Guerville d'Italcementi Group et complétée par les observations expérimentales des autres partenaires.

Calculer un MBE consiste ainsi à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté.



**Figure 10.** Passage d'un béton à un MBE.

### **Calcul surface développée par les granulats :**

Il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

#### **Analyse granulométrique et définition des tranches granulaires successives :**

L'analyse granulométrique de chaque fraction permet d'obtenir des tranches granulaires et chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [Ds] et par un tamis inférieur [Di].

Les tamis à considérer sont les suivants :

20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

#### **Calcul des diamètres moyens des tranches granulaires :**

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (di) défini par la relation :

$$d_i = (D_s + D_i) / 2$$

#### **Calcul du volume d'une particule de chaque tranche :**

Le volume de chaque type de particule est donné par la relation :

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6$$

#### **Calcul de la surface développée pour une particule de chaque tranche :**

La surface développée pour chaque type de particule est donnée par la relation :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2$$

#### **Calcul du volume massique de la fraction granulaire :**

Le volume massique de la fraction granulaire est déterminé à partir de la masse volumique :

$$\omega_j = 1 / \mu_g$$

#### **Calcul du volume total de chaque tranche granulaire :**

Le volume total de Chaque Tranche Granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la fraction granulaire.

$$V_i = \omega_j \cdot M_i$$

### **Calcul du nombre de particules dans chaque tranche granulaire :**

Le nombre de particules est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule ; ces paramètres  $v_i$  et  $V_i$  ont été définis :

$$N_i = V_i / v$$

### **Calcul de la surface développée par chaque tranche granulaire :**

La surface développée par les particules dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule par le nombre de particules :

$$S_i = N_i \cdot S_i$$

### **Détermination de la surface totale développée par la fraction granulaire :**

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum S_i$$

### **Calcul de la composition du mortier de béton équivalent :**

La composition du MBE est réalisée en prenant les mêmes quantités de matériaux que pour le béton, sans les gravillons et remplacer la quantité de gravier du béton par une quantité du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté.

La quantité de sable ( $S'_i$ ), nécessaire pour remplacer une fraction de gravier ( $G_i$ ), est déterminée par la formule :

$$S'_i = G_i \cdot SD_G / SD_s$$

Donc le dosage en sable du MBE est la somme des ( $S'_i$ ) avec le dosage initial du béton (S). [36]

### **Conclusion :**

La méthode de mortier équivalent est une nouvelle méthode introduite dans la formulation des bétons adjuvants. Elle consiste concevoir, à partir d'une composition de béton qui contient du ciment ; de l'eau ; du Sable ; des adjuvants éventuellement des additifs, qui présente une bonne Ouvrabilité à l'état frais et des propriétés physico- mécaniques définies à l'état durci. Un mortier, dit mortier de béton équivalent (MBE), dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton. [34]



## **CHAPITRE II Matériaux et méthodologie Expérimentales**

## Partie 1 : Matériaux utilisés

### Introduction :

La formulation d'un BAP requiert une étude précoce notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proposition optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Dans ce qui suit sont décrits les différents constituants entrant dans la composition d'un béton courant « vibrer » et d'un béton autoplaçant (granulats, additions minérales, adjuvants et eau).

Les constituants de base d'un béton ordinaire (ou courant) sont le ciment, l'eau et les granulats.

Les bétons autoplaçant sont obtenus par ajouts d'adjuvants et d'additions minérales.

### II.1. Les matériaux :

Les matériaux utilisés dans cette campagne expérimentale font partie d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

#### II.1.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est conforme aux normes NF P 15-301 et ENV 197-1 [105, 106]. C'est un ciment portland composé de classe CEM II 42,5, fabriqué à Hdjar-Essoud Wilaya de Skikda. La finesse de mouture de ce ciment est de 3280 cm<sup>2</sup>/g, caractéristique fournie par le fabricant du ciment.

Les compositions chimique et minéralogique du ciment :

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions sont données dans le tableau 1 et 2 respectivement (les résultats sont fournis par la cimenterie) :

**Tableau 1 : Composition chimique du ciment utilisé**

Oxides (%)									
CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si O <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	P.A. F
58.59	6.58	24.92	3.65	1.21	0.08	0.85	0.00	2.17	1.70

**Tableau 2 : Composition minéralogique du ciment utilisé**

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
57	17.5	10.5	9

### II.1.2. L'eau :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable du réseau publique au niveau du département de génie civil (Université Badji Mokhtar Annaba).

### II.1.3. Les additions minérales :

Dans notre étude nous utilisons un seul type d'addition qui est la poudre de marbre. Elle est commercialisée par l'entreprise nationale de marbre « ENAMARBRE » de la carrière de Fil-Fila (SKIKDA).

**Tableau3 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre**

<b>Couleur</b>	<b>Blanche</b>
<b>Masse volumique</b>	972.0kg/cm <sup>3</sup>
<b>Masse spécifique</b>	3.03g/cm <sup>3</sup>
<b>SSB</b>	5500cm <sup>2</sup> /g

**Tableau 4: Composition chimique de la poudre de marbre.**

<b>Element</b>	<b>(%)</b>
SiO <sub>2</sub>	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12
CaO	54.54
MgO	0.72
SO <sub>3</sub>	0.46
K <sub>2</sub> O	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
Ti O <sub>2</sub>	0.01
P.A.F	43.53

**Tableau 5: Composition minéralogique de la poudre de marbre.**

Minéraux présents	%
Quartz SiO <sub>2</sub>	1.5
Calcite CaCO <sub>3</sub>	95.5
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	03
Albite NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	---
Feldspaths K (Orthoclase) (K <sub>2</sub> O 6SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	---
Illite 2K <sub>2</sub> O Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	
Minéraux ferrugineux + Autres	---

#### **II-1.4 L'adjuvant :**

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant retardateur de prise de Sika dans notre travail on a utilisé Sika® ViscoCrete 3050). Avec un dosage de 1,2%

#### **II-1.5 Préparation des granulats :**

On a choisi pour cette étude deux types de granulats naturel et recyclé : gravier naturel (GN) et gravier recyclé (GR). Le GN est composé de deux fractions (3/8 et 8/16) mm, il est d'origine calcaire, provenant des carrières AIN ABIDE de la région de Constantine.

Le (GR) de fractions (3/8 et 8/16) mm aussi, il a été préparé au laboratoire de Génie Civil de l'université d'ANNABA. Le gravier recyclé a été récupéré d'un vieux béton massif, peu ferrillé, trouvé à Sidi Ammar. On a procédé à la fragmentation des blocs du béton de démolition (dalles préfabriquées) à l'aide d'une presse hydraulique, et à l'aide d'un marteau on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées à l'ouverture du concasseur. Celui-ci est à double mâchoires l'un fixe et l'autre mobile. La dimension de l'ouverture de sortie du concasseur est réglée de telle façon que le matériau (mélange) qui sort du concasseur ait la dimension maximale du gravier. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires. Les produits obtenus sont : sable 0/3, gravillons 3/8 et 8/16. Pour éliminer les impuretés les fractions granulométriques ont été lavées puis séchées.

## II-1.2. Caractérisation physique des granulats :

### II-1.2.1. Masse volumique apparente (Mvapp) :

Elle est déterminée selon les normes NFP18-554 pour les graviers et NFP18-555 pour les sables. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume (V) du matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité (M), pour en déduire la masse volumique selon la formule suivante :

$$Mvapp = M/V \text{ (g/cm}^3 \text{ ou kg /m}^3\text{) Ou : M : La masse sèche du matériau.}$$

V en : représente le volume du récipient

Les tableaux suivants présentent les résultats des essais :

**Tableau 6 : les masses volumiques apparentes du gravier naturel et recyclé**

Fraction	GN 3/8	GN 8/16	GR 3/8	GR 8/16
Mv APP (kg/l)	1,49	1,36	1,33	1,45

**Tableau 7 : Les masses volumiques apparentes des sables : de dune, carrier et recyclé**

SABLE	RECYCLE	DUNE	CARRIERE
Mv APP (KG/l)	1,26	1,62	1,68

### II-1.2.2 Masse volumique absolue (Mvabs) :

Cet essai a été réalisé selon la norme NFP18-558. D'abord on va remplir dans un tube de verre un volume d'eau (V1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le tube de verre et le niveau de l'eau va augmenter (V2). La différence entre le niveau V1 et V2 est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue calculée par la formule suivante :

$$Mvabs = M/V2 - V1$$

Les masses volumiques des granulats utilisés trouvés dans les tableaux suivants :

**Tableau 8 : les masses volumiques absolues du gravier naturel et recyclé**

Fraction	GN 3/8	GN 8/16	GR 3/8	GR 8/16
Mv ABS (kg/l)	2,6	2,6	2,5	2,5

**Tableau 9: les masses volumiques absolues des sables : de dune, carrier et recyclé**

SABLE	RECYCLE	DUNE	CARRIERE
Mv ABS (kg/l)	2,35	2,6	2,6

➤ Aussi nous avons trouvé que la masse volumique de la poudre de marbre est  $3.03\text{g/cm}^3$ .

### II-1.2.3 Le coefficient d'absorption d'eau

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes NF P 18-554 et NF P 18-555. Il est déterminé selon la formule suivante :

$$Ab\% = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$

Ma en (g) : la masse du l'échantillon immergé pendant 48h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche). - Ms en (g) : la masse de l'échantillon séché à 105°C.

Les résultats de la capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés sont représentés dans le tableau suivant par contre les granulats naturels leur absorption est négligeable

**Tableau 10: Le coefficient d'absorption d'eau pour les gravies recyclés**

Temps d'immersion (min)	GR 8/16 (%)	GR 3/8 (%)
5	2,45	4,1
10	2,82	4,15
15	2,87	4,2
20	3,1	4,77
25	3,27	4,81
30	3,37	4,82
60	3,6	5,05
120	3,78	5,12
24 H	3,83	5,17
48 H	3,95	6,2

### II-1.2.4 La propreté :

L'essai d'équivalent de sable consiste à séparer les impuretés argileuses dans le sable qui quantifie la propreté selon la norme (NF P 18-598). L'équivalent de sable visuel est donné par la formule :

$$Es = (h2 / h1) \times 100$$

Nous avons fait cet essai sur les trois types de sable : de dune, carrière et recyclé comme définie sur figure suivante :



**Figure 11.** Essai de équivalent sable.

Les résultats de cet essai sont montés dans les tableaux suivants :

Les sables utilisés dans cette étude, le premier c'est le sable de dune roulé, siliceux provenant de la sablière HWIJBAT de la région de Tébessa :

**Tableau II. Equivalent de sable de dune**

	H1	H2	ES %
Essai 1	9,3	11	84,55
Essai 2	9,5	10,9	87,16
Essai 3	8,1	11	73,64
		MOY	81,78

Le deuxième est un sable de carrière d'origine calcaire, provenant de la sablière d'AIN ABID de la région de Constantine.

**Tableau 11: Equivalent de sable de carrière**

	H1	H2	ES %
Essai 1	8	10,5	76,19
Essai 2	8	11	72,73
Essai 3	8	10,8	74,07
		MOY	74,33

**Tableau 12 : Equivalent de sable recyclé**

	H1	H2	ES %
Essai 1	10,5	12,8	82,03
Essai 2	10	12,2	81,97
Essai 3	10,8	12,4	87,10
	MOY		83,70

### **II-1.2.5 L'analyse granulométrique :**

L'analyse granulométrique des granulats s'est déterminée selon la norme NFP18-560, elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse  $M(200D < M < 600D)$  préalablement séché dans une étuve ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulats. Le tamisage est considéré fini lorsque le refus ne se modifie pas de plus de 1% en 1 minute de tamisage. Après on calcule le refus sur chaque tamis, et le cumul avec les précédents. et le matériau restant dans le fond (le tamisât du dernier tamis).

#### **Courbes granulométriques :**

Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale du matériau et exprimées en pourcentage, servent pour tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D sont indiquées en abscisse.

#### **Le Module de Finesse (MF) :**

Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540 [02], et calculé selon la formule suivante :

$$MF = \Sigma \text{ des refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm) } / 100$$

#### **Les résultats des analyses granulométriques :**

##### **Sable de dune :**

La masse initiale = 1000g (200\*D)

**Tableau 13 : Analyse granulométrique du sable de dune**

<b>Tamis</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Refus Cum. (G)</b>	<b>Refus Cum. (%)</b>	<b>Tam. Cum. (%)</b>
5	2,6	2,6	0%	100%
4	2,9	5,5	1%	99%
3,15	3,2	8,7	1%	99%
2,5	3,6	12,3	1%	98,76%
2	8	20,3	2%	98%
1,6	9	29,3	3%	97%
1,25	40,4	69,7	7%	93%
1	49	118,7	12%	88%
0,63	158	276,7	28%	72%
0,5	170	446,7	45%	55%
0,315	296,9	743,6	75%	25%
0,2	181	924,6	93%	7%
0,16	15,4	940	95%	5%
0,125	30,3	970,3	98%	2%
0,08	13,3	983,6	99%	1%
<b>Fond</b>	5,9	<b>Perte</b>	10,5	
<b>MF</b>			2,07	

Sable de carrière :(mi=1000g)

**Tableau 14: Analyse granulométrique**

<b>Tamis</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Ref. cum. (g)</b>	<b>Ref. cum. (%)</b>	<b>Tam. cum. (%)</b>
5	8,3	8,3	1%	99%
4	100,6	108,9	11%	89%
3,15	121,8	230,7	23%	77%
2,5	102,5	333,2	34%	66%
2	66	399,2	41%	59%
1,6	68,7	467,9	48%	52%
1,25	75,2	543,1	55%	45%
1	43,4	586,5	60%	40%
0,63	84,3	670,8	68%	32%
0,5	40	710,8	72%	28%
0,315	97,2	808	82%	18%
0,2	56,3	864,3	88%	12%
0,16	25,3	889,6	90%	10%
0,125	45,8	935,4	95%	5%
0,08	17,6	953	97%	3%
<b>Fond</b>	30	<b>Perte</b>	17	
<b>MF</b>			3,31	

Sable recyclé :( mi=1000g)

**Tableau 15 : Analyse granulométrique du sable de recyclé**

<b>Tamis</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Ref. cum. (g)</b>	<b>Ref. cum. (%)</b>	<b>Tam. cum.(%)</b>
5	1,7	1,7	0%	100%
4	0,4	2,1	0%	100%
3,15	11,4	13,5	2%	98%
2,5	102,3	115,8	14%	86%
2	75	190,8	22%	78%
1,6	73,4	264,2	31%	69%
1,25	64,5	328,7	39%	61%
1	25,5	354,2	42%	58%
0,63	88,3	442,5	52%	48%
0,5	31,8	474,3	56%	44%
0,315	136,8	611,1	72%	28%
0,2	126,1	737,2	87%	13%
0,16	43,9	781,1	92%	8%
0,125	66,1	847,2	100%	0%
0,08	2,5	849,7	100%	0%
<b>Fond</b>	128,3	<b>Perte</b>	22	
		<b>MF</b>	2,68	

## Le gravier naturel

Fraction (3/8) : Mi=1600g

**Tableau 16 : Analyse granulométrique de gravier naturel (3/8)**

<b>Tamis</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Ref. cum. (g)</b>	<b>Ref. cum.(%)</b>	<b>Tam. cum.(%)</b>
8	0	0	0%	100%
6,3	1076,4	1076,4	69%	31%
5	257,8	1334,2	85%	15%
3,15	227,5	1561,7	100%	0%
<b>Fond</b>	35,2	<b>Perte</b>	3,1	

Fraction (8/16), Mi =3200g

*Tableau 17 : Analyse granulométrique de gravier naturel (8/16)*

<b>Tamis</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Ref. cum. (g)</b>	<i>Ref. cum. (%)</i>	<b>Tam. cum. (%)</b>
20	0	0	0%	100%
16	70,2	70,2	2%	98%
12,5	440,7	510,9	16%	84%
10	738,9	1249,8	40%	60%
8	897,2	2147	68%	32%
6,3	760,6	2907,6	93%	7%
5	230,7	3138,3	100%	0%
<b>Fond</b>	60,9	<b>Perte</b>	0,8	

**Le gravier recyclé :**

Fraction (3/8) : Mi= 1600g

**Tableau 18: Analyse granulométrique de la fraction 3/8 recyclée**

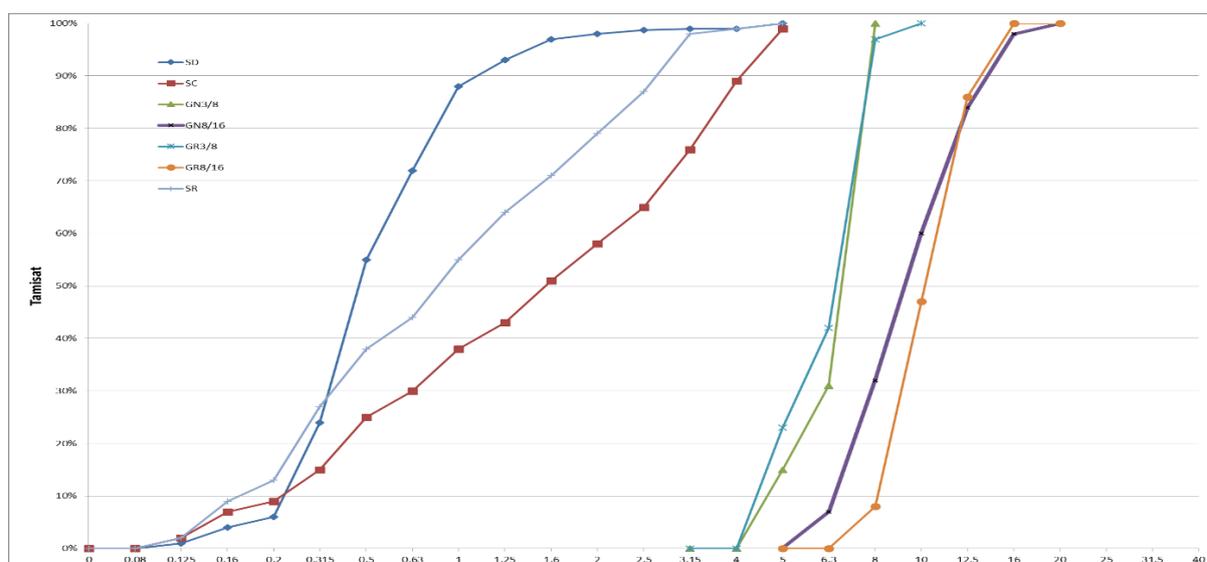
Tamis	Refus (g)	Ref. cum. (g)	Ref. cum.(%)	Tam. cum.(%)
8	49,9	49,9	3%	97%
6,3	822,1	872	58%	42%
5	285,9	1157,9	77%	23%
3,15	353,7	1511,6	100%	0%
<b>Fond</b>	81,6	<b>Perte</b>	6,8	

Fraction (8/16) : Mi= 3200g

**Tableau 19: Analyse granulométrique de la fraction recyclée 8/16 mm**

Tamis	Refus (g)	Ref. cum. (g)	Ref. cum.(%)	Tam. cum.(%)
20	0	0	0%	100%
16	0	0	0%	100%
12,5	434,4	434,4	14%	86%

Les résultats des analyses granulométriques des granulats utilisés sont tracés sous forme de courbes granulométriques sur la figure suivante :



**Figure 12.** Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.

## Partie 2 : Formulation et méthodologie expérimentale

### II-2.1. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE :

L'objectif de cette étude est de réaliser un béton autoplaçant à base de granulats recyclés (100% granulats recyclés) et un BAP à base des granulats naturels (100% granulats naturels) et les comparer avec leurs mortiers équivalents MBE. Ainsi que l'étude de l'influence du volume de pâte sur les critères d'un BAP et d'un MBE.

BAP : Série A (formulation d'un BAP avec 100% granulats naturels) et la série B (formulation d'un BAP avec 100% granulats recyclés).

**Tableau 20 : plans expérimentaux de cette étude :**

SERIE A	PM=130KG	PM=142kg	Pm=150kg	Pm=175kg	Pm=200kg
Volume de pâte	342	352	358	367	375
SERIE B	Pm=130kg	Pm=142kg	Pm=150kg	Pm=175kg	Pm=200kg
Volume de pâte	342	352	358	367	375

### II-2.2 Le Béton Autoplaçant (BAP) :

#### II-2.2.1 Méthode de formulation de (BAP) :

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions des BAP dans cette étude expérimentale est une méthode empirique basée sur plusieurs points :

- La formulation du BAP doit répondre aux critères de résistance mécanique (fixés ou désirés) choisis à partir de la formulation de Bolomey. Nous avons posé comme résistance caractéristique en compression à 28 jours pour un béton d'ouvrage  $f_{c28} = 32\text{MPa}$ .
- Le volume de pâte doit favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant le coût en matières premières de cette formulation.
- Pour cela, le volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) est fixé à  $400\text{ l/m}^3$
- Une quantité de fines élevée 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 kg/m<sup>3</sup>). Ces fines proviennent du ciment, des additions et des fines contenues dans les granulats dont la grosseur est inférieure à 125µm.

- Le dosage en super plastifiant est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur béton frais pour lequel l'étalement doit être compris entre 650 et 750 mm (valeur moyenne des normes en vigueur) afin de limiter la ségrégation et le ressuage.
- La constitution du squelette est optimisée afin de réduire la ségrégation et favoriser l'écoulement. Pour cela, on a fixé (D max = 16 mm et un rapport G/S proche de 1).

### **II.2.2. Calcul des compositions des (BAP):**

1. un rapport gravier/sable (G/S) égal à 1.
2. un rapport eau/ (ciment + addition) (E/L) égal à 0.4
3. un dosage en ciment égal à 350 Kg/m<sup>3</sup>
4. un dosage en poudre de marbre de 130 Kg/m<sup>3</sup>

Et en ce qui concerne les dosages en granulats, on a utilisé les formules suivantes

$$(G+S+C+PM+SP+E) = 1000 \text{ litres}$$

Où G = Gravier

S = Sable

C = Ciment

PM = Poudre de marbre

SP = Super plastifiant

E = Eau

On a les données suivantes [13] : On a pris le volume de pâte égal à 400 litres et (G + S) = 600 litres

#### **Pour la première série (BAP naturel) :**

$$G1n (3/8) = 60\% G \quad Sd = 50\% S \quad (Sd : \text{sable de dune})$$

$$G2n (8/16) = 40\% Sc = 50\% S \quad (Sc : \text{sable de carrière})$$

$$G/S = 1$$

$$MG = MS$$

$$MG1 + MG2 = MSd + MSd$$

$$CGn1. Gn1 + CGn2. Gn2 = Csd. Sd + Csc. Sc$$

$$(Csd, Csd: \text{la densité de sable et de gravier}) \quad 2.85(0.6G) + 2.5(0.4G)$$

$$= 2.66(0.5S) + 2.66(0.5S)$$

$$2.72G = 2.72S \quad (1)$$

$$G+S = 600 \text{ Kg/m}^3 \quad \dots (2)$$

#### **Pour la deuxième série (BAP recyclés) :**

$$G1R (3/8) = 60\% G \quad Sd = 50\% S$$

$$G2R (8/16) = 40\% S_c = 50\% S$$

$$G/S = 1$$

$$MG = MS$$

$$MG1 + MG2 = MSd + MSd$$

$$CGR1. GR1 + CGR2. GR2 = Csd. Sd + Csc. Sc$$

$$(Csd, Csd: \text{ la densité de sable et de gravier}) \quad 2.5 (0.6G) + 2.2 (0.4G) = 2.66 (0.5S) + 2.78 (0.5S)$$

$$2.72G = 2.72S \quad (1)$$

$$G + S = 600 \text{ Kg/m}^3 \quad (2)$$

- Une première formulation d'un BAP avec 50% de gravier 3/8 et 50% de gravier 8/16, n'a pas donné de résultats conformes aux critères de l'AFGC.

Lors d'un essai d'étalement, on remarque un signe de ségrégation, un amoncellement de gros granulats au centre de la galette. Pour cela nous avons corrigé le dosage des fractions granulaires (40% gravier 8/16 et 60% gravier 3/8).

Toutes les compositions étudiées sont présentées dans les tableaux suivants :

**Tableau 21 : Compositions des BAP avec granulats naturels pour 1 m<sup>3</sup> : en Kg**

Volume de pate en litre	Ciment en kg	Poudre de marbre en kg	Eau	Sp en kg
342	350	130	195	5,85
352	350	142	196,8	5,85
358	350	150	200	5,85
367	350	175	210	5,85
375	350	200	220	5,85

**Tableau 22 : Compositions des BAP avec granulats recyclés pour 1 m<sup>3</sup> : Kg**

Volume de pate en litre	Ciment en kg	Poudre de marbre en kg	Eau	Sp en kg
342	350	130	194.9	5,85

352	350	142	198.35	5,85
358	350	150	202,34	5,85
367	350	175	246	5,85
375	350	200	256	5,85

**Remarque :**

Concernant la quantité d'eau pour les BAP avec des granulats recyclés. Pour s'affranchir de l'absorption d'eau de gâchage par les granulats recyclés, une quantité d'eau supplémentaire est ajoutée à la quantité d'eau initiale concernant uniquement les mélanges contenant les granulats recyclés. Cette quantité a été estimée par la capacité d'absorption des granulats recyclés durant 60 min, temps nécessaire pour la mise en place des bétons frais.

**II.2.3. Malaxage de béton (BAP) et préparation des éprouvettes :**

La séquence d'introduction des différents matériaux est décrite comme suit :

- les matériaux sont introduits dans la bétonnière dans l'ordre suivant : ciment, addition minérale (Poudre de marbre), sable de carrière, sable de dune, gravier 3/8 et gravier 8/16.
- malaxage à sec pendant 1 minute.
- Introduction de 3/4 de la quantité d'eau et malaxage pendant 2 minutes.
- Ajouter l'adjuvant (super plastifiant) et 1 /4 d'eau restante puis malaxer pendant 2 minutes.

La durée effective totale du malaxage est 5 minutes.

- Réalisation des essais à l'état frais (l'étalement, T500, la boîte en L, et la stabilité au tamis) , le béton est conservé dans des récipients couverts (pour éviter l'évaporation de l'eau). Les mêmes tests sont reconduits sur le même béton pour étudier l'influence de sa destruction sur l'écoulement,



**Figure 13.** Outils utilisés pour la caractérisation à l'état frais du BAP.

Les bétons sont ensuite mis dans des moules pour les essais à l'état durci à l'échéance de 28 jours de durcissement. Après 24h on procède au démoulage des éprouvettes pour les conserver en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Le tableau donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP selon l'AFGC et EFNARC.

**Tableau 23 : Valeurs préconisées pour les essais [AFGC] et [EFNARC]**

ESSAIS	L'étalement	Boite en L	Stabilité au tamis	T500
AFGC	55-85 cm	>0,8%	<15%	
EFNARC (2002)	65-80	30%	30%	2-5s



**Figure 14.** Essai stabilité au tamis.

## II-2.4 La masse volumique de béton durci :

La masse volumique de béton durci s'effectue sur des éprouvettes cubiques, La masse volumique de béton durci est déterminée après démoulage les éprouvettes cubiques (10x10x10) cm et peser chacune des éprouvettes à l'aide d'une balance et ensuite calculer la masse volumique de chaque éprouvette avec les valeurs obtenues :

$$Mv \text{ (durci)} = \text{masse d'éprouvette} / 1000 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée des moules remplis de béton autoplaçant sans vibration.

La densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\Delta = (mrr - mrv)/vr \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

mrv: La masse de moule vide. [g]

mrr: La masse de moule avec béton. [g]

vr: Volume des 3 Cubique (3000 cm<sup>3</sup>).

## II.2.5. Caractérisation des BAP à l'état durci :

### II.2.5.1. Résistances mécaniques à la compression :

Les essais de la résistance mécanique à la compression s'effectuent sur des éprouvettes cubiques. Les résistances ont été mesurées à 28 jours après la date de coulage, selon la norme [NF EN 196-1], à l'aide d'une presse hydraulique.

La résistance à la compression est déterminée par la formule :

$$R_c = P / S \text{ [Mpa]}$$

- $R_c$  : la résistance à la compression (MPa)
- $P$  : la charge à la rupture (N)
- $S$  : la section du cube (mm<sup>2</sup>)



Figure 15. Résistances mécaniques à la compression.

### II-2.6 L'absorption d'eau par immersion totale :

Le coefficient d'absorption de notre béton est calculé après avoir déterminé la masse de 3 éprouvettes pour chaque mélange en forme de cube 10x10x10cm saturés dans l'eau 48H(Msat), puis on met ces éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la masse sèche (Msec).

L'absorption déterminée par la formule suivante :

$$A_b (\%) = [(M_{sat} - M_{sec}) / M_{sec}] \cdot 100 (\%) \text{ saturés dans l'eau jusqu'à 48H (M}_{sat}\text{)(M}_{sec}\text{)}$$



**Figure 16.** la masse de 3 éprouvettes.



**Figure 17.** la masse sèche des 3 éprouvettes.

### **Partie 3 : Le mortier de béton équivalent MBE**

#### **II.3.1. Méthode de formulation de (MBE) :**

Les différents mélanges du MBE que nous avons étudié sont ceux issues des différentes formules des BAP définies précédemment. Aussi, nous avons remplacé le volume du gravier par un autre volume de sable qui présente la même surface développée.

#### **II.3.2. Calcule les compositions des (MBE) :**

Pour déterminer la quantité de sable ( $S'_i$ ), nécessaire pour remplacer une fraction de gravier ( $G_i$ ), on applique cette formule :

$$S'_i = G_i \cdot \frac{SD_G}{SD_s}$$

Où :  $SD_G$  : est la surface totale développée par la fraction granulaire (gravier),

$SD_s$  : est la surface totale développée par la fraction granulaire (sable).

$SD_G = \sum SP_G$  ( $SP_G$  : la surface pondérée pour chaque fraction de gravier)

$SD_s = \sum SP_s$  ( $SP_s$  : la surface pondérée pour chaque fraction de sable)

**Tableau 24: La surface totale développée par la fraction granulaire (Sable de carrière) :(de masse volumique absolue : 2,6 g/cm³)**

Diamètres des tamis (mm)	Refus (g)	Surfaces pondérées(mm²)
5	8,3	0,0034
4	100,6	0,052
3,15	121,6	0,0801
2,5	102,5	0,085
2	66	0,0701
1,6	68,7	0,0903
1,25	75,2	0,124
1	43,4	0,0909
0,63	84,3	0,2434
0,5	40	0,1661
0,315	97,2	0,5602
0,2	56,3	0,5133
0,16	25,3	0,3302
0,125	45,8	0,7542
0,08	17,6	0,4031
0	30	1,7601
	Refus total :983 g	Surface. D Totale : 5,3234mm²

**Tableau 25 :: Les surfaces totales développées pour tous les granulats**

Granulats	Sable de Carrier	Sable recyclé	Gravier 3/8 N	Gravier 8/16N	Gravier 3/8 R	Gravier 8/16R
Surface totale Développée	5,3234 mm²	13,342mm²	0,395mm²	0,2668mm²	0,465 mm²	0,246mm²

Donc :

On détermine la quantité de sable (S'i), nécessaire pour remplacer une fraction de gravier ( G i ) , par la formule :

$$S' i = G i . SD G / SD s$$

**Tableau 26 : Compositions des MBE (avec remplacement les granulats naturelles pour 1 m<sup>3</sup>****\_Kg \_**

Composition /volume de pate	342	352	358	367	375
Sd	421,20	427,70	417,30	411,45	406,25
SC	473,77	481,08	469,38	462,80	456,95
C	350	350	350	350	350
PM	130	142	150	175	200
E	192	196,8	200	210	220
SP	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85

**Tableau 27 : Compositions des MBE (avec les granulats recyclés pour 1 m<sup>3</sup> : \_Kg**

Composition/volume de pate	342	352	358	367	375
Sd	412,94	419,31	409,12	403,38	382,35
Sc	412,94	419,31	409,12	403,38	
SR	32,99	33,50	32,69	32,23	
C	350	350	350	350	350
PM	130	142	150	175	200
E	229	234	237	246	226,18
SP	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85

### **II-3.2 Malaxage de mortier de béton équivalent (MBE) et préparation des éprouvettes :**

Le mode opératoire a été réalisé au moyen d'un malaxeur à double mâchoires, à deux axes horizontaux, et de capacité 20 litres.

La confection de MBE : ciment, poudre de marbre, sable (sable de dune, sable de carrière, sable recyclé) , eau , adjuvant par le superplastifiant est comme suit :

- Mettre le malaxeur en marche.
- Verser le liant (ciment + poudre de marbre), le sable et malaxer une 1minute.
- Verser 75%de la quantité d'eau
- Malaxer pendant 2minutes
- Arrêter le malaxage et racler les côtés.
- Verser 25%de la quantité d'eau +la quantité du superplastifiant (1,2%)
- Reprendre le malaxage pendant 2minutes.
- Arrêter et terminer le malaxage.
- Réalisation des essais d'ouvrabilité (l'étalement, T250, la mini boîte en L, et la stabilité au tamis, mini boîte LCPC, on remplit les moules sans aucune vibration.

Les éprouvettes sont démoulées 24h après le coulage et conservées sous l'eau jusqu'à 28 jours.

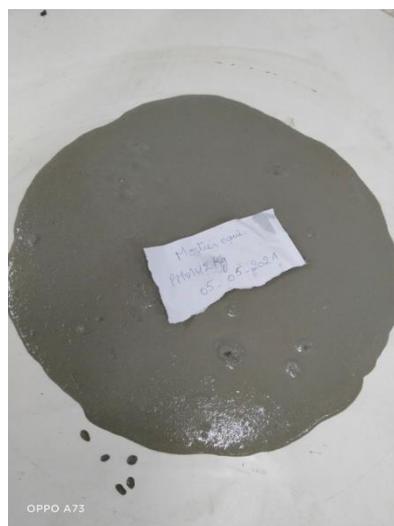
Pour les essais à l'état durcis (essais de la résistance à la compression, l'essai d'absorption, et la masse volumique de MBE) nous avons préparé des éprouvettes prismatiques de dimensions (4.4.16) cm<sup>3</sup>.

### II-3.3 Caractérisation de MBE à l'état frais :



**Figure 18.** Les essais du MBE à l'état frais.

#### II.3.3.1 Essais d'étalement :



**Figure 19.** Essai d'étalement pour MBE.

L'essai d'étalement au mini cône est utilisé pour caractériser la fluidité du mortier de béton équivalent en milieu non confiné.

### **Le temps d'étalement $T_{250}$ :**

Lorsque l'on effectue un essai d'étalement, on peut mesurer le temps  $T_{250}$ , à partir du moment où on soulève le mini cône, pour que la galette de MBE atteigne un diamètre de 250 mm. Pour un même étalement final, plus le mortier sera visqueux, plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur  $T_{250}$  sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité de MBE.

### **II.3.3.3 Essais du mini boîte en L :**

La mini boîte en L permet de tester la mobilité du mortier (MBE) en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du mortier ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le taux de remplissage final  $H_2/H_1$  renseigne sur la mobilité du mortier en milieu confiné.

### **II-3.3.4 Essais de stabilité au tamis :**

Cet essai vise à qualifier les mortiers de béton équivalent vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

### **II-3.3.5 La masse volumique de MBE frais :**

La masse volumique réelle du mortier frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée un récipient de 1 litre rempli de mortier de béton équivalent sans vibration.

La densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\Delta = (m_{rr} - m_{rv})/v_r \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$m_{rv}$ : La masse de récipient vide.

$m_{rr}$ : La masse de récipient avec mortier(MBE).

vr: Volume de la récipient de 1 litre(1000 cm<sup>3</sup>).



**Figure 20.** La masse volumique de MBE frais.

### **II-3.4 Caractérisation des MBE à l'état durci :**

#### **II-3.4.1 Résistances mécaniques à la compression :**

Les essais des résistances mécaniques à la compression s'effectuent sur des éprouvettes prismatiques (4.4.16) cm, Les résistances ont été mesurées à 28 jours après la date de coulage, selon la norme [NF EN 196-1], à l'aide d'une presse hydraulique.

La résistance à la compression est déterminée par la formule :  $R_c = P / S$  [Mpa]

- $R_c$  : la résistance à la compression(MPa)

#### **II-3.4.2 La résistance en traction :**

Les essais de traction s'effectuent sur des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis, sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette ; Les résistances ont été mesurées à 28 jours après la date de coulage.

- $P$  : la charge à la rupture(N)
- $S$  : la section du prisme (mm<sup>2</sup>)
- La résistance à la traction est déterminée par la formule :
- $R_t = 3/2 \cdot [(P \cdot l) / (b h^2)]$  [Mpa]
- $R_t$  : résistance à la traction. [Mpa]
- $P$  : charge concentrée unique appliquée. [N]
- $l$  : distance entre deux appuis. [mm]
- $b, h$  : dimensions d'éprouvette prismatique. [mm]

### **II-3.5 L'absorption d'eau par immersion :**

Le coefficient d'absorption de notre MBE est calculé après avoir déterminé la masse de 3 éprouvettes pour chaque mélange en forme de prisme (4.4.16) cm<sup>3</sup> saturés dans l'eau jusqu'à 48H(Msat), puis on met ces éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la masse constante, pour déterminer la masse sèche (Msec).

L'absorption déterminée par la formule suivante :

$$Ab (\%) = [(Msat - Msec) / Msec] \cdot 100 (\%)$$

### **Conclusion :**

Le sable utilisé pour la réalisation de ce travail est un sable moyen (sable de dune) de la région de Tébessa, et (sable de carrière) de la région de Constantine. Les graviers utilisés (3/8, 8/16) de la région de Constantine, présentent des distributions granulométriques continues pour les deux types (naturels et recyclés), celles-ci donnent une superposition de courbes sur le fuseau granulaire. Dans ce chapitre, nous avons traité tous les bétons (BAP) et tous les mortiers (MBE) pour obtenir les différentes valeurs des caractéristiques qui permettront d'optimiser la formulation des bétons et des mortiers que nous allons utiliser pour l'étude des comportements statique et différé. La caractérisation des bétons et des mortiers utilisés pour notre recherche est indispensable pour l'obtention d'un matériau ayant la maniabilité adéquate.



**CHAPITRE III :**  
**Résultats et**  
**discussion**

## Partie 01 :

### Introduction :

L'apparition de nouvelles technologies et d'adjuvants à plus haute performance permettent de maintenir la maniabilité du béton. A l'état frais le volume de la pâte joue un rôle fondamental sur la maniabilité du béton autoplaçant, et par conséquent une influence sur les propriétés mécaniques et physiques du BAP.

Dans ce chapitre, nous présentons et discutons les résultats obtenus lors de la campagne expérimentale dans le but de caractériser aux états frais et durci les BAP et leurs mortiers correspondants qui ont été formulés à base de granulats naturels (GN) et recyclés (GR). A l'état frais les mélanges composés sont testés conformément aux recommandations de l'AFGC.

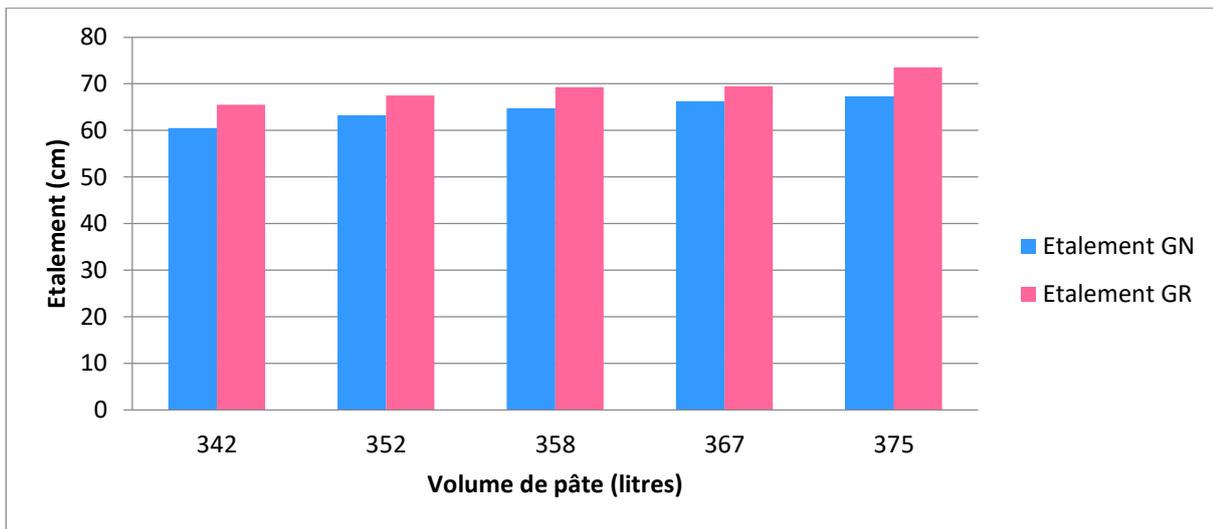
### III.1.1 Caractérisation à l'état frais :

#### III.1.1.1 Mobilité au milieu non confiné :

Les résultats des tests réalisés sur les bétons d'étude (deux séries, selon la nature de graviers, pour cinq mélanges chacun, où le volume de pâte change). Les tests utilisés en écoulement sont représentés, en termes de diamètre d'étalement et de temps d'étalement (T500mm), dans le tableau suivant.

**Tableau 28.** Résultats de l'étalement au cône et le T500mm des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.

Série 01		GN			
V de pâte	342	352	358	367	375
Etalement (cm)	60,5	63,25	64,76	66,25	67,25
T500 (s)	9,5	7,17	8,81	8,85	6,05
Série 02		GR			
Etalement (cm)	65,5	67,5	69,25	69,5	73,5
T500mm (s) GR	8,22	5,54	4,32	3,09	2,18



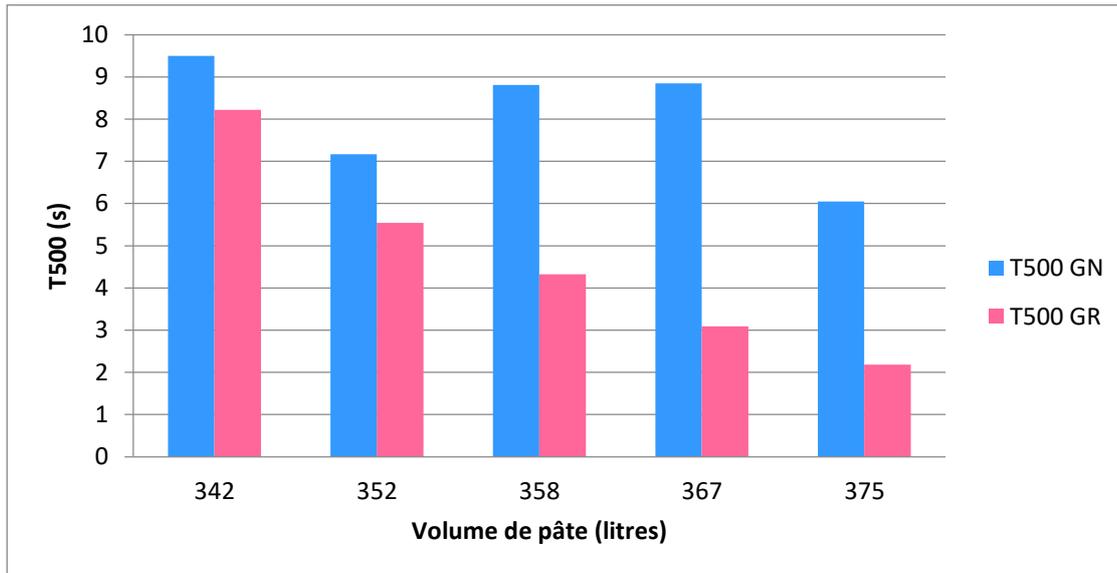
**Figure 21.** Evolution de l'étalement en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et BAP à RG.

La figure montre que les résultats obtenus des deux séries (GN et GR) d'étalement sont conformes aux normes l'AFGC puisque l'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre 600 et 800 mm.

Nous pouvons constater que l'ensemble des BAP respectent le critère d'étalement. L'étalement augmente avec l'augmentation du volume de pâte, sous l'effet des fines, l'augmentation du volume de filler, qui s'insèrent dans les vides et chassent l'eau inter-granulaire. Ces deux paramètres améliorent l'ouvrabilité de la matrice cimentaire par effet physique. Le volume de pâte réduit la force de trainée et les granulats se trouvent desserrer. En mécanique des fluides la trainée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide et agit comme un frottement.

Les mélanges réalisés avec les granulats recyclés présentent des étalements relativement meilleurs que ceux obtenus avec les granulats naturels. L'eau additionnelle, qui a servi pour l'ajustement de l'absorption d'eau par les granulats recyclés, a joué un rôle prépondérant dans l'amélioration de la maniabilité.

### III.1.1.2 Mesure du temps d'écoulement (T500) :



**Figure 22.** Evolution du temps d'écoulement (T500mm) en fonction du volume de pâte pour les BAP à GN et BAP à GR.

La figure montre les résultats du temps T500 obtenus lors de l'écoulement, pour les BAP à granulats naturels et les BAP à granulats recyclés en tenant compte de la variation du volume de pâte de 342 à 375 litres. La tendance générale pour ces résultats est que plus le volume de pâte ne s'accroît le temps mis pour la galette de BAP, à atteindre le diamètre 500 mm, diminue. Cependant, les temps d'écoulement qui devraient ne pas dépasser 5s ne sont pas respectés et ainsi la viscosité des mélanges s'est amoindrie, c'est-à-dire que les BAP sont devenus plus visqueux. L'augmentation du volume de pâte certes permet au mélange de s'écouler mais de manière lente, l'augmentation de la quantité de filler au dépend des granulats a rendu la pâte plus épaisse ou grasse

Contrairement aux BAP précédents, ceux confectionnés avec des granulats recyclés, le T500mm est inversement proportionnel au volume de pâte. Ainsi il diminue constamment lorsque le volume de pâte augmente, et ceci est dû à l'apport d'eau supplémentaire nécessaire lorsque des granulats recyclés sont utilisés.

### III.1.1.3 Mobilité au milieu confiné

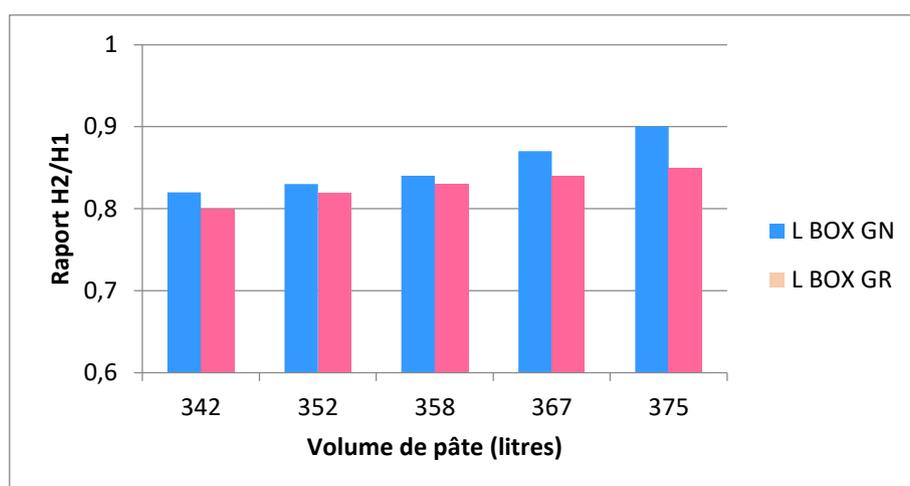
Le tableau 28 résume les résultats des tests effectués dans la boîte en L et l'écoulement dans le canal LCPC pour les mélanges d'étude.

**Tableau 29.** Résultats des tests dans la boîte en L et dans le canal LCPC BOX des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés

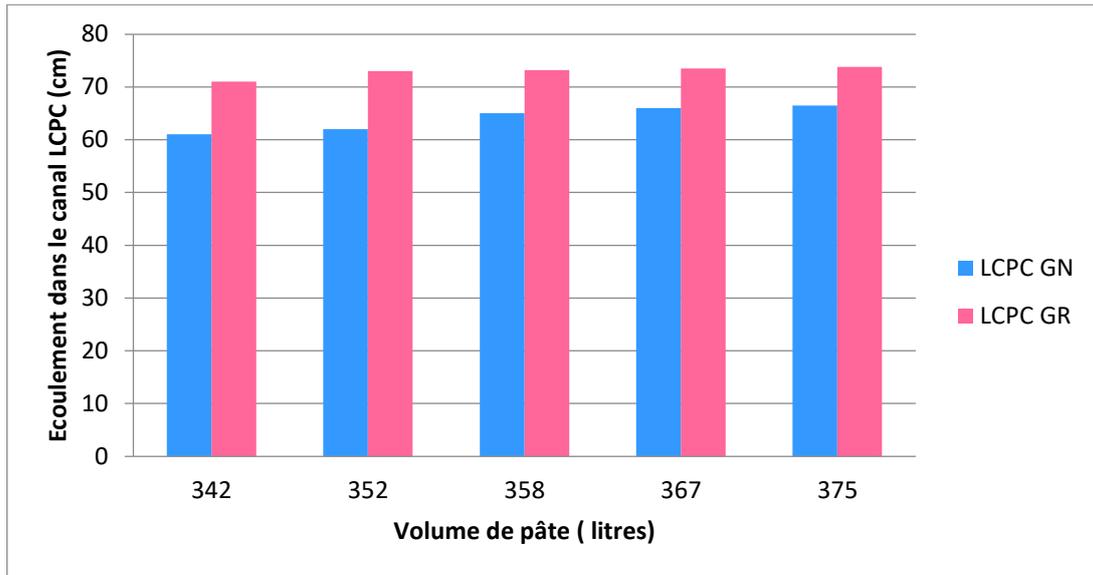
Volume de pâte (litres)	342	352	358	367	375
H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> , GN	0,83	0,82	0,84	0,87	0,9
H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> , GR	0,8	0,82	0,83	0,84	0,85
LCPC, GN (cm)	61	62	65	66	66,5
LCPC, GR (cm)	71	73	73,2	73,5	73,8

Les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L pour les deux séries sont présentés dans la figure. Ce type d'essai permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné.

Pour les deux séries de BAP, façonnées avec des granulats naturels et des granulats recyclés, les résultats présentent une tendance semblable à celle observée pour l'étalement en milieu libre. Tous les mélanges ont satisfait le critère de remplissage, vu que les valeurs sont supérieures à un rapport de 0,8. L'augmentation du volume de pâte a garanti l'amélioration de l'écoulement dans la boîte en L, mais le remplissage des mélanges de granulats recyclés est moindre que celui réalisé avec les granulats naturels. Ceci semble être lié à la différence de masses volumiques entre la pâte et les granulats recyclés. La pâte, constituée de ciment et filler de marbre, présente une masse volumique supérieure aux granulats recyclés et son écoulement est plus facile, tandis que les granulats recyclés semblent rester dans la partie verticale de la boîte en L. Dans cette partie, le mélange est devenu pauvre en pâte.



**Figure 23.** Evolution du rapport de remplissage en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et à RG.



**Figure 24.** Evolution du LCPC en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et BAP à GR.

L'écoulement dans la boîte LCPC, les longueurs d'écoulement varient de 61 à 66,5 cm et de 71 à 73,8 cm pour les BAP de granulats naturels et les granulats recyclés, respectivement. Au fur et à mesure que le volume de pâte augmente la longueur d'écoulement dans le canal augmente. Cependant, une évidence pour les BAP de GR est observée. Les granulats recyclés, de masse volumique inférieure à celle des granulats naturels, sont emportés sans gêne par la pâte dans le canal.

### III.1.1.3 La viscosité :

La viscosité des bétons caractérise aussi leurs écoulements. Elle est calculée en utilisant le T500mm de l'essai d'étalement au cône et le diamètre de la galette suivant la formule tirée des travaux de Sedran (1999) :

$$\mu = \rho / 1000 (0.0268 S_f^{-2,39}) T_{500} \quad (\text{Equation 1})$$

$\mu$  est la viscosité (Pa.s)

$\rho$  est la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

$S_f$  est l'étalement (mm)

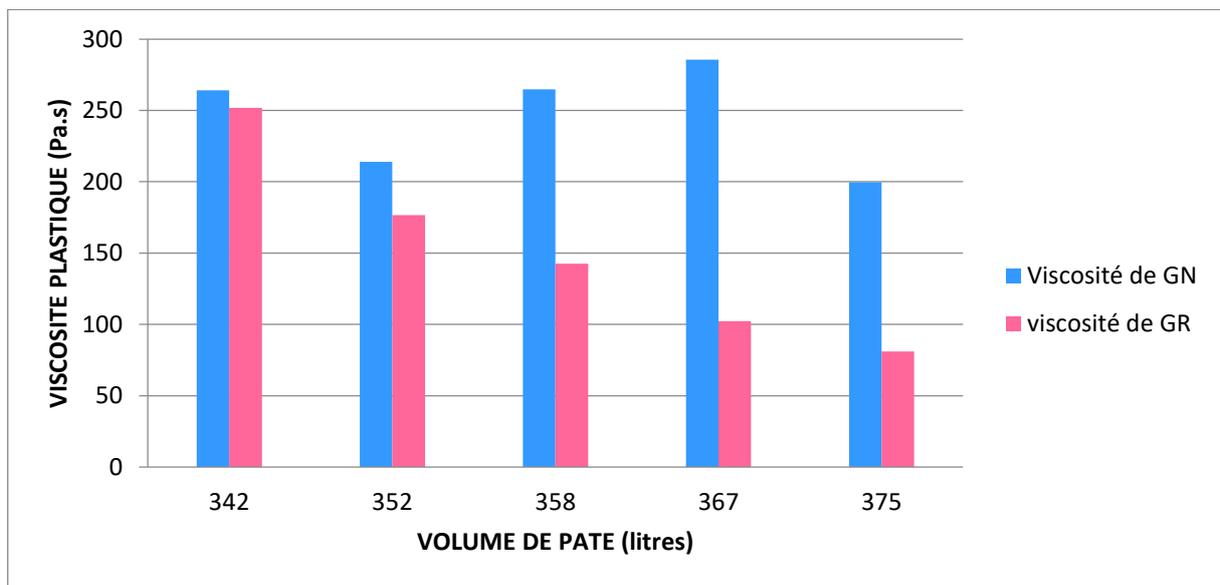
T500 est le temps d'écoulement de 500 mm (s)

Le tableau résume les calculs de la viscosité en utilisant l'équation (1). On constate selon les valeurs calculées une similitude avec les valeurs obtenues lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams et

ainsi qu'avec le temps T500mm. Ceci suppose qu'il y a une corrélation entre la viscosité plastique et l'ouvrabilité déterminée par l'essai d'écoulement et aussi avec la mesure du temps d'étalement T500mm.

**Tableau 30.** Calcul de la viscosité selon la formule de Sedran (1999).

V de pate	342	352	358	367	375
Viscosité de GN	264.0	214.0	264.8	285.6	199.6
viscosité de GR	251.8	176.6	142.5	102.3	81.1



**Figure 25.** Evolution du temps De la viscosité en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et BAP à RG.

En procédant au remplacement des gros granulats naturels par les recyclés, on note une diminution du temps d'écoulement T500 et par conséquent la viscosité se trouve diminuer (Figure25).

Ceci est une conséquence directe de la présence d'eau qui n'est pas encore absorbée qui serve à augmenter la fluidité et également la présence d'une densité faible des granulats recyclés qui sont facilement entraînés par le volume de pâte et ainsi l'augmentation de ce dernier. Selon Sedran [37], cette équation empirique peut garantir des estimations de viscosité plastique de grandeur de 200 Pa.s si le temps d'écoulement, pour atteindre un diamètre d'étalement de 500 mm, soit inférieur à 6s.

### III.1.1.4 Estimation du seuil de cisaillement

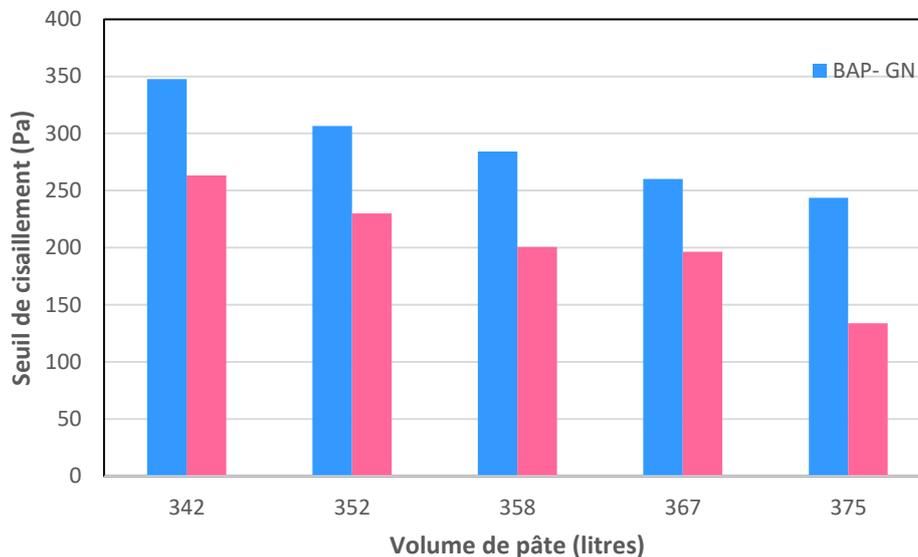
Pour avoir des indications sur les paramètres rhéologiques, Sedran et de Larrard [38] ont prédit la relation entre l'écoulement obtenu par affaissement et le seuil de cisaillement  $\tau_0$  (en Pa) selon l'équation 2.

$$\tau_0 = \frac{\rho}{1174} (808 - Sf) \quad (\text{Equation 2})$$

$\tau_0$  est le seuil de cisaillement (Pa)

$\rho$  est la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )

$Sf$  est l'étalement (mm)



**Figure 26.** Seuil de cisaillement en fonction du volume de pâte pour les BAP à GN et RG.

La figure 26 illustre la variation du seuil de cisaillement en fonction de l'augmentation du volume de pâte. Plus ce dernier augmente le seuil de cisaillement se réduit et ceci pour les deux séries de BAP à base de GN et GR. L'augmentation du volume de pâte a diminué les frictions ou les frottements entre les granulats ce qui a amélioré l'écoulement. Avec l'utilisation des granulats recyclés, le seuil de cisaillement est encore moins à cause de l'ajout supplémentaire d'eau pour remédier à une éventuelle absorption d'eau par les granulats recyclés.

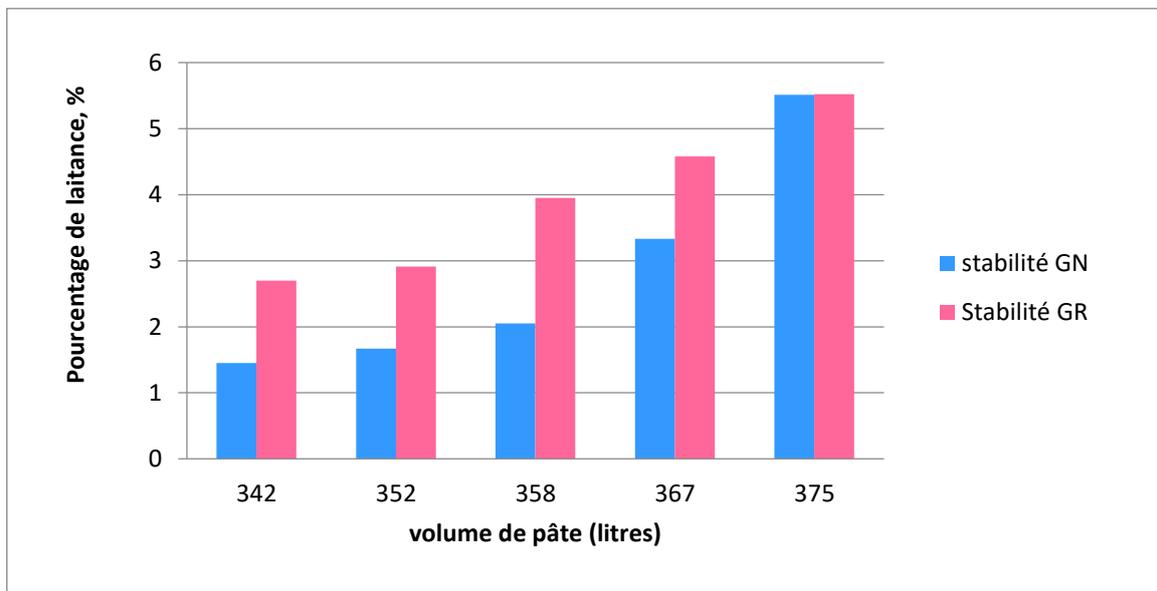
Les valeurs du seuil de cisaillement, obtenues par la formule proposée par Sedran et De Larrard [38], varient entre 243,5 et 347,6 Pa. Ces valeurs correspondent à des valeurs d'écoulement d'affaissement allant de 500 à 700 mm, et sont de même ordre de valeurs enregistrées à l'aide d'un rhéomètre à plaques parallèles.

### III.1.1.5 Résistance à la ségrégation statique :

L'objectif est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place jusqu'au début de prise. Les normes recommandent des valeurs inférieures à 15% et il est même toléré des valeurs allant jusqu'à 30%. Au-delà de cette valeur, le béton n'est plus utilisable. Les réponses des tests réalisés pour l'essai de stabilité au tamis (pourcentage de laitance passant à travers le tamis 5mm) des BAP de la série 01 et la série 02 sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 31.** Résultats de Stabilité au tamis pour le BAP naturel et le BAP recyclé.

Volume de pâte (litres)	342	352	358	367	375
Stabilité GN, %	1,45	1,67	2,05	3,33	5,51
Stabilité GR, %	2,7	2,91	3,95	4,58	5,52



**Figure 27.** Evolution de stabilité au tamis en fonction du volume de la pâte pour les BAP à RN et à RG.

Sur l'histogramme de la figure 27 les valeurs de taux de ségrégation pour tous les mélanges sont inférieures à 15 %. Ces résultats sont synonymes d'une stabilité satisfaisante et que les mélanges sont homogènes et ne présentent pas de risques de ségrégation statique. On constate que plus le volume de pâte augmente le pourcentage de laitance augmente également et ce qui est logique puisque l'augmentation du volume de pâte s'est faite au détriment du volume des granulats. On observe aussi que les bétons à base de GN présentent des valeurs de ségrégation inférieures aux BAP de GR et ceci à cause de la quantité d'eau présente au sein de ces BAP qui sont supérieures que dans les BAP de GN.

### III.1.1.6 La masse volumique à l'état frais :

La densité des bétons d'étude est mesurée à l'état frais après remplissage des moules cubiques destinés à la confection des éprouvettes pour la mesure de la résistance mécanique à la compression.

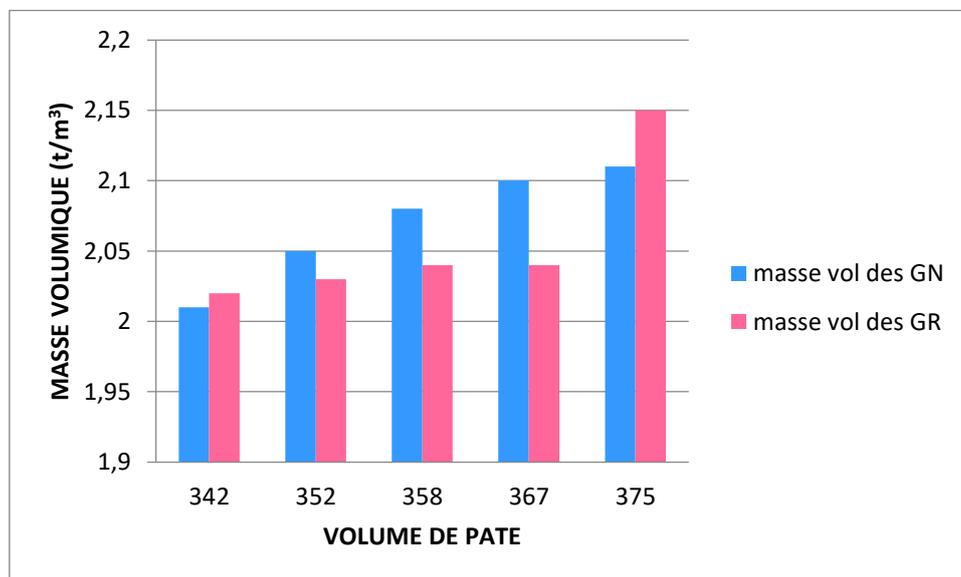
Les résultats de la masse volumique réelle obtenus pour les deux séries de BAP sont rassemblés dans le tableau 32 :

**Tableau 32.** Résultats de la masse volumique de BAP à GN et BAP à GR.

Volume de pâte (en litres)	342	352	358	367	375
Masse vol des GN ( $t/m^3$ )	2,01	2,05	2,08	2,1	2,11
Masse vol des GR ( $t/m^3$ )	2,02	2,03	2,04	2,04	2,15

La variation de la masse volumique à l'état frais est liée aux caractéristiques intrinsèques des granulats utilisés. La masse volumique des granulats naturels étant supérieure à celle des granulats recyclés.

- La densité calculée théoriquement des BAP à base des granulats naturels est :  $\Delta=2.31 \text{ g/cm}^3$
- La densité calculée théoriquement des BAP à base des granulats recyclés est :  $\Delta=2.23 \text{ g/cm}^3$



**Figure 28.** Evolution de la masse volumique en fonction du volume de la pâte pour les BAP à GN et à RG.

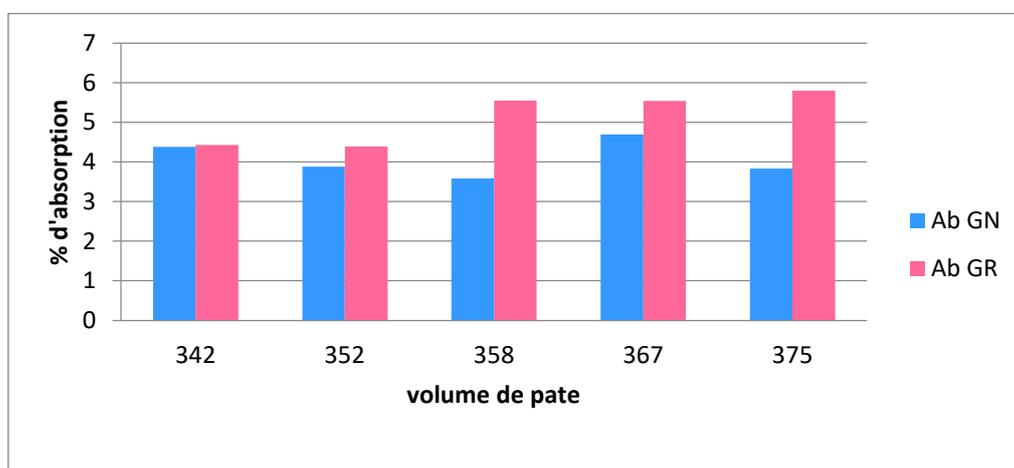
### III.1.2 Caractérisation à l'état durci :

#### III.1.2.1 La capacité d'absorption :

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau obtenus pour les deux séries de BAP sont présentés dans le tableau 33 :

**Tableau 33.** Résultat de l'absorption d'eau pour le BAP à GN et les BAP à GR.

Volume de pâte (litres)	342	352	358	367	375
Absorption d'eau GN (%)	4,38	3,88	3,58	4,69	3,83
Absorption d'eau GR (%)	4,43	4,39	5,55	5,54	5,8



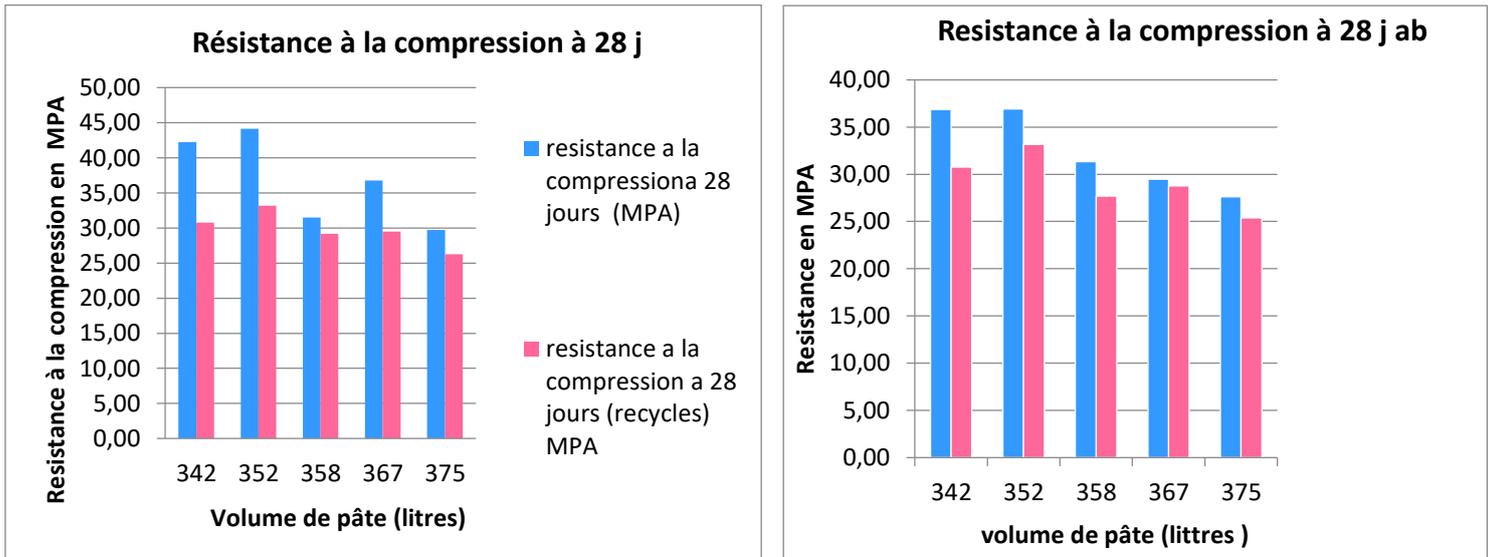
**Figure 29.** Evolution de l'absorption d'eau en fonction du volume de la pâte pour les BAP à RN et à RG.

#### III.1.2.2 La résistance à la compression :

Les résultats obtenus des résistances à la compression à 28 jours, sont regroupés dans le tableau suivant. Ces valeurs sont données en fonction du volume de la pâte.

**Tableau 34.** Résultat de résistance à la compression a 28 j pour le BAP à GN et les BAP à GR.

Volume de pâte (L)	342	352	358	367	375
Résistance à la compression a 28 jours pour GN	42,22	44,13	31,49	36,77	29,71
Résistance à la compression a 28 jours pour GR	30,77	33,17	29,17	29,48	26,26
Résistance à la compression a 28 j pour GN Ab	42,22	44,13	31,49	36,77	29,71
Résistance à la compression a 28 j pour GR Ab	30,77	33,17	29,17	29,48	26,26



**Figure 30.** Evolution de la résistance en compression en fonction du volume de pâte pour les BAP à RN et à RG. (Avec et sans l'absorption d'eau)

Pour les granulats naturels les BAP enregistrent une diminution de la résistance à la compression après 28 jours de durcissement. L'ajout du filler de marbre pour un remplacer un volume de granulats ne s'est pas traduit par une amélioration de la résistance, donc l'effet pouzzolanique ne s'est pas développé. Il en ressort que les granulats naturels de fractions grosses et qui sont d'origine calcaire sont plus résistant que la pâte. Par contre avec l'utilisation des granulats recyclés les valeurs de résistance à la compression sont presque similaires. Ceci laisse penser que la résistance intrinsèque des granulats recyclés est de même grandeur que la résistance de pâte.

### Conclusion :

Le but de cette partie de travail est de mettre en évidence l'effet du volume de pâte sur la rhéologie des bétons autoplaçants à GN et à GR à l'état frais et à l'état durci. Sur la base des résultats obtenus les paramètres de qualification des BAP (étalement, T500, stabilité et pouvoir de remplissage) restent conformes aux normes de l'AFGC pour les BAP à GN ainsi que les BAP à GR.

Cette étude a pour l'objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant à GN et à GR avec l'ajout d'une addition minérale (poudre de marbre) avec de différents dosages de poudre de marbre pour voir l'influence de l'augmentation du volume de pâte sur les propriétés rhéologiques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci .

Pour l'influence du volume de pâte et d'après les résultats, on observe qu'avec l'augmentation de la quantité de la poudre de marbre dans les BAP à GN et les BAP à GR une amélioration dans les propriétés rhéologiques, les BAP à GN ont donné une meilleur rhéologie (bon écoulement, bonne

capacité de remplissage ainsi qu'une bonne réponse mécanique) en outre l'effet des granulats recyclés influe sur l'étalement, la stabilité et l'absorption d'eau ainsi que la résistance à la compression.

## **Partie 02 :**

### **Introduction :**

Dans cette partie sont présentés les différents résultats obtenus, à l'état frais et durci, pour le MBE. Trois types de sable sont utilisés (sable de carrière, sable de dune et sable recyclé) à la place des gros graviers du BAP. Le sable de carrière et le sable de dune remplacent la fraction grosse du BAP, tandis que le sable recyclé remplace les gros granulats recyclés. Les sables incorporés dans le mortier doivent reproduire la même surface développée.

La finalité de ces essais est d'arriver à une possible corrélation entre les propriétés rhéologiques mesurées sur MBE et celles mesurées sur le béton correspondant. Parallèlement aux suivis rhéologiques, des suivis à l'état durci. Ils permettent d'anticiper le volume de pâte sur la propriété de MBE.

### **III.2.1 À l'état frais :**

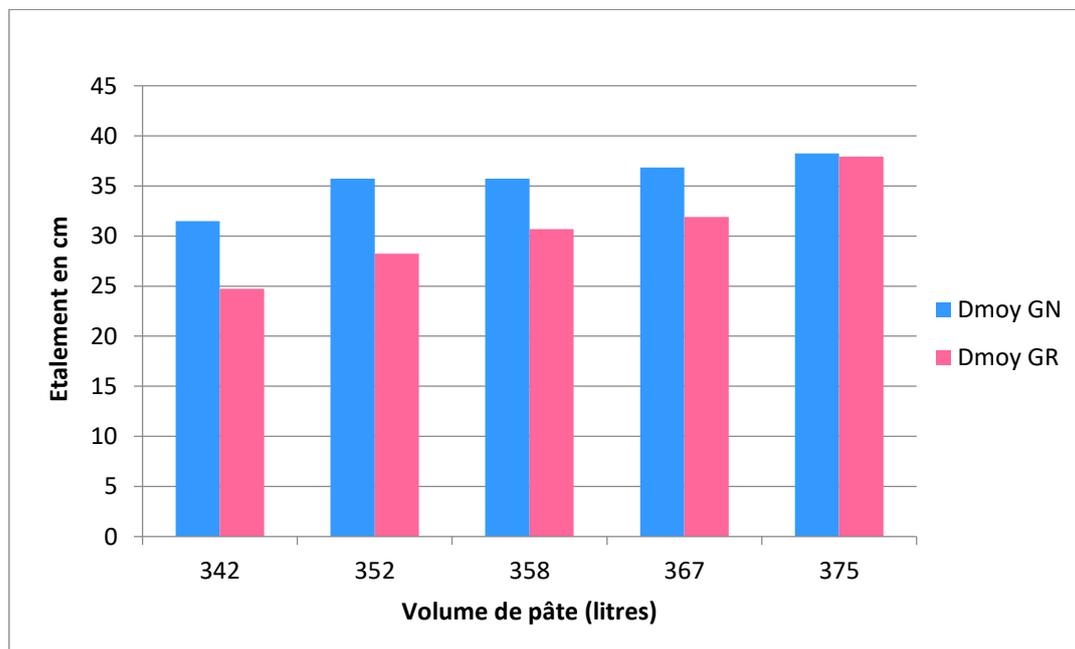
Nous avons déterminé les propriétés de MBE à l'état frais : la mobilité en milieu non confiné (essai d'étalement au mini cône), la mobilité en milieu confiné (essai avec mini boîte en L), la résistance à la ségrégation statique (essai de stabilité au tamis), et l'étalement dans un canal mini boîte LCPC et la densité déterminée sur récipient de 1 litre.

#### **III.2.1.1 Mobilité en milieu non confiné :**

L'essai réalisé sur le mortier frais est la mesure de l'écoulement libre de MBE, qui est évaluée à l'aide de mini cône ainsi que le temps de d'étalement pour faire une galette de 250 mm . Les résultats de ces essais dans le tableau suivant :

**Tableau 35.** Résultats de l'étalement au cône et le T250 mm des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.

Série GN					
<b>Volume de pâte (litres)</b>	342	352	358	367	375
<b>Étalement Dmoy cm</b>	31,5	35,75	35,75	36,85	38,25
<b>T250 (s)</b>	7,26	4,58	3,71	2,15	1,92
Série GR					
<b>Étalement Dmoy cm</b>	24,75	28,25	30,7	31,9	37,92
<b>T250 (s)</b>	12,8	10,19	9,35	8,86	7,92



**Figure 31.** Etalements MBE naturels et recycle en fonction d'étalement.

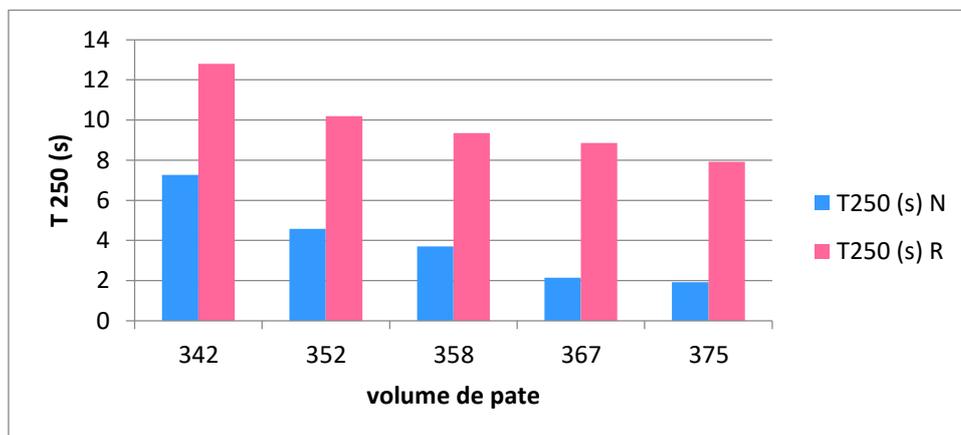
D'après le tableau nous observons une influence de la variation du volume de pâte sur le diamètre de la galette des MBE. Ces résultats sont représentés par la figure 31. La variation de l'étalement augmente avec l'augmentation du volume de pâte, présentant ainsi une similarité de tendance que les résultats obtenus avec les BAP. Toutefois, l'évolution de l'étalement d'un volume de pâte à un

autre, pour le MBE à base de sable recyclé, est en constante augmentation, alors qu'avec le MBE à base de sable naturel l'évolution de l'étalement n'est distincte. L'addition d'eau supplémentaire, pour les MBE de sable recyclé, a fait son effet.

Par rapport à un BAP l'augmentation relative du diamètre de la galette varie entre 2,3 et 3 fois, si on considère que le BAP est acceptable dans la plage de 650 à 800 mm de diamètre de galette.

En absence de normes pour le MBE, nous nous limitons à apprécier l'écoulement en utilisant la variation relative du diamètre de la galette pour un BAP et pour le MBE, les galettes obtenues donnent un rapport relatif de la variation diamètre variant entre 2,15 et 2.83 ; ce qui signifie que certaines compositions du MBE ne sont pas qualifiées d'autoplaçant. Et par application de cette approche l'écoulement du MBE doit varier entre 330 et 420 mm de diamètre de la galette, comme limites minimale et maximale respectivement. L'influence du volume de pâte est mis évidence, il faut un volume de pâte de 352 litres pour satisfaire un MBE qualifié d'autoplaçant en utilisant un sable naturel. Cependant, avec le sable recyclé pour pouvoir garantir une galette autoplaçante il nécessaire d'avoir un volume de pâte de 375 litres.

Contrairement aux résultats d'étalement obtenus avec les BAP où les mélanges de granulats recyclés s'étaient mieux que les granulats naturels, avec le MBE c'est l'inverse qui est constaté, c'est-à-dire avec les granulats naturels les étalements sont les meilleurs. Malgré l'apport d'une eau supplémentaire pour contrarier une possible absorption par le sable recyclé, il semble que ce dernier ait absorbé plus d'eau que prévu.



**Figure 32.** Temps d'écoulement T250 MBE naturels et recycle en fonction du volume de pâte.

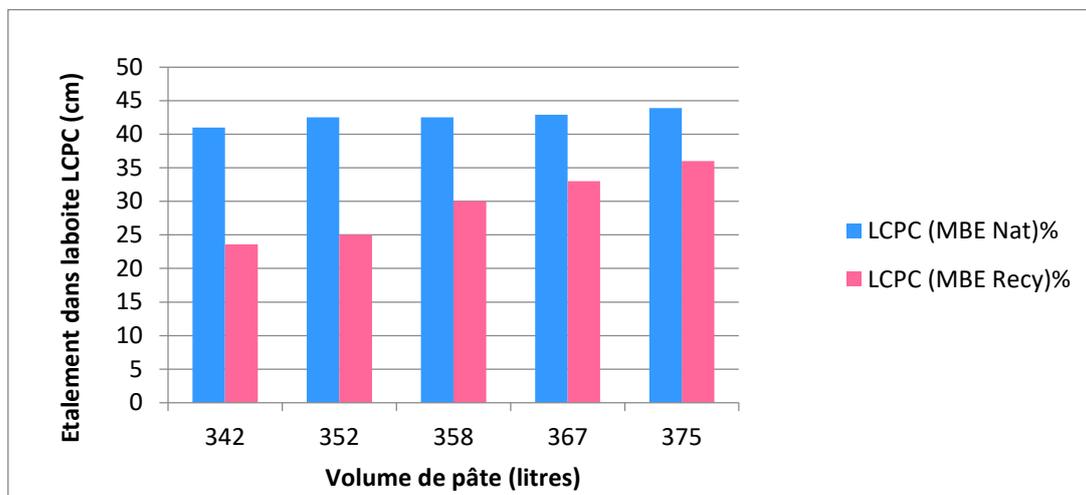
Pour les deux types MBE naturels et recyclés le T250 on remarque une diminution en fonction du volume de pate

### La mini boîte LCPC :

Les valeurs de la mini boîte LCPC pour MBE naturelle et recycle sont montrées dans le tableau suivant :

**Tableau 36.** Résultats de LCPC BOX des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.

<b>Volume de pâte (litres)</b>	342	352	358	367	375
<b>LCPC MBE Nat (cm)</b>	41	42,5	42,5	42,9	43,9
<b>LCPC MBE Recy (cm)</b>	23,6	25	30	33	36



**Figure 33.** Mini boîte LCPC MBE naturels et recycle en fonction du volume de pâte.

D'après la figure on remarque que le diamètre du mini boîte LCPC augmente avec augmentation du volume de pâte pour les deux séries MBE naturels et recyclés.

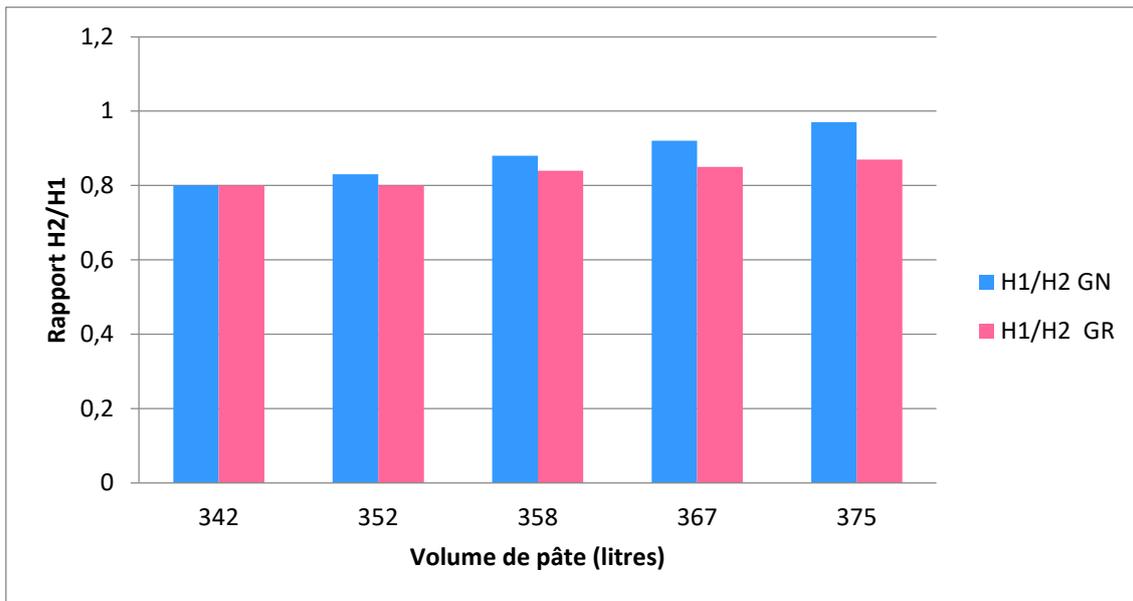
### Mobilité en milieu confiné (L-Box) :

La mobilité en milieu confiné du MBE est appréciée à l'aide d'une mini boîte en L qui n'est pas normalisée mais conçue spécialement pour un tel matériau. Cette boîte est munie de 3 barres d'acier de 6 mm de diamètre et espacées de 4 cm. Les dimensions de la mini boîte en L sont déduites de celles de la boîte en L du béton BAP par un rapport homothétique de deux.

Les résultats obtenus sont supérieurs à 0,8 et sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 37.** les résultats de l'essai mini boîte en L pour des MBE .

Volume de pate	342	352	358	367	375
H2/H1 Nat	0,8	0,83	0,88	0,92	0,97
H2/H1 Recy	0,8	0,8	0,84	0,85	0,87



**Figure 34.** Influence de changement du volume de sur le rapport H2/H1 pour le mini boîte en L pour MBE.

D'après l'histogramme nous trouvons que les valeurs des rapports ( $H_2/H_1$ ) des séries MBE à base de sables naturels sont supérieures aux résultats relevés avec le MBE de sable recyclé. Les deux séries augmentent avec l'augmentation du volume de pâte. Une similarité de tendance est observée pour les essais d'étalement, dans la boîte LCPC et la boîte en L, où les MBE à sables naturels se comportent rhéologiquement mieux que les MBE à sable recyclé.

#### **Résistance à la ségrégation statique :**

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier le MBE vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, au milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Pour le MBE nous avons fait cet essai sur un tamis 2mm, comme illustré sur la figure suivante :

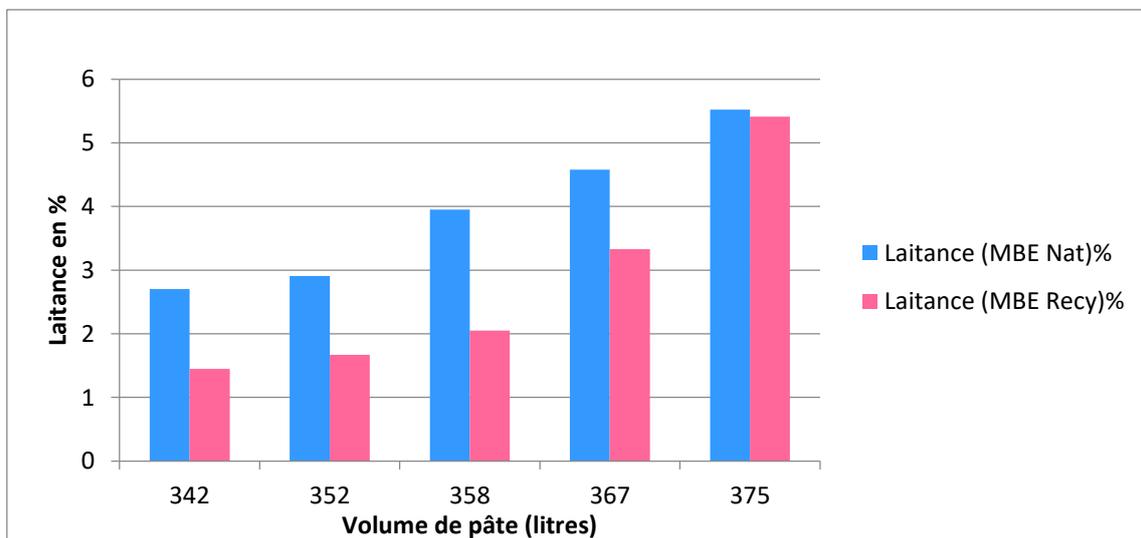


**Figure 35.** Essai de la stabilité au tamis.

Les résultats de ces essais dans le tableau suivant :

**Tableau 38.** Les résultats d'essai de la stabilité sur tamis pour MBE.

<b>Volume de pâte (litres)</b>	342	352	358	367	375
<b>Laitance (MBE Nat)%</b>	2,70	2,91	3,95	4,58	5,52
<b>Laitance (MBE Recy)%</b>	1,45	1,67	2,05	3,33	5,41



**Figure 36.** Variation du % de laitance MBE Nat,Recy.

D'après les résultats obtenus nous trouvons que le pourcentage de laitance passant au tamis 2 mm augmente avec l'augmentation du volume de pâte pour les séries de MBE, à sable nature et sable recyclé. , ceci est lié à l'augmentation du volume de filler qui présente une granulométrie fine et également aux sables utilisés en remplacement des gros granulats dont la distribution

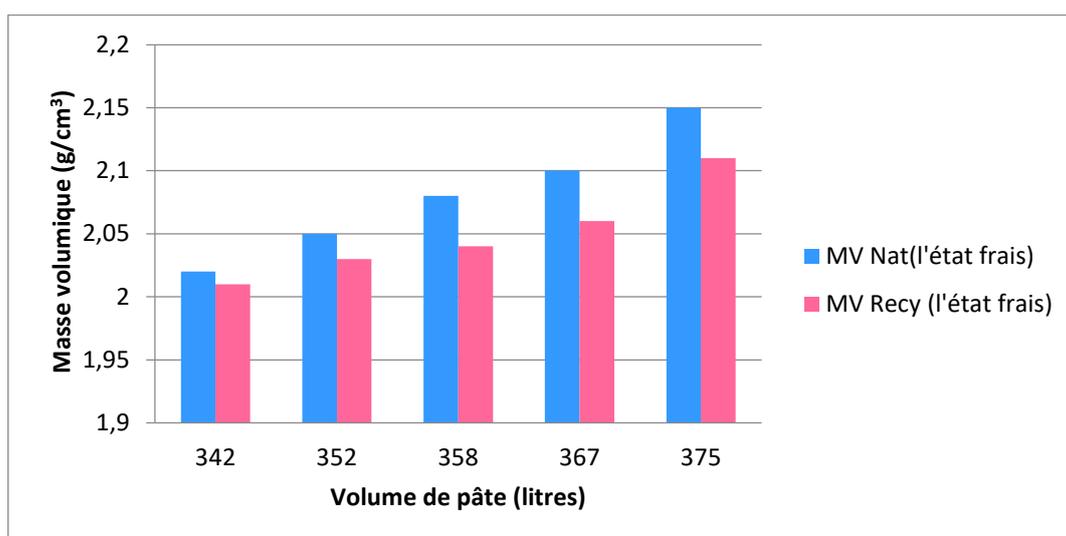
granulométrique est inférieure à 5 mm et dans ces sables un fort pourcentage de sable de dimensions inférieures à 2 mm, est présent.

### La densité :

Les valeurs des masses volumiques, à l'état frais et l'état durci, sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau 39. Masses volumiques à l'état frais pour MBE.

<b>Volume de pate</b>	342	352	358	367	375
<b>MV Nat l'état frais (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,02	2,05	2,08	2,1	2,15
<b>MV Recy l'état durci (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,01	2,03	2,04	2,06	2,11



**Figure 37.** Masse volumique du MBE à l'état frais.

Les valeurs des masses volumiques à l'état frais du MBE naturels et recyclés en fonction du volume de pâte sont proches les unes des autres. On constate que la masse volumique augmente avec l'augmentation du volume de pâte.

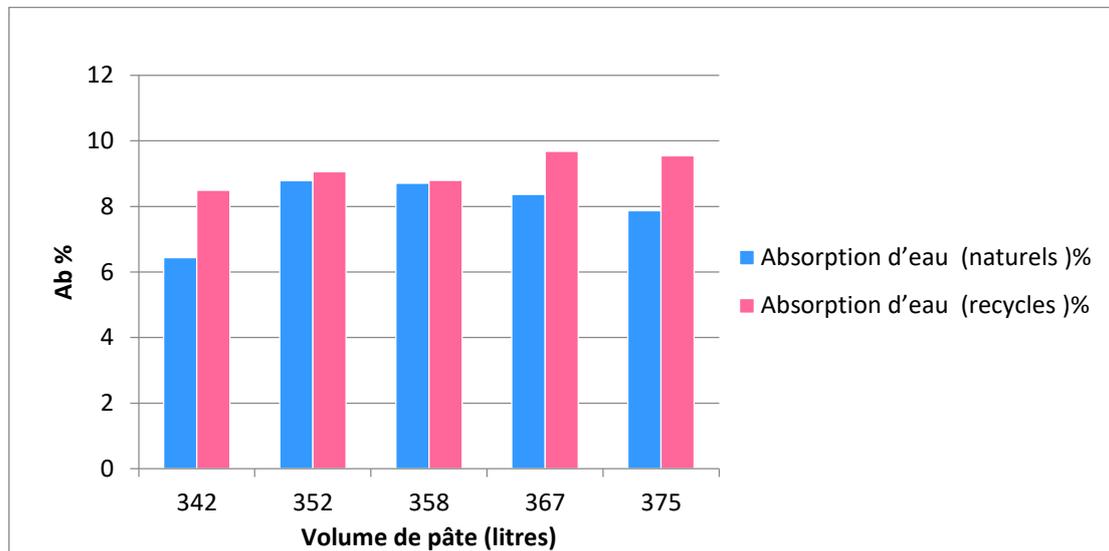
### III.2.3 A L'état durci :

#### Capacité d'absorption d'eau :

Les résultats de l'essai sur MBE à naturels et MBE recyclés sont montrés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 40.** la capacité d'absorption d'eau MBE naturels et recyclés.

<b>Volume de pate L</b>	342	352	358	367	375
<b>Absorption d'eau sur MBE</b>	6,44	8,79	8,71	8 ,37	7,87
<b>Absorption d'eau sur MBE</b>	8,49	9,06	8,80	9,68	9,55



**Figure 38.** Capacité d'absorption d'eau du MBE naturels et recyclé en fonction du volume de pate.

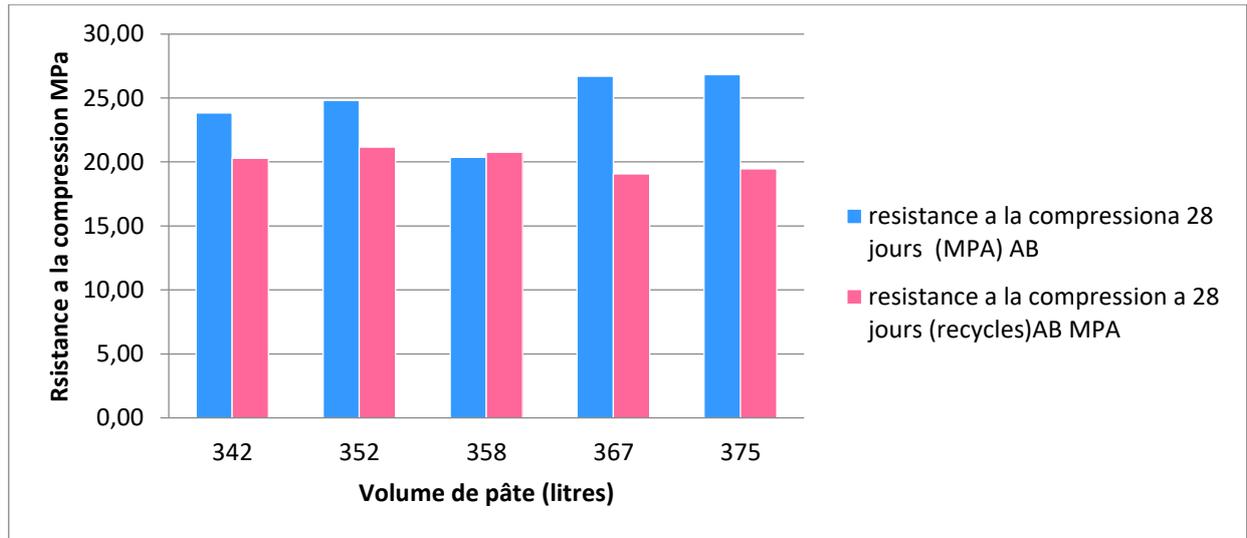
D'après la figure on constate que la capacité d'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du volume de pate, l'absorption d'eau pour MBE recyclés plus grande que MBE naturels ce qui signifie l'effet d'absorption d'eau par le sable recyclé est évident et confirme les résultats précédents où on a évoqué l'effet d'absorption d'eau par ce sable ce qui a influencé les mesures.

### III.2.3 La résistance en compression :

Les résultats obtenus pour les résistances à la compression à 28 jours pour les éprouvettes saturées d'eau, c'est-à-dire pour les éprouvettes qui ont servi pour l'essai d'absorption d'eau, sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau 41.** Résultats de la résistance à la compression du MBE naturels et recyclés (Ab) .

Volume de pâte (L)	342	352	358	367	375
Résistance à la compression à 28 jours MPa, MBE de sable naturel	23,84	24,81	20,35	26,7	26,83
Résistance à la compression à 28 jours MPa, MBE de sable recyclé	20,28	21,17	20,75	19,06	19,46



**Figure 39.** Evolution du MBE naturels et recycles à la résistance en compression à 28 jours en fonction du volume de pâte (éprouvettes saturées d'eau).

D'après la figure on constate en général que l'influence du volume de pâte sur la résistance pour MBE naturels et recycles est perceptible. Si pour les MBE de sables naturels on observe une amélioration de la résistance en fonction de l'augmentation du volume de pâte, même si elle n'est pas assez notable. Par contre pour les MBE de sable recyclé la tendance est à la baisse et ceci semble dû à l'effet du séchage qui s'est produit pour la procédure de l'essai d'absorption d'eau. Il est à rappeler que pour faire l'essai d'absorption d'eau il est nécessaire de sécher les éprouvettes dans les étuves à une température de 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

**Tableau 42.** Résultats de la résistance à la compression du MBE naturels et recycles.

Volume de pâte (L)	342	352	358	367	375
résistance à la comp à 28j GN (MPa)	29,64	32,52	29,51	30,73	29,43
Résistance à la comp à 28 j GR (MPa)	27,07	23,42	28,52	25,02	24,63

La figure 39 illustre la variation de la résistance en compression pour les MBE naturels et recyclés et cette évolution est fonction de l'accroissement du volume de pâte. On observe que la résistance à la compression pour le MBE naturels est légèrement supérieure que la résistance pour MBE à sable recyclé et ceci est logique. Toutefois les résistances à la compression des éprouvettes durcis dans des conditions normales, c'est-à-dire conservées dans un bain d'eau, sont meilleures que les

résistances à compression pour les éprouvettes ayant servies pour le test d'absorption qui ont subi un séchage avant immersion dans l'eau pour le besoin de la capacité d'absorption d'eau.



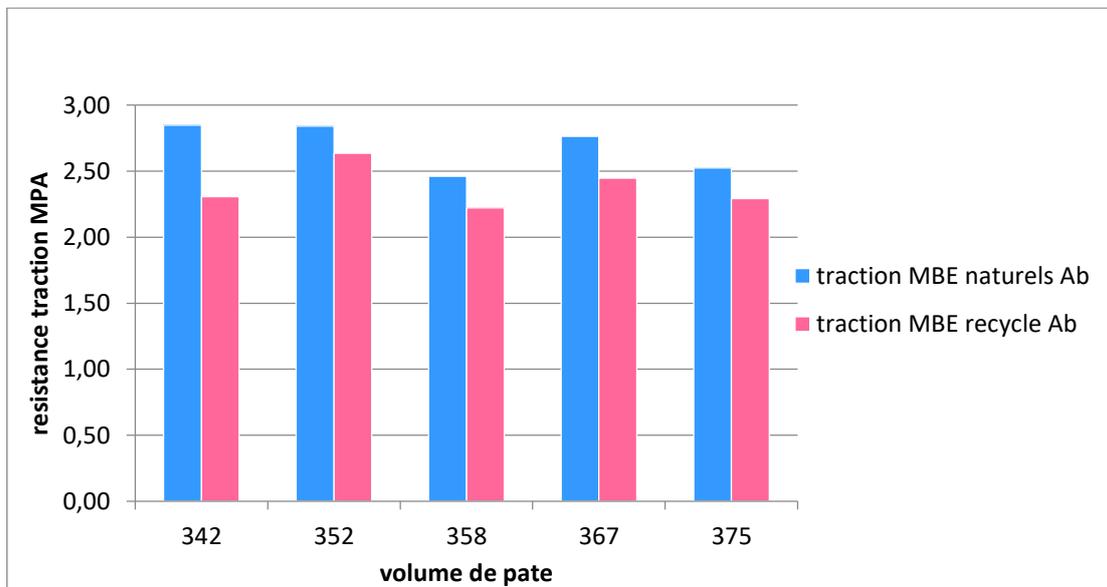
**Figure 40.** Evolution du MBE naturels et recycles à la résistance en compression à 28 jours en fonction du volume de pâte.

#### La résistance en traction :

Les résultats obtenus de la résistance à la traction 28 jours pour les MBE à sables naturels et à sable recyclé sont regroupés dans les tableaux suivants. Ces deux tableaux représentent les résultats des essais à la traction des échantillons qui ont servi à l'essai d'absorption et les échantillons durcis en conditions normales.

**Tableau 43.** Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé.

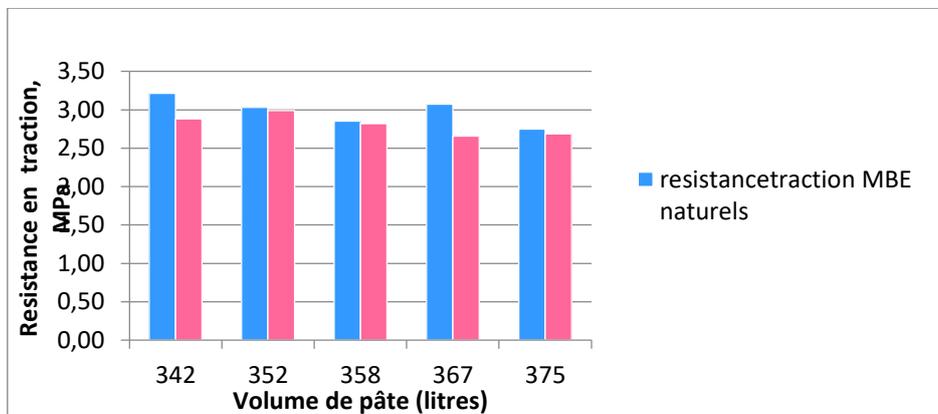
Volume de pâte (litres)	342	352	358	367	375
Traction à 28 jours MPa MBE à sables naturels Ab	2,85	2,84	2,46	2,76	2,52
Traction à 28 jours Mpa MBE à sable recyclé Ab	2,31	2,64	2,22	2,45	2,29



**Figure 41.** Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé en fonction du volume de pate (Ab).

**Tableau 44.** Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé .

Volume de pâte	342	352	358	367	375
Traction à 28 jours (MPa), MBE à sables	3.21	3.03	2.85	3.07	2.75
Traction à 28 jours (MPa), à sable recyclé	2.88	2.99	2.82	2.66	2.69



**Figure 42.** Résistance traction pour MBE naturels et MBE recyclé en fonction du volume de pate .

Les figures 40 et 41 montrent les évolutions de la résistance à la compression pour les échantillons ayant servi aux essais d'absorption d'eau et l'essai de traction pour la caractérisation, respectivement. Comme pour les essais de compression, les spécimens ayant subi un séchage présentent des résistances à la traction moindre que ceux ayant utilisés pour la caractérisation de la résistance à la traction, c'est-à-dire ayant été conservées dans des conditions immergées dans l'eau.

## **Conclusion**

En absence de normes relatives à la caractérisation des mortiers de béton équivalent autoplaçants, des outils non conventionnels ont été utilisés. Pour cet usage, un mini cône, une mini boîte en L, une mini boîte LCPC et un tamis 2 mm ont servi pour caractériser rhéologiquement les MBE. Deux séries de mélanges ont été testées. Il en ressort des résultats obtenus que la variation du volume de pâte a été remarquée. Contrairement aux BAP, l'utilisation du sable recyclé dans le MBE en remplacement des gros granulats recyclés a présenté des résultats moindres que ceux observés avec les MBE à sables naturels. L'absorption d'eau par les sables recyclés semble néfaste pour la caractérisation des MBE à l'état frais et ceci malgré un apport additif d'eau au préalable pour contenir l'absorption d'eau par les granulats recyclés, une donnée largement constatée dans les différents travaux relatifs à la valorisation de ce genre de granulats.

## **Partie 3**

### **Introduction :**

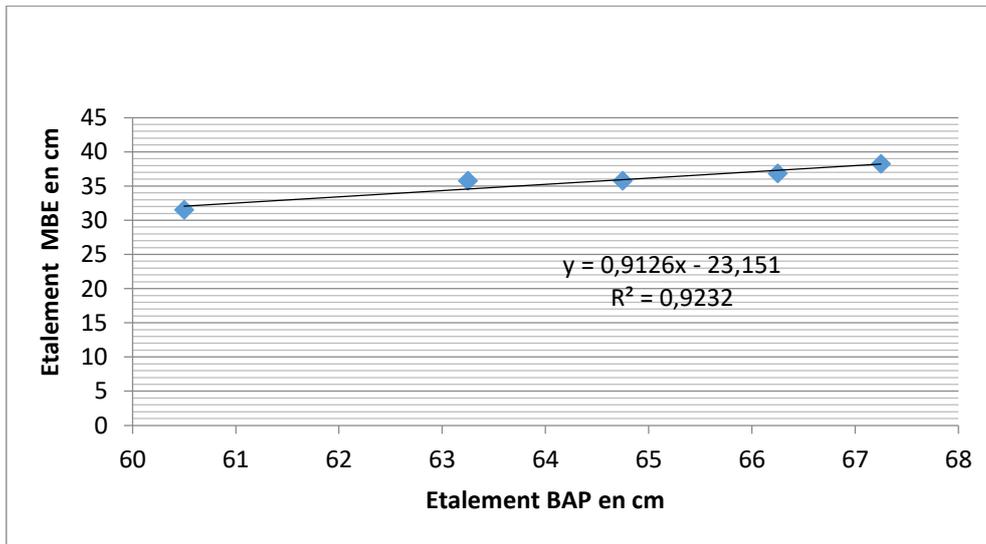
Dans cette partie nous présentons les courbes de corrélation des essais rhéologiques physiques, et mécanique réalisés sur le BAP et MBE qui permettent de déterminer les valeurs approximatives des caractéristiques des BAP en fonction des de MBE correspondant les corrélations retenues ne concernent que les principales propriétés du BAP et MBE.

### **III.3.1.Corrélation entre le BAP (100% granulats naturels) et le MBE (remplacement les granulats naturels 100% par un sable de carrière):**

#### **III.3.1 à l'état frais :**

##### **III.3.1.1 Etalement :**

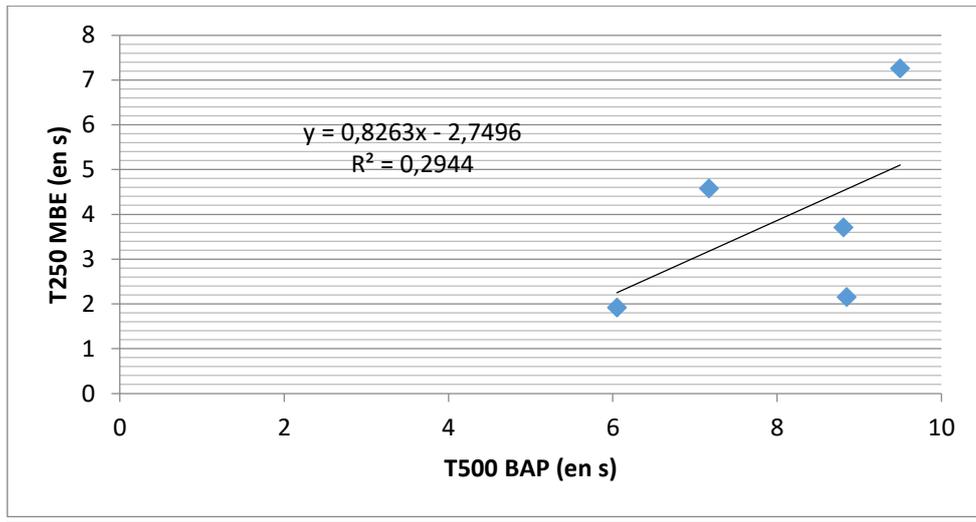
La figure présente une courbe de corrélation de type linéaire entre l'étalement des BAP et des MBE correspondants, L'équation de cette courbe ainsi que le coefficient de corrélation sont données sur le graphe. Nous constatons que le domaine de validité qui varie pour l'étalement du MBE de 31,5 cm à 38,25 cm et pour le BAP l'étalement varie entre 60,5 cm et 67,25 cm, assure une bonne corrélation (coefficient de corrélation de 0,92).



**Figure 43.** Corrélation Etalement vs Etalement MBE.

### **III.3.1.2 Temps d'écoulement T500 / T250 :**

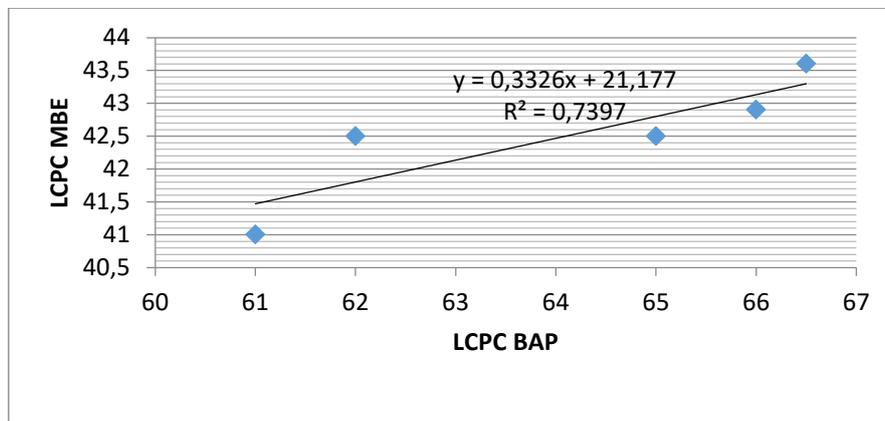
L'écoulement est estimé pour le BAP par la mesure du temps T500 et pour le MBE par la mesure T250, c'est dire le temps mis par la galette pour atteindre le diamètre de 250 mm. La figure 42 présente une courbe de corrélation de type linéaire entre les viscosités du MBE au BAP avec une corrélation trop médiocre  $r = 0.29$ . Les moyens utilisés pour mesurer le temps d'écoulement ne sont pas adéquats pour des mesures fiables. Il serait beaucoup plus utile de faire appel à la vidéo pour relever le temps d'écoulement, parce que le chronomètre reste insuffisant pour des mesures de précision. Peut être également un nombre considérable de prélèvement de temps, c'est-à-dire un nombre important de test, pourrait rendre l'approche, la corrélation, plus indicative. La mauvaise corrélation entre ces deux grandeurs est largement liée aux valeurs du temps d'écoulement, pour T500 dans le du BAP, qui sont en dehors de la zone d'acceptabilité recommandée par la norme dont le temps ne doit pas dépasser 5 s pour atteindre un diamètre de 500 mm lors de l'écoulement libre. Les temps relevés sont tous supérieurs à 6 s pour le BAP, tandis que pour le MBE, quatre mélanges sur cinq présentent des valeurs de temps inférieurs à 5s. Et, il semble que c'est la raison principale de non corrélation entre ces variables (T250 et T500).



**Figure 44.** Temps T500 BAP vs Temps T250 MBE.

### **III.3.1.3 La boîte en LCPC :**

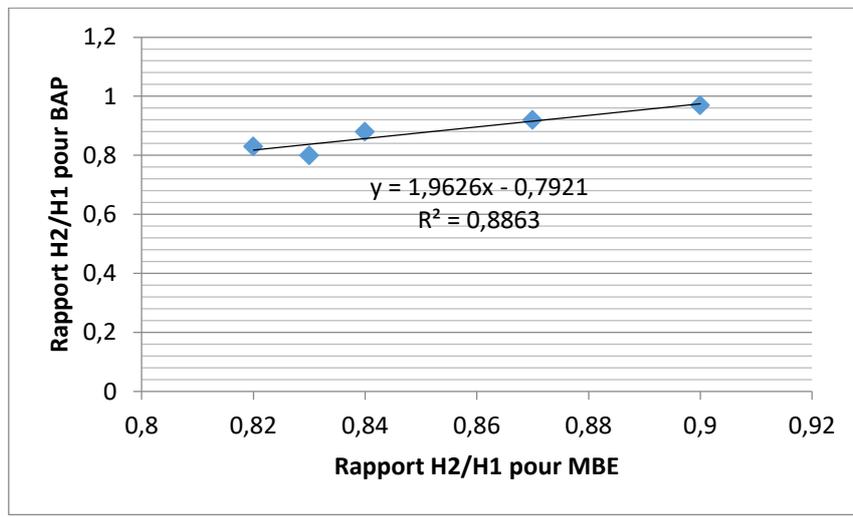
La courbe de corrélation de type linéaire entre LCPC box du BAP et mini LCPC du MBE est représentée par la figure, le domaine de validité qui varie pour l'écoulement du MBE de 41 cm à 43,6 cm et pour le BAP l'étalement varie entre 61 cm et 66,5 cm. La relation entre les écoulements des BAP et MBE est représentée par une droite linéaire avec une corrélation acceptable (coefficient de corrélation de 0,73)



**Figure 45.** Corrélation LCPC BAP vs LCPC MBE.

### **III.3.1.4 La boîte en L :**

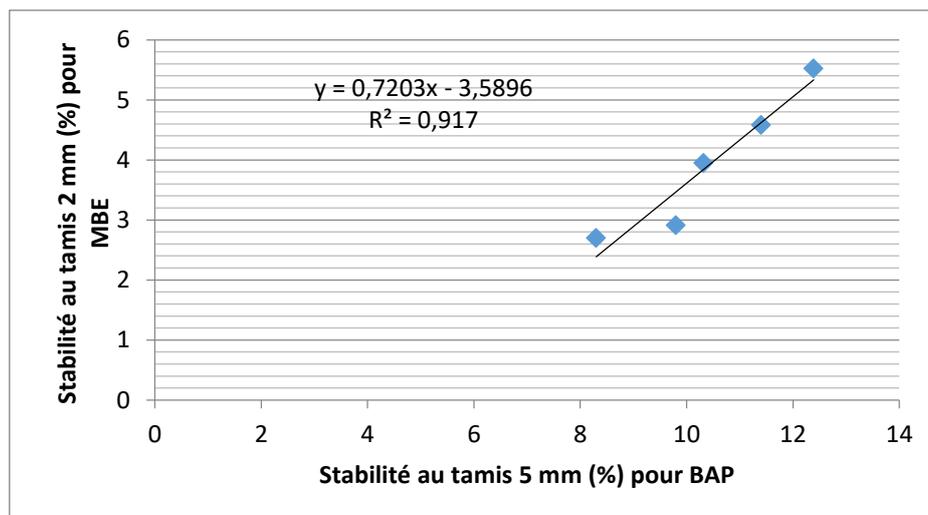
La figure montre une courbe de corrélation de type linéaire entre les H2 /H1 du MBE au BAP. La relation entre le rapport H2/H1BAP et le rapport H2/H1 MBE peut être modélisée par une droite linéaire avec une corrélation satisfaisante (coefficient de corrélation de 0,88).



**Figure 46.** Boîte en L BAP vs Mini boîte en L MBE.

### III.3.1.5 Stabilité au tamis :

La figure montre la relation entre la stabilité au tamis 5 mm pour le BAP et la stabilité au tamis 2 mm pour le MBE. La relation entre ces deux variables montre une équation de forme linéaire ayant un coefficient de corrélation très satisfaisant (coefficient de corrélation de 0,91)

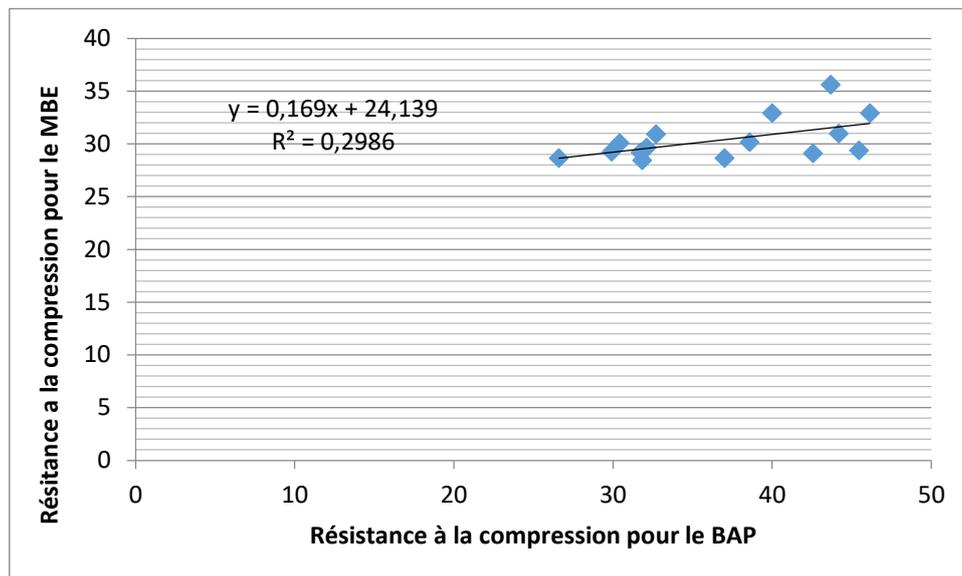


**Figure 47.** Corrélation Stabilité BAP vs Stabilité MBE.

### III.3.1.6 Résistance en compression :

La figure présente une courbe de corrélation de type linéaire entre la résistance à la compression après 28 jours de durcissement pour le BAP à GN et pour le MBE avec un coefficient de corrélation faible  $r = 0.29$ . Cette relation ne semble pas évidente, les deux matériaux (BAP et MBE) n'ont la même configuration. Pour le BAP, il existe la présence de gros granulats qui sont connus pour leur importance au niveau la résistance à la compression, tandis que le MBE confectionné avec uniquement du sable se comporte comme un mortier. Ajouter à cela l'effet d'échelle est aussi à

prendre en considération. Le test de résistance à la compression a été effectué sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm pour le BAP. Par contre pour le MBE se sont les moitiés d'éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm, qui ont servi pour le test de flexion, qui ont été utilisées pour la détermination de la résistance à la compression.



**Figure 48.** Corrélation résistance à la compression à 28 j BAP vs résistance à la compression MBE.

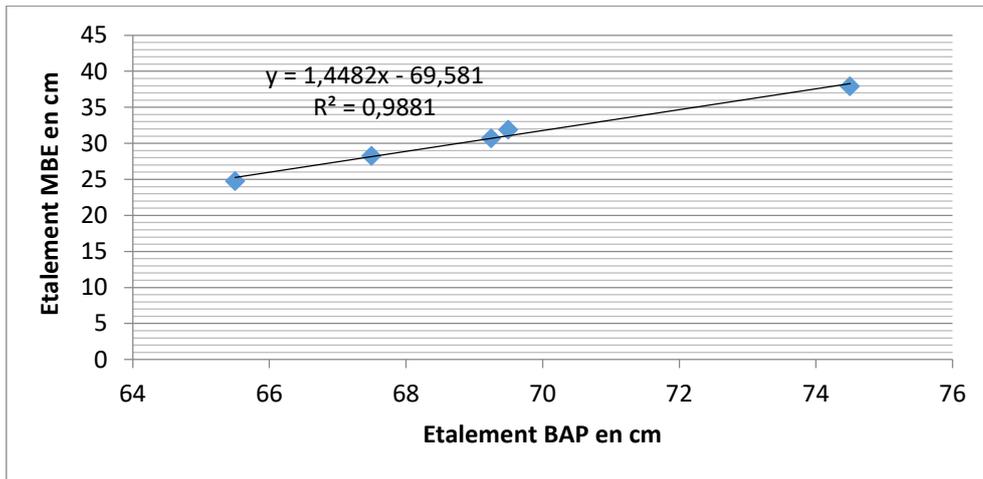
### Corrélation entre le BAP à granulats recyclés et le MBE à sable recyclé :

#### III.3.2 l'état frais :

##### III.3.2.1 Etalement :

La figure 47 montre une courbe de corrélation de type linéaire entre l'étalement des BAP à granulats recyclés et des MBE correspondants, c'est-à-dire en remplacement des granulats recyclés par du sable recyclé. L'équation de cette courbe ainsi que le coefficient de corrélation sont donnés sur le graphe.

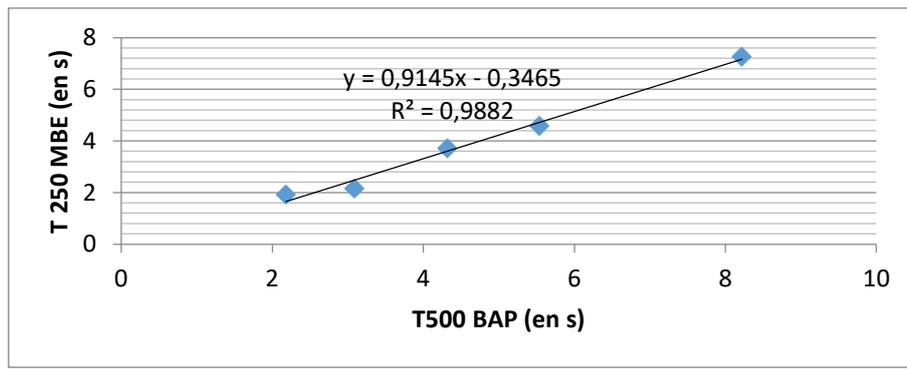
Cette corrélation ne couvre que le domaine de validité qui varie pour l'étalement du MBE de 40 cm à 44,5 cm et pour le BAP l'étalement varie entre 65 cm et 79 cm. Le coefficient de corrélation est bon  $r=0,98$  signe de représentation presque parfaite du comportement du BAP à granulats recyclés en milieu libre ou non confiné.



**Figure 49.** Corrélation Etagement BAP vs Etagement MBE.

### III.3.2.2 Temps d'écoulement T500 / T250 :

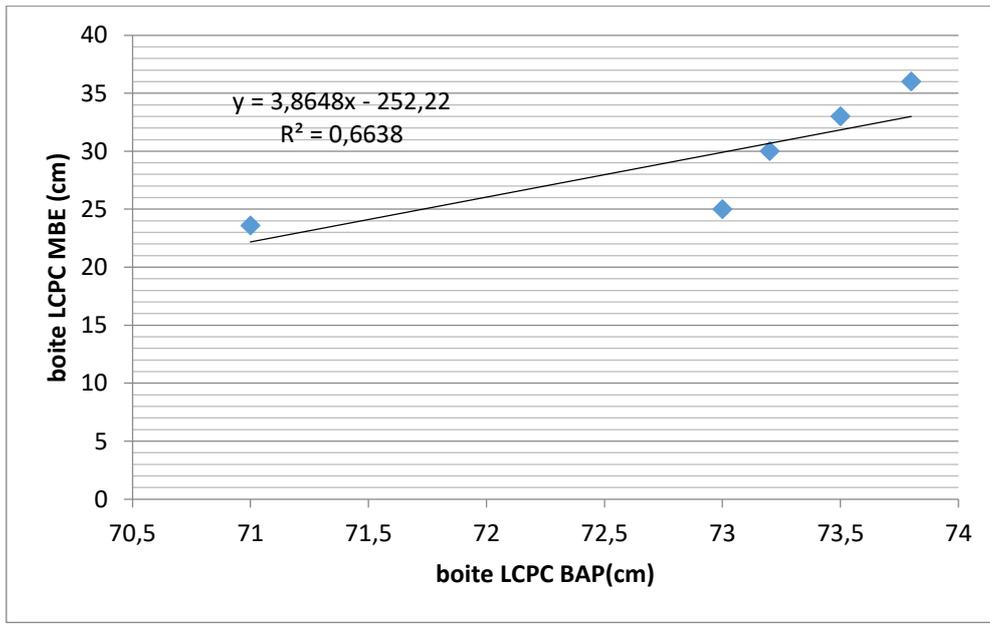
La viscosité est estimée pour le temps de l'écoulement pour atteindre le diamètre 500 mm pour le BAP (T500) et un diamètre de 250 mm pour le MBE (T250) avec un coefficient de corrélation très satisfaisant  $r=0.98$ . Contrairement aux mélanges confectionnés avec les granulats naturels, les temps d'écoulement sont à majorité dans la fourchette comprise entre 2 et 5s.



**Figure 50.** Temps T500 BAP vs Temps T250 MBE.

### III.3.2.3 La boîte en LCPC :

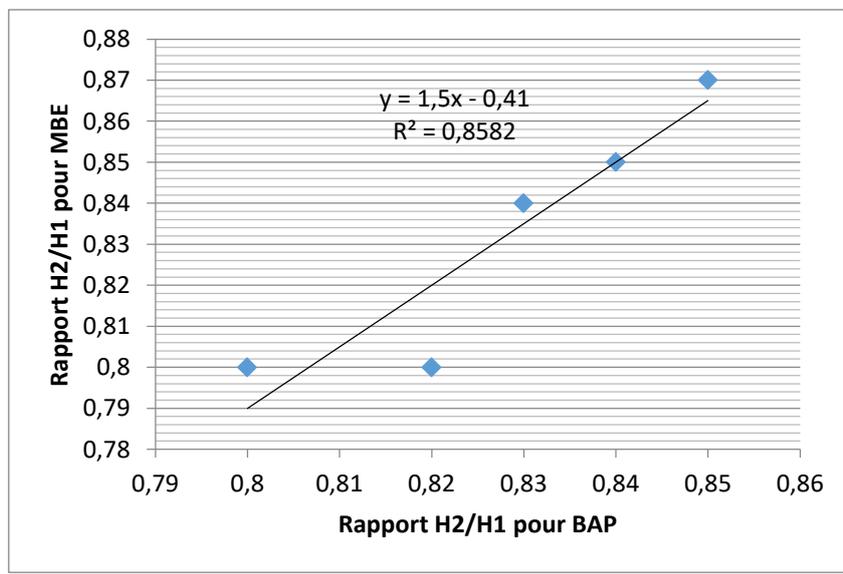
La figure illustre une fonction de type linéaire reliant les deux variables qui sont le BAP à granulats recyclés à son mortier équivalent MBE à sable recyclé. La relation est une équation de type  $(y=ax+b)$  de forme affine avec un coefficient de corrélation acceptable ( $r=0,66$ )



**Figure 51.** Corrélation LCPC BAP vs LCPC MBE.

### III.3.2.4 La boîte en L :

La figure présente une courbe de corrélation de type linéaire entre la capacité de remplissage (H2/H1) du MBE à sable recyclé et au BAP de granulats recyclés. La relation entre le rapport H2/H1 BAP et le rapport H2/H1 MBE peut être modélisée par une droite linéaire avec corrélation satisfaisante (coefficient de corrélation de 0,96).



**Figure 52.** Corrélation H2/H1 BAP vs H2/H1 MBE.

### III.3.2.5 Stabilité au tamis :

La résistance à la ségrégation entre le BAP à granulats recyclés et le MBE, est indiquée par la droite linéaire représentée sur la figure avec un coefficient de corrélation très satisfaisant  $r = 0,91$ .

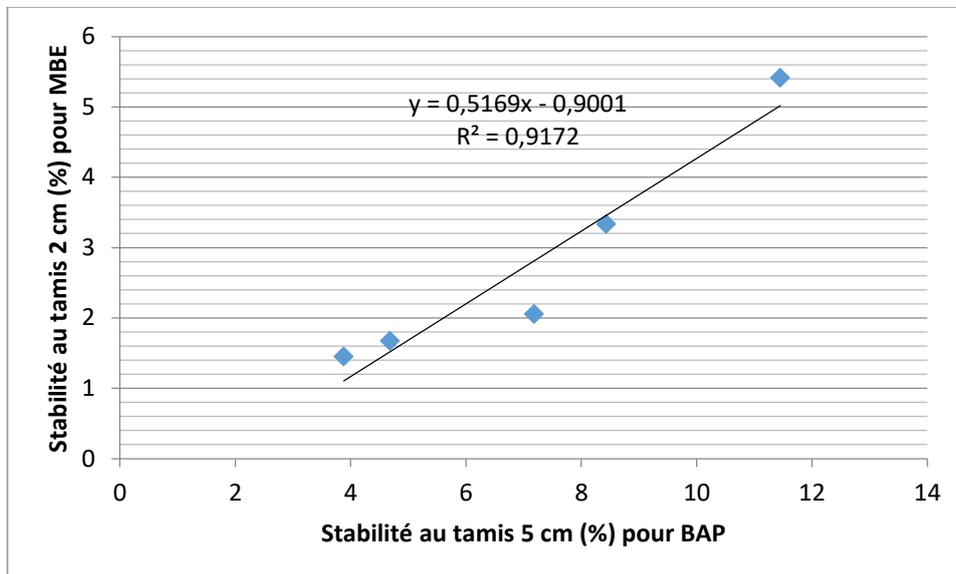
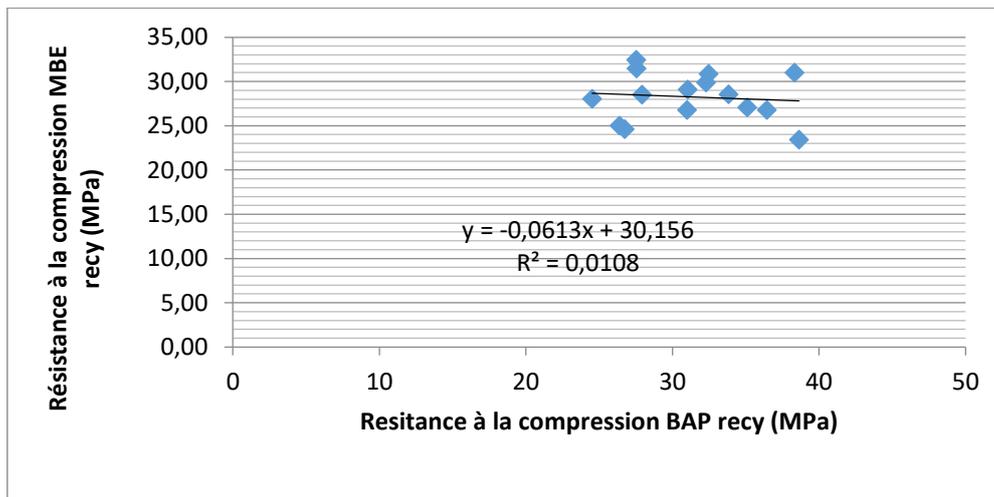


Figure 53. Corrélation Stabilité BAP vs Stabilité MBE.

### III.3.2.6 Résistance en compression :

Les résultats obtenus présentent la relation entre la résistance en BAP à la résistance en compression MBE à 28 jours avec un coefficient de corrélation presque nul  $r = 0,01$ . Comme pour la corrélation entre résistance pour le cas des granulats naturels, la corrélation obtenue est insignifiante. Il est fort probable que l'effet d'échelle entre les éprouvettes BAP et MBE soit l'inconvénient majeur dans l'établissement d'une relation fiable.



**Figure 54.** Corrélation résistance à la compression à 28 j BAP vs résistance à la compression MBE.

### **Conclusion :**

De bonnes corrélations ont été observées surtout dans les caractéristiques à l'état frais. Si les mesures relevées ne convergent pas avec les valeurs prescrites dans les documents (les normes), il est improbable d'avoir une corrélation fiable servant d'outil de prévision. Pour la relation entre les résistances à la compression (BAP vs MBE), l'effet d'échelle semble contrarier toute corrélation.



## **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale :**

Cette étude a pour objet d'étudier l'influence de la variation du volume de pâte sur la performance rhéologique du BAP et le mortier de béton équivalent correspondant (MBE) à base de granulats naturels et recyclés. Cinq différents volumes de pâte ont été testés. L'approche entreprise est de faire augmenter le volume de pâte au dépend du volume des granulats. L'augmentation du volume de pâte s'est faite uniquement sur la variation de la quantité de filler, qui la poudre de marbre, et la quantité de ciment est restée constante. La performance rhéologique est approchée par des essais recommandés par l'EFNARC (les lignes directrices européennes pour le béton autoplaçant). Ces essais concernent l'étalement au cône d'Abrams, le temps d'écoulement (T500) pour apprécier la viscosité, la mobilité dans la boîte en L, l'étalement dans la boîte LCPC et la résistance à la ségrégation. Tandis que les essais de caractérisation du MBE et en absence d'outils normalisés pour cet usage, des outils non conventionnels ont été préconisés et il s'agit du mini cône, la mini boîte en L, le temps d'écoulement (T250), la mini boîte LCPC et la résistance à la ségrégation au tamis 2 mm. Également, des tests de résistance mécanique en compression et en traction ont été réalisés sur des spécimens de BAP et MBE.

A l'issue des résultats obtenus dans cette étude sur les BAP et les MBE, on peut déduire que :

### **Sur Mobilité en milieu non confiné :**

Pour le BAP, l'augmentation du volume de pâte est mise en évidence, tous les mélanges respectent les spécifications recommandées et les diamètres d'étalement varient entre 650 et 800 mm. Les mélanges à base de granulats recyclés ont présenté des valeurs meilleures que les granulats naturels.

Pour le MBE, l'influence du volume de pâte est aussi présente. En absence de normes relatives au MBE à l'état frais et par simulation à un BAP dont l'augmentation relative du diamètre de la galette varie entre 2,3 et 3 fois et par application de cette approche l'écoulement du MBE doit varier entre 330 et 420 mm de diamètre de la galette, comme limites minimale et maximale respectivement. A l'inverse des BAP, les sables naturels sont plus prépondérants que le sable recyclé. Ce dernier absorbe plus d'eau que l'apport initial en eau pour contrarier l'absorption d'eau préalablement déterminé.

### **Mobilité en milieu confiné :**

Pour les BAP des deux séries (GN, GR) le rapport  $H_2/H_1$  satisfait le critère de remplissage vu que les valeurs sont supérieures ou égales à 0,8 ce qui évite le risque de blocage.

Et pour le MBE l'évolution des valeurs obtenues s'accordent avec celles de l'écoulement en milieu non confiné (étalement au mini cône).

### **Sur la viscosité plastique :**

Pour le temps d'écoulement des BAP (T500), la tendance générale est que plus le volume de pâte augmente le temps d'écoulement diminue. Pour les BAP de granulats naturels, cependant, les temps d'écoulement qui devraient ne pas dépasser 5s ne sont pas respectés et ainsi la viscosité des mélanges s'est amoindrie, c'est-à-dire que les BAP sont devenus plus visqueux. L'augmentation du volume de pâte a rendu celle-ci plus épaisse ou grasse. L'écoulement n'est pas contrarié mais devenu plus lent. Alors que les temps d'écoulement, pour les BAP à base de granulats recyclés, sont à majorité inférieurs à 5s.

Pour le MBE, les temps d'écoulements des mélanges de sables naturels sont beaucoup inférieurs à ceux des mélanges à base de sable recyclé. Comme mentionner avant, l'absorption d'eau par le sable est bien évidente.

### **Sur la ségrégation statique :**

Les BAP des deux séries (GN, GR) ont des valeurs de laitance inférieures à 15%, les valeurs réelles varient entre 1% et 5,5 %. Ces résultats sont signes de stabilité

Pour le MBE aussi la résistance à la ségrégation est assurée, puisque tous les mélanges présentent des valeurs de laitance variant entre 1.45 et 5.52%.

### **Sur la résistance mécanique :**

Le remplacement des granulats naturels par les recyclés a entraîné une diminution des résistances à la compression. L'augmentation du volume de pâte n'a pas donné l'effet escompté, puisque la résistance à la compression a diminué pour les séries de mélanges BAP à granulats naturels et recyclés.

Pour le MBE, la tendance est la même, les mélanges MBE avec sable naturel (sable de carrière) assurent des résistances élevées qu'à ceux formulés avec du sable recyclé.

Ce qui ressort de ces résultats, l'augmentation du volume de pâte est plus intéressante sur le comportement rhéologique et non d'aucune amélioration de la résistance mécanique.

### **Sur les corrélations**

Les corrélations faites entre les BAP et les MBE sont acceptables pour le cas du comportement à l'état frais. Les coefficients de corrélations trouvés sont plutôt bons. Par contre en résistance mécanique, les corrélations sont inexistantes avec des coefficients ( $R^2$ ) trop médiocres.

### **Perspectives**

Retour d'expérience en utilisant des outils (un rhéomètre) de détermination des paramètres rhéologiques réels.



## **Références bibliographiques**

- [1] **Davood Niknezhad Décembre 2015** thèse de doctorat « Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales : approche expérimentale et numérique » Université Européenne de Bretagne
- [2] **Boudra Sara Octobre 2014 Magister** « Contribution à la modélisation du retrait des bétons 'Application au béton Autoplaçant » Université de Constantine 1
- [3] « Net, [www.termsscience.fr](http://www.termsscience.fr), 2008 »
- [4] **Benakli Sarah 2011 Magister** « Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction ». Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou .
- [5] **Nikolas Roussel 2005** « Rhéologie des bétons autoplaçants Évaluation de la thixotropie » BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES OCTOBRE-NOVEMBRE-DÉCEMBRE
- [6] **Taleb Mounir 2016-2017** « Optimisation de la pâte d'un béton autoplaçant (BAP) à base d'ajouts cimentaires locaux » Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara-Boumerdes .
- [7] **H.Hafid 2012 Thèse de doctorat** « Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologiques des bétons frais » l'université Paris-Est, France
- [8] **S.Assié 2004 Thèse de doctorat** "Durabilité des bétons autoplaçants" Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliqués-INSA Toulouse-France..
- [9] **Maher El barrak 2005** Thèse de Doctorat « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais Université de toulouse III – Paul Sabatier
- [10] **Yahia, A., Tanimura, M. and Shimoyama, Y., 2005.** Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. Cement and Concrete Research,
- [11] **EFNARC, 2005.** The European guidelines for self-compacting concrete; specification, production and use.
- [12] **Hu, C. and de Larrard, F., 1996.** The rheology of fresh high-performance concrete. Cement and Concrete Research.
- [13] **Yen, T., Tang, C., Chang, C. and Chen, K., 1999.** Flow behaviour of high strength high-performance concrete. Cement and Concrete Composites.
- [14] **B. Ghofrane Novembre 2007** Etude de comportement différé des bétons autoplaçants Université Mentouri Constantine.
- [15] **Rola Deeb 2013** FLOW OF SELF-COMPACTING CONCRETE School of Engineering Cardiff University, UK

- [16] **AFCG juin, 2000**, « Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics. Association Française de Génie Civil
- [17] **Holcim, 2004** : Guide pratique, Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, une publication de Holcim (Belgique), S.A,2004
- [18] **Saadani Sabrina, 2016** « Comportement des bétons à base de granulats recyclés ». Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine.
- [19] **GDCBFNB, 1994** Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l’habitat et de la Construction, Agence De l’environnement et de la Maîtrise de l’Energie-. Cité dans (Raphaël, 2003)
- [20] **UNPG, (2001)**. Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans (Raphaël, 2003)
- [21] **Thai-Hoa V 2009** Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l’hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse.
- [22] **Cimpelli C. et Lefort M 1996** Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclé UNICEM. Île de France. Cité dans (Raphaël, 2003)
- [23] **Raphaël B (2003)**. Substitution des granulats alluvionnaires dans l’industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. CERIB, RB/JRO, EA286/Matériau.
- [24] **Sánchez et Al. 2004., Houari H. ; (2014) . Grondin .A ;2011**; Valorisation des granulats recyclés de béton : étude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton. Mémoire présenté à IUT Robert Schuman
- [25] **Debieb, Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert 2010**. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cement and Concrete Composites.
- [26] **Levy S.M. Helene P 2004** Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research 1975-1980.
- [27] **Olorunsogo, F.T., Padayachee, N 2002**. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cement and Concrete Research.
- [28] **Abbas A. Carcassès M. Ollivier J.P 2009** The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research
- [29] **Serifou Mamery Décembre 2013** « Béton à base de recyclas : influence du type de recyclas et rôle de la formulation »
- [30] **JING PAN 2013**. Influence des adjuvants chimiques sur le refroidissement de mortier de beton équivalent a rhéologie adaptée Université de Sherbrooke Canada .

- [31] **Italcementi Group, par A. 2000** Schwartzentruber et C. Catherine CTG, Les Techno des, Guerville France, (La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvants Guerville France
- [32] **Benbrahim Fahima 2015** Effet Des Granulats De Verre Mousse Sur Les Propriétés Rhéologiques Et Physico-mécaniques Du Mortier Autoplaçant. Mémoire de Magister, Université de M'hamed bougara Boumerdes.
- [33] **Haifi Mohamed Redah 2011.** Formulation des béton autoplaçant. Mémoire de Magister. Université de Constantine.
- [34] **Prisca Chételat, Mars 2012** Rapport technique / domaine du bâtiment, Isolation de verre cellulaire en vrac : Utilisation de verre cellulaire dans le domaine du bâtiment ;»
- [35] **Bouheram Nour Elhouda 2018** «La Méthode du mortier de béton équivalent pour l'étude des propriétés des BAP Université Annaba.
- [36] **Amara Hanene 2013** « Etude de la méthode du mortier du béton équivalent pour un BAP à base de granulats recyclés.
- [37] **Sedran, T. 1999.** Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application à la formulation des bétons autonivelants." Doctoral Thesis of Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [38] **Sedran, T., de Larrard, F., 1999.** Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. Proceedings 1st SCC Symp, RILEM PRO7, CBI Sweden,