

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

THESE DE DOCTORAT SCIENCE

Spécialité : GENIE CIVIL

**PERFORMANCE ET DURABILITE D'UN BETON AUTOPLAÇANT A
BASE D'AGREGATS RECYCLES ET DE POZZOLANE NATURELLE**

Par

Mohammed OMRANE

Devant le jury composé de :

Menadi belkacem	Professeur, U de Blida 1	Président
Mouli Mohamed	Professeur, ENPO, Oran	Examineur
Boukendakdji Othmane	Professeur, U de Médéa	Examineur
Bouikni Ammar	Maître de conférences A, U de Blida 1	Examineur
Kenai Saïd	Professeur, U de Blida 1	Rapporteur
Aït-Mokhtar Abdelkrim	Professeur, U de La Rochelle, France	Co- Rapporteur

Blida, 2018

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail, à la mémoire
de mes chers parents
à mon cher frère et à ma sœur, ma femme, mes
enfants et toute la famille.*

RÉSUMÉ

L'utilisation d'agrégats de béton recyclé à partir des déchets de démolition en combinaison avec les ajouts cimentaires en béton présente plusieurs avantages écologiques et économiques par la réduction des émissions de dioxyde de carbone et la réduction de la consommation de ressources naturelles. Dans cette thèse, les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant (BAP) à base d'agrégats de béton recyclé et de pouzzolane naturelle (PZ) sont évaluées.

Quatre mélanges de béton ont été fabriqués, en faisant varier le taux massique de substitution de deux agrégats naturels grossiers et fins par des agrégats recyclés grossiers et fins (équivalents). Les taux de substitution ont été fixés à 0%, 50%, 75% et 100%. Le ciment a également été partiellement substitué par 5% à 25% en masse de pouzzolane naturelle.

La performance à l'état frais de BAP a été évaluée à l'aide des essais de l'étalement, l'étalement à la couronne (J-Ring test), du temps d'écoulement en entonnoir en V, de l'essai à la boîte en L (L-Box) et de l'essai de la stabilité du tamisage. La résistance à la compression a été mesurée à l'âge de 7, 28, 56, 90 et 120 jours. Considérant l'importance d'étudier la durabilité de BAP dans des environnements agressifs, le comportement des matériaux face à la diffusion des ions chlorures a été analysé selon la deuxième loi de Fick et au moyen d'essais de perte de masse après immersion dans l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chlorhydrique (HCl). La résistance à l'attaque sulfatique externe de (Na_2SO_4 et $MgSO_4$) a également été étudiée.

Les résultats montrent qu'il est possible d'utiliser 50% d'agrégats grossiers et fins recyclés pour la fabrication de bétons autoplaçants (BAP) avec des performances rhéologiques et mécaniques comparables à celles des BAP avec granulats naturels. Les mélanges de BAP avec et sans granulats recyclés contenant des pouzzolanes développent des résistances en compression comparables à celles des mélanges sans pouzzolanes à 120 jours.

L'incorporation de 15% et de 20% de pouzzolane réduit la profondeur de pénétration des ions chlorure à 50% et a également réduit la perte de masse suite à l'attaque acide (HCl et H_2SO_4) et à l'attaque sulfatique (Na_2SO_4 et $MgSO_4$).

Mots clés : Béton Autoplaçant ; Pouzzolane naturelle ; Agrégats recyclés ; Rhéologie ; Caractérisations mécaniques ; Acides ; Sulfates ; Durabilité.

ملخص

إن استخدام الركام (الحصى والرمل) من الخرسانة المعاد تدويرها من نفايات الهدم مع دمج الإضافات الإسمنتية في الخرسانة له فوائد إيكولوجية واقتصادية عديدة، وذلك عن طريق الحد أو التخفيض من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وكذا الحد أو التخفيض من الاستهلاك المفرط للموارد الطبيعية.

في هذه الأطروحة، تم تقييم الخصائص الريولوجية، الميكانيكية وديمومة الخرسانة ذاتية التسوية (BAP) المنجزة من ركام الخرسانة المعاد تدويرها ومن البوز ولان الطبيعي (PZ).

تم تصنيع أربعة خلطات خرسانية، باستبدال الركام الطبيعي الخشن والدقيق بالركام المعاد تدويره (الخشن والدقيق) بمقدار 0٪، 50٪، 75٪ و 100٪. كما تم استبدال الاسمنت جزئياً بنسبة 5٪ إلى 25٪ بالبوز ولان الطبيعي.

وقد نوقش أداء وفعالية الخرسانة ذاتية التسوية في حالتها السائلة قبل التصلب باستخدام الاختبارات التالية (اختبار الانتشار، اختبار الانتشار J - الدائري)، واختبار زمن التدفق للقمع على شكل حرف V، اختبار العلبة القائمة على شكل حرف L واختبار الاستقرار للمنخل). تم قياس مقاومة الضغط في الأزمنة 7، 28، 56، 90 و 120 يوماً.

وبالنظر إلى أهمية دراسة متانة وديمومة الخرسانة ذاتية التسوية في البيئات العدوانية، تم تحليل سلوك انتشار شوارد الكلوريد بواسطة قانون Fick الثاني، وكذا فقدان الكتلة بعد الغمر في حمض الكبريتيك (H_2SO_4)، حمض الهيدروكلوريد (HCL)؛ والهجوم الكيميائي لكبريتات (Na_2SO_4) و ($MgSO_4$).

تشير النتائج إلى إمكانية استخدام 50٪ من الركام الخشن والدقيق المعاد تدويره لتصنيع وتحضير الخرسانة ذاتية التسوية بخصائص ميكانيكية وريولوجية متقاربة مع الخرسانة ذاتية التسوية المحتوية على ركام طبيعي. حيث أبدت مخاليط الخرسانة ذاتية التسوية المحتوية على ركام طبيعي ومدور من نفايات الهدم والتي تحتوي على البوز ولان الطبيعي تطورا في مقاومة الضغط مماثلة للخليطين بدون البوز ولان وذلك بعد 120 يوم.

إن دمج 15٪ و 20٪ من البوز ولان على الترتيب عمل على خفض عمق تغلغل شوارد الكلوريد بمقدار 50٪، كما عمل على خفض فقدان الكتلة ضد هجوم حمض الكلوريد (HCL) وحمض الكبريتيك (H_2SO_4) وضد الهجوم الكيميائي لكبريتات (Na_2SO_4) و ($MgSO_4$).

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التسوية، البوز ولان الطبيعي، الركام المعاد تدويره؛ الريولوجيا. الخصائص الميكانيكية؛ الأحماض. الكبريتات، الديمومة.

ABSTRACT

The use of recycled concrete aggregates from rubble and demolition waste in combination with cementitious additions in concrete has several ecological and economic advantages by reducing carbon dioxide emissions and reducing the consumption of natural resources. In this thesis, the rheological, the mechanical and the durability properties of self-compacting concrete (SCC) using recycled concrete aggregates and natural pozzolana (PZ) are evaluated.

Four concrete mixes were manufactured, by varying the level of substitution by weight of both coarse and fine natural aggregates by coarse and fine recycled aggregates. The substitution levels were fixed at 0%, 50%, 75% and 100%. The cement was also partially replaced by weight from 5% to 25% by natural pozzolan.

The performance at the fresh state of SCC was discussed using the slump test, the J-Ring test, the flow time test V-funnel, the L-Box and the sieve stability test. Compressive strength was measured at the ages of 7, 28, 56, 90 and 120 days. Considering the importance of studying the durability of SCC in aggressive environments, the behavior of chloride ions diffusion was analyzed using the Fick's second law and the loss in mass after immersion in sulfuric acid (H_2SO_4), hydrochloric acid (HCl) and external sulfate attack of (Na_2SO_4) and (MgSO_4) was also investigated.

The results indicate the possibility of using 50% recycled coarse and fine aggregates for performing self-compacting concrete with comparable rheological and mechanical performance as mixture with natural aggregates. The mixtures of SCC with natural and recycled aggregates containing PZ develop a comparable compressive strength to mixtures without PZ at 120 days.

The incorporation of 15% and 20% PZ decreased the penetration depth of chloride ions to 50% and also decreased the mass loss under from acid attack (HCl and H_2SO_4) and sulfate attack (Na_2SO_4 , MgSO_4).

Key words: *Self - compacting concrete; Natural pozzolana; Recycled aggregates; Rheology; Mechanical properties; Acids; Sulfates; Durability.*

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU "Allah" Le Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Ce travail n'a pu être réalisé que grâce à une collaboration avec le laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, par la mise à disposition de moyens d'essais pour les bétons autoplaçants, j'en remercie vivement ses membres pour leurs aides. Je tiens à ce que chacun d'eux sache que je le remercie sincèrement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude, mes remerciements et ma profonde reconnaissance à Monsieur Kenaï Saïd, Professeur à l'université Saad Dahlab de Blida, directeur de cette thèse qui, malgré ses nombreuses responsabilités, n'a pas hésité à consacrer de son temps pour me faire bénéficier de ses orientations, ses précieux conseils aux moments importants, et enfin à corriger minutieusement cette thèse.

Mes remerciements vont à Monsieur Aït-Mokhtar Abdelkrim, Professeur à l'université de La Rochelle (France) et Co-directeur de cette thèse. Je le remercie vivement pour ses orientations pour mener à bien ce travail.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Menadi Belkacem, Professeur à l'université Saad Dahlab de Blida de m'avoir accepté de présider ce jury.

Mes remerciements vont à Mr Mouli Mohamed, professeur à ENPO, Oran, Mr Othmane. Boukendakdji, professeur à l'université de Médéa, Mr Bouikni Ammar MCA université Saad Dahlab de Blida qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à Mr El-Hadj Kadri, professeur à l'université Cergy-Pontoise (France) pour sa gentillesse, ses conseils, ses orientations pris pour mener à bien ce travail, je le remercie vivement pour m'avoir accueilli à son laboratoire.

Je ne saurai oublier de remercier vivement Mr Benosman A. S. MCA Université Aboubaker Belkaid Tlemcen.

Je remercie vivement MM. Ben Chaa A. et Akram S., Maîtres de conférences à l'université de Laghouat.

Je tiens aussi à remercier M. Ganona ben Alia, le propriétaire de la station de concassage pour son aide à la préparation des granulats recyclés qui ont été nécessaires au projet.

Enfin, tous mes remerciements vont à ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide. Je pense bien évidemment à tous mes collègues de l'université Ziane Achour Djelfa, et plus particulièrement ceux qui se sont montré disponibles jusqu'au dernier moment.

Tableau des matières

Résumé	
Remerciements	
Table des matières	I
Liste des illustrations, graphiques et tableaux.....	V
Liste des symboles et des abréviations	XII
Introduction générale.....	01

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTOPLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

1.1 Introduction.....	03
1.2. Définition d'un béton autoplaçant.....	03
1.3. Modes de formulation des BAP.....	03
1.4. Particularités de la composition des BAP.....	04
1.4.1. Volume de pâte	04
1.4.2. Quantité de fines	04
1.4.3. Emploi du superplastifiant.....	05
1.4.4 Agent de viscosité (réteneur d'eau)	06
1.4.5. Volume de gravillon	06
1.5. Méthodes de conception des mélanges.....	08
1.5.1. Méthode empirique de conception.....	08
1.5.2. Méthode de résistance à la compression.....	13
1.6. Caractérisation du béton à l'état frais	15
1.6.1. Caractéristiques rhéologiques des BAP	15
1.6.2. Essais de caractérisations d'un BAP	17
1.6.2.1. Essai d'étalement (Slump flow)	17
1.6.2.2. Essai boîte en L (L-box test)	17
1.6.2.3. Essai de stabilité.....	19
1.7. Effet des ajouts minéraux sur le comportement des bétons ordinaires et autoplaçants...	20
1.7.1. Propriétés du béton ordinaire et du béton autoplaçant à l'état frais.....	21
1.7.1.1. Cendre volante	21
1.7.1.2. Fillers calcaires	26
1.7.1.3. Fumée de silice	30
1.7.1.4. Laitier.....	33

1.7.1.5. Pouzzolane naturelle.....	33
1.7.2. Propriétés du béton ordinaire et du béton autoplaçant à l'état durci.....	33
1.7.2.1. Cendre volante	33
1.7.2.2. Fillers calcaire.....	34
1.7.2.3. Fumée de silice	35
1.7.2.4. Méta kaolin.....	35
1.7.2.5. Laitier.....	36
1.7.2.6. Pouzzolane naturelle.....	36
1.8 Effet de type de sable	37

CHAPITRE 2

GRANULATS RECYCLES : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

2.1. Introduction	38
2.2. Industrie des granulats	38
2.3. Granulats recyclés dans le génie civil.....	38
2.4. Utilisation des granulats recyclés.....	40
2.5. Propriétés des granulats recyclés.....	41
2.6. Distribution granulaire.....	41
2.6.1. Absorption d'eau	42
2.6.2. Résistance à l'abrasion	43
2.7. Caractéristiques de béton fabriqué par granulats recyclés à l'état frais.....	43
2.8. Caractéristiques de béton fabriqué par granulats recyclés à l'état durci	47
2.8.1. Le retrait.....	53
2.9. Performance du béton autoplaçant à base de granulats recyclés	56

CHAPITRE 3

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET FORMULATIONS ADOPTÉES.

3.1. Généralités.....	58
3.2. Caractéristiques des matériaux	58
3.2.1. Le ciment.....	58
3.2.2. La pouzzolane naturelle.....	59
3.2.3. Granulats (sable et Gravier)	60
3.2.4. Eau de gâchage.....	66
3.2.5. Super plastifiant.....	66
3.3. Formulations adoptées.....	67
3.3.1. Formulation du mortier.....	68
3.3.1.1. Rapport eau/liant (E/L)	69
3.3.1.2. Rapport sable/mortier (S/M)	69
3.3.1.3. Variation du rapport superplastifiant/liant (Sp/L).....	69
3.3.2. Confection des mortiers.....	69
3.3.3. Formulation du BAP de référence	70
3.4. Confection des bétons autoplaçants.....	70

CHAPITRE 4

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

4.1. Introduction.....	71
4.2. Essais relatifs au mortier à l'état frais.....	71
4.2.1. Essai d'étalement au mini-cône.....	71
4.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	72
4.3. Essais relatifs au BAP à l'état frais.....	72
4.3.1. Essai d'étalement (Flow test)	72
4.3.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	74
4.3.3. Essai à la couronne J (J-Ring test)	75
4.3.4. Essai à la boîte en L (L-Box test).....	77
4.3.5. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage	79
4.4. Essais mécaniques des BAP à l'état durci.....	80
4.4.1. Résistance à la compression.....	80
4.4.2. Résistance à la traction par flexion.....	81
4.5. Essais de durabilité.....	82
4.5. 1. Absorption capillaire (la sorptivité).....	82
4.5. 2. La diffusion des ions chlore.....	83
4.5. 3. La résistance aux attaques acides (HCl et H ₂ SO ₄).....	87
4.5.4. La résistance aux attaques sulfatiques externes (Na ₂ SO ₄) et (MgSO ₄).....	90
4.6. Récapitulatif du programme des essais réalisés	91
4.6.1. Essais sur mortier (MAP)	91
4.6.2. Essais sur béton	93
4.7. Conclusion	97

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RESULTATS PROPRIETES RHEOLOGIQUES ET MECANIQUES.

5.1. Introduction	98
5.2. Optimisation du dosage en superplastifiant.....	98
5.3. Performances des BAP à base de granulats recyclés sans ajout à l'état frais.....	102
5.4. Optimisation du dosage en pouzzolane naturelle pour mortiers (MAP SN et MAP SR)	106
5.5. Performances des BAP à base de granulats (naturels / recyclés) et PZ à l'état frais.....	110
5.5.1. Etalement au cône d'Abrams (Slump flow test).....	112
5.5.2. Etalement à la couronne (J-Ring test).....	114
5.5.3. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	116
5.5.4. Essai à la boîte en L (L-Box test).....	116
5.5.5. Essai de résistance à la ségrégation au tamis	119
5.6. Conclusion.....	120
5.7. Effet de la pouzzolane naturelle sur les résistances mécaniques des BAP à l'état durci..	121

5.7.1. Résistance à la compression	122
5.7.2. Résistance à la traction par flexion	126
5.8 Corrélation entre R_{tf} et R_c des différents BAP	130
5.9. Conclusion	132

CHAPITRE 6

DISCUSSION DES RESULTATS : DURABILITE.

6.1. Introduction	133
6.2. Absorption capillaire (la sorptivité).....	133
6.3 Diffusion des ions chlore.....	135
6.3.1. Résultats et discussion d'essai d'immersion totale	136
6.3.2. Coefficient apparent de diffusion	139
6.4. Mécanisme de résistance aux attaques acides (H_2SO_4 et HCl).....	143
6.5 Résistance à l'attaque par H_2SO_4	145
6.5.1 Variation de la masse après attaque de H_2SO_4	145
6.5.2. Analyse DRX.....	147
6.5.3. Examen visuel.....	149
6.6. Résistance aux attaques acides (HCl).....	150
6.6.1. Variation de la masse	150
6.6.2. Analyse DRX.....	152
6.6.3. Examen visuel.....	154
6.7. Résistance aux attaques sulfatiques externes (Na_2SO_4).....	156
6. 7.1. Variation de la masse.....	156
6. 7.2. Analyse DRX.....	158
6. 7.3. Examen visuel.....	160
6. 8. Résistance aux attaques sulfatiques externes ($MgSO_4$).....	161
6. 8.1. Variation de la masse.....	161
6. 8.2. Analyse DRX.....	163
6. 8.3. Examen visuel.....	165
6.9. Conclusion	166
Conclusions générales et recommandation	167
Références bibliographiques.....	169

Annexes

Annexe A : Exemple de Calcul de la Composition du Mortier

Annexe B : Exemple de Calcul de la Composition du Béton

Annexe C : Publication et conférences internationales

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Phénomène de ressuage	05
Figure 1-2 : Phénomène de blocage des granulats aux droits d'un obstacle.	07
Figure 1.3 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré.	08
Figure 1.4 : Procédure de conception de mélange.....	09
Figure 1.5 : Diagramme du processus de conception du mélange de l'approche.....	11
Figure 1.6 : Procédure de la méthode de mélange.....	12
Figure 1.7 : Procédure de conception de mélange de la méthode	13
Figure 1.8 : Aperçu de la méthode de conception du mélange pour le BAP contenant du GGBS.....	15
Figure 1.9 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	16
Figure 1.10 : Essai en U.....	18
Figure 1.11 : essai de caisson.	19
Figure 1.12 : Essai de ressuage à l'aéromètre.....	20
Figure 1.13 : L'influence des cendres sur l'absorption avec 0.7% adjuvant.....	21
Figure 1.14: L'influence des cendres volantes sur la résistance (avec 0.7% d'adjuvant)	22
Figure 1.15 : Variation de retrait en fonction de la quantité des cendres Après 56 j de cure...	23
Figure 1.16 : Influence des ajouts minéraux sur les temps de prise du ciment.....	24
Figure 1.17 : Les valeurs de mini-étalement des mortiers.....	28
Figure 1.18 : Dosage en superplastifiant requis du BAP pour réaliser la marge d'étalement.	29
Figure 1.19 : Valeurs d'étalement dans les études élaborées.....	31
Figure 1.20 : Distribution de la résistance à la compression à 28 jours.....	32
Figure 1.21 : Distribution des contenus d'ajouts.....	32
Figure 1.22 : Chaleur d'hydratations du béton dans des éprouvettes Cylindriques.....	34
Figure 1.23 : Relation entre la quantité de fumée de silice et du cendre volante et la résistance à la compression pour les séries HS.....	35

Chapitre 2

Figure 2.1. Traitement des déchets.....	40
Figure 2.2. Les formes de granulats recyclés.....	41
Figure 2.3. Rapport entre l'absorption et la période d'immersion dans l'eau des granulats recyclés et naturels.....	42
Figure 2.4. Effet de granulats recyclés sur l'affaissement de béton.....	44
Figure 2.5. Effet des RCA sur le diamètre d'étalement au cône d'Abrams.	45
Figure 2.6. Effet des RCA sur le diamètre d'étalement à la couronne J-Ring.....	46
Figure 2.7. Relation entre G/C et la classe de béton pour un béton recyclé.	48
Figure 2.8. Relation entre la demande en ciment et la classe du béton.	48
Figure 2.9. Développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge.	49
Figure 2.10. Variation de la résistance à la compression variation avec le taux de substitution du sable.....	51
Figure 2.11. Développement de la résistance à la compression.....	51
Figure 2.12. Effet du sable recyclé CC et du sable de brique CB sur la résistance à la compression.....	52
Figure 2.13 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,53.....	54
Figure 2.14 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,44.....	54
Figure 2.15 : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport E/L ,.....	55
Figure 2.16 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires.....	55

Chapitre 3

Figure 3.1 : Photo MEB du ciment.....	59
Figure 3.2 : Spectre DRX du ciment.....	59
Figure 3.3 : Scories de la PN avant broyage.....	60
Figure 3.4 : Poudre de la PN après broyage.....	60
Figure 3.5: Photo MEB de la pouzzolane naturelle.....	61
Figure 3.6 : Procédure de fabrication de sable et granulats recyclés.....	61
Figure 3.7 : Courbes granulométriques des sables naturels et des graviers naturels.....	62
Figure 3.8: Courbes granulométriques des sables recyclés et des graviers recyclés.....	63

Figure 3.9 : Comparaison entre la Mv absolue des granulats naturels et recyclés.....	64
Figure 3.10 : Comparaison entre la Mv apparente des granulats naturels et recyclés.....	64
Figure 3.11 : Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau (Ab) des granulats recyclés et naturels.....	65
Figure.312. Apparences visuelles des granulats de béton recyclé et des granulats naturels....	66

Chapitre 4

Figure 4.1 : Essai d'étalement pour mortier (MAP).....	71
Figure 4.2 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier (MAP).....	72
Figure 4.3 : Mesure du diamètre d'étalement.....	73
Figure 4.4 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).....	75
Figure 4.5 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de la différence de hauteurs.....	76
Figure 4.6 : Mesure d'étalement en présence du J-Ring.....	76
Figure 4.7 : Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.....	77
Figure 4.8 : Dispositif de l'essai L-Box.....	78
Figure 4.9 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.....	79
Figure 4.10 : Dispositif pour l'essai de compression.....	80
Figure 4.11 : Schéma de l'essai de traction par flexion à trois points.....	81
Figure 4.17 : Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité.....	82
Figure 4.18 : Recouvrement des échantillons par la résine époxy.....	83
Figure 4.19 : Immersion totale des échantillons dans une solution de 3% NaCl.....	84
Figure 4.20 : Séchage de 24h des échantillons après 28,56,90 et 120 jours d'immersion (totale).....	84
Figure 4.21 : Coupe de l'éprouvette en deux après 28,56,90 et 120 jours d'immersion (totale).....	85
Figure 4.22 : Coupes schématiques de l'échantillon pour mesurer de la profondeur de pénétration d'ion chlore.....	85
Figure 4.23 : Mesure de la profondeur de pénétration d'ion chlore.....	86
Figure 4.24 : Méthode de calcul du coefficient apparent de la diffusion des ions chlore.....	87
Figure 4.25: Les échantillons du béton immergés dans les solutions acides HCl et H ₂ SO ₄	88
Figure 4.26 : Diagramme des essais réalisés sur mortier (MAP).....	92
Figure 4.27 : Diagramme des essais réalisés sur le BAP N à l'état frais.	93
Figure 4.28 : Diagramme des essais réalisés sur le BAP R à l'état frais.....	94
Figure 4.29 : Diagramme des essais réalisés sur les BAP à l'état durci.....	95
Figure 4.30 : Diagramme des essais réalisés sur la durabilité des BAP à l'état durci.....	96

Chapitre 5

Figure 5.1 : Etalement au mini cône des mortiers en fonction du dosage en Sp.....	100
Figure 5.2 : Etalement au mini cône du mortier SN (en dessus) et mortier SR (en dessous) à un dosage de 1% de Sp.....	101
Figure 5.3 : Temps d'écoulement au V-funnel des mortiers en fonction de dosage en Sp.....	102
Figure 5.4 : Etalement au cône d'Abrams des déferents BAP.....	104
Figure 5.5 : Etalement à la couronne (J-Ring test) des déferents BAP.....	105
Figure 5.6 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des déferents BAP.....	105
Figure 5.7 : Etalement au couronne (J-Ring test) du BAP (50%R/50%N) (à gauche) et BAP (75%R/25%N) (à droite).....	106
Figure 5.8 : Etalement au cône d'Abrams du BAP (50%R/50%N) (à gauche) et BAP (75%R/25%N) (à droite).	106
Figure 5.9 : Etalement au mini cône du MAPN et MAPR en fonction du dosage en pouzzolane naturelle.....	109
Figure 5.10 : Temps d'écoulement en entonnoir V du MAPN et MAPR en fonction du dosage en pouzzolane naturelle.....	109
Figure 5.11 : Etalement au cône d'Abrams des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	112
Figure 5.12 : Temps d'écoulement T50 des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	113
Figure 5.13 : Etalement au cône d'Abrams (J-Ring) des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	114
Figure 5.14 : Temps d'écoulement T50J des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	115
Figure 5.15: Différence de hauteurs Bj au J-Ring des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	115
Figure 5.16 : Temps d'écoulement en entonnoir V des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	116
Figure 5.17 : Rapport H2/H1 de l'essai à la boîte en L des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	118
Figure 5.18 : Le temps d'écoulement T20 des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	118
Figure 5.19 : Le temps d'écoulement T40 des différents BAP en fonction du dosage en	

pouzzolane naturelle (%).	119
Figure 5.20 : Résultats de la résistance à la ségrégation au tamis des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).	120
Figure 5.21: Variation de la résistance à la compression du (BAP N).	123
Figure 5.22 : Variation de la résistance à la compression du (BAP R).	123
Figure 5.23 : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps du BAPN.	125
Figure 5.24 : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps du BAPR.	125
Figure 5.25 : Variation de la résistance à la traction par flexion du (BAP N).	127
Figure 5.26 : Variation de la résistance à la traction par flexion du (BAP R).	127
Figure 5.27 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du (BAP N) en fonction du temps avec et sans pouzzolane naturelle.	129
Figure 5.28 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du (BAP R) en fonction du temps avec et sans pouzzolane naturelle.	129
Figure 5.29 : Corrélation entre la résistance à la traction par flexion R_{tf} et la résistance à la compression R_c des différents BAP.	131

Chapitre 6

Figure 6.1 : Coefficients de sorptivité des deux BAP à 28 jours.	134
Figure 6.2 : Coefficients de sorptivité des deux BAP à 90 jours.	134
Figure 6.3: Relation entre la profondeur de pénétration des ions Cl^- et le taux de substitution en PZ.	137
Figure 6.4: Relation entre la profondeur de pénétration et le temps d'immersion des (BAPN).	138
Figure 6.5: Relation entre la profondeur de pénétration et le temps d'immersion des (BAP R).	138
Figure 6.6 (a,b,c,d) : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.	139
Figure 6.7 (e, f, g,h,i) : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.	140
Figure 6.8 : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.	142
Figure 6.9: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% H_2SO_4 .	146
Figure 6.10: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la	

solution 5% H_2SO_4	146
Figure 6.11: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque 5% H_2SO_4	148
Figure 6.12: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque 5% H_2SO_4	148
Figure 6.13: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% H_2SO_4	149
Figure 6.14: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% H_2SO_4	149
Figure 6.15: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 3% HCl	151
Figure 6.16: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 3% HCl	151
Figure 6.17: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 3% HCl	153
Figure 6.18: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 3% HCl	153
Figure 6.19: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 3% HCl	154
Figure 6.20: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 3% HCl	154
Figure 6.21: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 3% HCl et 5% H_2SO_4	155
Figure 6.22: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 3% HCl et 5% H_2SO_4	155
Figure 6.23: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% Na_2SO_4	157
Figure 6.24: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% Na_2SO_4	157
Figure 6.25: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 5% Na_2SO_4	159
Figure 6.26: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 5% Na_2SO_4	159
Figure 6.27: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% Na_2SO_4	160
Figure 6.28: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% Na_2SO_4	160
Figure 6.29: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% MgSO_4	162
Figure 6.30: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% MgSO_4	162
Figure 6.31: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 5% MgSO_4	164
Figure 6.32: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 5% MgSO_4	164
Figure 6.33: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% MgSO_4	165
Figure 6.34: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% MgSO_4	165

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Résistance à la compression du BAP par rapport à E / C.	14
Tableau 1.2 : Ressuage, temps de prise, et chaleur d'hydratation du béton.....	26
Tableau 1.3 : Caractéristiques des fillers calcaires et de craies utilisées dans l'étude.....	27
Tableau 1.4 : Propriétés des mélanges à l'état frais.....	30

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Statistiques de l'UEPG sur la production des granulats recyclés.	39
---	----

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment.....	58
Tableau 3.2 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.....	60
Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés.....	62
Tableau 3.4 : Caractéristiques du super plastifiant.....	67

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation.....	74
--	----

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Composition de mortier de référence à base de sable naturel.....	98
Tableau 5.2 : Composition de mortier de référence à base de sable recyclé.....	99
Tableau 5.3 : Propriétés de mortier de référence à base de sable naturel à l'état frais.....	99
Tableau 5.4 : Propriétés de mortier de référence à base de sable recyclé à l'état frais.....	99
Tableau 5.5 : Composition des BAP sans ajouts en kg/m^3	103
Tableau 5.6 : Propriétés des BAP sans ajouts.....	104
Tableau 5.7 : Composition de mortier à base de sable naturel avec l'ajout PZ en kg/m^3	107
Tableau 5.8 : Composition de mortier à base de sable recyclé avec l'ajout de PZ en kg/m^3	107
Tableau 5.9 : Propriétés de mortier à base de sable naturel avec l'ajout PZ à l'état frais.....	108
Tableau 5.10 : Propriétés de mortier à base de sable recyclé avec l'ajout de PZ à l'état frais..	108
Tableau 5.11: Composition des différents types du BAP sans et avec PZ en kg/m^3	110
Tableau 5.12 : Propriétés des différents types du BAP sans et avec PZ.....	111
Tableau 5.13 : Résistances mécaniques des différents types du BAP sans et avec PZ.....	121

LISTE DES ABREVIATIONS

A	Quantité d'air, (m ³)
A _{b G}	Coefficient d'absorption du gravier
A _{bs}	Coefficient d'absorption du sable
BAP	Béton autoplaçant
MAP	Mortier autoplaçant
BAPN	Béton autoplaçant à base de granulats naturels.
BAPR	Béton autoplaçant à base de 50% GN et 50% GR
BHP	Béton de Haute Performance
B _J	Différence d'Hauteurs de béton au J-Ring
BO	Béton ordinaire
BV	Béton Vibré
C	Ciment
C ₃ A	Aluminate tricalcique.
Ca(OH) ₂	Hydroxyde de calcium ou portlandite.
CaCO ₃	Carbonate de Calcium ou Calcaire.
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
D _{max}	Diamètre maximal des Granulats
Da	Coefficient apparente de diffusion
E/C	Eau/Ciment
E/F	Eau/Fines
E/L	Eau/Liant
G	Gravier
G/S	Rapport Gravier/Sable
G _{lim}	Volume absolu 1 m ³ de gros granulats
GN	Granulats naturels
GR	Granulats recyclés
H ₂ SO ₄	Acide Sulfurique
H _{avg}	Hauteur moyenne
HCl	Acide chlorhydrique
L	Laitier de haut fourneau
MgSO ₄	Sulfates de magnésium
R _c	Résistance à la compression
R _{tf}	Résistance à la traction par flexion
DRX	Diffractomètre au rayon X
MPa	Méga pascal.
Na ₂ SO ₄	Sulfates de sodium
P	Poudre (Ciment + ajout).
PC	Polycarboxylate

PNS	Poly naphthalène sulfonâtes
POE	Polyoxyéthylène
PZ	Pouzzolane naturelle
R _m	Vitesse relative
R _b	Risque de blocage
S	Affaissement final
S/M	Sable/Mortier
SCC	Self-Compacting Concrete
Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
Sp/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T	Temps d'affaissement, (sec)
T ₁₀₀	Temps d'affaissement partiel au cône d'Abrams modifié, (sec).
T ₂₀	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).
T ₄₀	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).
T ₅₀	Temps d'écoulement pour que l'étalement atteigne un diamètre de 50 cm, (sec).
T _{VF}	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec).
V _i	Proportion volumique des granulats de taille i
V _p	Volume de pâte, (m ³).
V _{vides}	Volume des vides, (m ³).
V _w	Volume d'eau, (m ³).

LISTE DES SYMBOLES

<i>II</i>	Pourcentage de laitance
ρ _C	Masse volumique du ciment
ρ _E	Masse volumique d'eau
ρ _G	Masse apparente du gravier
ρ _S	Masse volumique du sable
ρ _{Sp}	Masse volumique du super plastifiant
σ _f	Résistance à la traction par flexion
σ _t	Résistance à la traction par flexion
τ	Contrainte de cisaillement, (Pa)
τ ₀	Seuil de cisaillement, (Pa).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des déchets de démolition comme granulats dans le béton a un grand intérêt pour la protection de l'environnement. Car d'une part, cela permet la récupération des matériaux de démolition du vieux bâti ou due aux catastrophes naturelles et d'autre part, de protéger la nature et les réserves de granulats naturels. Ceci contribue aussi à la conservation des ressources naturelles, à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.

En Algérie, l'industrie du recyclage dans le secteur de la construction est très limitée malgré la grande quantité d'immeubles démolis après les séismes survenus dans différentes régions. L'absence de normes et de guides pour l'utilisation de granulats recyclés et de politique d'encouragement limite l'industrie du recyclage des déchets de démolition.

Plusieurs études ont été réalisées en Algérie et dans le monde sur la performance du béton ordinaire à base de granulats recyclés. Cependant peu de travaux ont été effectués sur l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons autoplaçants (BAP).

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par leurs compositions qui comprennent plus de pâte cimentaire, d'additions minérales et des adjuvants superplastifiants pour avoir une ouvrabilité plus élevée permettant la mise en place sans recours à la vibration. L'utilisation de granulats recyclés engendre des difficultés en raison de leur absorption d'eau très élevée et de la présence de pâtes de ciment sur leurs surfaces. L'utilisation simultanée de granulats recyclés et d'additions minérales comme la pouzzolane naturelle ou laitier réduit l'impact environnemental du béton.

L'objectif de notre travail est d'étudier la possibilité de la valorisation des déchets de démolition du vieux bâti ou suite à des catastrophes naturelles et de la pouzzolane naturelle dans la fabrication d'un béton autoplaçant.

La performance de ces BAP est évaluée par des essais rhéologiques, mécaniques et de durabilité.

Ce travail est composé de six chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les caractéristiques du béton autoplaçant tandis que le deuxième chapitre donne une synthèse bibliographique sur les granulats recyclés et sur le béton autoplaçant à base de granulats recyclés.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et à la présentation des formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude.

Le quatrième chapitre résume les différents essais à l'état frais (essais rhéologiques), les essais mécaniques (compression et traction) des BAP à l'état durci et les essais de durabilité.

Le cinquième chapitre analyse et discute les résultats des différents essais d'ouvrabilité, de rhéologie des BAP à l'état frais et des résistances à la compression et à la traction par flexion des BAP à l'état durci.

Le sixième chapitre analyse et discute les résultats des essais de durabilité aux attaques de sulfates, d'acides et de résistance à la pénétration des ions chlore.

Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que des recommandations et des perspectives clôturent cette thèse.

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTOPLAÇANT

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTOPLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre la définition, la formulation et la performance d'un béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci sont présentés.

1.2. Définition d'un béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants sont découverts depuis les années 1980 au Japon. Ces bétons se caractérisent par, une grande fluidité, une homogénéité et une mise en place correcte par gravitation et sans vibration (Okamura et Ouchi, 2003).

Ces bétons se développent maintenant dans le monde et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du béton d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part (Okamura et Ouchi, 1999). Cependant, ces avantages s'accompagnent de certains inconvénients comme l'augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants) et les modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

1.3. Modes de formulation des BAP

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Il existe plusieurs approches de formulation qui ont été élaborées à travers le monde pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Deux grandes familles prévalent actuellement (Assié, 2004) :

- La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante ($450 \text{ à } 600 \text{ kg/m}^3$) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du

mortier (Hayakawa et al., 1995) et (Nagataki et Fujiwara, 1995). Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les super plastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreuses et mal adapté à des ouvrages courants.

- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales (Petersson et al., 1996). Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir une squelette granulaire plus compacte et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

1.4. Particularités de la composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différées d'une approche à l'autre.

1.4.1. Volume de pâte

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement, son volume est donc élevé (330 à 400 l/m³) (Turcry, 2004).

1.4.2. Quantité de fines

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation figure 1.1. Toutefois, le liant est

fréquemment un mélange de deux pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (Assié, 2004).

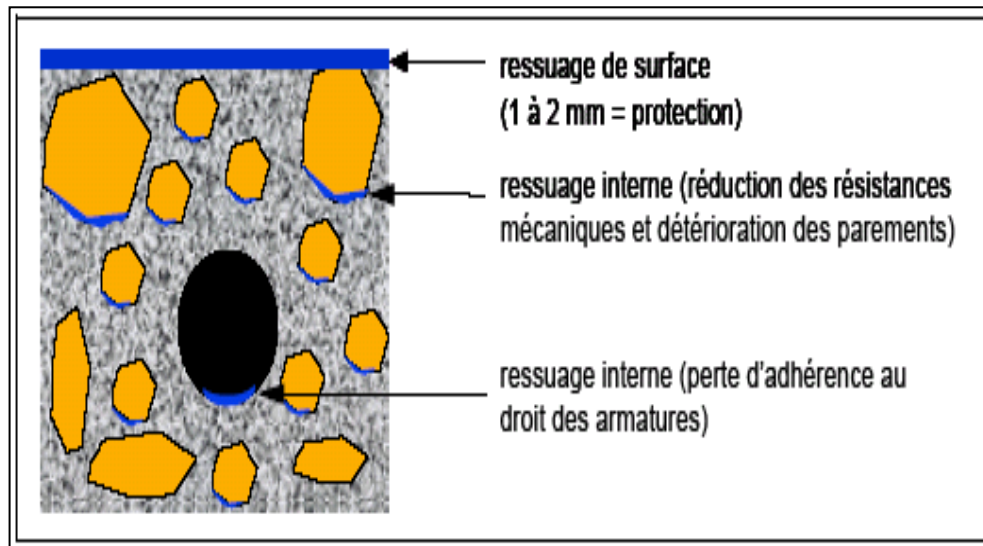


Figure 1.1 : Phénomène de ressuage. (Assié, 2004).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.). Le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de (BAP) et leur proportion respective. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence sur les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton.

1.4.3. Emploi du superplastifiant

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/ polyacrylate ester acrylique. Cette quantité d'adjuvant ne doit pas être trop élevée (proche de dosage de saturation) de peur d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'absorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau.

1.4.4 Agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un super plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité. Afin de minimiser ce problème, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0.3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas. Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air et à une diminution de la fluidité (Sedran, 1995).

1.4.5 Volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée figure 1.2. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

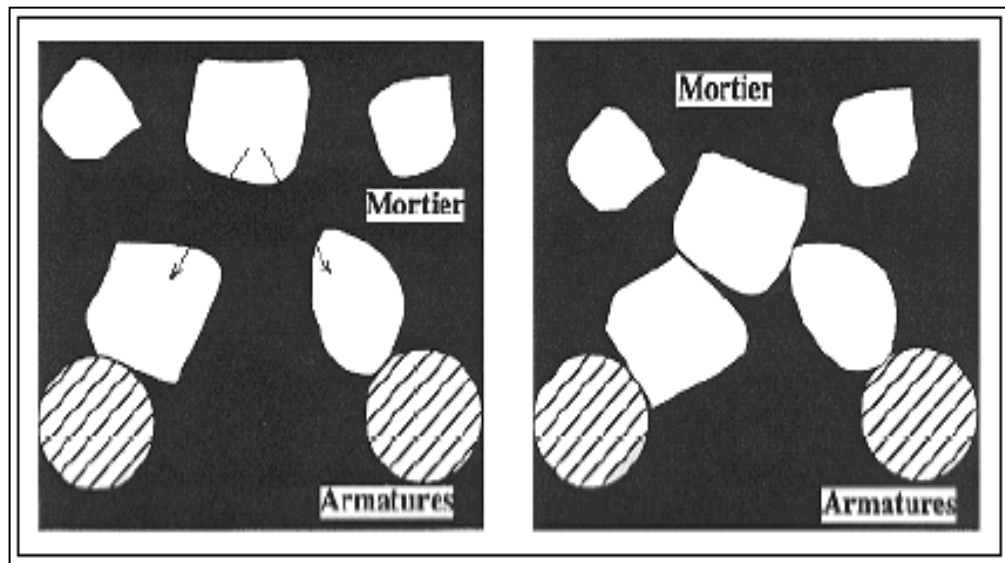


Figure 1-2 : Phénomène de blocage des granulats aux droits d'un obstacle. (Assié, 2004).

Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{max} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes figure 1.3. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super plastifiants) sont nécessaires.

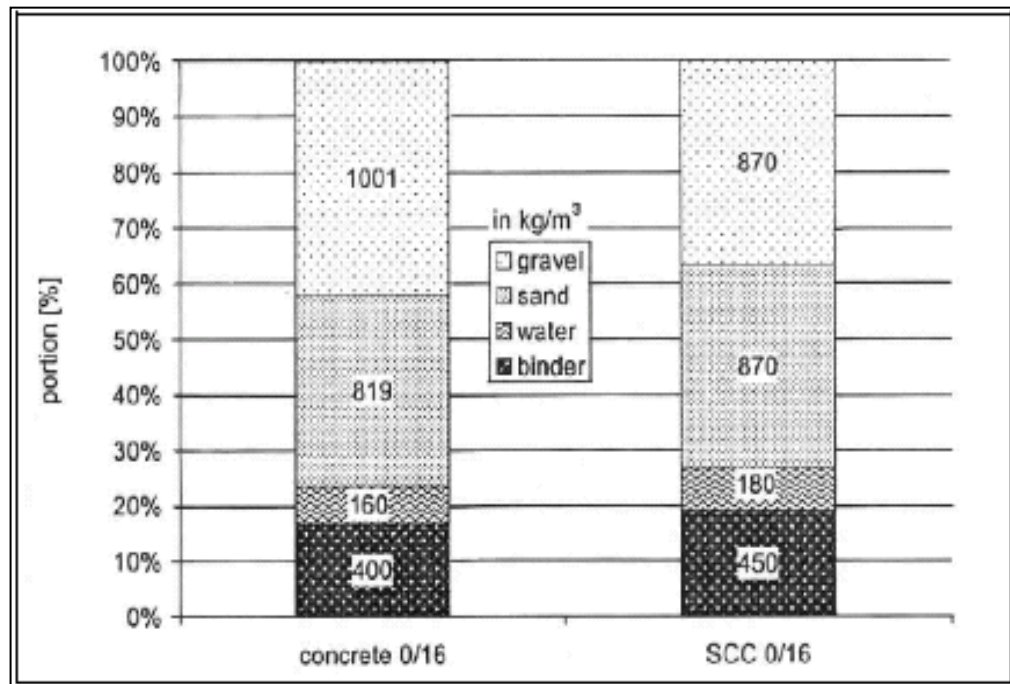


Figure 1.3 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré. (Jacobs et al., 1999).

1.5. Méthodes de conception des mélanges

Les méthodes de conception des mélanges existants pour le BAP dans les littératures sont nombreuses. Selon les principes de conception, ces méthodes peuvent être classées en cinq catégories : méthode de conception empirique, méthode de compression, méthode d'emballage agrégée étroite, méthodes basées sur un modèle factoriel statistique Et la rhéologie du modèle de pâte. Les sections suivantes traitent de ces méthodes en détail.

1.5.1. Méthode empirique de conception

La méthode de conception empirique est basée sur des données empiriques portant sur les granulats grossiers et fins, l'eau, le dosage en matériaux cimentaires et le dosage en superplastifiant pour déterminer les proportions initiales du mélange. Les meilleures estimations des proportions du mélange pour les propriétés requises sont effectuées à l'aide de plusieurs mélanges d'essai et d'ajustement.

(Edamatsu et al., 2003), (Edamatsu et al., 1999) ont amélioré la méthode en fixant le rapport global de l'agrégat, le rapport volumétrique eau-poudre et le dosage super plastifiant.

La figure 1.4 montre la procédure de conception du mélange. Comparée à l'approche d'Okamura, cette méthode peut s'appliquer aux matériaux en poudre et aux agrégats de différentes qualités. Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour caractériser les propriétés des matières premières, y compris la compactibilité entre les matériaux en poudre et les super plastifiants.

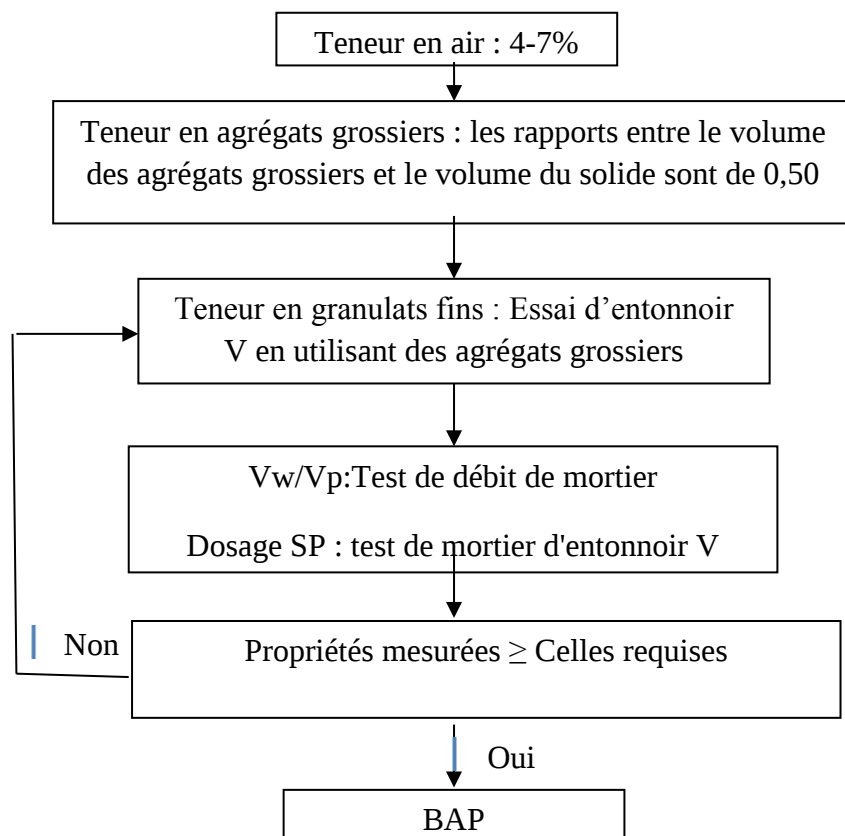


Figure 1.4 : Procédure de conception de mélange proposée par (Edamatsu et al., 2003).

(Okamura et Ozawa, 1995 ; (Okamura, 1997) ont proposé une méthode de conception de mélange pour le BAP fondée sur les expériences. La procédure de conception comprenait les aspects suivants : (1) la teneur en agrégats grossiers dans le béton a été fixée à 50% du volume solide ; (2) la teneur en granulats fine a été fixée à 40% du volume de mortier ; (3) le rapport eau / poudre a été supposé entre 0,9 et 1,0 en volume, en fonction des propriétés de la poudre ; (4) le dosage de super plastifiant et le rapport final eau-poudre ont été déterminés de façon à assurer l'auto compactibilité. Cette approche est très facile à suivre, mais il n'y avait pas de paramètres décrivant les propriétés de l'agrégat. Afin d'obtenir une

plus grande ouvrabilité et une viscosité modérée, une dose plus élevée de super plastifiant doit être utilisée, ce qui pourrait entraîner un retard du béton et augmente également le coût du BAP. Bien que cette méthode repose sur des expériences, il s'agit d'une approche simple pour la conception du BAP.

(Khaleel et Abdul., 2014) ont proposé une méthode de conception, similaire à celle d'Edamatsa, pour le BAP à base de méta kaolin auto compactant avec des agrégats grossiers de propriétés différentes. La procédure de conception du mélange est représentée sur la figure 1.5. Des expériences ont été menées sur la pâte, le mortier et le béton pour faciliter le processus de conception du mélange.

(Domone, 2009) a également proposé une méthode basée sur l'expérience et la compréhension du comportement du BAP. La méthode estime les proportions du mélange pour un ensemble donné de propriétés requises, puis le mélange est ajusté par des essais. La fraction de mortier du béton a été testée à l'aide de tests d'étalement et d'entonnoir en V pour déterminer le rapport eau-poudre et le dosage superplastifiant. La figure 1.6 montre la procédure de cet essai. Dans cette méthode, seuls des essais standard pour le béton frais sont nécessaires et d'autres essais compliqués tels que le comportement rhéologique du mortier ou du béton sont évités.

Un avantage significatif pour la méthode de conception empirique est sa simplicité. Cependant, des tests de laboratoire intensifs sont nécessaires pour obtenir un comportement compatible des constituants disponibles et des proportions de mélange satisfaisantes. En outre, les changements dans les matières premières devront faire l'objet d'un réexamen et d'ajustements intensifs.

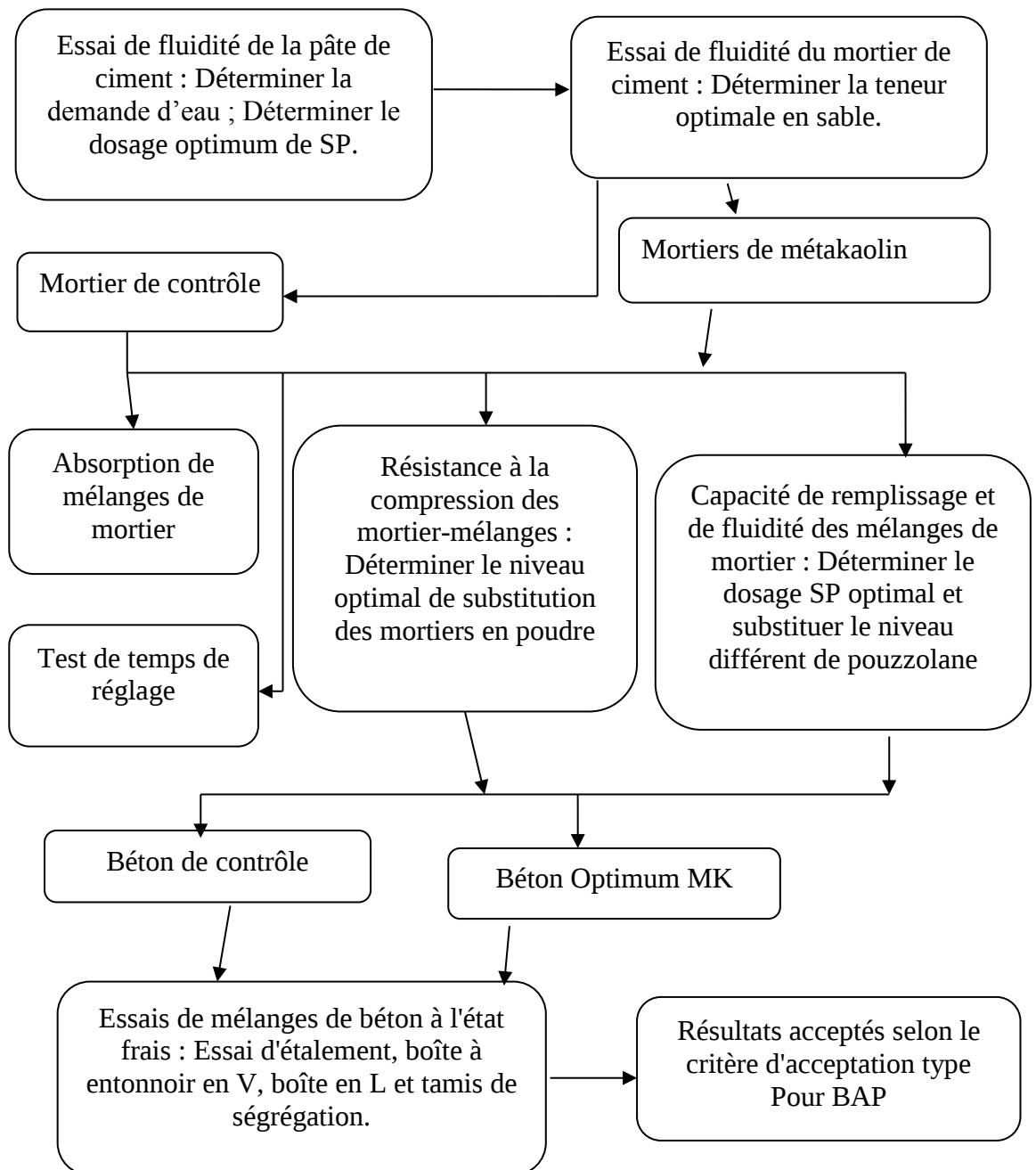


Figure 1.5 : Diagramme du processus de conception du mélange de l'approche proposée par (Khaleel et Abdul, 2014).

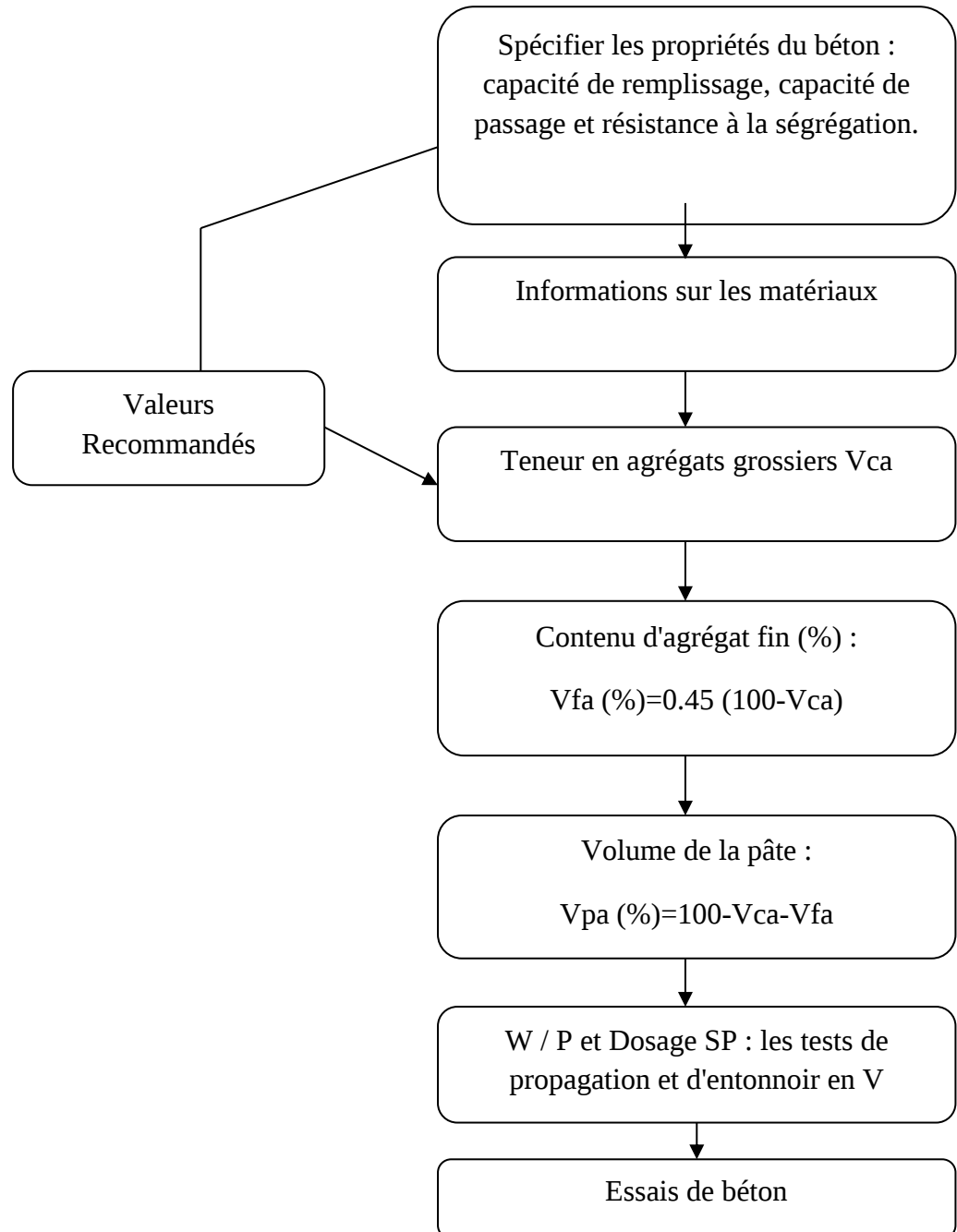


Figure 1.6 : Procédure de la méthode de mélange. (Domone, 2009).

1.5.2. Méthode de résistance à la compression

Ce type de procédé détermine le ciment, les adjuvants minéraux, l'eau et les teneurs en agrégats en fonction de la résistance à la compression requise. (Ghazi et Jadiri, 2010) ont proposé une méthode simple pour la conception des mélanges du BAP basée sur la méthode (ACI 211.1-91,1991) pour le béton vibré et la méthode (EFNARC, 2002) pour le dosage du BAP. Dans cette méthode, la teneur en agrégats grossiers dépendait de la taille maximale d'agrégat (MAS) et du module de finesse de l'agrégat fin. La teneur en eau a été déterminée sur la base de la taille maximale de l'agrégat et de la résistance du béton. Les rapports E/C et eau-poudre ont été déterminés par la résistance à la compression du béton figure 1.7.

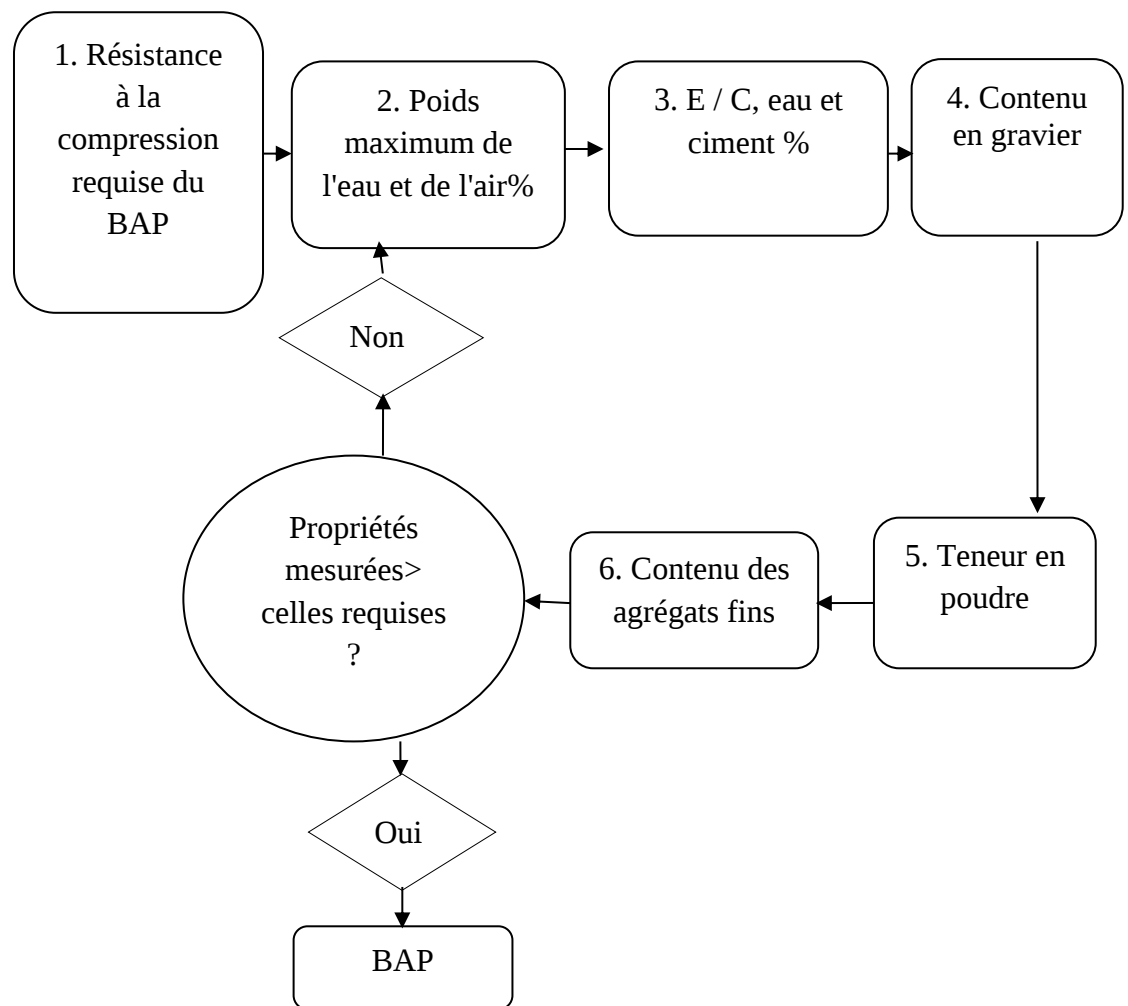


Figure 1.7 : Procédure de conception de mélange de la méthode proposée par (Ghazi et Jadiri, 2010).

La méthode originale (ACI 211.1-91, 1991) couvre la conception d'une résistance à la compression de 15 à 40 MPa. Cependant, cette méthode a étendu la plage de résistance à la compression de 15 à 75 MPa pour le BAP, avec un maximum de E / C comme indiqué dans le tableau 1.1. Cette méthode doit également utiliser certains tableaux pertinents dans la référence (Ghazi et Jadiri, 2010).

Tableau 1.1 : Résistance à la compression du BAP par rapport à E / C

(Ghazi et Jadiri, 2010)

F _c (MPa)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
E/c	0.8	0.7	0.62	0.55	0.48	0.43	0.38	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31	0.29

(Dinakar et al., 2013) ont proposé une méthode pour le BAP contenant des scories granulées de haut fourneau (GGBS) en utilisant le facteur d'efficacité. La méthode consistait en cinq étapes, comme le montre la figure 1.8.

La teneur en poudre totale a été fixée dans la première étape, le pourcentage de scories a été fixé sur la base de la résistance requise. Le facteur d'efficacité (k) a été déterminé pour le même pourcentage avec l'équation proposée dans la deuxième étape. Dans la troisième étape, la teneur en eau requise pour les BAP est déterminé. En suite les quantités de granulats grossiers et fines sont déterminés. Finalement, l'auto-compactibilité du béton frais est évaluée à travers la mesure de l'étalement et l'essai V-funnel et la capacité de passage à travers le L-box.

En utilisant la méthode proposée et les valeurs d'efficacité établies pour le GGBS, ils ont pu mettre au point des BAP de 30 à 100 MPa avec 20 à 80% de laitier.

La méthode de résistance à la compression présente une procédure claire et précise pour obtenir des quantités spécifiques d'ingrédients et minimise le besoin à des essais préliminaires. De plus, la méthode proposée tient compte de la courbe granulométrique des agrégats fins et grossiers ou de la contribution des matériaux pouzzolaniques aux propriétés du béton. Cependant, une de ses inconvénients est qu'elle nécessite des ajustements de tous

les ingrédients comme le sable, agrégats grossiers, superplastifiants et de l'eau, pour atteindre une proportion de mélange optimal.

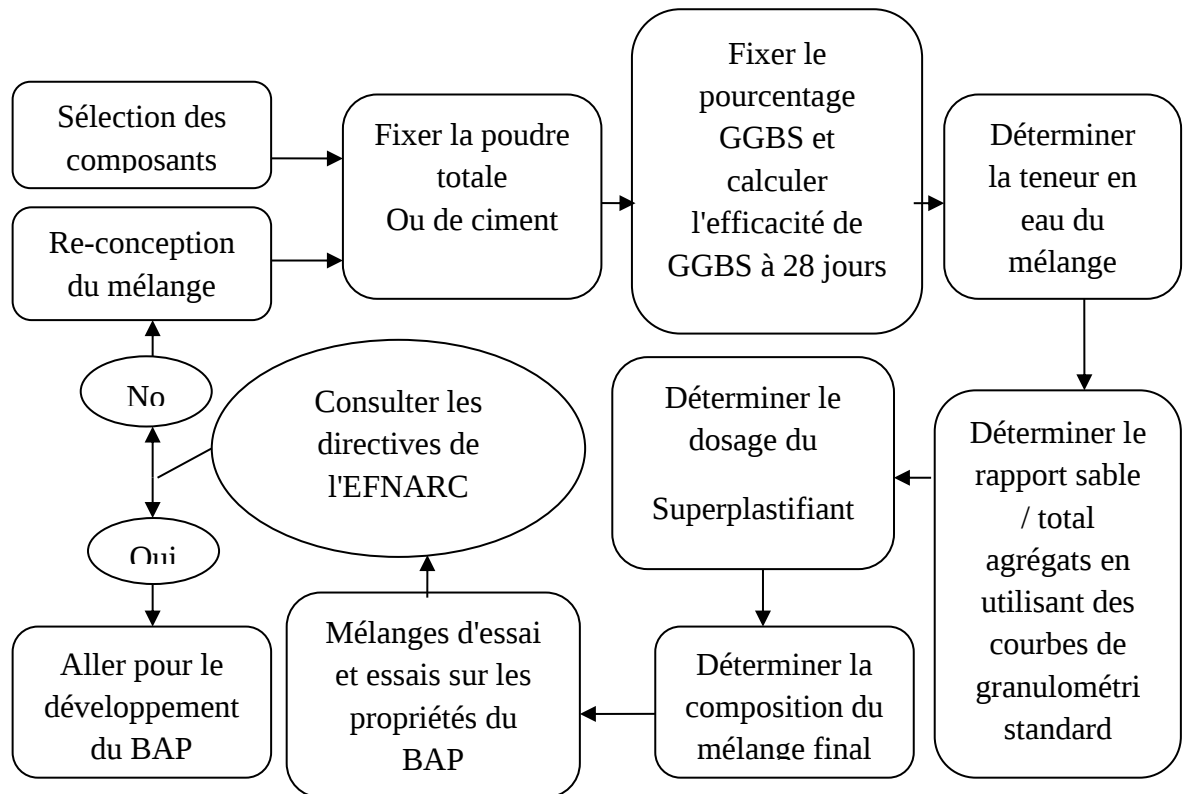


Figure 1.8 : Aperçu de la méthode de conception du mélange pour le BAP contenant du GGBS. (Dinakar et al., 2013).

1.6. Caractérisation du béton à l'état frais

1.6.1. Caractéristiques rhéologiques des BAP

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. Le comportement rhéologique d'un matériau figure 1.9 est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 . Le fluide est considéré comme binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma^b \quad (1.1)$$

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique (Pa.s^{-1}) et γ la vitesse de déformation (s^{-1}).

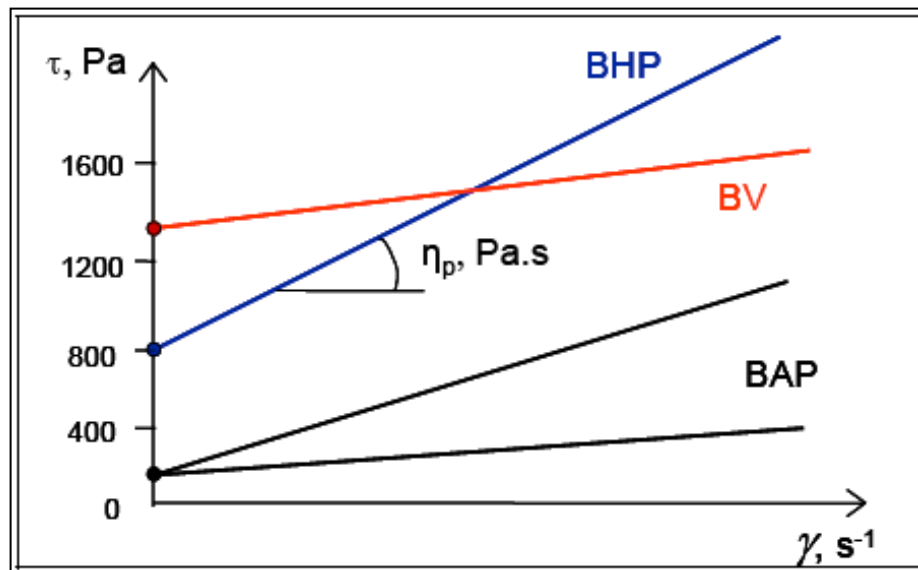


Figure 1.9 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton. (Assié, 2004).

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, certains auteurs ont montrés que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \quad (1.2)$$

Où a et b sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

1.6.2. Essais de caractérisations d'un BAP

Les bétons autoplaçants sont caractérisés à l'état frais par trois essais essentielles (selon les recommandations de (AFGC,2000)) :

- Essai d'étalement
- Essai de boîte en L
- Essai de stabilité au tamis.

1.6.2.1. Essai d'étalement (Slump flow)

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement (Slump flow) à l'aide du cône d'Abrams. En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement. Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai (AFGC, 2000). La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (T_{50} par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm).

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) (Okamura et Ouchi, 2003).

1.6.2.2. Essai boîte en L (L-box test)

Cet essai a pour but de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. Cette caractérisation est traduite par la capacité de ce béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\phi 14$) qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) (AFGC, 2000).

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs $H2/H1$, doit être supérieur à 0,8 (AFGC, 2000). Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. Il existe d'autres essais qui

permettent de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP figures 1.10 et 1.11 :

- L'essai de tube en U.
- L'essai de caisson.
- Essai de la passoire.

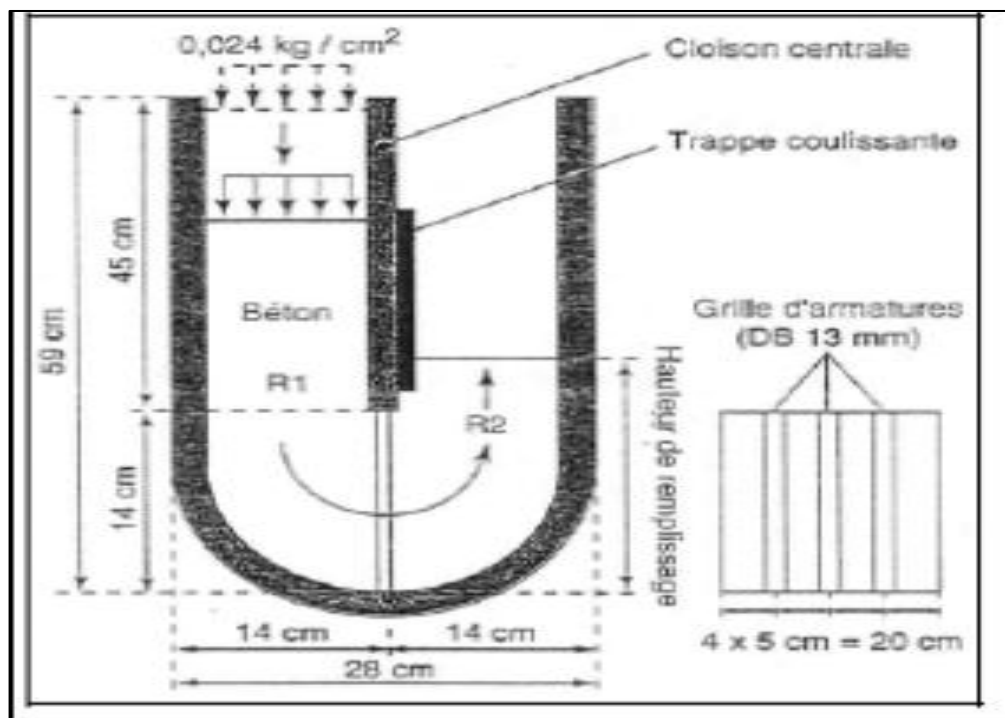


Figure 1.10 : Essai en U.

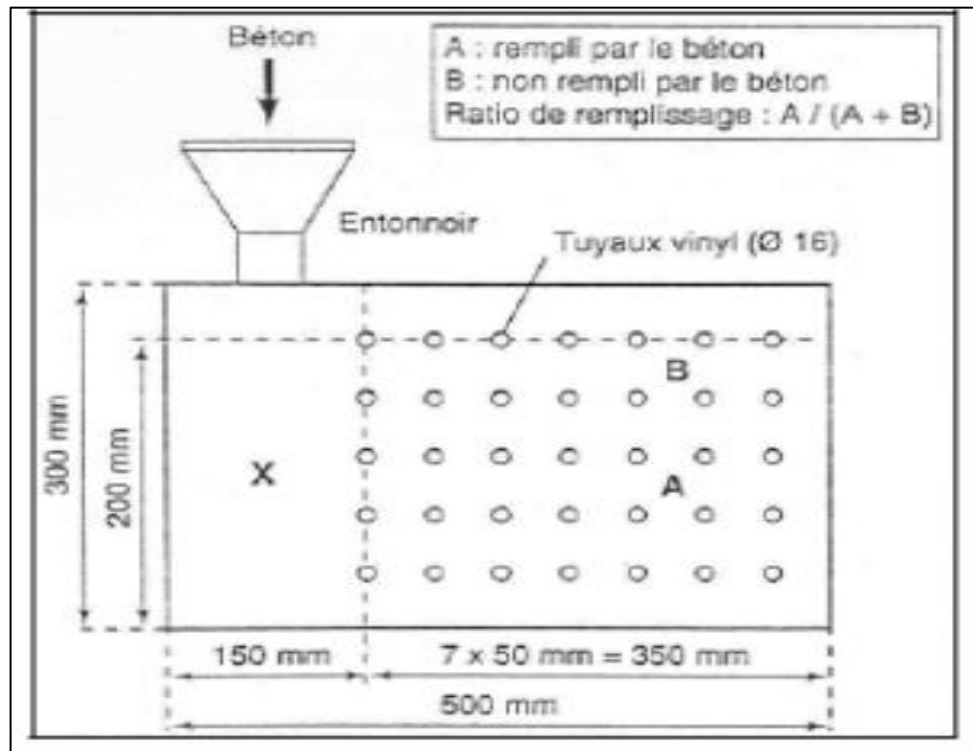


Figure 1.11 : essai de caisson.

1.6.2.3. Essai de stabilité

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé ; est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée.

a. Résistance à la ségrégation

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

Un de ces essais est celui dit de « stabilité au tamis », développé par GTM (AFGC, 2000), qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté P_{LAITANCE} par la suite) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
 - $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
 - $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).
- b. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure 1.12 : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer (AFGC, 2000). Ce test semble cependant peu pratique à être utilisé étant donné la nocivité du produit employé.

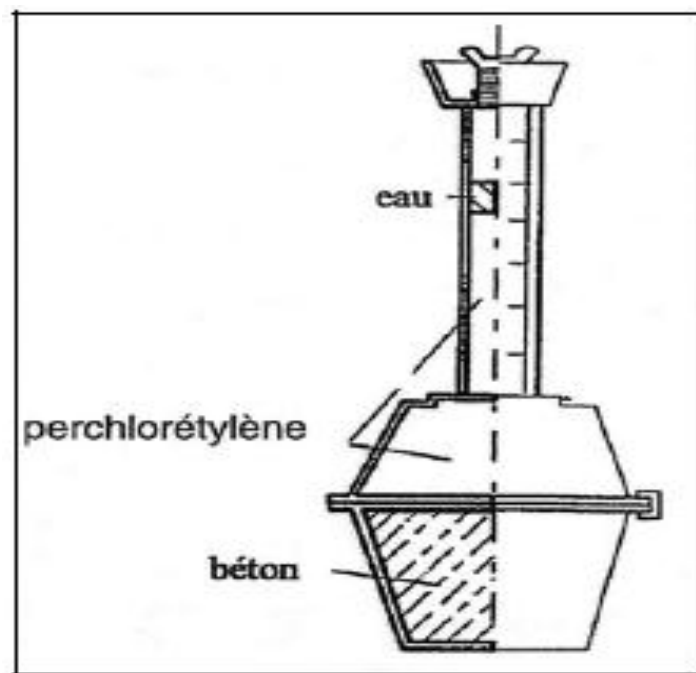


Figure 1.12 : Essai de ressuage à l'aéromètre. (AFGC, 2000).

1.7. Effet des ajouts minéraux sur le comportement des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants.

Dans ce qui suit nous avons présenté quelques études trouvées dans les littératures en ce

concerne l'utilisation des ajouts minéraux et leurs influences sur le comportement des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants.

1.7.1. Propriétés du béton ordinaire et du béton autoplaçant à l'état frais

1.7.1.1. Cendre volante

L'étude de (Khatib, 2008) a montré qu'on peut remplacer une partie le ciment par un volume élevé de cendres volantes (jusqu'à 60%) dans le BAP. Khatib a montré que les cendres volantes augmentent l'ouvrabilité des BAP. Cette augmentation est due à la réduction en demande en eau provoquée par les cendres volantes.

De plus l'incorporation des cendres volantes a diminué la densité de béton en comparaison au mélange témoin, cette diminution est due à la légèreté des cendres (sa masse volumique est faible par rapport au ciment).

Khatib a observé aussi une diminution de l'absorption de béton au cours de temps et une augmentation de l'absorption avec l'augmentation de la quantité des cendres. Cette augmentation est due à la finesse des cendres qui joue un rôle de remplissage des vides, donc elle améliore la compacité du béton figure 1.13.

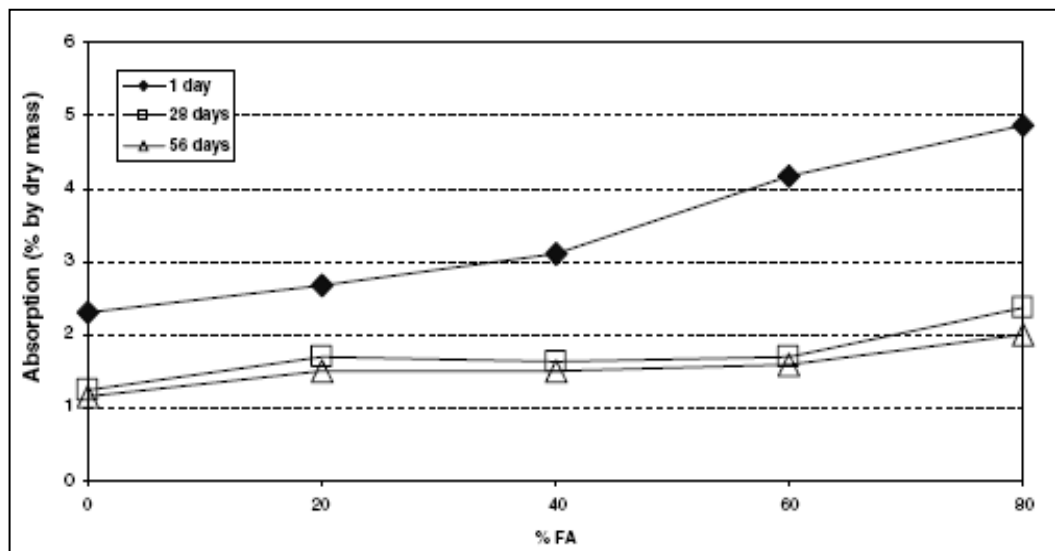


Figure 1.13 : L'influence des cendres sur l'absorption avec 0.7% adjuvant. (Khatib, 2008).

L'incorporation des cendres volantes jusqu'à un taux de substitution (environ de 40%), présente une résistance maximum (70 MPa) à 56 jours figure 1.14. Généralement

l'évolution de la résistance diminue avec le temps. La substitution par des cendres volantes jusqu'à 60% donne une résistance acceptable 40 Mpa à 56 jours.

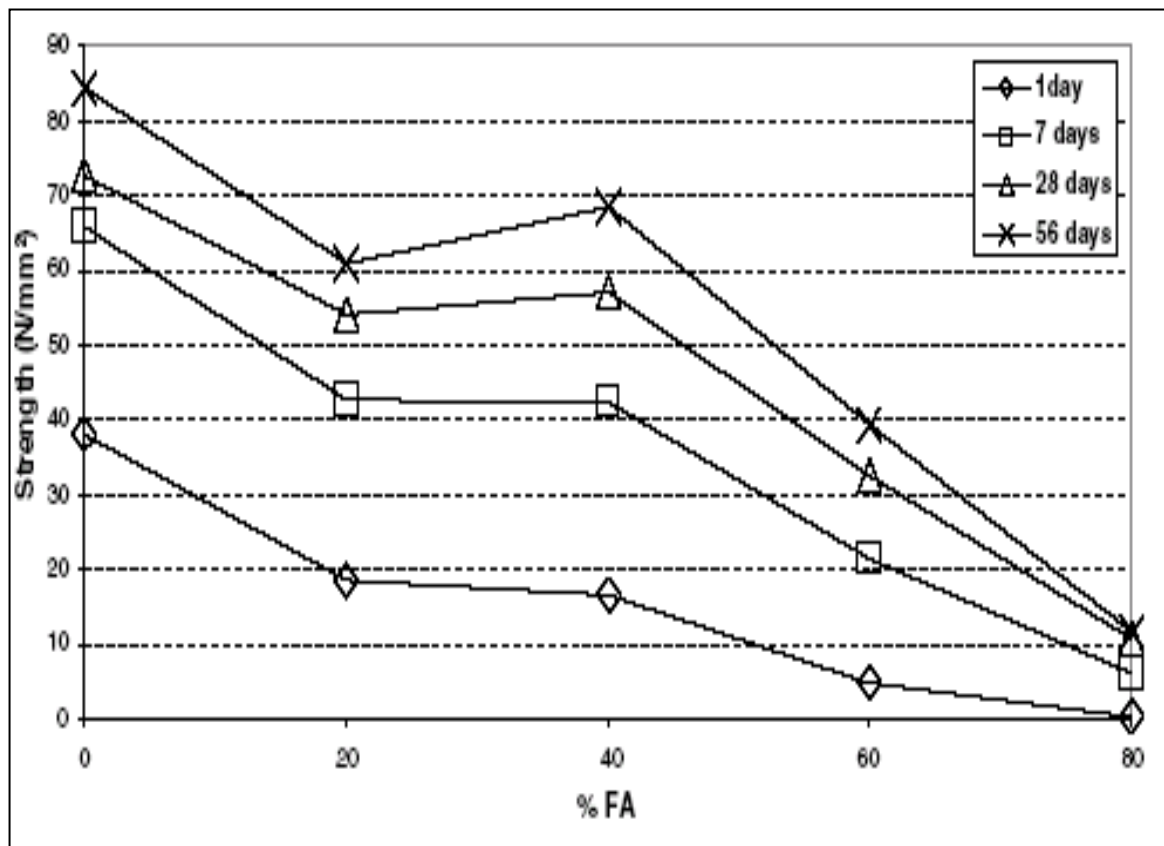


Figure 1.14: L'influence des cendres volantes sur la résistance (avec 0.7% d'adjuvant). (Khatib, 2008).

Une corrélation entre la résistance et l'absorption a été établie dans cette étude, il a résulté que la résistance diminue avec l'augmentation de l'absorption. L'incorporation des cendres volantes diminue le retrait de manière significative. La relation entre la variation de retrait et la quantité des cendres volantes, est linéaire figure 1.15.

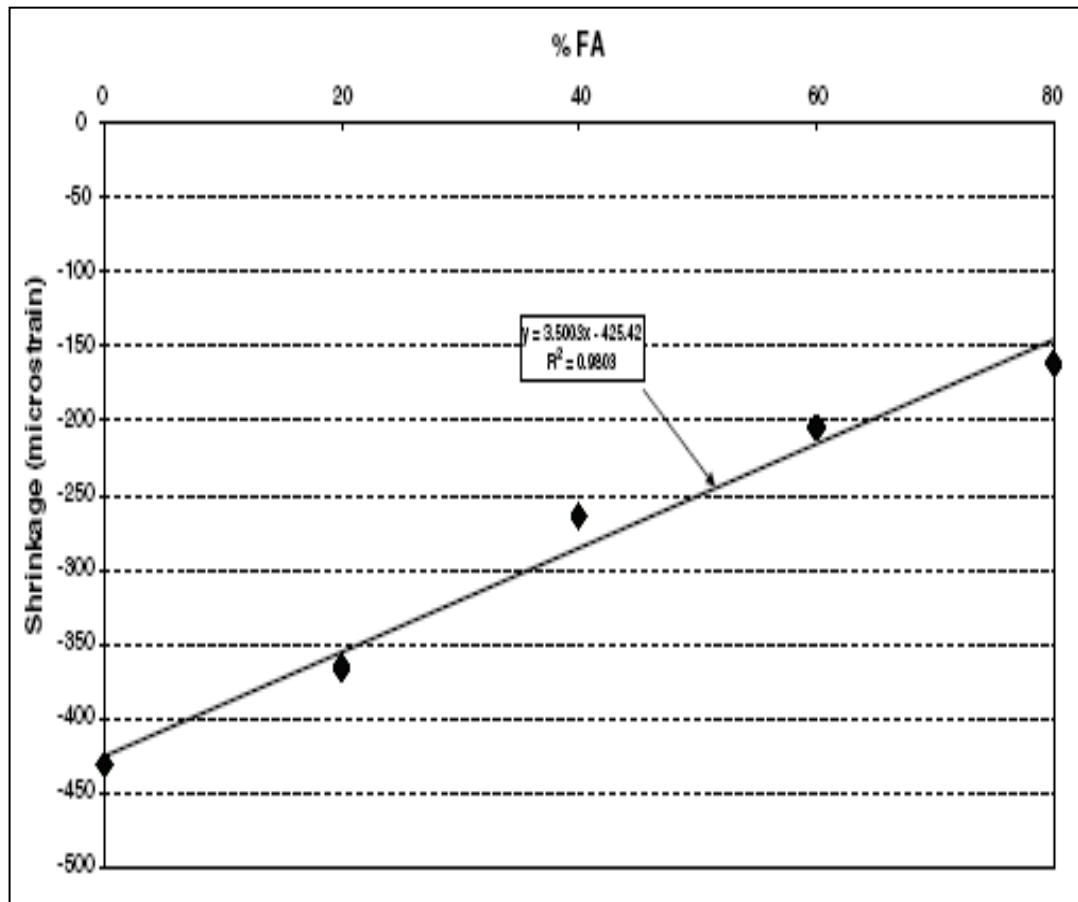


Figure 1.15 : Variation de retrait en fonction de la quantité des cendres Après 56 jours de cure. (Khatib, 2008).

Une autre étude faite par (Şahmaran et al., 2008) ont rapporté que les cendres volantes prolongent le début et la fin de prise de l'ordre de 90 à 140% et 50 à 80% respectivement figure 1.16 Cette prolongation est due à la finesse et à la forme sphérique des cendres qui absorbent l'eau libre dans le mélange.

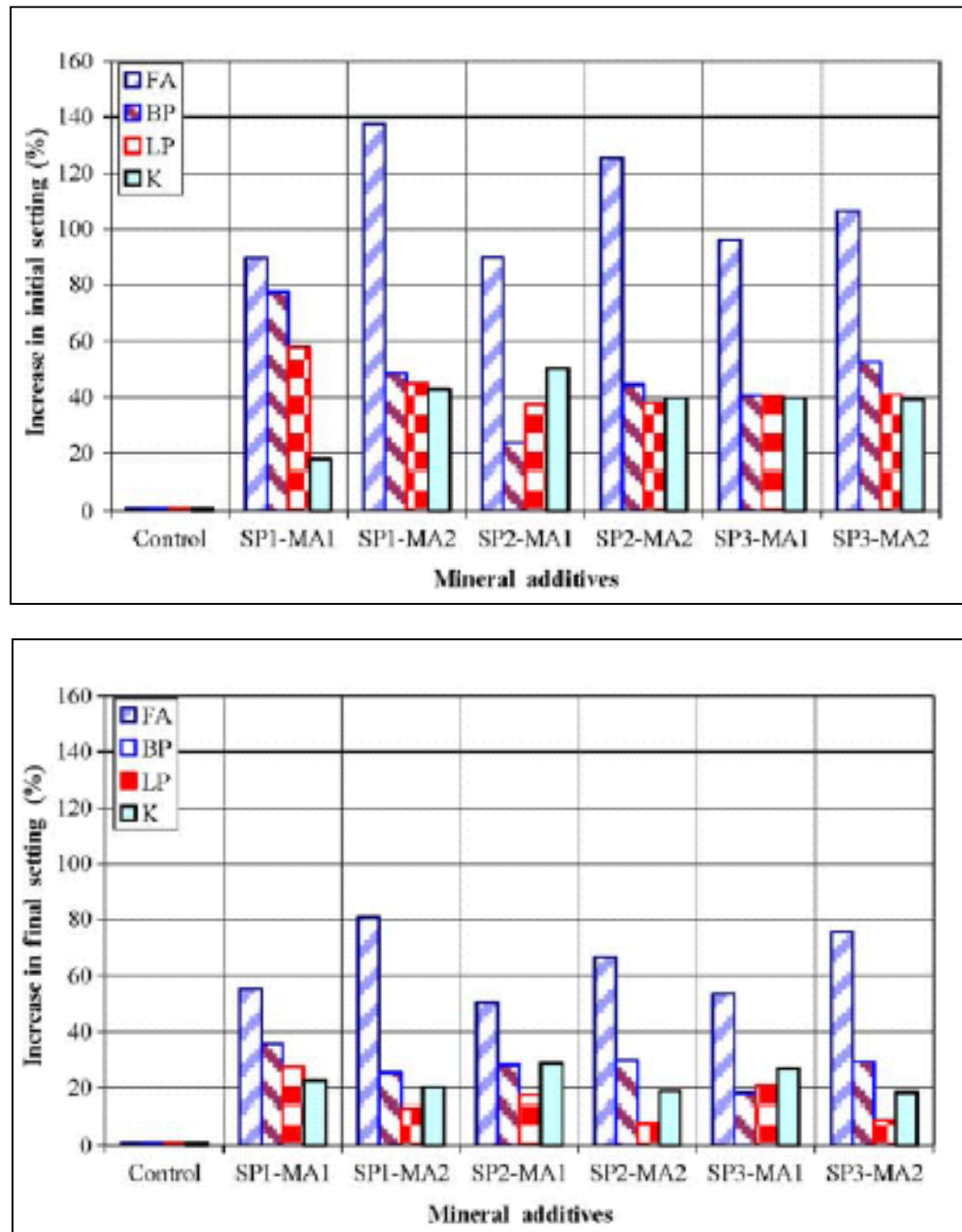


Figure 1.16 : Influence des ajouts minéraux sur les temps de prise du ciment. (Şahmaran et al., 2008).

Şahmaran et al. Ont aussi montré que le remplacement d'une partie de ciment par les cendres volantes augmente le volume de la pâte; cette augmentation est attribuée à la faible densité et à la forme sphérique des cendres. Cette dernière provoque une réduction de

frottement entre les grains de sable ; ce qui améliore la plasticité et la cohésion, d'où une amélioration de l'ouvrabilité.

(Bouzoubaâ et Lachemi, 2001) ont intéressé aux substitutions d'une partie de ciment par différents pourcentages des cendres volantes (40%, 50% et 60%), avec un rapport d'eau/liant variant entre 0,35 et 0.45. Ils ont trouvé que tous les mélanges présentent un étalement compris entre 45 et 65 cm et un temps d'écoulement dans l'essai d'entonnoir compris entre (3 et 7) s. La variation de l'étalement est proportionnelle au dosage en superplastifiant et les cendres, par contre il est improportionnel au rapport eau/liant.

Aussi, ils ont observé une augmentation en demande d'adjuvant. Cette augmentation dépend de la diminution du rapport eau/liant et de l'augmentation en quantité des cendres volantes utilisées. Ainsi le ressuage augmente avec l'augmentation de E/L, et l'utilisation des cendres de 40% à 60% n'a pas certes une influence significative.

L'incorporation des cendres prolonge le temps de début et fin de prise, cette prolongation est aussi due à la réduction de la quantité de ciment tableau 1.2.

Le remplacement d'une partie de ciment par les cendres volantes réduit la chaleur d'hydratation du béton. Cette réduction est due à la faible quantité de ciment et à la réaction lente des cendres volantes.

Tableau 1.2 : Ressuage, temps de prise, et chaleur d'hydratation du béton (Bouzoubaâ et Lachemi, 2001)

Mixture	W/(C+FA)	% of	Total bleeding	Setting time,h/min		Maximum autogenous
	no	Fly ash	Water, ml/cm ²	Initial	Final	Temperature rise,C°
1	0.5	-	0.065	4.48	6.28	23.4
2	0.45	40	0.117	6.57	9.50	18.6
3	0.4	40	0.082	7.40	10.19	-
4	3.05	40	0.025	6.43	9.07	-
5	0.45	50	0.129	6.57	10.04	17
8	0.45	60	0.127	7.26	10.04	13.6

1.7.1.2. Fillers calcaires

(Şahmaran et al. (2008)) ont trouvé que l'ouvrabilité du mortier dépend du super plastifiant et que les fillers calcaires améliorent aussi l'ouvrabilité.

(Zhu et Gibbs, 2005) ont utilisé trois types des fillers calcaires (L1, L2, et L3) et deux types de craie (C1 et C2) tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Caractéristiques des fillers calcaires et de craies utilisées dans l'étude (Zhu et Gibbs, 2005)

Powder type	L1	L2	L3	C1	C2
	Limestone	Limestone	Limestone	Chalk	Chalk
Chemical analysis					
CaCO ₃ (%)	99.3	99.3	99.3	94.5	90.5
SiO ₂ (%)	0.2	0.3	0.3	-	-
Fe ₂ O ₃ (%)	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1
Al ₂ O ₃ (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MgO (%)	-	0.2	0.2	-	-
Insoluble In HCL(%)	-	0.4	0.4	4.7	9.0
Physical properties					
Residue en 45um sive(%)	0.3	15	33	30	50
Top cut(d98)(um)	30	80	200	100	250
Weight (um)	5	17	25	na	na
Partcles by weight	20	15	11	15	na
Specific gravity	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7

La figure 1.17 montre l'évolution du mini-étalement des mortiers fabriqués avec 40% de substitution par les fillers et les craies. La figure montre que le mini-étalement est augmenté lorsqu'on utilise l'adjuvant Glenium 27 en comparaison à celle Glenium C315.

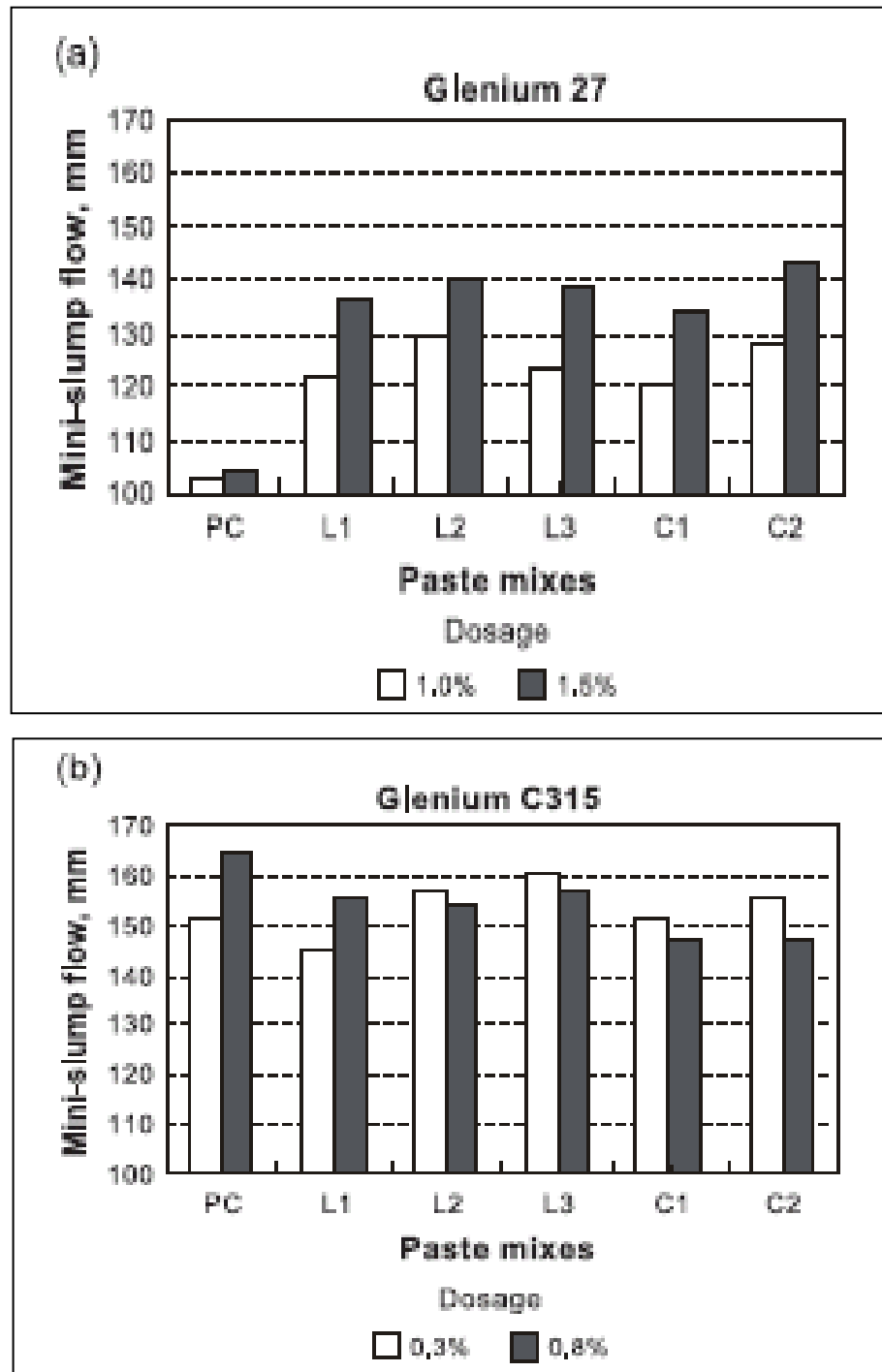


Figure 1.17 : Les valeurs de mini-étalement des mortiers. (Zhu et Gibbs, 2005).

Après ce test Zhu et Gibbs ont préparé des BAP avec des taux de substitution 55%, 44% et 25% de chaque ajout ; avec un dosage de liant 540 kg/m^3 . Tous les BAP préparés

avaient un étalement compris entre 600 et 650 mm. La figure 1.18 montre l'étalement du béton en fonction de pourcentage d'ajouts. Elle indique que la variation du dosage en adjuvant dépend de la nature d'ajout utilisé. Les fillers (L1, L2, et L3) présentent moins de demande en adjuvant en comparaison à celles de craies (C1 et C2).

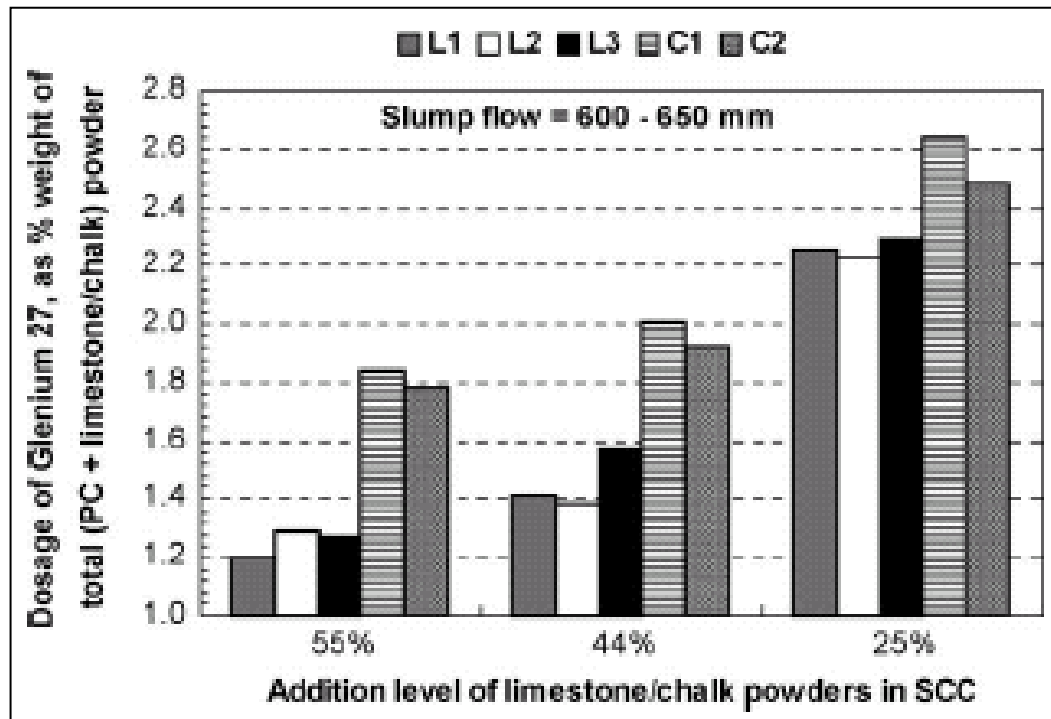


Figure 1.18 : Dosage en superplastifiant requis du BAP pour réaliser la marge d'étalement. (Zhu et Gibbs, 2005).

Dans la figure précédente les chercheurs ont constaté aucune différence significative de la demande en super plastifiant entre les trois fillers (L1, L2, et L3), et les deux poudres de craies (C1, C2). Ils ont aussi constaté que la finesse n'est pas le seul paramètre qui influe sur la demande en superplastifiant, mais aussi la nature de l'ajout.

(EL Hilali, 2009) a rapporté que le dosage en superplastifiant dépend du type de filler calcaire.

Il a aussi remarqué que pour la même formulation le dosage en superplastifiant dépend de la finesse du couple « ciment+fillers ». Une diminution de l'ouvrabilité au cours du temps

a aussi été observé. Cette diminution est plus grande lorsque la finesse des fillers est plus élevée.

(Bosiljkov, 2003) a trouvé que pour obtenir un béton autoplaçant il faut utiliser une quantité de ciment comprise entre 380 et 390 kg/m³, et une quantité des fillers de 50% par rapport à la quantité de ciment, et un rapport de eau/liant compris entre 0.45 et 0.48. Il a montré que tous les mélanges fabriqués par les fillers présentent des étalements compris entre 702 et 765 mm tableau 1.4.

Les fillers améliorent l'ouvrabilité de la pâte du ciment. Cette ouvrabilité est augmentée avec l'augmentation de la quantité des fillers et avec l'augmentation du rapport eau/liant.

Tableau 1.4 : Propriétés des mélanges à l'état frais (Bosiljkov, 2003)

Mix	V_w/V_{c+f}	Slump flow		V-Funnel	L-shaped box		
		Spread(mm)	T500(s)		H2/H1	T200(s)	T4005s)
C-1	0.66	765	3.3	7.5	0.88	1.2	3.0
C-2	0.74	735	2.5	5.8	0.91	0.7	1.6
L-1	0.69	764	3.1	7.5	0.92	1.0	2.3
L-2	0.66	693	4.7	11.7	0.86	1.1	3.7
L-3	0.64	702	4.7	13.4	0.89	0.8	2.8

1.7.1.3. Fumée de silice

(Yazici, 2008) a travaillé sur l'effet de la fumée de silice et les cendres volantes sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP. Il a partagé les mélanges en deux séries, la première série (H) utilise un pourcentage de substitution 0% par la fumée de silice et avec les pourcentages des cendres volantes (0%, 30%, 40%, 50 % et 60%) ; la deuxième séries (HS) identique à la première avec une quantité de fumée de silice fixée à 10%. Il a montré qu'au même rapport E/L tous les mélanges présentent des étalements compris entre 710 et

825 mm. Il a observé une augmentation de l'étalement avec l'augmentation de la quantité des cendres volantes dans la deuxième série HS (qui contient 10% de la fumée de silice). Cette augmentation est due à l'augmentation de la demande en adjuvant. La fumée de silice et la cendre volante influent sur l'ouvrabilité par amélioration de la cohésion entre les grains.

(Domone, 2006) a présenté un résumé général sur l'utilisation des bétons autoplaçants dans le monde depuis 1993 jusqu'à 2003 de 68 travaux de recherche publiés durant 11 ans. Il a trouvé que 90% parmi ces études ont réalisé des étalements compris entre 600 et 750mm figure 1.19. Domone a trouvé aussi que 80% de résultats de travaux de recherche effectués sur les BAP entre 1993 et 2003 ont montré des résistances à la compression supérieure à 40Mpa figure 1.20.

Toutes ces études ont utilisé des ajouts minéraux. Les fillers calcaires présentent 41% parmi elles. Les quantités d'ajouts sont comprises entre 425 et 625 kg/m³ pour 80% de l'ensemble des études élaboré figure 1.21.

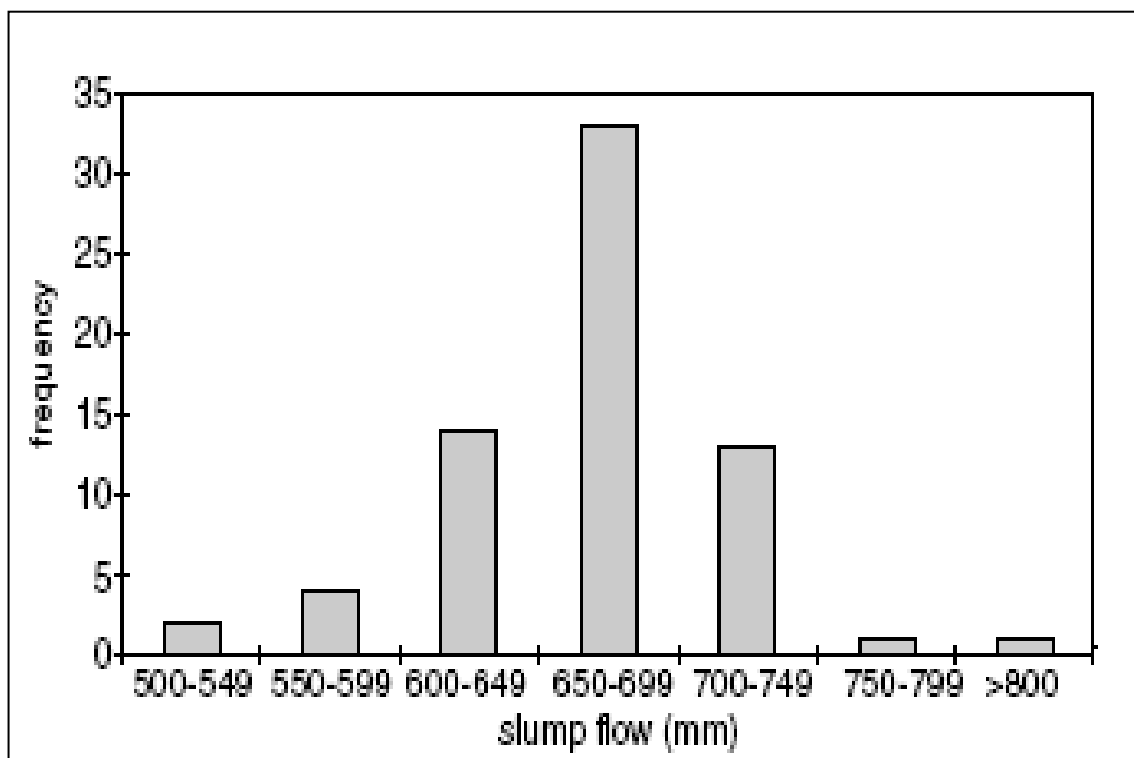


Figure 1.19 : Valeurs d'étalement dans les études élaborées. (Domone, 2006).

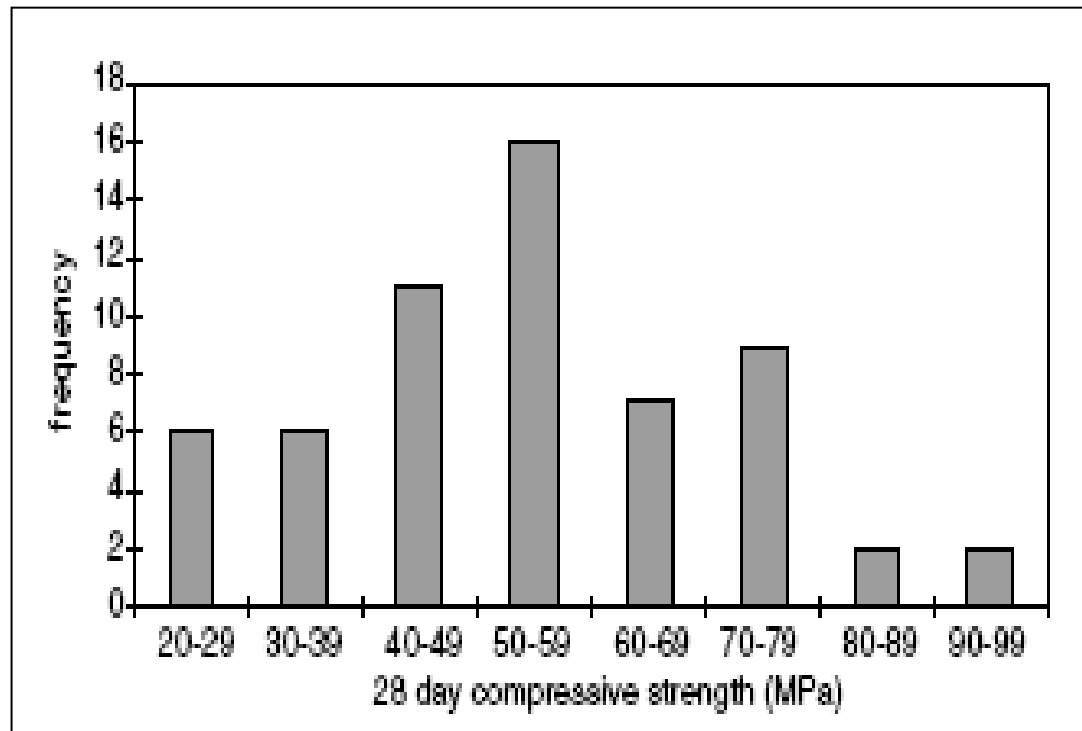


Figure 1.20 : Distribution de la résistance à la compression à 28 jours. (Domone, 2006).

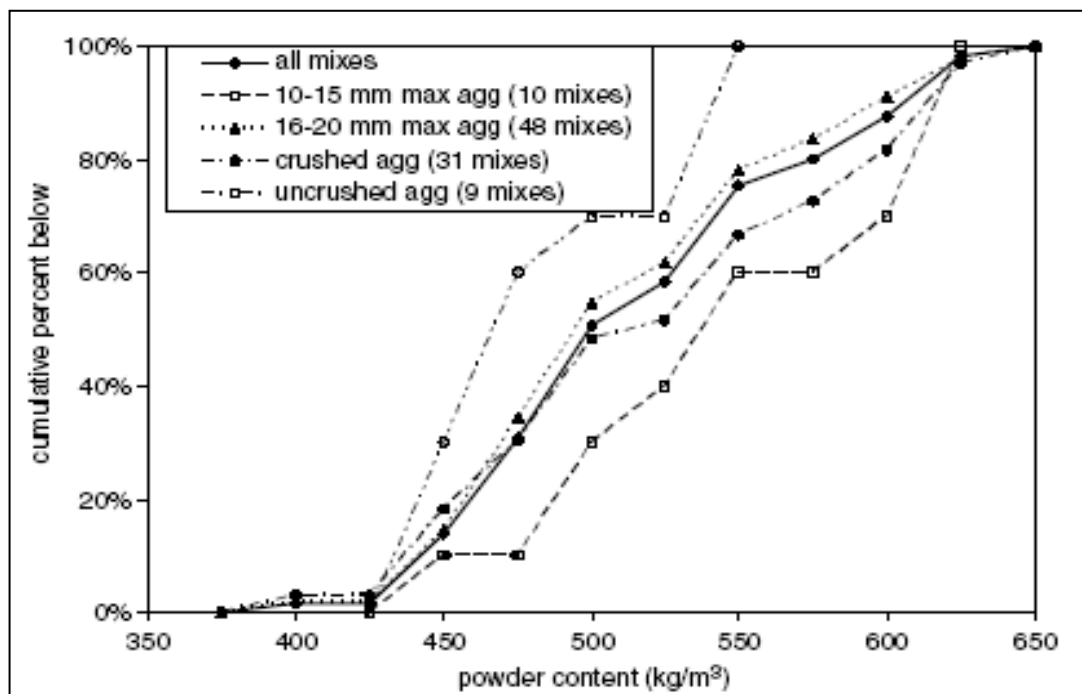


Figure 1.21 : Distribution des contenus d'ajouts. (Domone, 2006).

1.7.1.4. Laitier

(Debbih, 2012) a trouvé que Le laitier donne une meilleure ouvrabilité pour les BAP, et que la substitution de 15% du ciment par le laitier dans le BAP à base de granulats naturels engendre une amélioration très remarquable de l'ouvrabilité (étalement, capacité de passage et de remplissage).

1.7.1.5. Pouzzolane naturelle

(Aichouba et Ghrici, 2005) ont étudié les effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés physico-mécaniques et de la durabilité des ciments à base de calcaire (CPJ CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie de Chlef - Oued-Sly (ECDE) contenant 10% de calcaire. Ils ont conclu que la substitution de 10 à 30 % du ciment par la pouzzolane naturelle augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant, et que le temps de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

(Kenai et al. (2014)) ont montré que La pouzzolane naturelle diminue la capacité d'écoulement des BAP avec les agrégats naturels et avec les agrégats recyclés.

(Debbih, 2012) a trouvé que la pouzzolane naturelle diminue l'ouvrabilité du BAP, mais malgré cette diminution les valeurs obtenues restent plus au moins acceptables.

(Boukendakdji, 2010) a conclu que de vue ouvrabilité et rhéologie, une teneur en laitier à 20% peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation, avec un optimum de 15%, et que les résistances mécaniques diminuent en présence du laitier toutefois, elles ne sont pas significatives d'autant plus qu'elles sont rattrapées à long terme, au-delà de 28 jours.

1.7.2. Propriétés du béton ordinaire et du béton autoplaçant à l'état durci

1.7.2.1. Cendre volante

(Bouzoubaâ et Lachemi, 2001) ont trouvé que l'incorporation des cendres volantes dans le béton diminue la résistance à la compression. Cependant la substitution de 60% de ciment par les cendres volantes donne une résistance acceptable d'ordre 35 MPa figure 1.22.

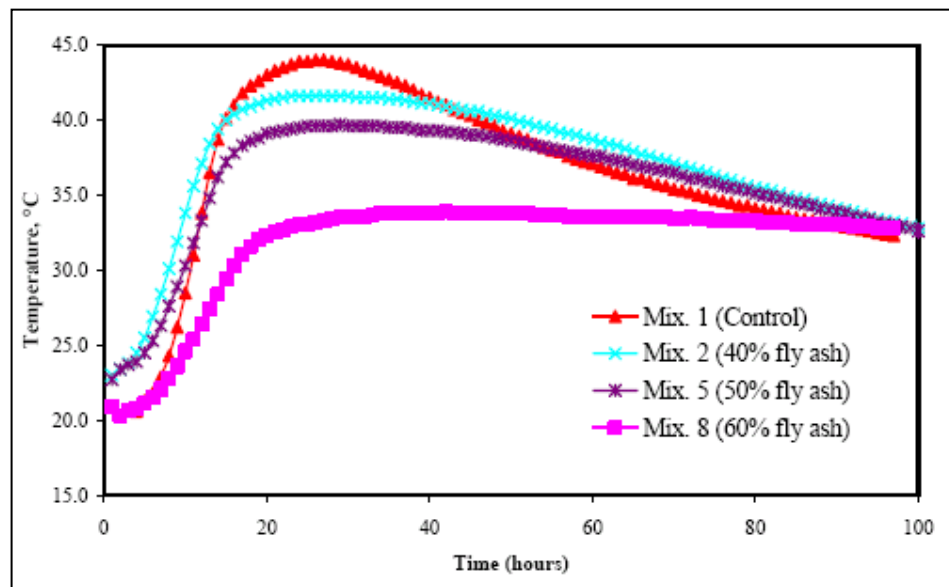


Figure 1.22 : Chaleur d'hydratations du béton dans des éprouvettes Cylindriques 152×305 mm. (Bouzoubaâ et Lachemi, 2001).

1.7.2.2. Fillers calcaires

Les travaux de (De larrard, 1999 ; Pera et al., 1999) montrent que la résistance mécanique s'accélère aux jeunes âges en utilisant les fillers. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien dés floclées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

(Siad et al., 2015) ont trouvé que les dégâts physiques, l'expansion et la perte de résistance à la compression due à l'attaque de Mg_2SO_4 sont passés de la classe de résistance supérieure à la plus basse. Les mélanges BAP contenant de la pierre calcaire ont présenté la détérioration physique la plus élevée, en particulier dans les 30 MPa, avec 18% de perte de masse.

(Adekunle et al., 2015) ont trouvé que l'utilisation de pouzzolane naturelle(PN) en combinaison avec d'autres déchets locaux (poudre de calcaire(LSP), poussière de ciment, (CKD) et scories d'acier pulvérisé, (PSS) comme charges minérales permet de produire des mélanges BAP à haute résistance 3, 7, 28 et 90 jours dans les plages de 36 à 49, 47 à 56, 65 à 68 et 70 à 83 MPa, respectivement).

(Zhu et Gibbs, 2005) ont remarqué que La résistance à la compression des BAP contenant des fillers et des poudres de craies présentent des valeurs grandes (supérieure de 60 ÷ 80% à 7 jours et de 30 ÷ 40% à 28 jours) que celles d'un béton vibré.

1.7.2.3. Fumée de silice

(Yazici, 2008) a trouvé que la substitution par 10% de fumée de silice et 60 % de cendres volantes donne une résistance à la compression d'ordre 68,2 MPa à 90 jours figure 1.23 avec une quantité de ciment de 180 Kg/m³ seulement.

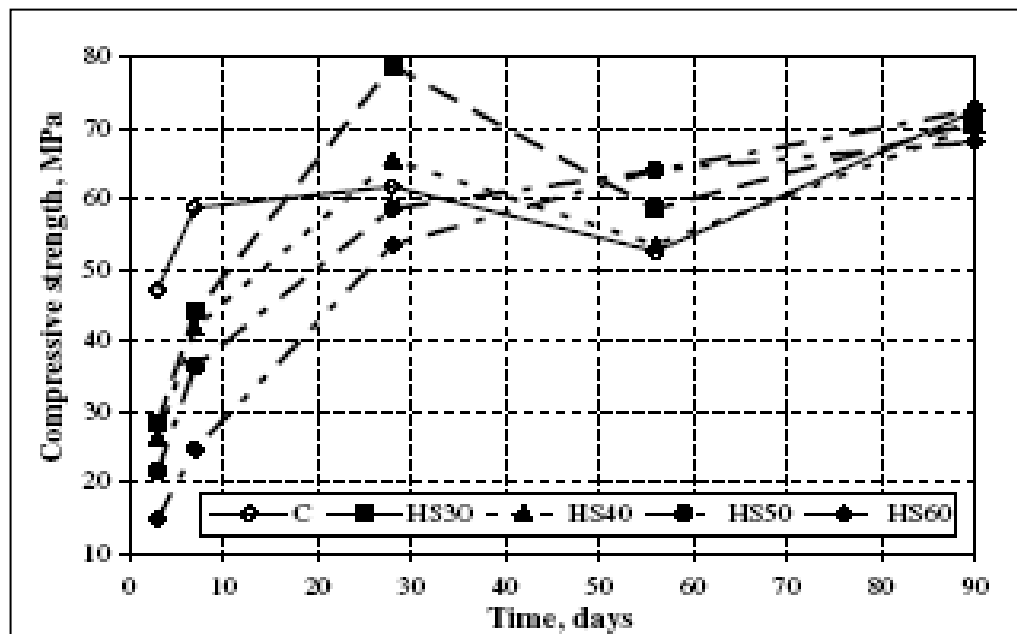


Figure 1.23 : Relation entre la quantité de fumée de silice et du cendre volante et la résistance à la compression pour les séries HS. (Yazici, 2008).

1.7.2.4. Méta kaolin

(Assem et al., 2012) ont montré que le méta kaolin (MK) réduit de manière significative la perméabilité aux chlorures du BAP. Lorsque 20% de MK ont été utilisés (comme substitution partiel de ciment), la perméabilité aux chlorures du mélange témoin a été réduite de 89%. Le pourcentage optimal de MK en termes de perméabilité aux chlorures était de

20%, tandis que le fumé de silice (SF) a montré une diminution des charges totales car la teneur en SF a augmenté de 0% à 11%.

1.7.2.5. Laitier

(Boukendakdji, 2010) a conclu que les résistances mécaniques diminuent en présence du laitier toutefois, elles ne sont pas significatives d'autant plus qu'elles sont rattrapées à long terme, au-delà de 28 jours.

1.7.2.6. Pouzzolane naturelle

(Adekunle et al., 2015) ont montré que l'utilisation de pouzzolane naturelle (PN) en combinaison avec d'autres déchets locaux (poudre de calcaire (LSP), poussière de ciment, (CKD) et scories d'acier pulvérisé, (PSS) comme charges minérales permet de produire des mélanges BAP à haute résistance 3, 7, 28 et 90 jours dans les plages de 36 à 49, 47 à 56, 65 à 68 et 70 à 83 MPa, respectivement).

(Celik et Meral, 2014) ont montré que Tous les mélanges binaires et ternaires réalisés avec des ciments mélangés avec du pouzzolane naturelle (NP) ont démontré une plus grande résistance à la migration de chlorure par rapport aux mélanges témoins.

(Siad et al., 2015) ont trouvé aussi que Les classes de 30 MPa du BAP avec pouzzolane naturelle et cendres volantes ont également montré des surfaces détériorées remarquables, la perte de masse variant entre 4% et 5%. Aucune perte de masse n'a été enregistrée pour les mélanges de béton ordinaire.

(Kaid et al., 2009) ont trouvé qu'il est possible d'améliorer la durabilité des bétons typiques actuellement fabriqués en Algérie en utilisant la pouzzolane naturelle.

(Ghrici et al., 2006) ont observé qu'aucune perte de résistance avec des échantillons de ciment de pouzzolane naturel après immersion dans des solutions de sulfate jusqu'à 180 jours. Une réduction de la perméabilité aux ions chlorure avec l'ajout de pouzzolane naturelle a été constaté.

(Mouli et Khelafi, 2008) ont constaté que le béton incorporant 30% de pouzzolane développe des résistances plus élevées que le béton témoin à 90 jours et plus.

(Ghrici et al., 2006) ont trouvé que la pouzzolane naturelle (NP) ne peut être utilisé que pour améliorer la résistance à l'acide chlorhydrique (HCl) du mortier OPC, tandis que le

fumé de silice SF peut être utilisé pour améliorer les résistances d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H_2SO_4) du OPC Mortier et le mortier contenant du NP.

(Mouli, 2006) a montré la possibilité de produire un béton acceptable à base d'agrégats de pouzzolane (sable pouzzolanique, gravier léger GL3/8 et gravier Leger GL8/15).

(Kaid, 2000 ; Kaid et Khellafi, 2005) ont étudié l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et d'un adjuvant super plastifiant sur révolution des caractéristiques mécaniques et sur révolution du retrait libre total (l'effet conjugué du retrait d'évaporation et du retrait d'hydratation) des mortiers desséchant conservés à une température de $15C^{\circ} \pm 1^{\circ}C$, contenant 2% de super plastifiant avec des pourcentages variables de l'ajout pouzzolanique 5%, 10% et 15%. Elle a montré qu'aux jeunes âges l'ajout pouzzolanique produit, par rapport au mortier témoins, une Légère diminution de la résistance en compression. Au-delà de 14 jours, il est possible de distinguer des améliorations significatives de cette résistance (les améliorations les plus significatives concernent les mélanges à taux de substitution comprise entre 5 % et 10 % correspondant aux mélanges contenant 2% de super plastifiant). Les augmentations des résistances durant cette période des mortiers contenant 5 % et 10 % de la pouzzolane naturelle ainsi que 2 % du super plastifiant valent 30 % par rapport à celle du mortier témoin.

1.8 Effet de type de sable

(Benabed et al., 2012) ont montré que l'utilisation de sables binaires et ternaires dans l'application des BAP aurait des avantages techniques, économiques et environnementaux pour les producteurs de béton.

CHAPITRE 2

GRANULATS RECYCLÉS

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 2**GRANULATS RECYCLES : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.****2.1. Introduction**

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Le recyclage des matériaux de construction, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans le bâtiment, est la solution la plus prometteuse. Dans ce chapitre une synthèse bibliographique est donnée sur les propriétés des granulats recyclés et le béton à base de granulats recyclés.

2.2. Industrie des granulats

L'industrie des granulats est une industrie importante dans l'industrie de construction et en particulier pour la production du béton. La production de granulats en Europe est estimée à 2800 millions de tonnes par an avec plus de 27 000 sites d'extraction et une production annuelle moyenne de 7 tonnes par habitant de l'UE (L'UEPG, 2005). La construction d'une maison neuve nécessite jusqu'à 400 tonnes de granulats depuis les fondations jusqu'à la pose des tuiles. La construction d'une école nécessite 3000 tonnes de granulats et la construction d'un stade peut atteindre 300 000 tonnes. (L'UEPG, 2005). Dans le domaine de transport, la construction d'1 km d'autoroute nécessite environ 30 000 tonnes de granulats et il faut environ 9 tonnes de granulats pour 1 mètre de ligne TGV.

2.3. Granulats recyclés dans le génie civil

Le recyclage des matériaux inertes du BTP est l'une des solutions pour répondre au déficit entre production et consommation et de mieux protéger l'environnement. Le secteur du bâtiment et des travaux publics a longtemps pratiqué la technique du dépôt sauvage sur ses chantiers mais malgré des contraintes économiques, normatives et psychologiques, le recyclage de ces déchets progresse régulièrement en particulier dans le secteur routier et le recyclage des revêtements routiers (Bomstein et Bazire, 2003). Dans le bâtiment, le recyclage pourrait concerner une bonne part des déchets issus de différentes opérations : construction neuve, réhabilitation et démolition. Afin de réduire l'épuisement des ressources naturelles et le recyclage des débris de démolition ou de chantiers de construction, l'utilisation des granulats recyclés dans les différents domaines de génie civil commence à

se développer. Les granulats provenant du recyclage jouent un rôle de plus en plus important pour répondre à la demande de granulats.

Les granulats recyclés conviennent à un large éventail d'applications. Le tableau 2.1 résumé la production des granulats recyclés dans différents pays européens.

Tableau 2.1 : Statistiques de l'UEPG sur la production des granulats recyclés
(Bomstein et Bazire, 2003)

Pays	Entreprises	Sites	Production (Million t)			
			Roches meubles	Roches massives	Granulats recyclés	Production Totale
Allemagne*	1878	5640	297	179	50	526
Autriche	900	1250	65	27	3	95
Belgique	87	72	9.2	47.7	7	63.9
Danemark*	400	410	38	0.3	-	38.3
Espagne	1650	2250	155	282	1	438
Finlande	400	3600	55	43	-	98
France	1800	-	168	225	9	402
Irlande	350	360	50	50	1	101
Italie	1796	2460	220	135	3	358
Norvège	793	4500	14.7	35.7	0.9	51.3
Pays-Bas	-	-	12	4	0.5	16.5
Pologne	3450	1745	105	40	2.5	147.5
Portugal*	331	357	6.3	82	-	88.3
République chèque	300	520	24	25.5	2.5	52
Royaume-Uni	350	1280	79	124	54	257
Slovaquie	128*	181*	4	16	-	20
Suède*	170	1940	26	41	8,2	75,2
Suisse	338	500	26	3	3	32
Total	15121	27065	1354,2	1360,2	145,6	2860

Production totale : 2860 millions de tonnes

* Chiffres pour 2003

L'une des difficultés de production de granulats recyclés est la difficulté de séparer les matériaux nuisibles comme le plâtre ou des substances toxiques. Il y a donc urgence à modifier les pratiques actuelles, à prescrire le non mélange des déchets et à pratiquer la déconstruction sélective des bâtiments qui peut représenter une alternative économique et qualitative. C'est la condition pour que le recyclage des inertes qui représente moins de 10 % du gisement progresse sensiblement d'où le traitement est fortement nécessaire figure 2.1.

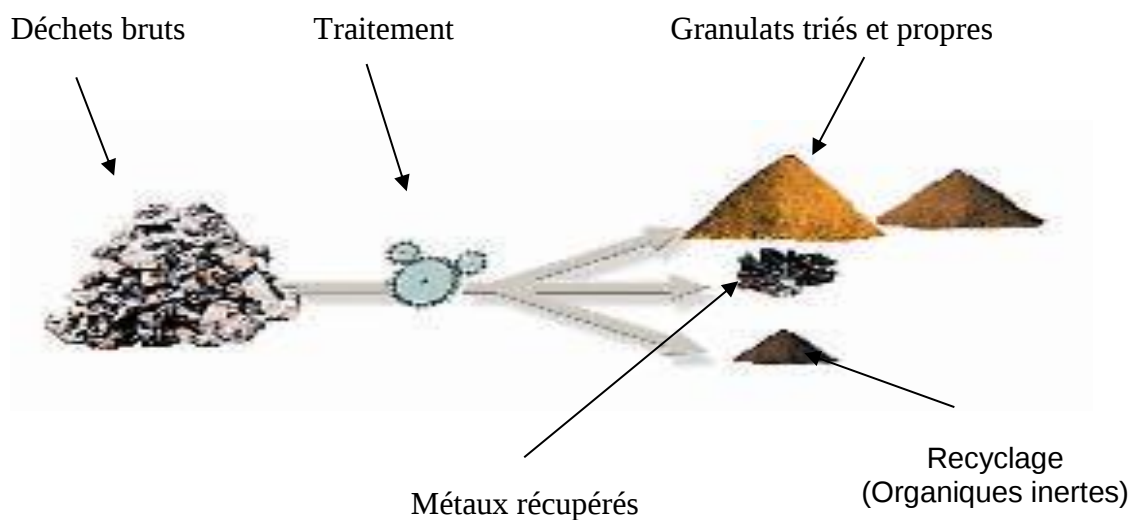


Figure 2.1. Traitement des déchets. (Bomstein et Bazire, 2003).

2.4. Utilisation des granulats recyclés

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne (Akash et al., 2007). Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasés dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir.

2.5. Propriétés des granulats recyclés

Les granulats recyclés peuvent être produits à partir de : (a) les déchets du béton de laboratoire ou (b) les déchets de démolition des constructions. Les granulats fabriqués à partir des déchets de laboratoire ont plusieurs formes : 1 un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment, 2 une pâte de ciment seule, 3 un grain de gravier naturel figure 2.2.

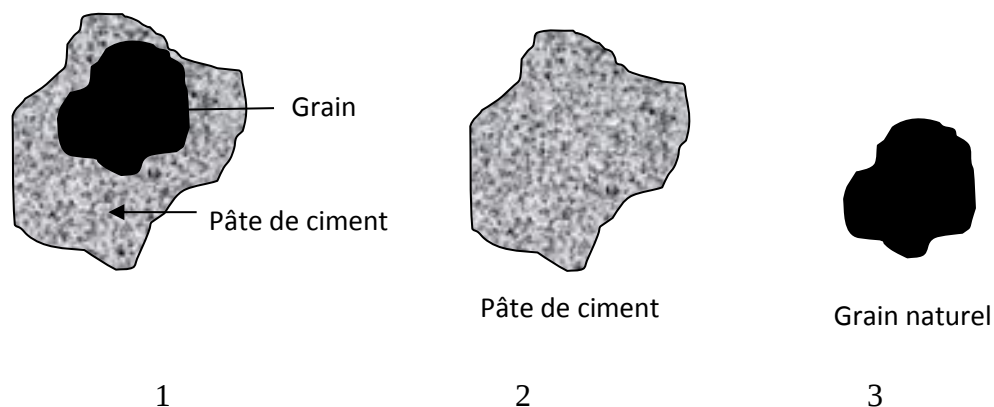


Figure 2.2. Les formes de granulats recyclés.

Cependant, les granulats recyclés fabriqués par les déchets de démolition des constructions dont plusieurs déchets autres que le béton tels que : le plâtre, la brique, le bois, le plastique, les métaux, les papiers etc. Après la séparation et le tamisage on peut les utiliser comme substituant les gros granulats naturels dans le béton.

Comme les granulats naturels, la qualité des granulats recyclés en termes de distribution granulaire, l'absorption d'eau et la résistance d'abrasion doivent être évaluées avant leur utilisation. On discute ci-après quelques propriétés.

2.6. Distribution granulaire

La préparation des granulats recyclés (sable et gravier) se fait en trois étapes. La première est consacrée à concasser les déchets jusqu'à l'obtention des blocs de 50 mm. La deuxième est consacrée à réduire la fraction de 0 à 20 mm, et la dernière étape de séparer par tamisage les fractions souhaitées.

2.6.1. Absorption d'eau

(Bairagi et al., 1993) ont trouvé que l'absorption d'eau des granulats recyclés varie de 3 à 12%. Cette caractéristique dépend de la matière première. Il est à noter que ces valeurs sont plus grandes en comparaison aux valeurs des granulats naturels qui sont d'environ 0.5 à 2 %. La forte porosité des granulats recyclés peut être attribuée à la présence de la pâte de ciment qui adhère aux granulats originaux. Les granulats recyclés ont présenté aussi, une forte absorption d'eau. Cette absorption a atteint 75% lors des premières 30 minutes en comparaison avec les granulats naturels figure 2.3.

(Khatib, 2005) a constaté que le sable de brique (CB) a une masse volumique faible en comparaison au sable recyclé (CC) et les deux ont des densités faibles que le naturel. Le coefficient d'absorption de sable recyclé et de sable de brique est d'ordre 6.25% et 14.75% respectivement.

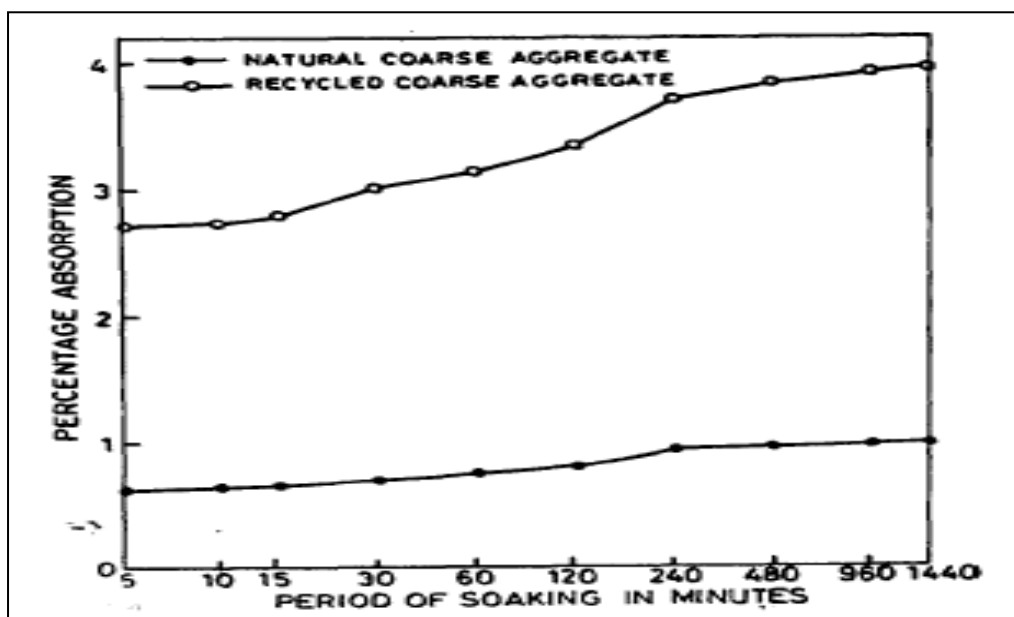


Figure 2.3. Rapport entre l'absorption et la période d'immersion dans l'eau des granulats recyclés et naturels. (Bairagi et al., 1993).

(Debieb et al., 2010). Ont trouvé que Les granulats recyclés sont plus légers, absorbent plus d'eau et contiennent une quantité importante de vieux mortier.

Debieb a étudié aussi la porosité et la perméabilité et il a trouvé que Le type de contamination des granulats recyclés n'a pas un effet significatif sur la porosité et la perméabilité du béton à base des agrégats recyclés, et que l'utilisation d'agrégats recyclés induit cependant une augmentation de l'absorption initiale et de la porosité, indépendamment du type de contamination.

2.6.2. Résistance à l'abrasion

(Juan et Gutierrez, 2009). Ont constaté que lors de l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles, tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion, et que la résistance à l'abrasion est donc directement reliée à la résistance à la teneur en mortier résiduel.

(Chakradhara *et al.*, 2011 ; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009), ont observé une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des coefficients Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés pour des granulats naturels.

(Rakesh, 2017), a étudié L'influence du remplacement des granulats grossiers naturels dans le béton avec des granulats de béton recyclé de taille similaire obtenus du recyclage sur la résistance à l'abrasion du béton de chaussée, Rakesh a trouvé aussi que Les propriétés physiques de l'agrégat grossier recyclé étaient inférieures à l'agrégat grossier naturel, et que La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés réduit la densité fraîche des mélanges de béton de 6 à 8%. Tan disque la résistance à la compression et à la flexion du béton avec des agrégats recyclés étaient moins que le béton avec des agrégats naturels. Il a aussi observé que la résistance à l'abrasion du béton avec des granulats recyclés était significativement moins par rapport au béton avec des granulats naturels.

Il semble que la résistance à l'abrasion des bétons recyclés soit légèrement plus faible que les bétons traditionnels. Selon (Sangoe-Crentsil *et al.*, 2001), cette diminution serait de l'ordre de 10%.

2.7. Caractéristiques de béton fabriqué par granulats recyclés à l'état frais

Généralement le béton fabriqué par des granulats recyclés présente les caractéristiques suivantes :

- Une perte d'ouvrabilité (l'affaissement) lorsque le taux de remplacement dépasse 50% de substitution.
- L'air contenu dans le béton recyclé est peu élevé (≈ 4 à 5.5%) avec 100% de remplacement en comparaison au béton traditionnel.

- Le béton frais est moins dense ($\approx 2150 \text{ kg/m}^3$) en comparaison au béton ordinaire ($\approx 2400 \text{ kg/m}^3$). Cette réduction est due à la faible densité des granulats recyclés.

Un résumé de travaux ultérieurs est donné ci-dessous :

(Gonzalez-Fonteboa et al., 2007) ont trouvé que tous les mélanges avaient un affaissement compris entre 6 à 9 cm et les densités sèches et humides ont des faibles valeurs lorsqu'on utilise les granulats recyclés.

(Khatib, 2005) a constaté que tous les mélanges (avec et sans sable recyclés) avaient un bon affaissement. L'affaissement varie entre 170 à 190 mm pour les bétons contenant le sable recyclé et de 85 à 155 mm pour les bétons contenant le sable de brique recyclé. De plus, l'affaissement augmente avec le taux de remplacement par le sable recyclé d'une part, et diminue lorsque le remplacement est effectué par le sable de brique. La variation de l'ouvrabilité (affaissement) en fonction du pourcentage de remplacement est présentée dans la figure 2.4.

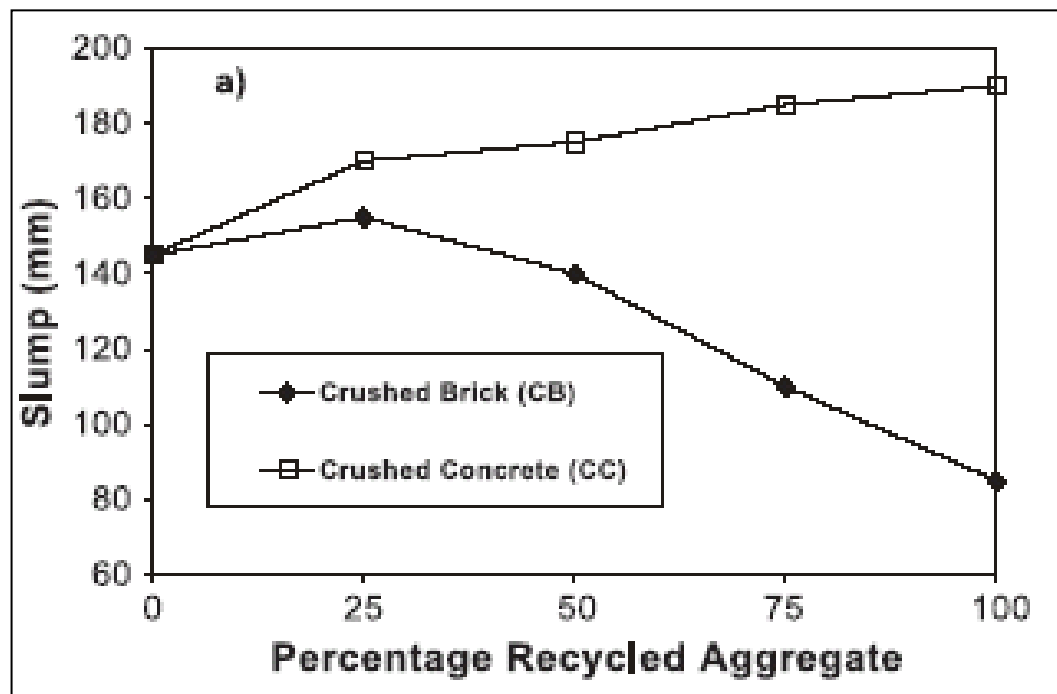


Figure 2.4. Effet de granulats recyclés sur l'affaissement de béton. (Khatib, 2005).

(Safiuddin et al., 2011). Ont étudié l'effet des agrégats recyclés (RCA) sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais, ils ont trouvé que la capacité de remplissage du BAP a été améliorée à 30% et 50% principalement en raison de teneur réduite en granulats grossiers et volume de pâte relativement élevé par agrégat unitaire contenu. En revanche, la capacité de remplissage a été réduite à une teneur en RCA supérieure à 50%. En particulier, une réduction significative de la capacité de remplissage a été observée pour 100% de RCA en raison de la quantité accrue d'agrégat fin. Ils ont remarqué aussi que les mélanges BAP avec une teneur en RCA supérieure à 50% étaient plus visqueux comme indiqué par le temps d'écoulement de l'affaissement T50 et les résultats du temps d'écoulement de l'entonnoir en V, et que tous les mélanges BAP ont eu une bonne résistance à la ségrégation, comme le montrent les résultats du test de stabilité du tamis. Les indices de ségrégation des bétons obtenus de cet essai étaient significativement inférieurs à la limite maximale recommandée (18%). L'effet de l'RCA sur le diamètre d'étalement au cône d'Abrams du BAP est évident à partir de la figure 2.5, qui montre que le diamètre d'étalement au cône d'Abrams a augmenté pour 30% et 50% de RCA. Ceci est principalement attribué à la teneur réduite en agrégats grossiers.

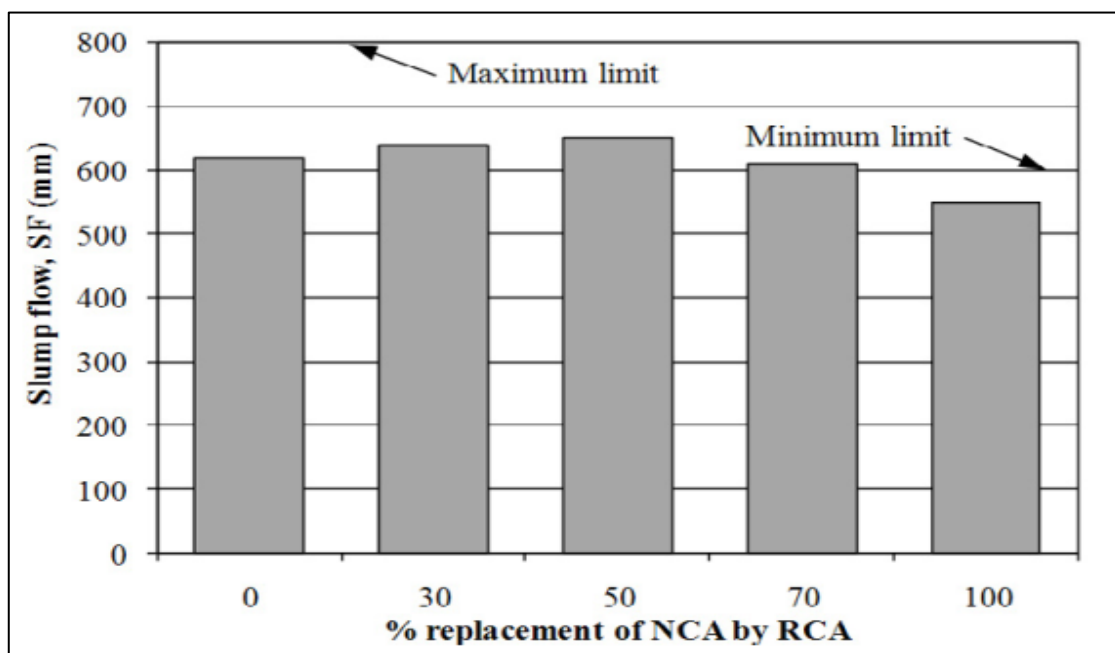


Figure 2.5. Effet des RCA sur le diamètre d'étalement au cône d'Abrams.

(Safiuddin et al., 2011).

L'effet de RCA sur le diamètre d'étalement à la couronne J-Ring est illustré à la figure 2. 6. Cette figure révèle que la capacité de dépassement a été améliorée pour 30% et 50% RCA, puisque le diamètre d'étalement à la couronne J-Ring augmenté. En revanche le diamètre d'étalement à la couronne J-Ring a diminué à 70% et 100% RCA, indiquant ainsi une capacité de passage inférieure. Les raisons sont les mêmes que discutées dans le cas le diamètre d'étalement au cône d'Abrams.

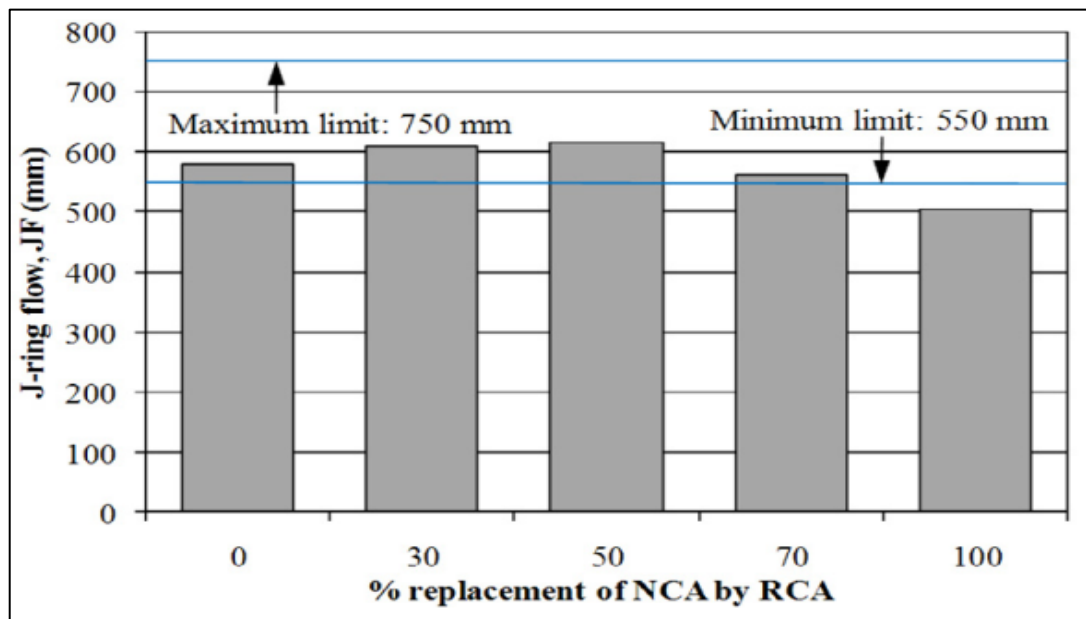


Figure 2.6. Effet des RCA sur le diamètre d'étalement à la couronne J-Ring.

(Safiuddin et al., 2011).

D'après plusieurs chercheurs (Butler et al., 2011 ; Chakradhara et al., 2011 ; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009). Ils ont trouvé que l'utilisation de granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton contenant un granulat naturel pour un même rapport E/C. Cette baisse de l'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, selon Butler, une augmentation de 3,1 à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation de granulats recyclés, pour garantir un affaissement égal. Ceci peut être dû au fait que les granulats recyclés ont une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton.

2.8. Caractéristiques de béton fabriqué par granulats recyclés à l'état durci

- Généralement le béton recyclé présente une diminution de la résistance à la compression.
- Le rapport de résistance à la flexion et la résistance à la compression est entre 16 à 32% et le rapport de résistance à la traction par fendage avec la résistance à la compression est entre 9 à 13%. Ces valeurs sont moins que le béton traditionnel (10 à 15%).
- Le module d'élasticité du béton recyclé est moins de 50 à 70% en comparaison au béton ordinaire.
- Le retrait du béton recyclé est plus élevé d'ordre 0.55 à 0.8mm/m en comparaison à celui du béton ordinaire (0.3 mm/m).

(Hansen, 1990) a étudié aussi l'utilisation des granulats recyclés et la cendre volante pour fabriquer un béton sans l'usage du ciment Portland. Le béton original contient 413 kg/m^3 de ciment et le rapport $E/C=0.40$, l'affaissement trouvé est de 55 mm et la résistance à la compression après 38 jours est de 56.4 MPa. Ce béton est concassé et séparé selon deux fractions : gravier fin inférieur à 4 mm, et gros gravier supérieur à 4 mm. Une partie de gravier fin est broyée dans un broyeur à boulets pendant 20 heures pour préparer des fines ayant une finesse similaire à celle du ciment. Un nouveau béton a été préparé avec 275 kg/m^3 de fines broyées et 275 kg/m^3 de la cendre volante de classe F, et de 375 kg/m^3 de gravier fin recyclé (inférieur à 4 mm) et de 1263 kg/m^3 des gros granulats, et 238 kg/m^3 d'eau. L'affaissement a augmenté à 100 mm avec une bonne cohésion entre les grains de béton en comparaison au béton témoin. Hensen a aussi testé le développement de la résistance d'une pâte de cendre volante seulement (avec eau/cendre égal à 0,4). La résistance trouvée est 0.12 MPa à 28 jours ce qui signifie que la résistance du béton recyclé trouvée est attribuée à la réaction pouzzolanique entre la cendre volante et les fines broyées pour donner une résistance 12,4 MPa. Cette étude a montré que les fines de démolition ont une certaine réactivité avec la présence des cendres volantes ce qui a été démontré aussi dans la première étude.

(Bairagi et al., 1990) ont comparé un béton traditionnel fabriqué par des granulats naturels et un béton recyclé fabriqué par des granulats recyclés. Les chercheurs ont trouvé que les granulats recyclés avaient une même distribution granulaire en comparaison à celle

des granulats naturels. Par contre la densité sèche des granulats recyclés est faible et le coefficient d'absorption d'eau est élevé (5.76%) en comparaison avec les granulats naturels. Ils ont conclu aussi que la résistance varie avec la variation du rapport eau/ciment et du gravier/ciment figure 2.7, et que les granulats recyclés augmentent la demande en ciment de 8 à 13% selon la classe de béton figure 2.8.

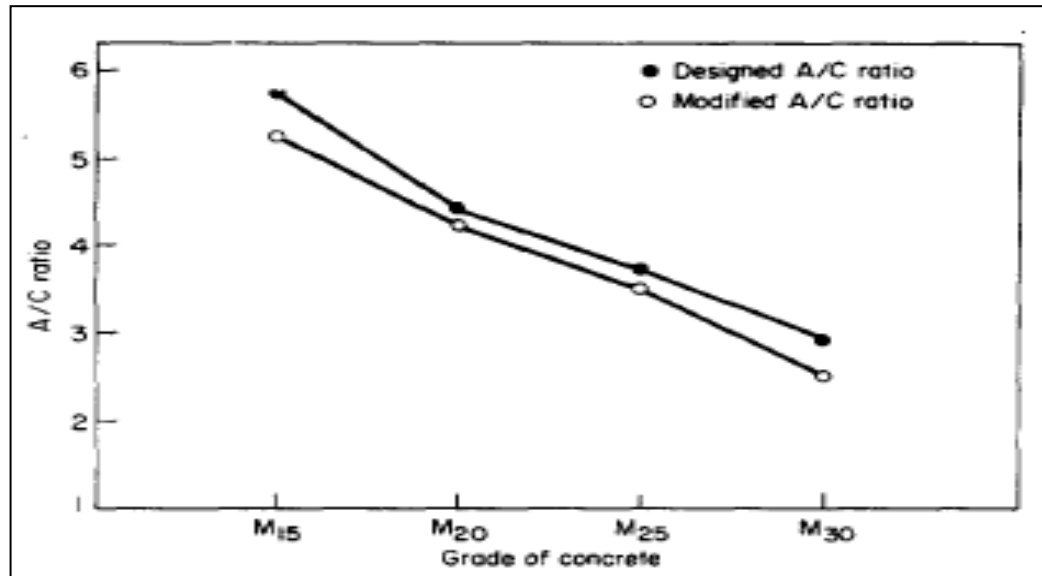


Figure 2.7. Relation entre G/C et la classe de béton pour un béton recyclé.

(Bairagi et al., 1990).

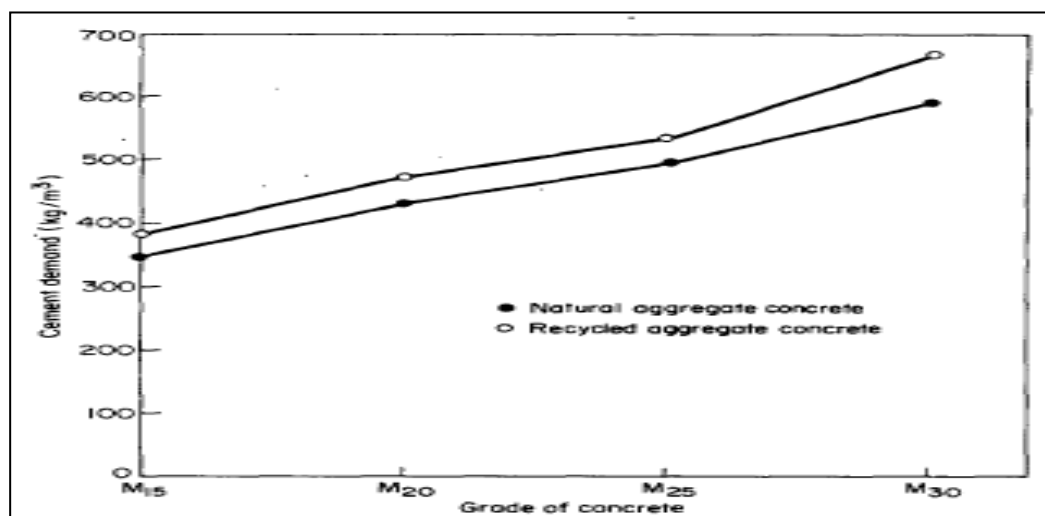


Figure 2.8. Relation entre la demande en ciment et la classe du béton.

(Bairagi et al., 1990).

Dans une autre étude, (Bairagi et al., 1993) ont étudié le comportement d'un béton contenant plusieurs proportions de granulats recyclés et naturels. Ils ont remplacé les granulats naturels par des granulats recyclés avec plusieurs proportions comprises entre 0 et 1 (0, 0.25, 0.5, 0.75, et 1) et avec des rapports E/C variants (0.57, 0.50, et 0.43). Ils ont trouvé que les granulats recyclés avaient une courbe granulométrique comparable à celle des granulats naturels. Ainsi les granulats recyclés ont des modules de finesse plus élevés et des résistances mécaniques faibles, d'une part, et d'autre part une faible densité, en comparaison à celle des granulats naturels

Ainsi, la résistance a diminué avec l'augmentation du taux de remplacement par les granulats recyclés figure 2.9. La relation contrainte-déformation a augmenté avec l'augmentation de la quantité des granulats recyclés, c'est-à-dire à la faible contrainte il y a une grande déformation en comparaison au témoin, cette augmentation provoque, donc, une réduction de module d'élasticité.

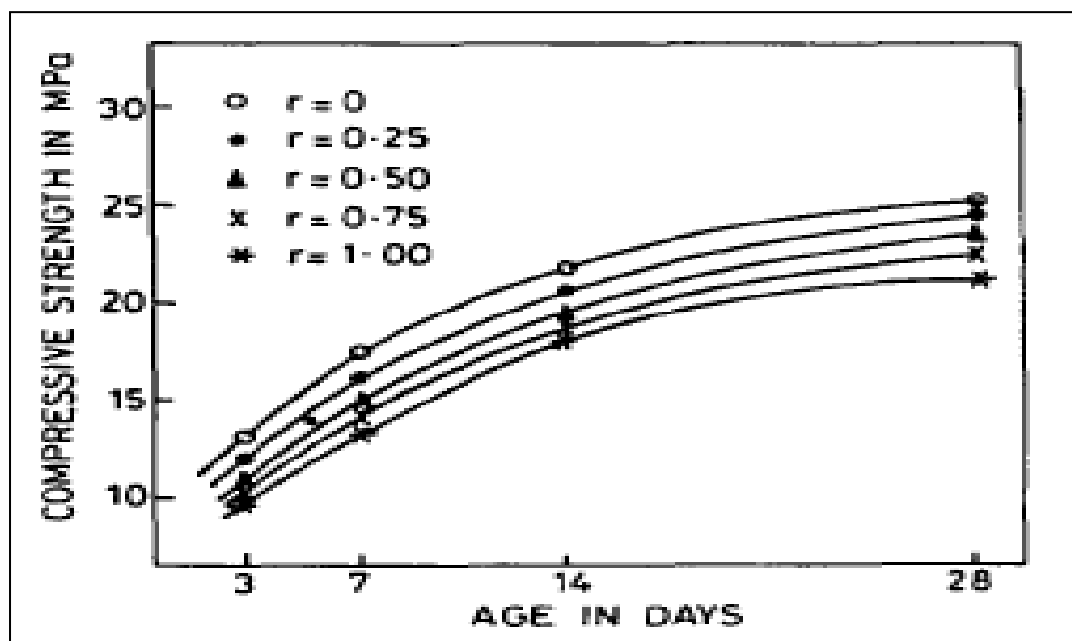


Figure 2.9. Développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge.

(Bairagi et al., 1993).

Les chercheurs ont observé qu'au taux de remplacement supérieur à (50%) provoque une réduction en propriétés mécaniques maximum et à 100% la réduction à la résistance devient 40%. (Bairagi et al., 1993) ont conclu qu'il est possible de substituer les granulats naturels par des granulats recyclés jusqu'à 50% sans perte des propriétés du béton à l'état frais ou à l'état durci.

(Evangelista et al., 1993) ont étudié le comportement mécanique d'un béton fabriqué par un sable recyclé. Ils ont fait des substitutions du sable naturel par un sable recyclé des proportions entre (0%, 10%, 20%, 30%, 50% et 100%). Ils ont trouvé que le rapport E/C a augmenté avec l'augmentation de la quantité de sable recyclé pour garder la même maniabilité du béton. Cette augmentation est due à la haute absorption d'eau de sable recyclé (13,1%) en comparaison à celle naturelle (0,8%). Ils ont aussi montré que la résistance à la compression du béton recyclé est faible par rapport au témoin d'une part, et d'autre part l'évolution de la résistance en fonction de l'âge reste croissante après 28 jours du béton contenant le sable recyclé. Cette augmentation est attribuée à l'hydratation de ciment non hydraté dans le sable recyclé, par contre la résistance du béton ordinaire est stable après le même âge figure 2.10.

La résistance à la traction par fendage a diminué aussi avec l'augmentation de la quantité de sable recyclé en raison de la structure poreuse de sable recyclé. Le module d'élasticité aussi présente une diminution significative lorsque le taux de remplacement est supérieur à 30% du sable naturel par un sable recyclé. L'étude a conclu qu'on peut remplacer le sable naturel par un sable recyclé jusqu'à un taux de 30% sans perdre les propriétés mécaniques du béton.

(Gonzalez et al., 2007) ont étudié le comportement d'un béton recyclé contenant des granulats recyclés et de la fumée de silice. Ils ont fait quatre (04) mélanges dont deux avec granulats naturels (dont un est un béton conventionnel (CCS) avec 8% de fumée de silice), et les deux autres mélanges avec 50% de substitution par des granulats recyclés (dont un béton à base de granulats recyclés (RCS) avec 8% de fumée de silice). Les résultats d'essai d'absorption d'eau du béton indiquent que le béton recyclé avait une forte absorption d'eau (6 à 7 %) en comparaison au témoin (5%). Ils ont constaté les mêmes résistances à la compression du béton naturel et recyclé sans la fumée de silice figure 2.11. Par contre, les autres bétons (contenant 8% de la fumée de silice) ont présenté des résistances élevées. Les résistances élevées sont dues à l'effet pouzzolanique de la fumée de silice qui provoque une amélioration de la résistance à long terme. Par contre en comparant les compositions avec

fumée de silice (8%) ; les auteurs ont remarqué une résistance supérieure dans le béton à base de granulats naturels que celle des granulats recyclés. Les résistances à la traction observées sont similaires pour toutes les compositions et Il a été conclu que la substitution par 8% de la fumée de silice n'avait pas un effet sur la résistance à la traction. Aussi le module d'élasticité du béton recyclé a diminué de l'ordre de 11.32% à 7 jours et de 17.60% à 28 jours en comparaison au témoin. Les auteurs ont conclu que la fumée de silice n'avait pas une influence sur le module d'élasticité.

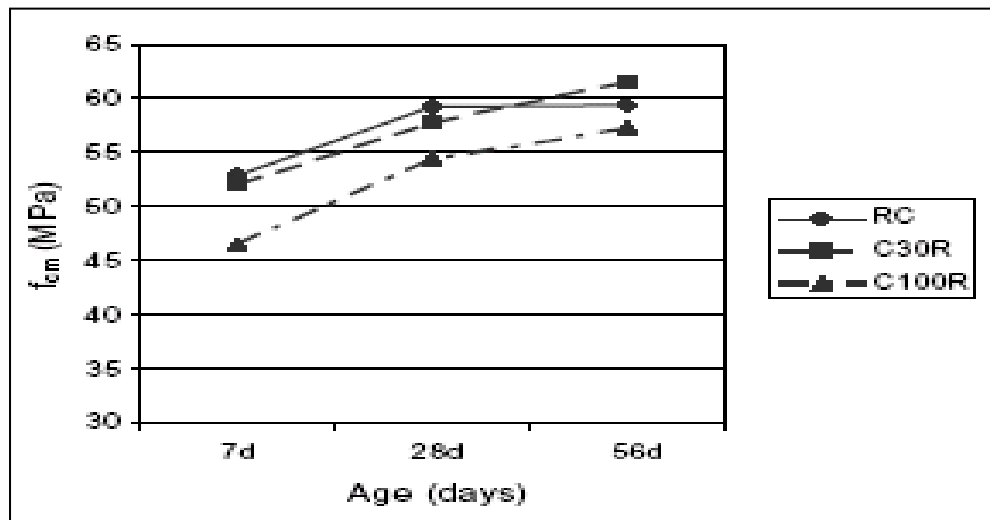


Figure 2.10. Variation de la résistance à la compression variation avec le taux de substitution du sable. (Evangelista et al., 1993).

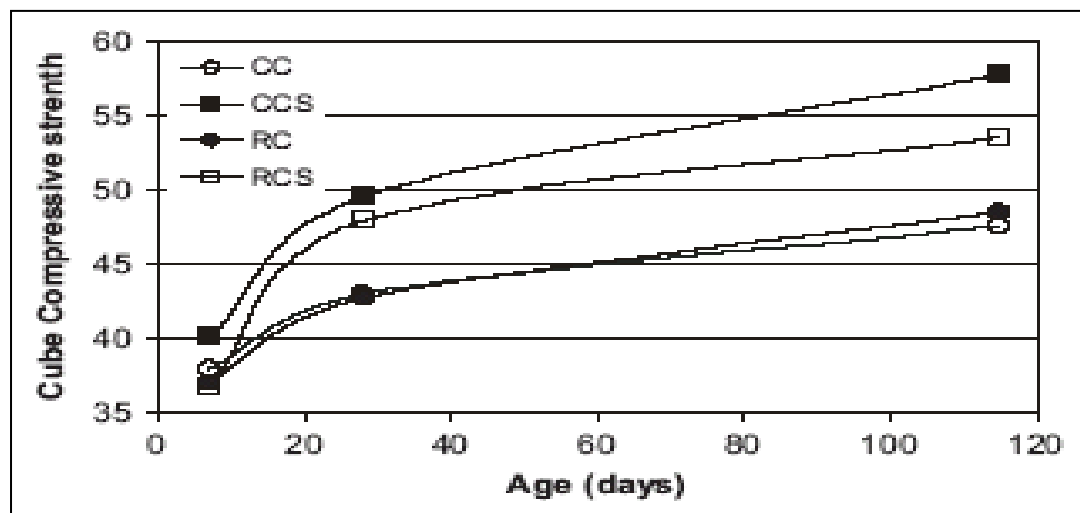


Figure 2.11. Développement de la résistance à la compression. (Gonzalez et al., 2007).

(Khatib, 2005) a étudié la substitution de sable naturel par un sable recyclé (CC) ou un sable de brique recyclé (CB) par des proportions suivantes : (0%, 25%, 50% et 100%). Il a constaté que la résistance a diminué avec l'augmentation de la quantité de sable recyclé ou de brique recyclée figure 2.12. Cette réduction a atteint 30% à 100% de substitution par sable recyclé, et à 25% de substitution la réduction atteint 15% seulement. Par contre, la substitution par le sable de brique recyclée ne cause pas une réduction substantielle à long terme (à un taux de 50%, la résistance est similaire au témoin, et à un taux de 100%, la réduction de la résistance devient 10% seulement).

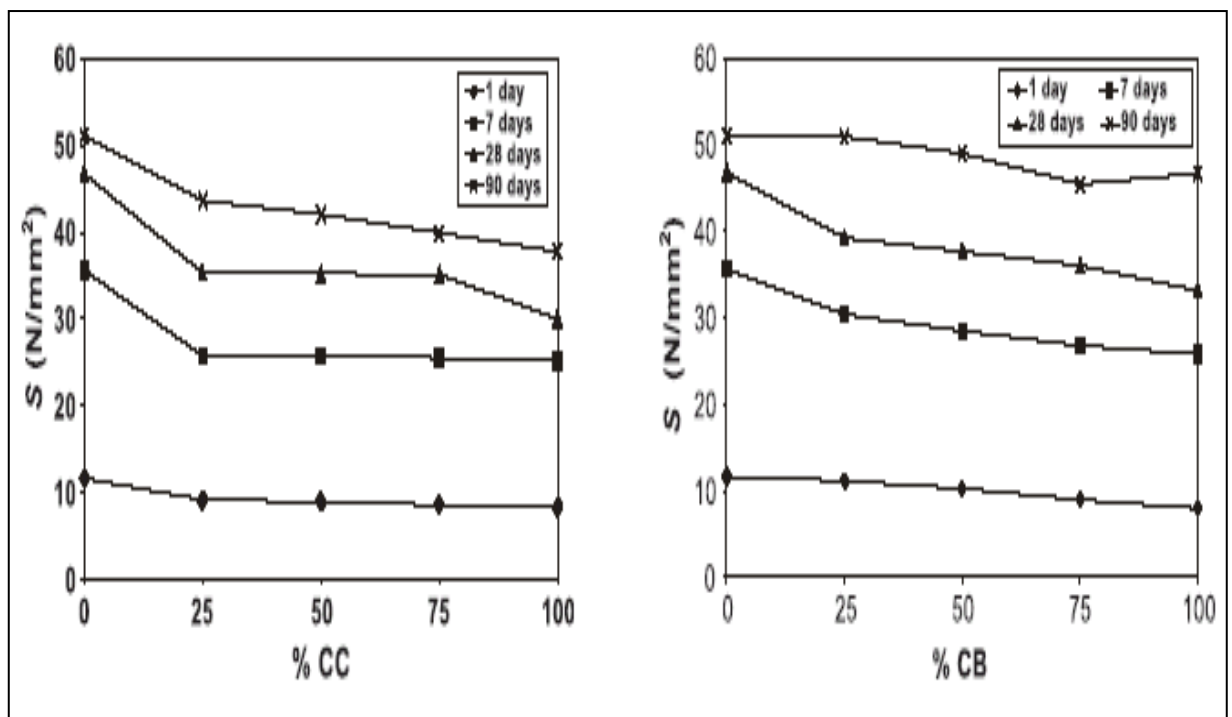


Figure 2.12. Effet du sable recyclé CC et du sable de brique CB sur la résistance à la compression. (Khatib, 2005).

(Kou et al., 2011), ont montré qu'un béton de granulats recyclés présente une résistance à la compression inférieure à celle d'un béton de granulats naturel et une résistance élevée à la traction, après 5 ans de cure dans l'eau. De 28 jours à 5 ans, l'augmentation de la résistance à la compression et à la traction pour le béton à base de granulats recyclés est supérieure à

celle du béton à base de granulats naturels. De plus, le béton préparé avec 100% de granulats de béton concassé a une faible porosité (une diminution de 45% entre 28 jours et 5 ans).

2.8.1. Le retrait

(Khatib, 2005) a étudié aussi le retrait, il a trouvé une augmentation de retrait dans les compositions qui contiennent le sable recyclé et de brique recyclée, ainsi le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage du sable recyclé. Par contre, le retrait du béton fabriqué par le sable de brique recyclé augmente lorsque la quantité du sable est faible.

(Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007) ont trouvé que la résistance à la compression du béton avec agrégats recyclés (RAC) /agrégats naturels (NAC) était similaire. Cependant, (Arora et Singh, 2016) ont observé que Le remplacement de 50% des agrégats naturels a conduit à une résistance de compression plus élevée que le béton ordinaire.

(Kenai et Debieb, 2011) ont trouvé que l'étude de l'influence des granulats recyclés sur le retrait a mis en évidence le retrait élevé à jeune âge lorsque la résistance à la traction est faible et le risque de fissuration est important.

(Malesev et al., 2010) ont constaté que le retrait augmente de manière significative pour un taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés supérieur à 50%.

(Kou et Poon, 2009) ont constaté que le retrait de séchage du BAP avec des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité des fines recyclées mais il peut être contrôlé par l'utilisation d'un rapport E/L faible figures (2.13 à 2.15).

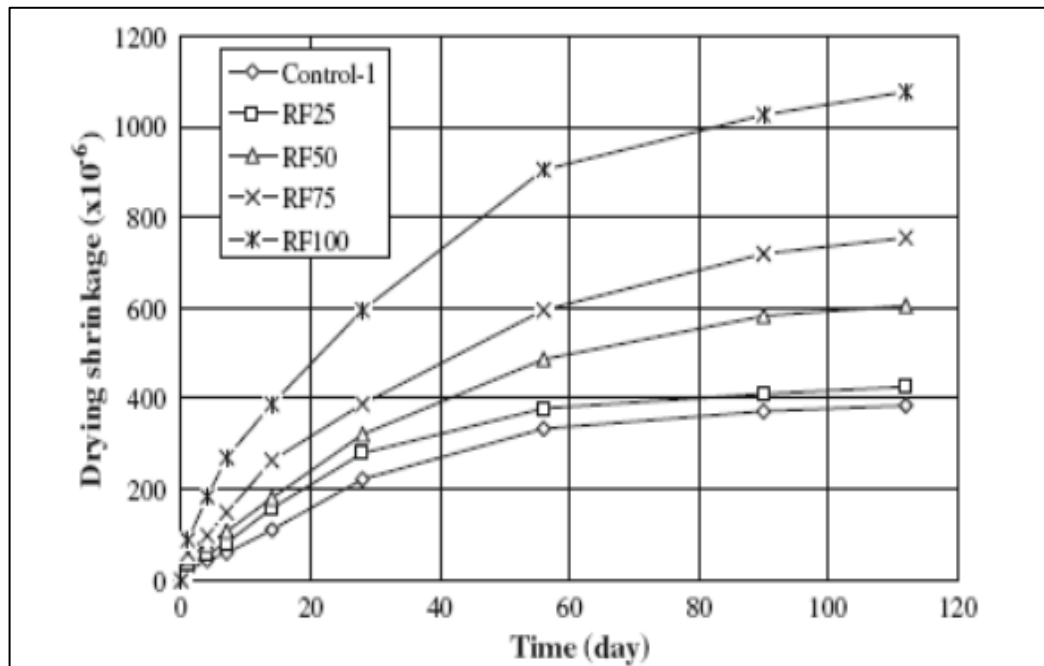


Figure 2.13 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,53. (Kou et Poon, 2009).

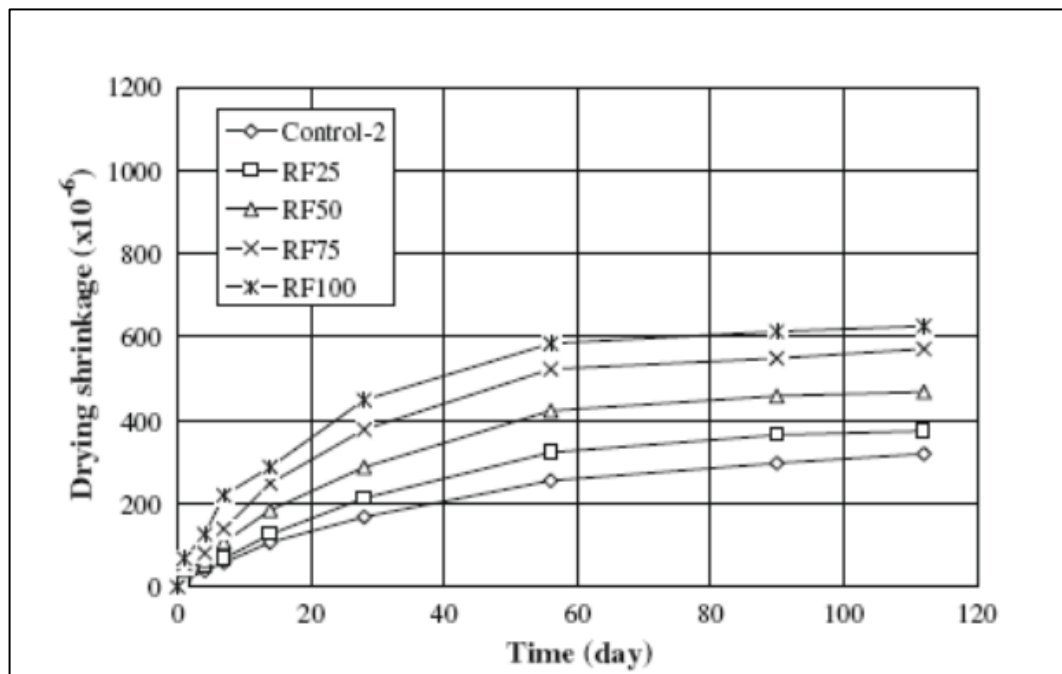


Figure 2.14 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,44. (Kou et Poon, 2009).

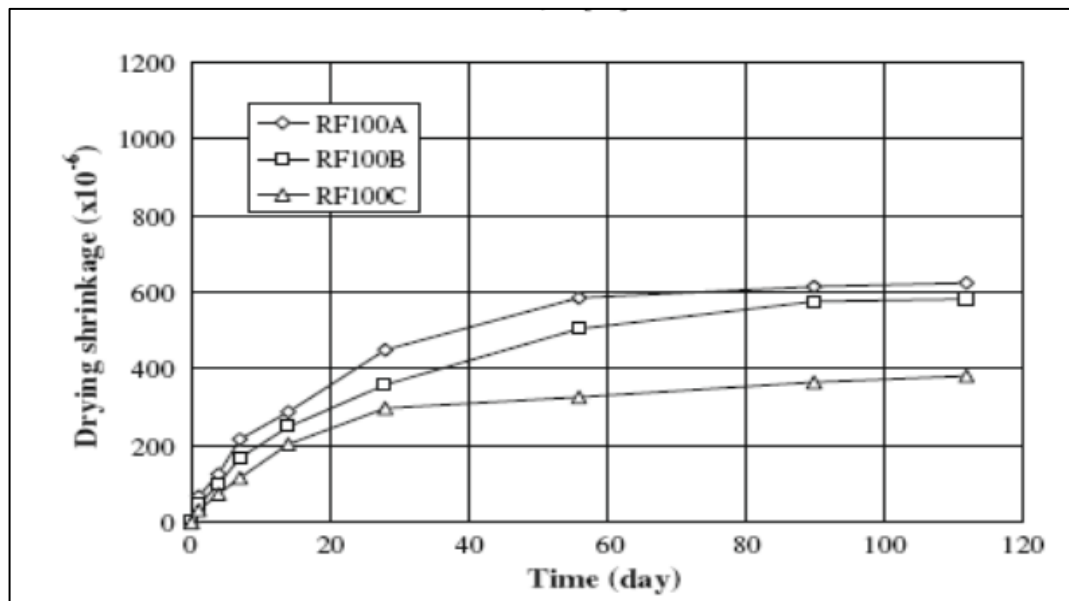


Figure 2.15 : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport E/L (A=0,44, B=0,40 et C=0,35). (Kou et Poon, 2009).

(Turcry, 2004) a trouvé que l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires figure 2.16.

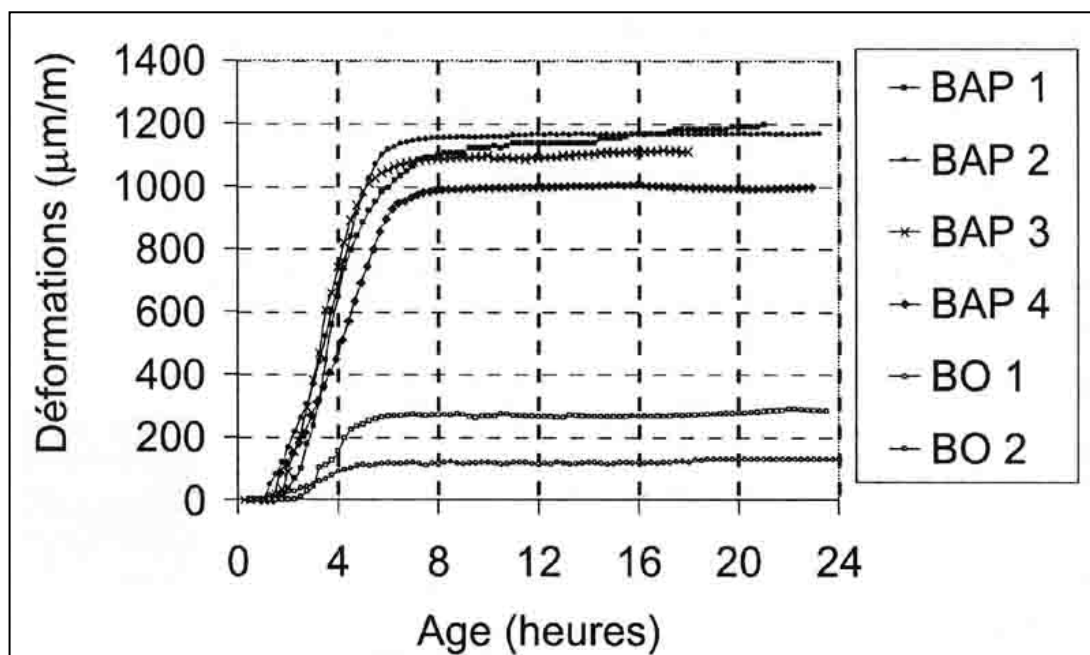


Figure 2.16 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires. (Turcry, 2004).

(Lee et al., 2006) ont trouvé que le retrait endogène est plus important dans les BAP que dans les bétons ordinaires, en raison du retrait chimique élevé ainsi qu'aux fines pores dans les bétons au laitier.

(Van et Montgomery, 1999) ont remarqué que le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquate.

2.9. Performance du béton autoplaçant à base de granulats recyclés

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton présentant une composition similaire au béton ordinaire mais avec des adjuvants superplastifiants et des ajouts cimentaires et par conséquent un volume plus important de pâte. Il est mis en œuvre sans vibration et donc exige une fluidité importante sans risque de ségrégation. Son utilisation présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction.

(Grdic et al., 2010) ont trouvé que l'étalement des BAP avec 50 et 100% granulats recyclés (gravier) est très comparable à l'étalement du BAP à base de granulats naturels.

(Cartixo et al., 2015) ont trouvé que l'incorporation de granulats fins recyclés jusqu'à 100% exige d'augmenter de 16.3% le rapport Eau/ciment (E/C) pour la même valeur d'affaissement. La densité apparente fraîche a diminué jusqu'à 3,7%.

(Guneyisi et al., 2016) a trouvé que la densité fraîche des mélanges BAP diminue graduellement en fonction des taux croissants de substitution granulats recyclés fins (FRCA) et grossiers (CRCA). Le niveau de substitution de gros granulats à 50% augmente les l'affaissement tandis que l'utilisation d'un taux plus élevée donne moins d'augmentation de l'affaissement en raison de la forme plus angulaire des gros granulats recyclés.

(Carro-Lopez et al., 2015) ont réalisé des essais (étalement, L-Box et J-Ring) à l'état frais à 15, 45 et 90 min après le mélange. Ils ont trouvé que Les mélanges avec 100% d'incorporation de sable recyclé ont totalement perdu leurs caractéristiques BAP à 90 min et cette perte de capacité de passage et de remplissage s'est également produite en partie à 45

min. Dans le mélange de sable recyclé à 50%, l'effet n'était pas si sévère mais la perte de propriétés était fortement perceptible après 45 min. Ce changement radical de propriétés est produit par l'absorption très élevée du sable recyclé qui retire l'eau de la pâte à tel point qu'elle change la rhéologie du béton en un béton vibré.

(Kanish Kapoor et al., 2016) ont montré que la résistance à la compression de 28 jours a diminué de 13% lorsque tous les granulats naturels ont été substitués par des granulats recyclés. Cependant, lorsque la fumée de silice (FS) ou le méta kaolin (MK) ont été ajoutés à 10% en poids du ciment aux BAP à base de granulats recyclés, la diminution de la résistance a été réduite à 8% et 3% respectivement.

(Kenai et al., 2014) ont trouvé que la substitution de 50% ou 100% d'agrégats naturels par des granulats de béton recyclés donne des BAP avec des propriétés rhéologiques très comparables à celles du BAP de référence, et que La viscosité plastique du mélange BAP diminue avec l'augmentation du niveau de substitution d'agrégats naturels à 100% d'agrégats recyclés, tan disque la capacité de passage par le l'essai boîte en L est meilleure pour le béton de granulats recyclés que pour le béton de granulats naturels.

(Grdic et al., 2010) ont trouvé que la résistance à la pénétration de chlorure d'un BAP basé sur des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés.

(Boudali et al., 2016) ont constaté que les mélanges incorporant l'agrégat recyclé et les fines recyclés du béton présentaient de meilleures performances que le mélange avec l'agrégat naturel et la pouzzolane dans des conditions environnementales cycliques combinées à l'exposition au sulfate de sodium.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

ET

FORMULATIONS ADOPTÉES

CHAPITRE 3

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATIONS ADOPTÉES.

3.1. Généralités

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux et des méthodes de formulation adoptées pour la réalisation des différents essais expérimentaux. Il est divisé en deux parties la première partie s'intéresse à l'explication des différents matériaux qui ont été utilisés ainsi que leurs caractéristiques. Dans la deuxième partie, on exposera la formulation qui a été choisie pour réaliser les différents essais soit pour le mortier ou pour le béton.

3.2. Caractéristiques des matériaux

3.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé est du type CEM II/A-L42.5R, avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa., une masse spécifique de 3.12 g/cm³ et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3000 cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 3.1, les figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement une Photo MEB et le Spectre DRX du ciment utilisé.

Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment

Composé (%)	Cao	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Ciment	63.6	20.5	5.8	2.6	0.9	0.4	0.9	3.3	--
	C ₃ S		C ₂ S			C ₃ A		C ₄ AF	
	60.4		13.2			11		7.9	

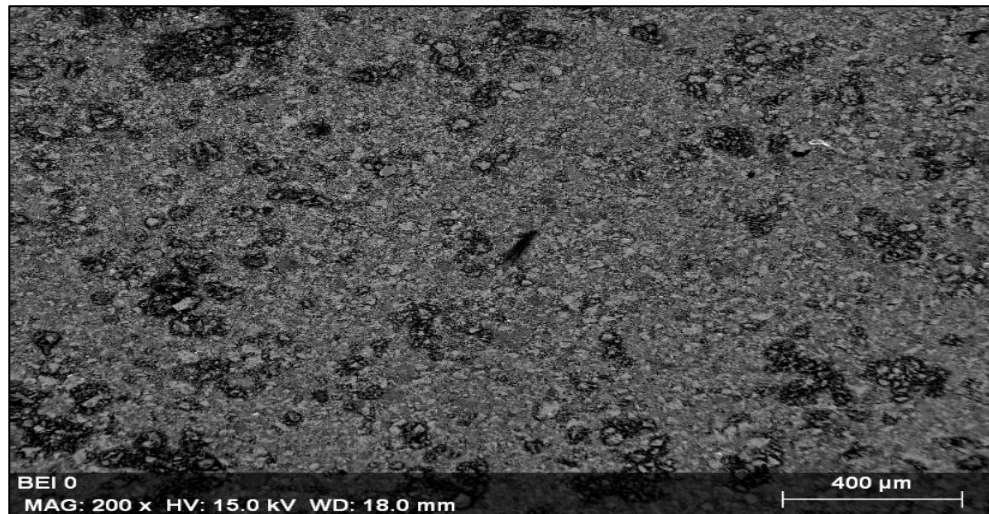


Figure 3.1 : Photo MEB du ciment.

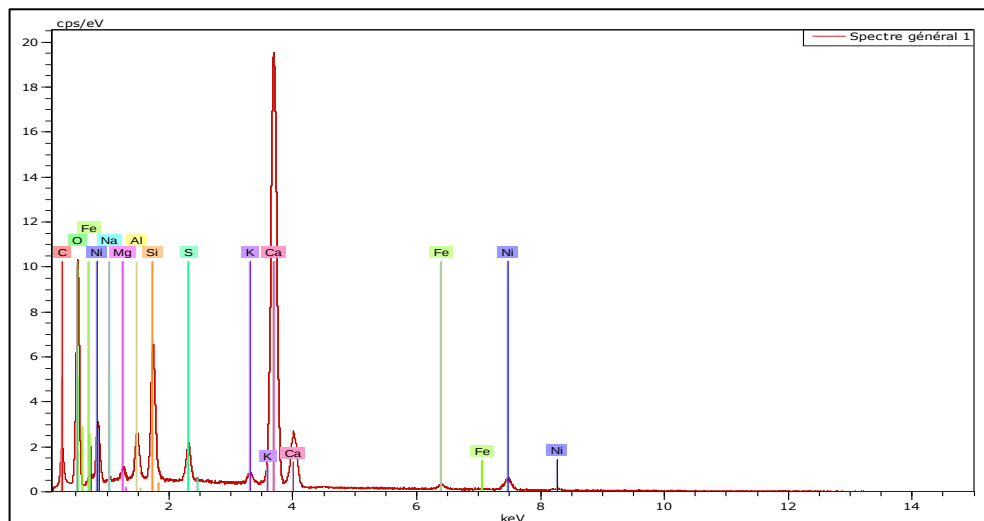


Figure 3.2 : Spectre DRX du ciment.

3.2.2. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle (PN) utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Beni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre, résultante de concassage des scories pouzzolaniques après étuvage pendant 24 heures à une température de 105°C afin d'éliminer leur humidité, suivi un broyage jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80 µm, figures 3.3 et 3.4.



Figure 3.3 : Scories de la PN
avant broyage.



Figure 3.4 : Poudre de la PN
après broyage.

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau 3.2. La photo MEB de la pouzzolane naturelle est présentée dans la figure 3.5.

La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle est : $\rho = 2,45 \text{ g/cm}^3$

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle est : $\text{SSB} = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$

Tableau 3.2 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	Perte au feu
43	19	9.5	4	3.0	1.4	--	12.4	6.5

3.2.3. Granulats (sable et Gravier)

Le sable utilisé est le sable d'oued Mzy (Laghouat), pour le BAP à base d'agrégats naturels. Pour le BAP à base d'agrégats recyclés, on a utilisé un sable (0/5) et des granulats (3/8 et 8/15) à partir de concassage des blocs de béton selon la procédure de la figure 3.6.

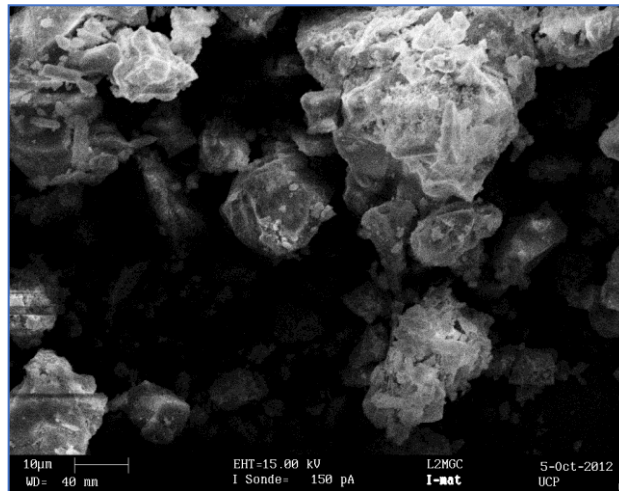


Figure 3.5: Photo MEB de la pouzzolane naturelle.

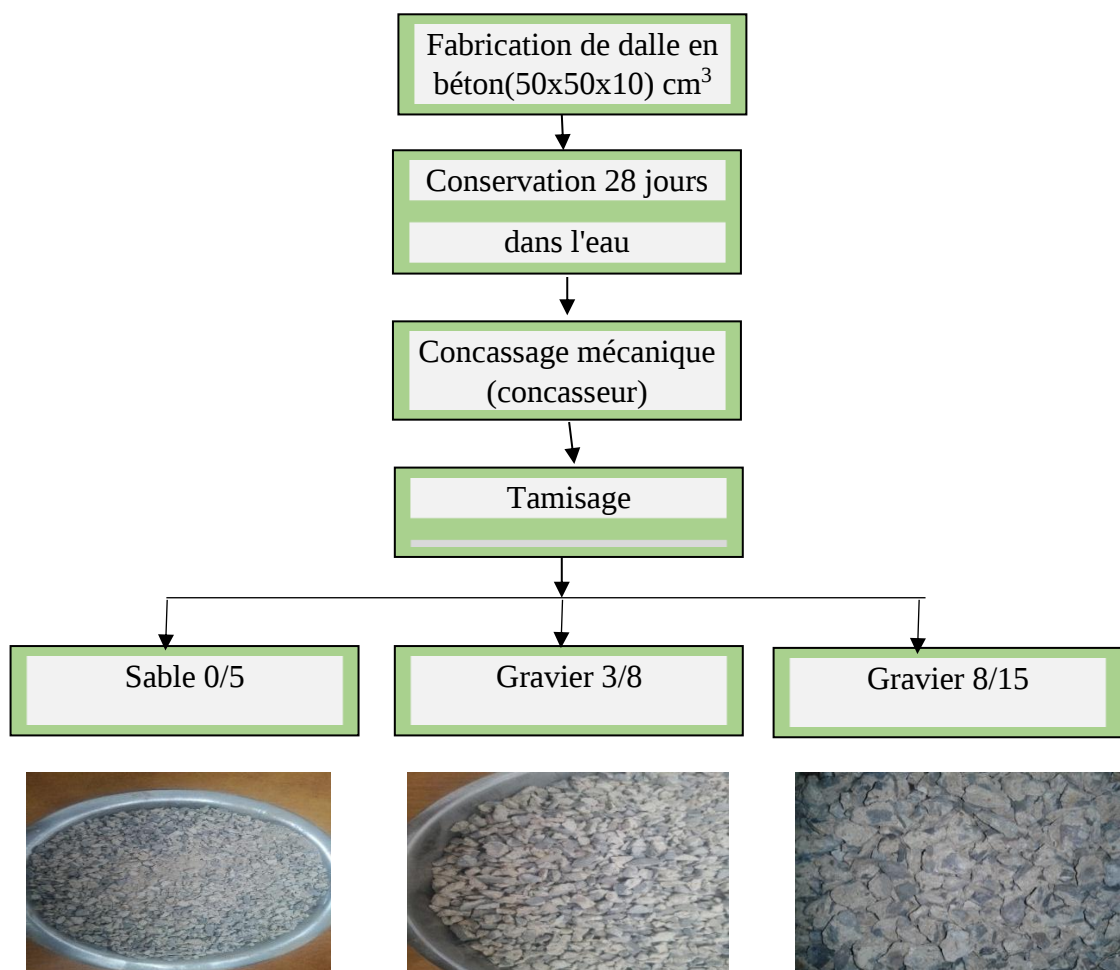


Figure 3.6 : Procédure de fabrication de sable et granulats recyclés.

Les caractéristiques physiques des granulats utilisés sont illustrées dans les tableau 3.3, et les courbes granulométriques des différents types de sables et graviers sont présentés aux figures 3.7 et 3.8.

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

	Sable (0/5)		Gravillon (3/8)		Gravillon (8/15)	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
Masse volumique des grains [kg/m^3]	2,63	2,42	2,64	2,43	2,66	2,45
Masse volumique apparente [kg/m^3]	1,54	1,21	1,23	1,20	1,40	1,23
Équivalent de sable ES (%)	89	86	-	-	-	-
Ab (%)	0.65	9.07	1.6	6.8	1.58	6.5

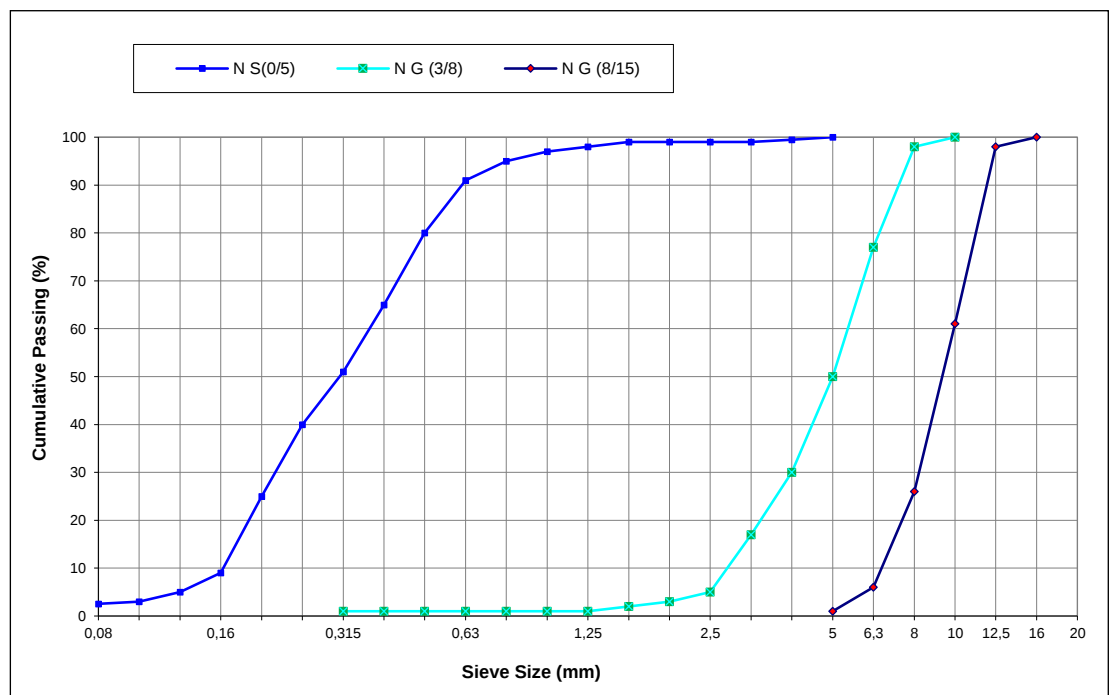


Figure 3.7 : Courbes granulométriques des sables naturels et des graviers naturels.

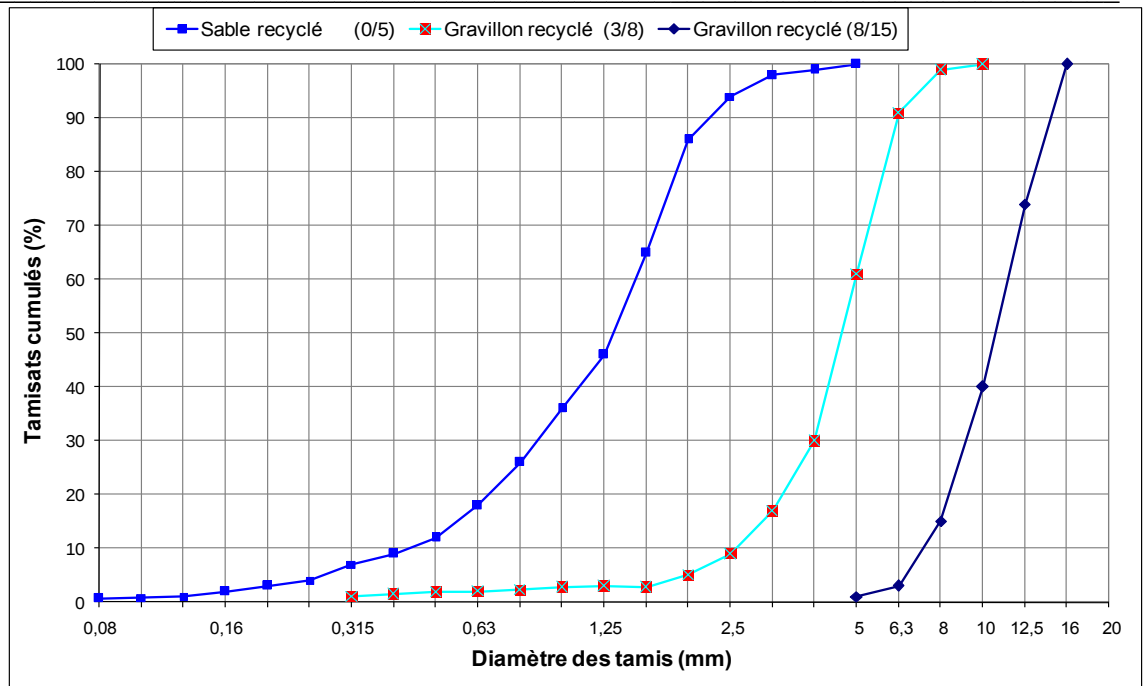


Figure 3.8: Courbes granulométriques des sables recyclés et des graviers recyclés.

Les modules de finesses des deux sables suivant le (*Norme EN 933-1*) sont :

$Mf_{sn} = 1.52$ et $Mf_{sr} = 3.34$.

Les figures 3.9 et 3.10 présentent une comparaison entre les masses volumiques apparentes et absolues des granulats naturels et recyclés. On remarque une chute de la masse pour les trois fractions granulaires. Cette diminution est peut-être due à la faible densité de la pâte d'ancien mortier recouvrant les granulats recyclés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs (Debieb, 2007 ; Gasti 2010 ; Pani et al., 2011).

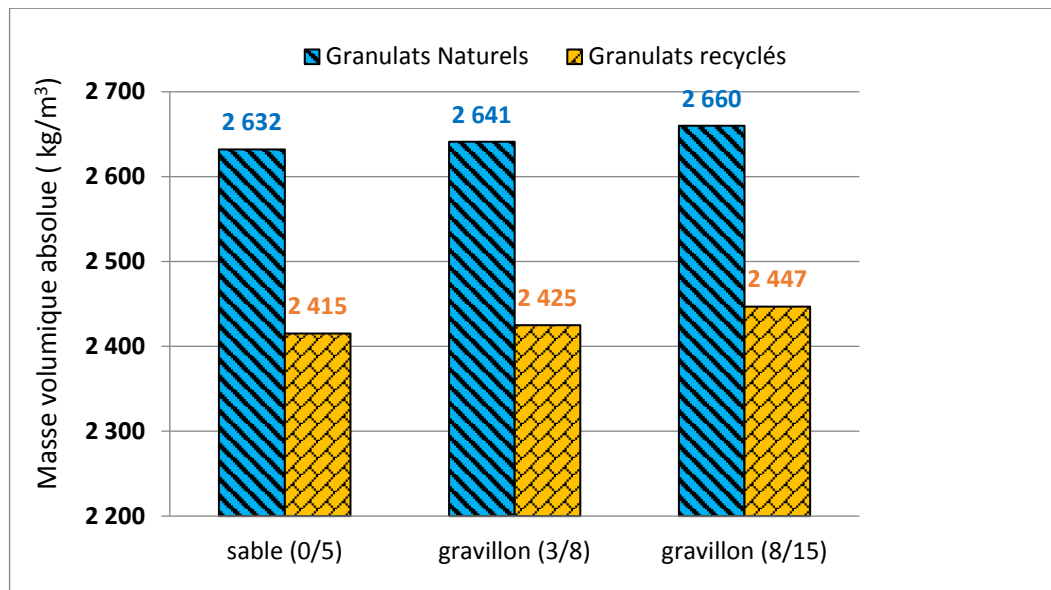


Figure 3.9 : Comparaison entre la Mv absolue des granulats naturels et recyclés.

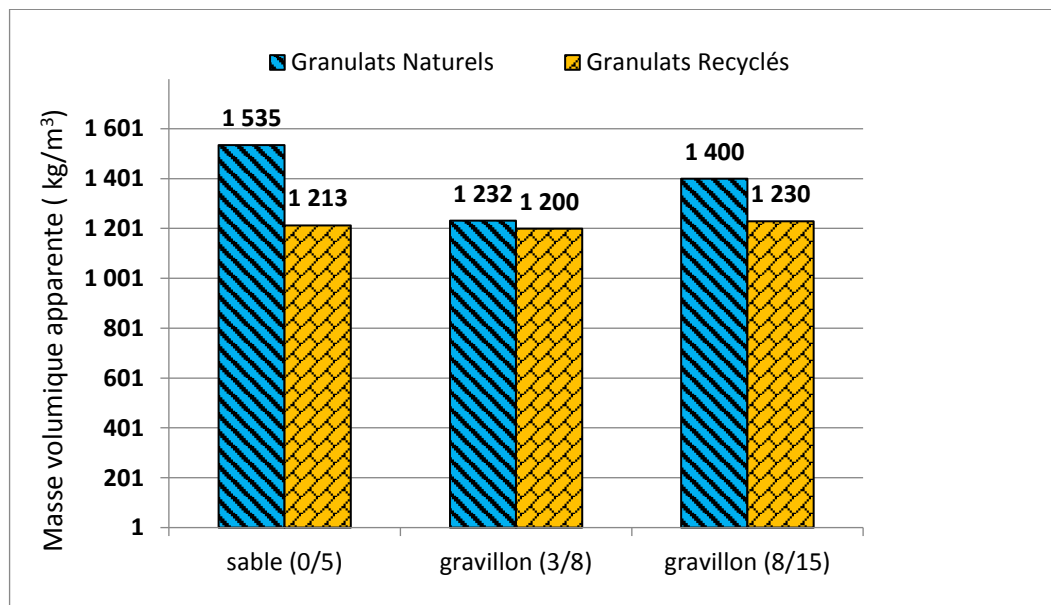


Figure 3.10 : Comparaison entre la Mv apparente des granulats naturels et recyclés.

Le coefficient d'absorption d'eau (A_b) est un paramètre important. La figure 3.11 montre un coefficient d'absorption d'eau plus élevé pour les granulats recyclés que les granulats naturels. Cette remarque a été observée par d'autres chercheurs (Debieb, 2007 ; Hachana et al., 2008 ; Tu et al., 2006).

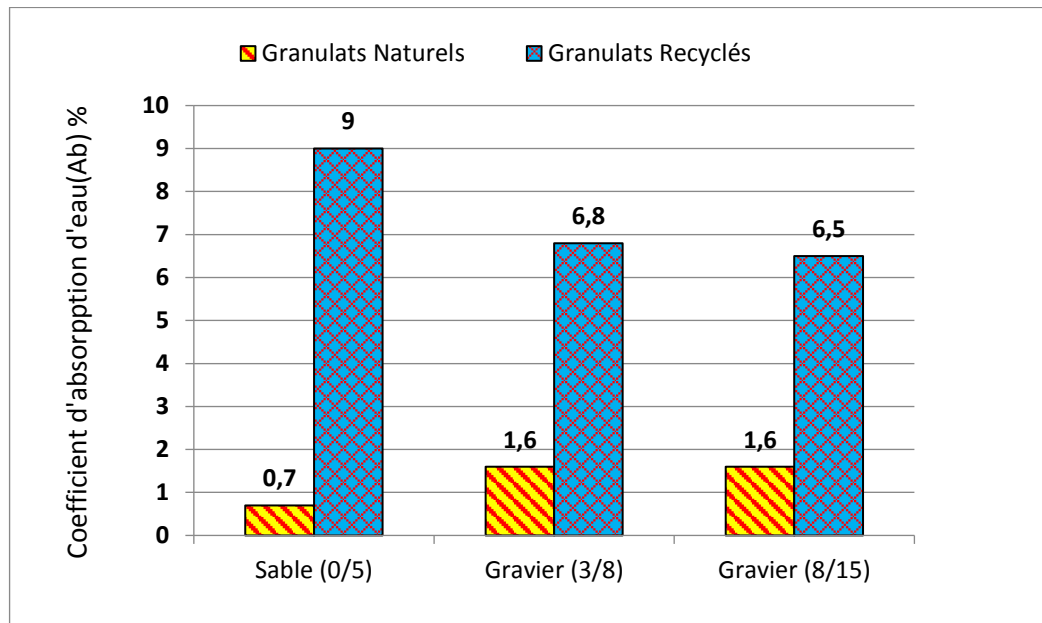


Figure 3.11 : Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau (Ab) des granulats recyclés et naturels.

L'inspection visuelle des granulats a révélé leur plus grande angularité, rugosité et porosité des granulats recyclés comparé aux granulats naturels figure.3.12. En outre, la dureté de surface des granulats recyclés était inférieure à celle des granulats naturels en raison de l'état poreux du mortier collé qui recouvrent les granulats recyclés. La densité des agrégats naturels est supérieure à celle des granulats recyclés et les granulats recyclés ont une plus grande valeur d'absorption d'eau par rapport aux granulats naturels. La présence de vieux mortier collé et pâte de ciment dont la porosité à l'eau est supérieure à celui des granulats naturels induit une plus grande quantité d'absorption d'eau pour les granulats recyclés. En conséquence, un mélange approprié est nécessaire pour obtenir des granulats recyclés satisfaisant aux conditions souhaitées (Okamura et Ouchi, 1999 ; Bairagi et al., 1990).



Granulat de béton recyclé

(Angularité, rugosité et porosité :
relativement élevée).

Granulats naturels

(Angularité, Rugosité et porosité :
relativement faible).

Figure.312. Apparences visuelles des granulats de béton recyclé et des granulats naturels.

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation du béton est l'eau de robinet de laboratoire.

3.2.5. Super plastifiant

Le super plastifiant utilisé est un MEDAFLOW 30 à base de polycarboxylates d'Ether conforme à la norme (EN 934-2). Il est un haut réducteur d'eau de la troisième génération. Les caractéristiques de ce super plastifiant sont données par le tableau 3.4

Tableau 3.4 : Caractéristiques du super plastifiant

Masse volumique	1100 kg/m ³
PH	6- 6.5
Teneur en chlore	< 0,1 g/l
Pourcentage d'extrait sec en masse	30 %
Plage du dosage recommandée	0.5 à 2.0 %

3.3. Formulations adoptées

La détermination de la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée est très importante pour la formulation, afin d'obtenir un béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant.

On note bien qu'il faut connaître le comportement à l'état frais à partir des tests mis en place depuis son développement lors de la formulation, parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais tel que : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. En effet, le risque de blocage peut être réduit en optimisant les mélanges avec une viscosité adéquate. Ceci permet d'assurer une bonne suspension aux particules solides durant l'écoulement. Cela peut se faire en réduisant le rapport eau/ pâte et/ou en incorporant un dosage adéquat en super plastifiant. Selon (Khatat, 1999), le BAP doit assurer le compromis entre deux propriétés tout fait contradictoires : une haute fluidité et une haute stabilité. Un BAP assure en effet, un remplissage complet des coffrages même quand l'accès est gêné par des vides étroits entre les barres d'armatures ou dans des coffrages ayant des formes complexes.

En vue d'appréhender l'influence des agrégats recyclés et du pozzolane naturelle, comme ajout minéral, sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et sur la durabilité des bétons autoplacants, on a fixé tous les autres paramètres, tel que la quantité de sable dans le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant et le pourcentage en super plastifiant.

La méthode Japonaise de (Okamura et Ouchi, 2003) dite méthode générale a été adopté avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport super plastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs acceptables de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel.

3.3.1. Formulation du mortier

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant sont une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique, tandis qu'une quantité supplémentaire d'eau peut diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Selon (Domone et Jin, 1999) des essais sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement (EFNARC, 2005).

Pour la formulation du mortier autoplaçant, on s'est basé sur la méthode Okamura avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport Eau/Liant (E/L) et le rapport

Superplastifiant/Liant (Sp/L) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 12 \text{ secs}$ (EFNARC, 2005). Il faut noter ici que le mélange de mortier ne comportera pas de pozzolane naturelle.

3.3.1.1. Rapport eau/liant (E/L)

Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,42.

3.3.1.2. Rapport sable/mortier (S/M)

Après plusieurs tentatives pour trouver la composition optimale pour les rapports (S/M) (Sable/Mortier) on a fixé le rapport S/M à 0,50.

3.3.1.3. Variation du rapport superplastifiant/liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiants sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel), en fonction du dosage en super plastifiants Sp/L variant de 0.6% à 1.8%.

3.3.2. Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à (l'annexe A).

Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de (Domone et Jin, 1999). La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier.

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

3.3.3. Formulation du BAP de référence

On cherchera le BAP de référence (0% pouzzolane naturelle) en se basant sur les résultats des essais sur mortier, si nécessaire les rapports surtout E/L et Sp/L seront ajustés afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. Une fois que les rapports seront déterminés, on procèdera aux différents essais sur béton frais et sur béton durci. Pour la confection du béton autoplaçant, les proportions du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition du béton donné à (l'annexe B).

Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence par substituer une partie du ciment par du pozzolane naturelle et on procèdera à tous les essais sur béton frais.

3.4. Confection des bétons autoplaçants

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à obtenir un béton performant et durable. Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 40 litres. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par (Domone et Jin, 1999).

- Malaxer le sable, ciment et gravier pendant 30 secondes puis on ajoute pendant 1 minute la première quantité d'eau ($Eau1 = 70\% \text{ Eau}$) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ($Eau2 = 30\% \text{ Eau}$) ;
- Malaxer pendant 5 minutes puis on laisse le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le re-malaxage il se fait juste avant chaque essai.

Après avoir obtenu le BAP de référence, on procèdera à la substitution du ciment par du pozzolane naturelle à différents pourcentages, nous avons décidé de limiter les pourcentages du pozzolane naturelle utilisé dans notre étude à 5, 10, 15, 20 et 25%. En plus du BAP de référence à base des constituants naturels, nous avons effectué les mêmes étapes pour le BAP à base des agrégats recyclés. Ce dernier était choisi parmi trois formulations (BAP 100%, BAP 75% et BAP 50% granulats recyclés).

CHAPITRE 4

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 4

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente la procédure expérimentale et les essais réalisées. Ces essais ont été réalisés aux laboratoires de Géo matériaux de l'université de Laghouat ainsi que le laboratoire de Béton de l'Université de Djelfa.

4.2. Essais relatifs au mortier à l'état frais

4.2.1. Essai d'étalement au mini-cône selon (EFNARC, 2005)

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier auto plaçant (MAP) est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. La figure 4.1 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

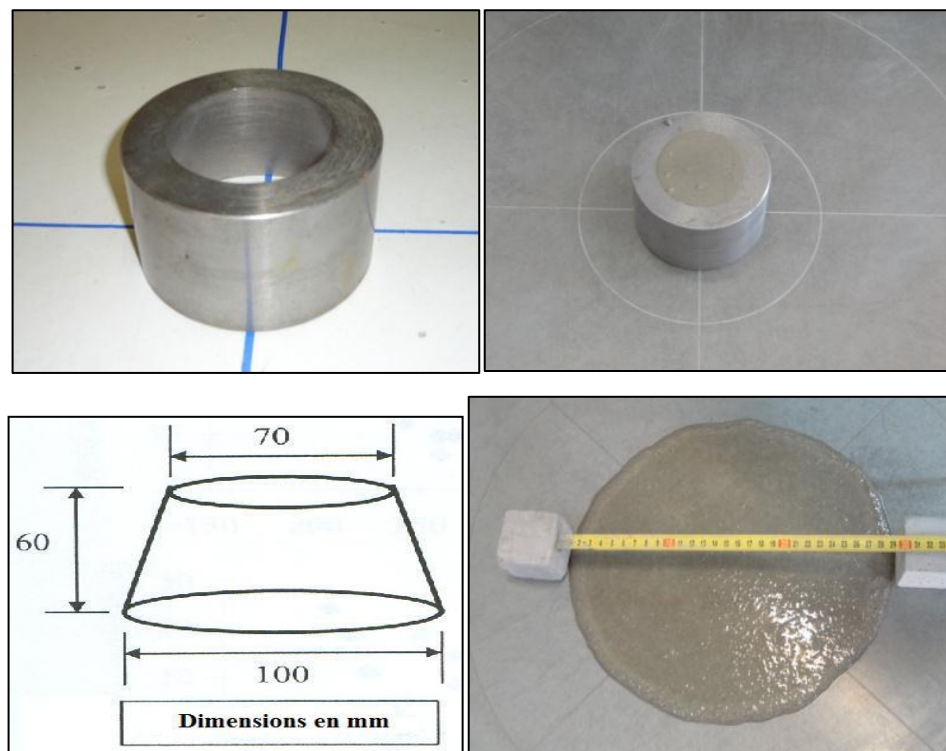


Figure 4.1 : Essai d'étalement pour mortier (MAP).

4.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) selon (EFNARC, 2005)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel test), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier (MAP), et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir figure 4.2.

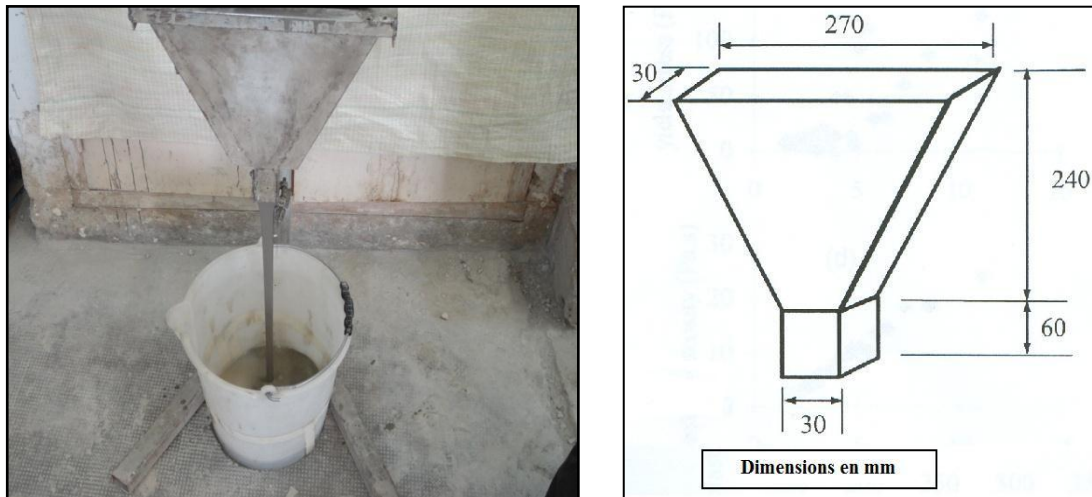


Figure 4.2 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier (MAP).

(Nawa et al., 1998) ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Tan disque (Chai, 1998) a travaillé avec des matériaux Anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s.

4.3. Essais relatifs au BAP à l'état frais

4.3.1. Essai d'étalement (Flow test) selon (EFNARC, 2005)

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 200 mm et le diamètre de base supérieur est de 100 mm. Il a une hauteur de 300 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplacants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ces bétons sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai

reste cependant le même. On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue figure 4.3. Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 1 minute après soulèvement du cône.

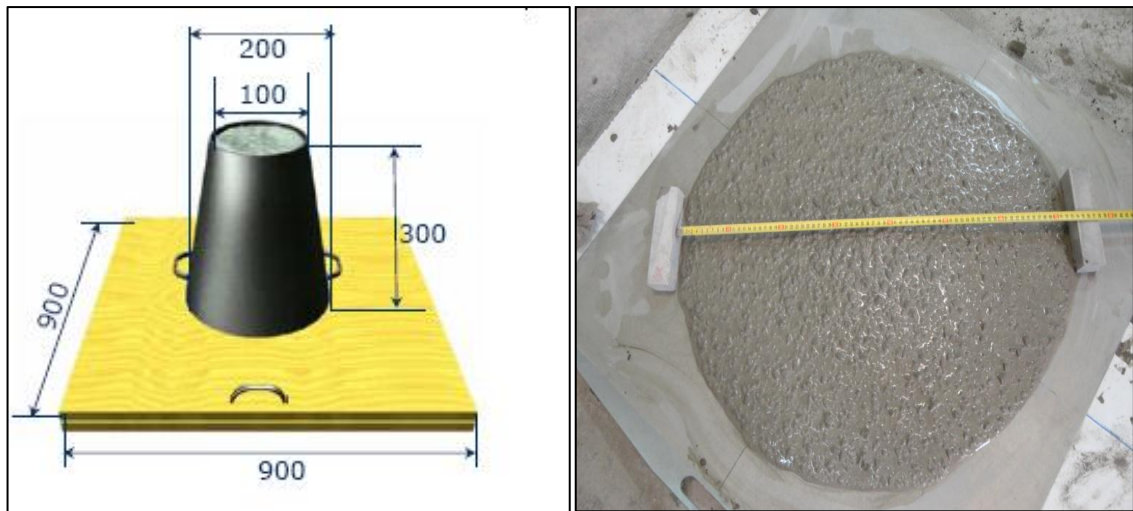


Figure 4.3 : Mesure du diamètre d'étalement.

Selon (EFNARC, 2005), la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le tableau 4.1 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP. La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats ($D_{\max} < 16$ mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler. Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais une attention particulière doit être portée quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm. Avec le même essai, on mesurera le temps d'écoulement T_{50} , qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce temps d'écoulement T_{50} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange (EFNARC, 2005).

Tableau 4.1 : Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation selon (EFNARC, 2005)

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 – 650	• Structures non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les Dalles) • Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) • Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660 – 750	• La majorité des applications
SF3	760 – 850	• Applications verticales • Structures trop ferrillées • Coulage à partir du dessous du coffrage • Structures de forme complexe

4.3.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) selon (EFNARC, 2002)

L'essai de l'entonnoir mis en place par (Okamura et Ozawa, 1995), permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en secondes). On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V voire figure 4.4, nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important (Sonebi et Bartos, 2002).

Selon (EFNARC, 2002). Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Il recommande un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

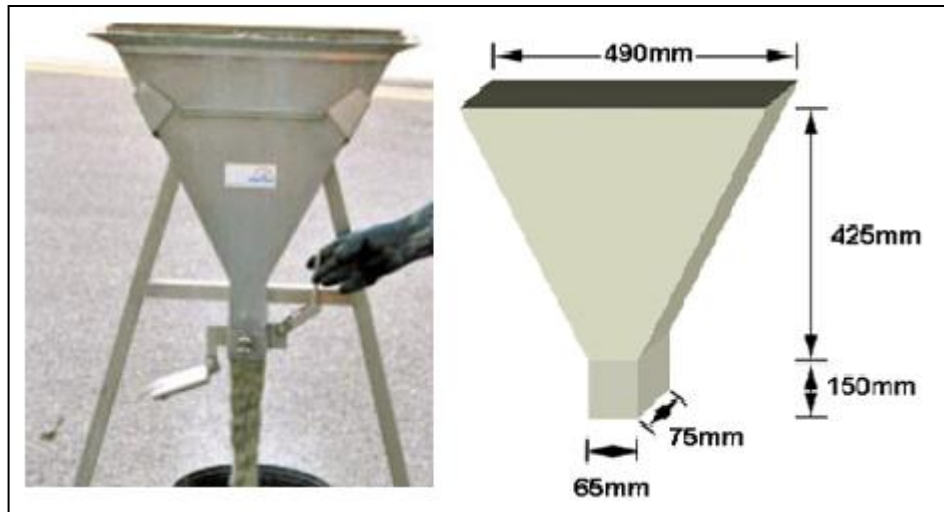


Figure 4.4 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

4.3.3. Essai à la couronne J (J-Ring test) selon (AFGC, 2002)

L'essai à la couronne J (J-ring test) est utilisé pour étudier la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il permet aussi d'étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage (AFGC, 2002).

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage figure 4.5. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

On mesurera en premier lieu le plus grand diamètre de la galette du BAP d_{max} figure 4.6, puis le diamètre perpendiculaire d_{perp} , puis on calculera l'étalement à partir de la formule suivante :

$$S_J = \frac{(d_{\max} + d_{\text{perp}})}{2} \quad (4.1)$$

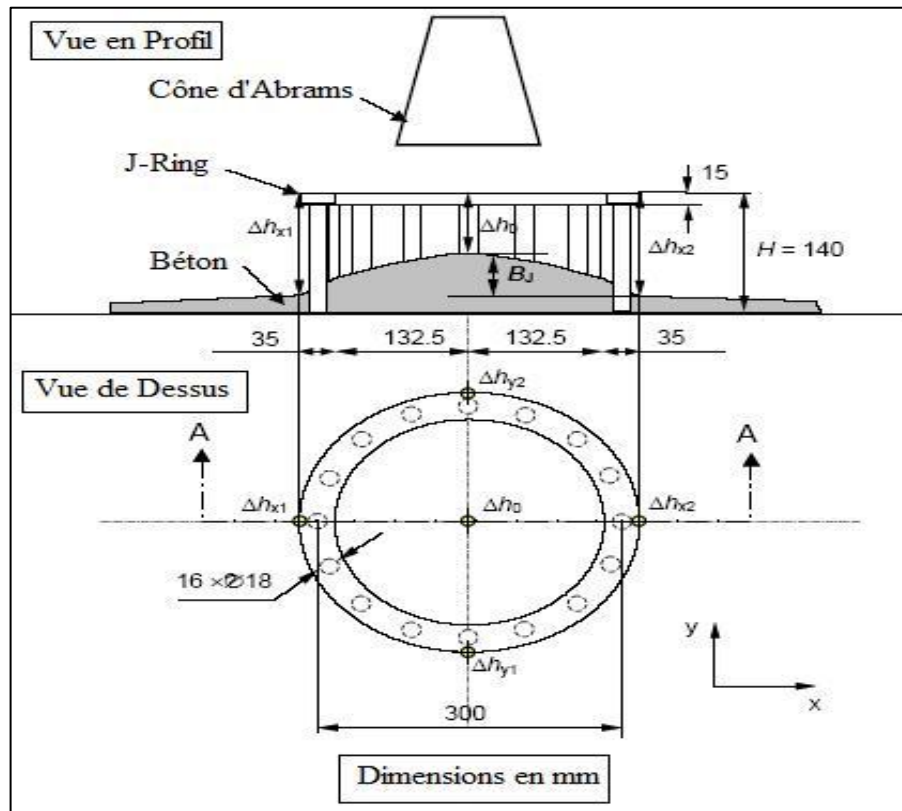


Figure 4.5 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de la différence de hauteurs. (Boukendkdji, 2010).



Figure 4.6 : Mesure d'étalement en présence du J-Ring.

Le temps d'écoulement T_{50J} est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm. La différence d'hauteurs B_J du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring est aussi mesurée pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. Les hauteurs sont montrées sur la figure 4.7. D'après (Domone et Jin, 1999) pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence de hauteur B_J ne doit pas dépasser 10 mm. B_J est calculée avec la formule suivante :

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (4.2)$$



Figure 4.7 : Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.

4.3.4. Essai à la boîte en L (L-Box test) selon (AFGC, 2002)

Avec l'essai à la boîte en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm). Soit environ 12,7 l de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale figure 4.8. Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange.

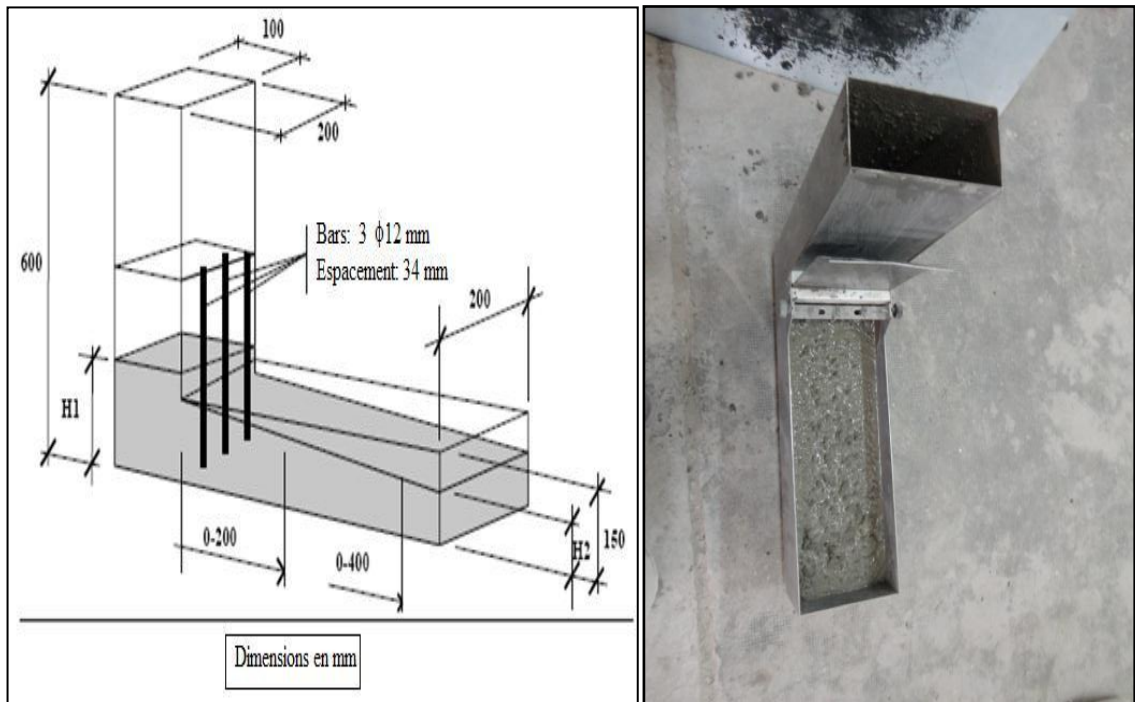


Figure 4.8 : Dispositif de l'essai L-Box.

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs $H1$ et $H2$.

Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport $H2/H1$ entre 0,8 et 0,85 est acceptable. La capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferrailage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L-Box, on pourra dire que ce béton est homogène. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant (AFGC,2002).

4.3.5. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage selon (AFGC, 2002)

Cet essai est proposé dans les recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil (AFGC, 2002). Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression figure 4.9.

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} \cdot 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (4.3)$$

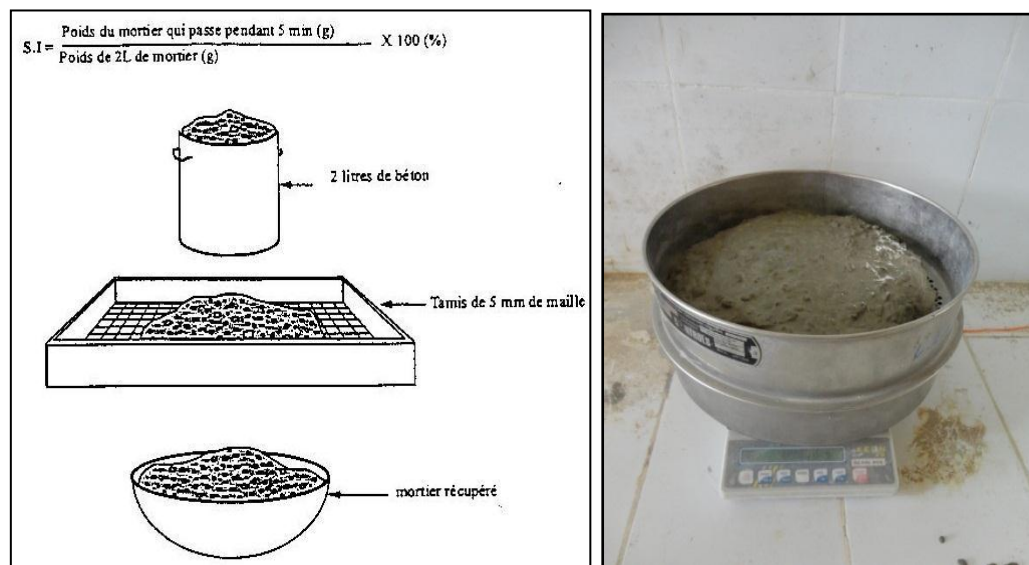


Figure 4.9 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

Lorsque $0 \leq \Pi \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise (Cussigh et al., 2003). La conclusion de cet essai est qu'il est sensible aux variations de dosage en super plastifiant ou en eau.

4.4. Essais mécaniques des BAP à l'état durci

Les essais relatifs au BAP à l'état durci se limitent à la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion.

4.4.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques $(7 \times 7 \times 7) \text{ cm}^3$, à 7, 28, 56, 90 et 120 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN figure 4.10. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse



Figure 4.10 : Dispositif pour l'essai de compression.

4.4.2. Résistance à la traction par flexion

Cet essai est l'essai de flexion quatre points et est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³ figure 4.11. La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2a^3} \quad (4.4)$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de la plastification du béton en déduit les résistances à la traction (σ_t) :

$$\sigma_t = 1.8 \frac{PL}{2a^3} \quad (4.5)$$



Figure 4.11 : Schéma de l'essai de traction par flexion à trois points.

4.5. Essais de durabilité

4.5. 1. Absorption capillaire (la sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont préconditionnées selon les recommandations de la procédure (AFPC-AFREM, 1997).

L'essai a été réalisé sur des échantillons de formes cylindriques de dimensions 100mm de $\varnothing$ et 50mm de hauteur (trois échantillons par formulation). Les échéances de mesure sont les suivantes : 28 et 90 jours de conservation dans l'eau. Les éprouvettes sont alors placées dans des dessiccateurs pendant 24 heures pour permettre le retour en température. Par la suite, la surface latérale de chaque éprouvette est alors enduite de résine pour éviter l'évaporation ou la pénétration latérale de l'eau absorbée durant l'essai. L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales figure 4.17. A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes.

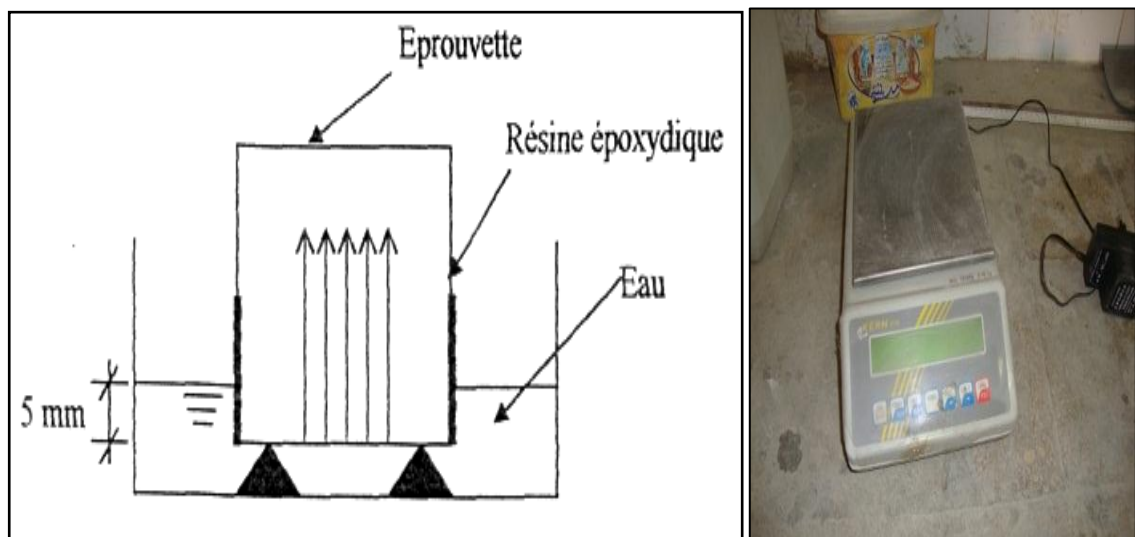


Figure 4.17 : Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient de sorptivité est défini par la relation suivante :

$$S = (Q/A) / t^{0.5} \quad (4.6)$$

Avec

S : le coefficient de sorptivité en (cm /sec^{0.5}) ;

Q : le volume de l'eau absorbée en cm³ ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm² ;

t : le temps écoulé en secondes.

4.5. 2. La diffusion des ions chlore

Pour la diffusion des ions chlorures, on a choisi l'Essai d'immersion totale, pour cet essai, les faces latérales et la face du dessus des échantillons sont recouvertes par de la résine époxy pour rendre les facettes imperméables ainsi la pénétration des ions chlorure ne se fait que dans un seul sens selon la face (de dessous) figure 4.18.



Figure 4.18 : Recouvrement des échantillons par la résine époxy.

Ensuite les échantillons sont introduits dans une solution de NaCl concentré à 3%, comme il est indiqué au figure 4.19.

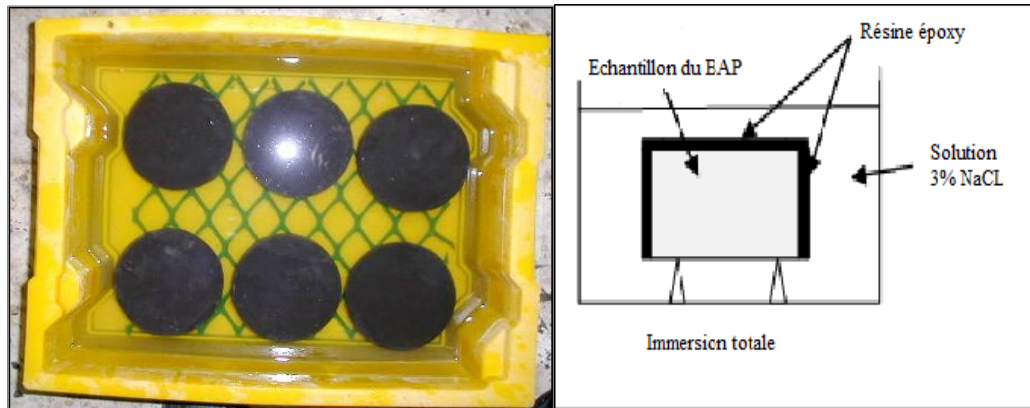


Figure 4.19 : Immersion totale des échantillons dans une solution de 3% NaCl.

Pour évaluer la durabilité du BAP vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures et mettre en relief l'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance par rapport à cette pénétration, nous avons suivi l'évolution de la profondeur de pénétration des ions chlorures à 28, 56, 90 et 120 jours. Les solutions n'ont été pas changées jusqu'à la fin.

A chaque essai les éprouvettes doivent sécher de 24h à l'air libre figure 4.20. Puis doivent être coupées en deux le long de la face perméable c'est-à-dire suivant le flux de la diffusion des chlores figure 4.21,

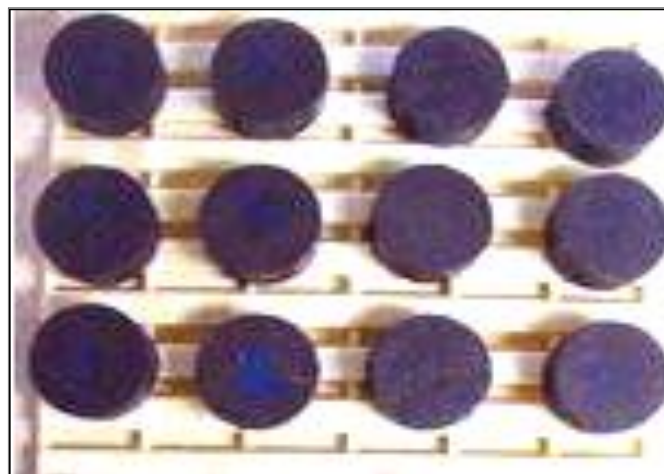


Figure 4.20 : Séchage de 24h des échantillons après 28, 56, 90 et 120 jours d'immersion (totale).



Figure 4.21 : Coupe de l'éprouvette en deux après 28,56,90 et 120 jours d'immersion totale.

Puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent AgNO_3 selon la norme (UNI 7928, 1978). Le bord de chaque section change de couleur, on obtient une couleur blanche qui représente la profondeur de pénétration des ions chlorures. Cette profondeur est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs positions figures 4.22 et 4.23. La profondeur de pénétration (X) est la moyenne de toutes les lectures (A, B, C, D, E, F, G, H).

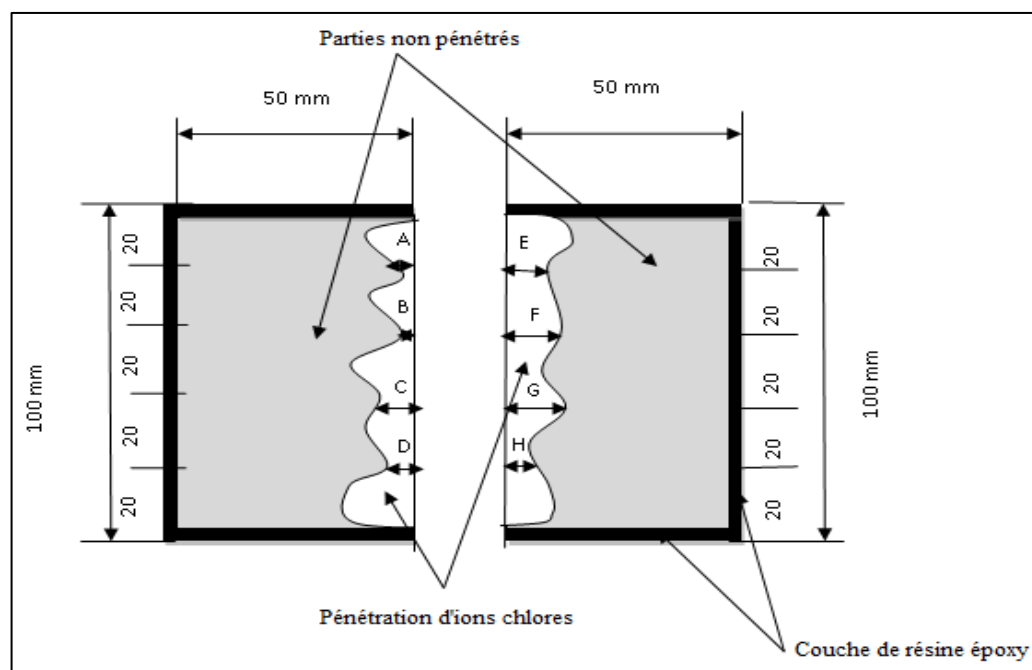


Figure 4.22 : Coupes schématiques de l'échantillon pour mesurer de la profondeur de pénétration d'ion chlore.

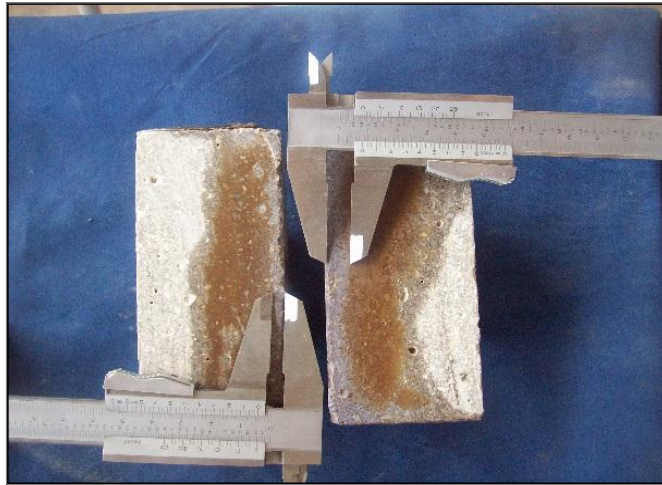


Figure 4.23 : Mesure de la profondeur de pénétration d'ion chlore.

La profondeur de pénétration d'ion chlorure suit la seconde loi de Fick, la solution selon cette loi est donnée par l'équation suivante :

$$Q/Q_0 = 1 - \operatorname{erf} (x / 2 \sqrt{Dt}) \quad (4.7)$$

Où :

Q : concentration des ions chlorures ;

X : Profondeur de pénétration des ions chlorures ;

Q_0 : Concentration des ions chlorures à la surface exposée des mortiers ;

t : Temps d'immersion dans la solution ;

D : Coefficient de diffusion d'ions chlorures ;

erf : La fonction d'erreur.

Une approximation de la formule (1) par l'expression suivante :

$$X = 4 \sqrt{Dt} \quad (4.8)$$

Le graphe ($X = f(t)$) est linéaire avec une ordonnée négative à $X = 0$, cela veut dire que le graphe ne suit pas la loi de Fick et ce à cause de la réaction des ions chlorures avec certains hydrates du ciment. Une estimation du coefficient apparent de diffusion des ions chlorures par la formule suivante peut être recommandée :

$$X = 4 \sqrt{D_a t} + k \quad (4.9)$$

Où

D_a : le coefficient apparent de diffusion des ions chlorures, c'est la pente de la droite ;

k : Constante empirique.

Un exemple de calcul du coefficient apparent de la diffusion des ions chlore est illustré au figure 4.24 ci-dessous.

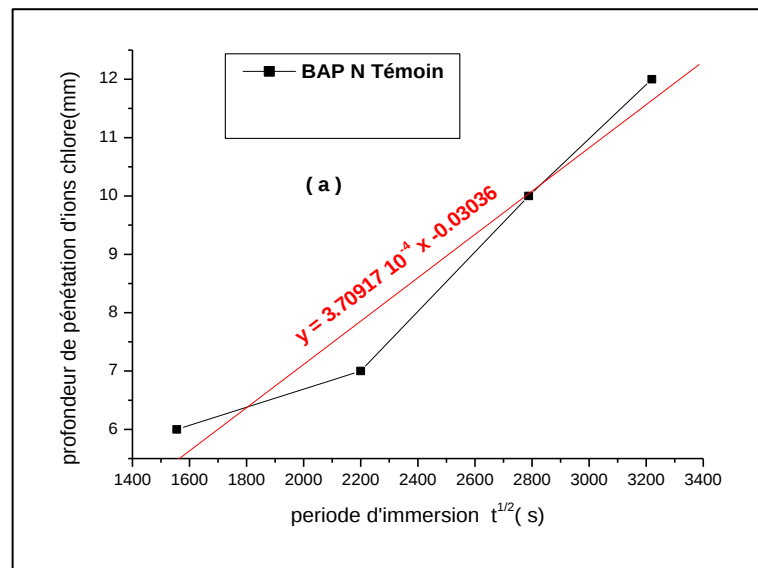


Figure 4.24 : Méthode de calcul du coefficient apparent de la diffusion des ions chlore.

4.5. 3. La résistance aux attaques acides (HCl et H₂SO₄)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (3% et 5% en volume), placées à une température ambiante de 23°. Les acides utilisés sont l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide chlorhydrique (HCl).

Les échantillons testés sont de forme cubique ($7 \times 7 \times 7$) cm³. Trois échantillons sont utilisés pour chaque type de BAP. L'essai a été réalisé après 28 de conservation dans l'eau. A l'échéance souhaitée, les cubes ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 23°C pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes. La masse sèche initiale (M_0) des cubes est déterminée avant leurs immersions dans des solutions acides (Bassuoni et Nehdi, 2007).

Conformément à la norme (ASTM C 192, 2007) ; Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ 2 cm de solution acide figure 4.25. Un pH mètre numérique portatif a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH chaque semaine. La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (variation de masse), chimiquement (analyse DRX) et aussi visuellement.



(a) acide chlorhydrique (HCl).

(b) acide sulfurique (H₂SO₄).

Figure 4.25: Les échantillons du béton immergés dans les solutions acides

HCl (a) et H₂SO₄ (b).

a) Variation de masse

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme (ASTM C 267-96, 1996). Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le mortier et/ou composite altéré et puis on les laisse

sécher pendant une ½ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M2. Cette opération est effectuée après 1, 7, 14, 21, 28, 90 et 180 jours après l'immersion.

La solution d'attaque est renouvelée chaque 7 jours (selon la valeur du pH). Enfin la résistante chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1-M2) / M1] \times 100 \quad (4.10)$$

Avec :

M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

b) Analyse aux diffractions aux rayons X (DRX)

Afin de mieux comprendre le mécanisme de diffraction du béton des analyses aux DRX ont été conduites sur les échantillons exposés à l'attaque des acides H₂SO₄ et HCl.

Les échantillons sont analysés par un diffractomètre X' (PERT PRO), disponible à l'Université de Laghouat, Laboratoire de Physique. Les analyses par diffraction X des surfaces des BAP soumises à une attaque acide ont permis d'identifier et de positionner les différentes phases cristallines rencontrées sur l'épaisseur du matériau altéré. La couche des cristaux formés sur la surface de l'échantillon est analysée, après avoir subi un grattage sur une épaisseur de quelques dixièmes de millimètres et un broyage pour obtenir une fine poudre.

L'analyse de la pâte de ciment hydraté par DRX (Benosman et al., 2005) n'est pas une chose simple, car le produit majeur d'hydratation est le C-S-H qui se présente sous forme d'un gel plus ou moins bien cristallisé difficilement identifiable sur un spectre DRX. En fait, le C-S-H est caractérisé sur un spectre DRX par une large bosse située entre 28 et 35° 2θ, là même où se situent la plupart des pics de silicates anhydres (C₂S et C₃S). Ainsi la pâte de ciment est souvent caractérisée par ses hydrates mieux cristallisés que sont l'ettringite et la portlandite.

c) Analyse visuelle

Une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) entre l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide.

4.5.4. La résistance aux attaques sulfatiques externes (Na_2SO_4) et (MgSO_4).

Les essais utilisés pour étudier la résistance des bétons aux attaques sulfatiques sont très divers (Roziere, 2007 ; Bassuoni et Nehdi, 2009). Ils ont étudié deux fonctions principales (la dégradation du béton et la quantification de cette dégradation). Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans des solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes en béton dans une solution sulfatique. Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et la solution de sulfate de magnésium (MgSO_4) ont été effectués.

Selon la norme (ASTM C1012-04, 2004), le pH de la solution de sulfate doit être compris entre 6 et 8 et la solution doit être renouvelée chaque semaine, ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium. La correction est réalisée quotidiennement au cours des premières semaines d'essai, ensuite elle devient hebdomadaire. Les solutions sont renouvelées tous les 2 mois. Pour évaluer la durabilité des BAP avec les différentes additions utilisées et de pouvoir mettre évaluer l'effet de l'addition pouzzolane naturelle sur la résistivité aux attaques sulfatiques, on a réalisé des essais chimiques sur des éprouvettes de bétons immergées pendant 180 jours dans les solutions de 5 % de sulfate de sodium, 5% de sulfate de magnésium.

Pour cela on a procédé comme suit :

- Suivi de la variation de masse
- Analyse visuelle de l'état des éprouvettes
- Etude de la microstructure des BAP par DRX.

a) Variation de la masse

Le suivi de la variation de la masse est effectué sur des éprouvettes cubiques ($7 \times 7 \times 7$) cm^3 . Après démoulage, les éprouvettes sont mises directement dans l'eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'essai. Après 28 jours de conservation, deux échantillons de chaque formulation ont été mis dans deux milieux différents (La solution à 5% Na_2SO_4 sulfate de sodium et La solution à 5% MgSO_4 sulfate de magnésium). La mesure de la masse est réalisée après 1, 7, 14, 21, 28, 90 et 180 jours. Le mode opératoire suivi pour chaque mesure consiste à retirer de son milieu de conservation l'éprouvette, l'essuyer avec un tissu sec et la

laisser pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire. Ensuite, la pesée est effectuée puis enregistrée. L'éprouvette est ensuite remise dans son milieu de conservation. La variation de masse sous attaque sulfate est évaluée de même que la variation de masse sous attaques acides par l'équation (4.10).

b) Analyse DRX

Après 180 jours de conservation dans les milieux sulfatiques, des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX) sont réalisés sur des surfaces des différentes éprouvettes exposées à l'attaque de sulfate Na_2SO_4 , de sulfate MgSO_4 .

c) Analyse visuelle

Pour évaluer la dégradation de chaque béton, une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) avant et après 180 jours de conservation dans les différents milieux.

4.6. Récapitulatif du programme des essais réalisés

4.6.1. Essais sur mortier (MAP)

La figure 4.26 résume les essais réalisés sur mortier (MAP) à l'état frais à base de sable naturels et sable recyclés.

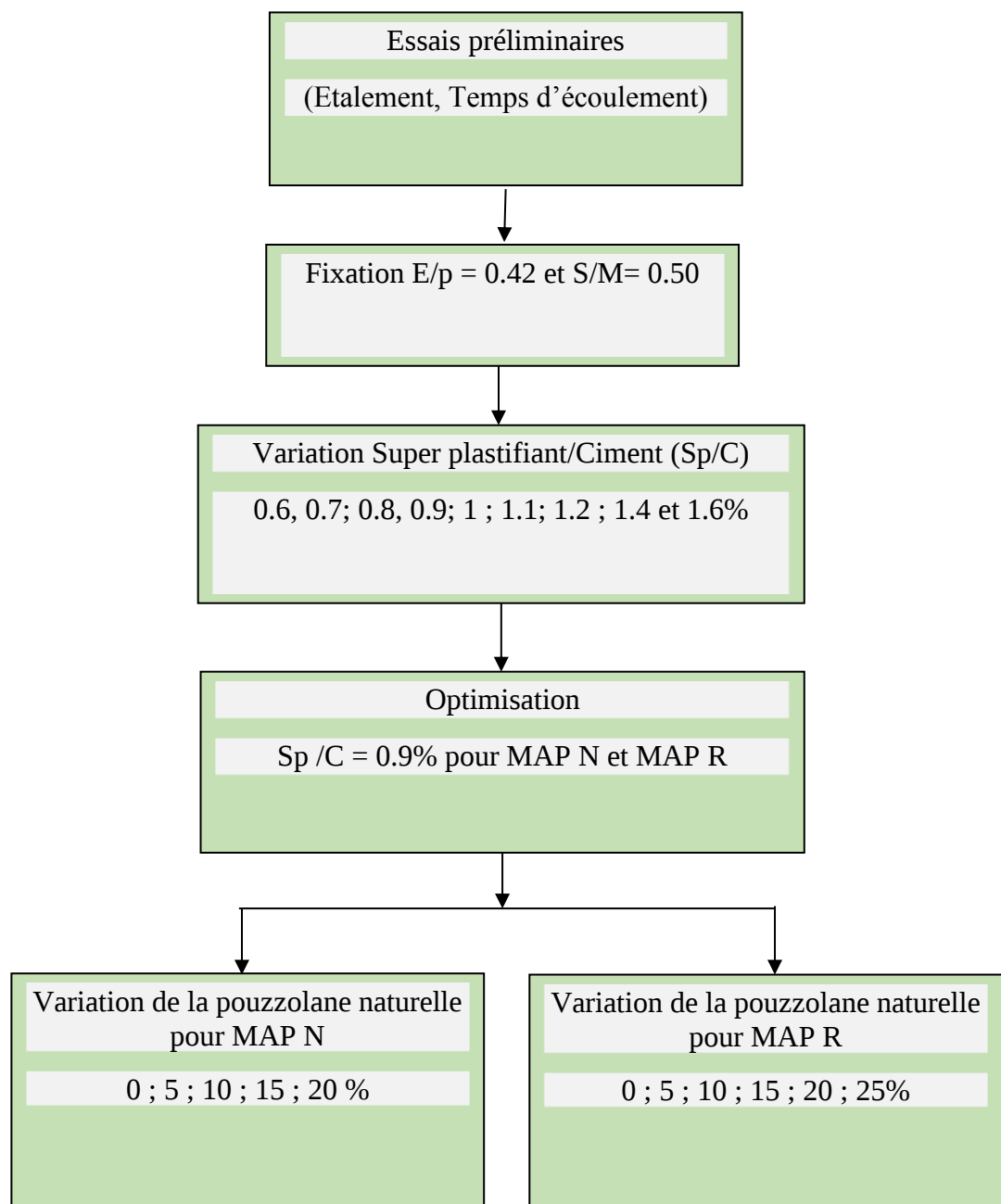


Figure 4.26 : Diagramme des essais réalisés sur mortier (MAP).

4.6.2. Essais sur béton

Les figure 4.27 et 4.28 résument les essais réalisés à l'état frais sur les BAP à base de granulats naturels et granulats recyclés respectivement.

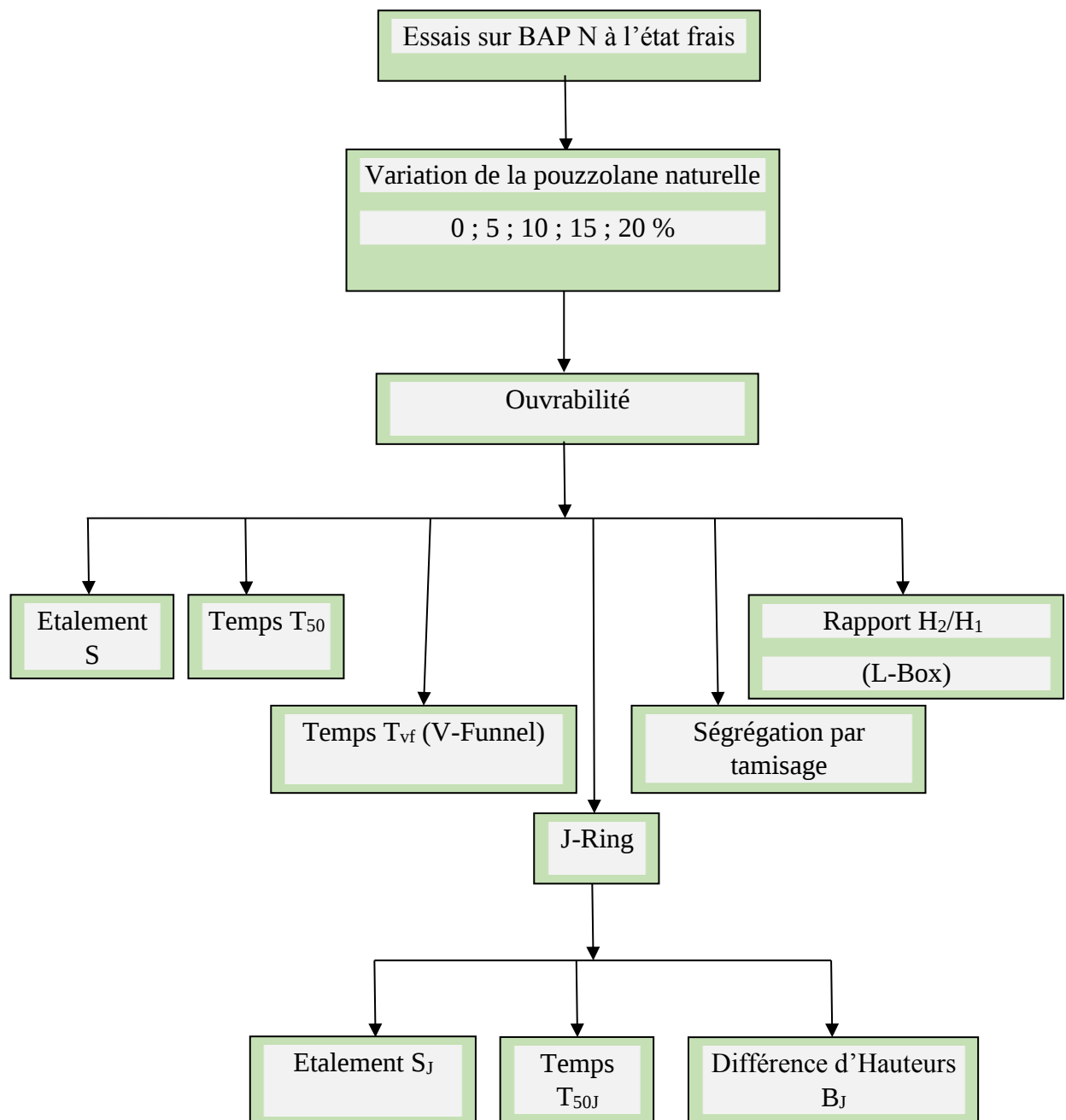


Figure 4.27 : Diagramme des essais réalisés sur le BAP N à l'état frais.

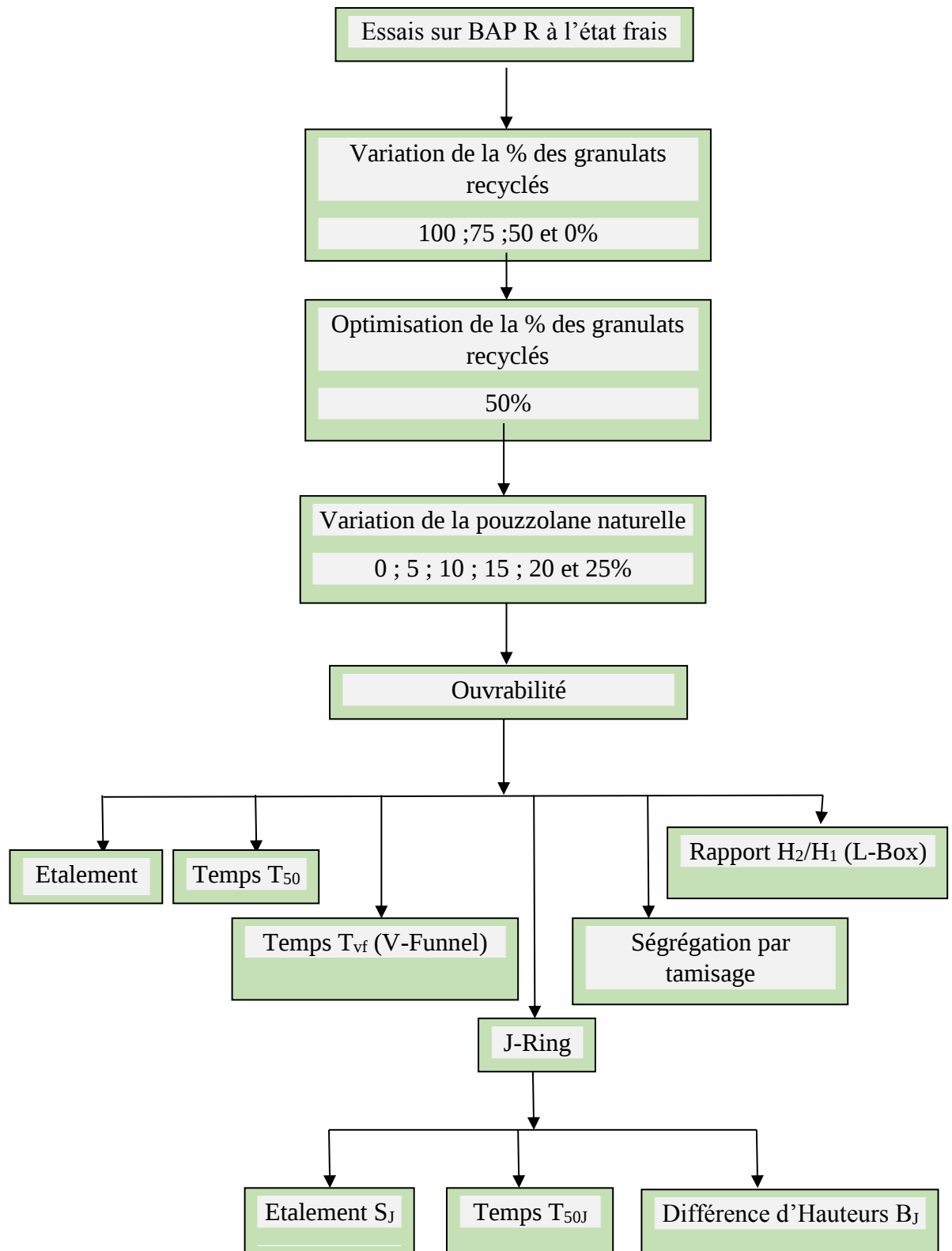


Figure 4.28 : Diagramme des essais réalisés sur le BAP R à l'état frais.

La figure 4.29 résume les essais réalisés sur le BAP à base de granulats naturels et recyclés à l'état durci tandis que les essais de durabilité sont résumés dans la figure 4.30.

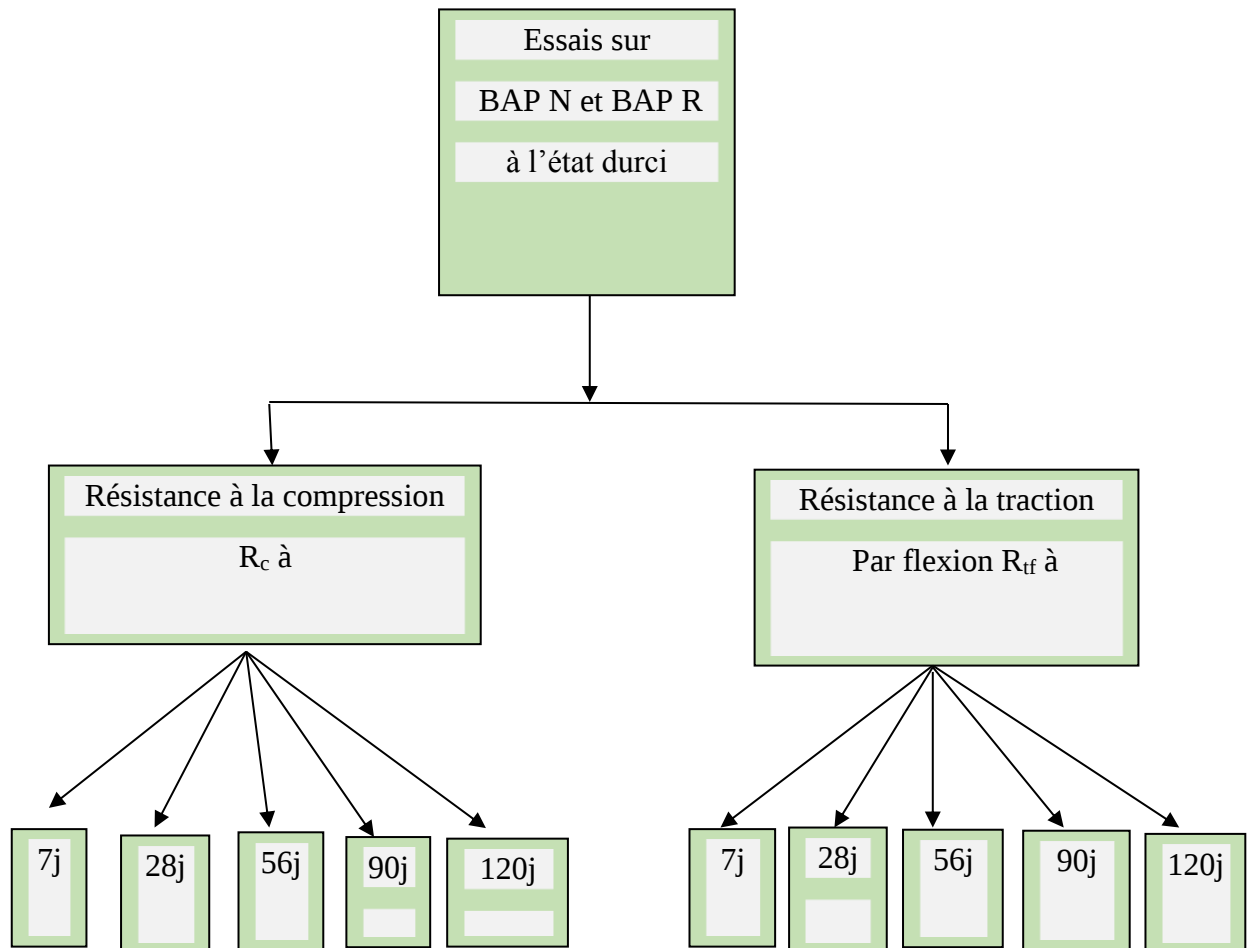


Figure 4.29 : Diagramme des essais réalisés sur les BAP à l'état durci.

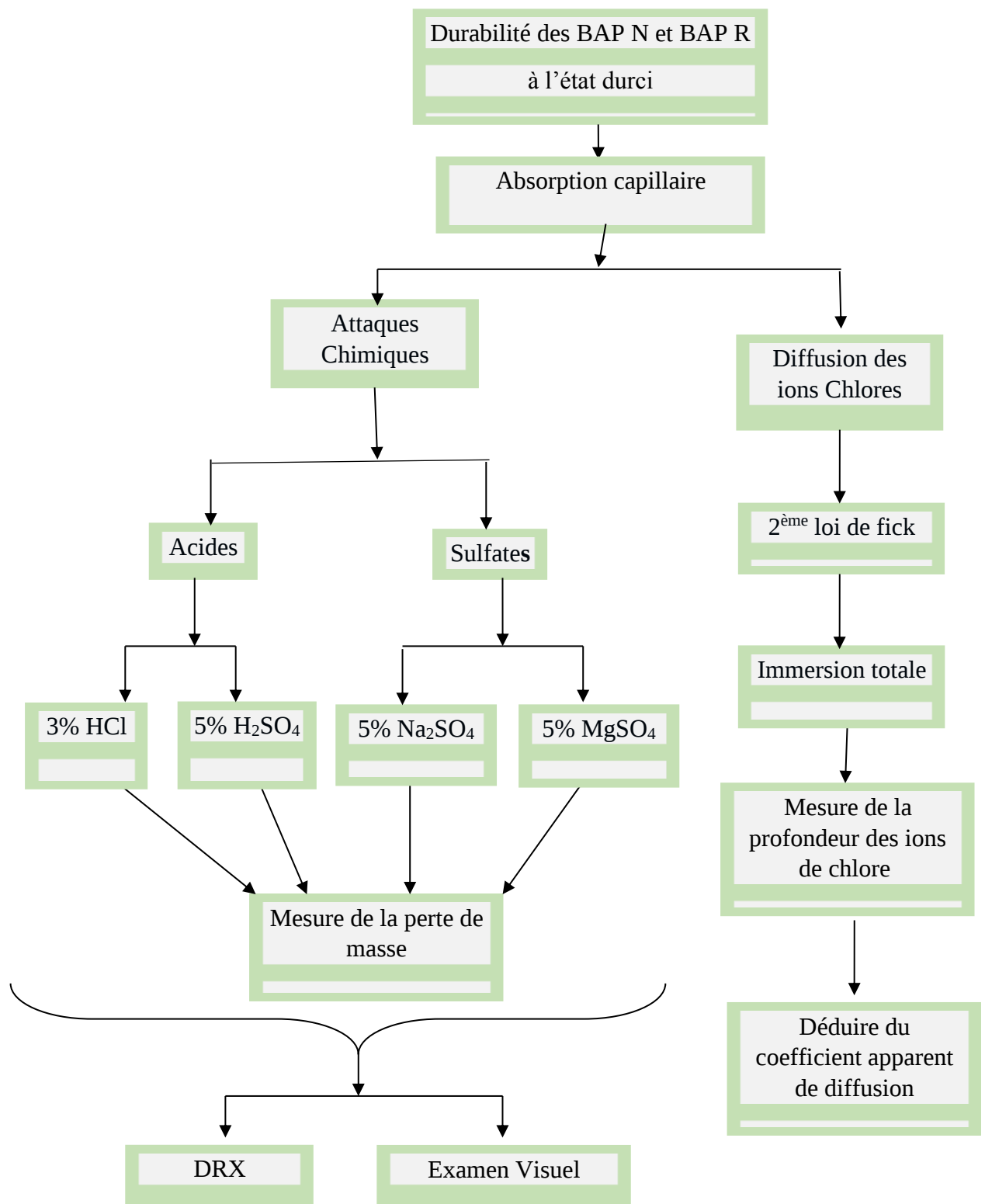


Figure 4.30 : Diagramme des essais réalisés sur la durabilité des BAP à l'état durci.

4.7. Conclusion

Ce travail expérimental a pour objectif de comparer les performances rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants BAPN et BAPR à base d'addition pouzzolane naturelle à ceux des BAP N et BAP R témoins. Pour ce qui est des essais sur mortiers, il était impératif de faire plusieurs essais préliminaires afin d'optimiser les dosages en eau, en sable et surtout en superplastifiants.

Plusieurs formulations de BAP à base de pouzzolane naturelle, ont été étudiées. A l'état frais, les compositions de BAP remplissent correctement les spécifications requises pour de tels bétons (la mobilité en milieu non confiné, la mobilité en milieu confiné et la stabilité).

Pour qualifier les performances des différents bétons, de nombreux essais ont été définis, certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression et à la traction. D'autres concernent les propriétés de transfert avec par exemple les essais d'absorption capillaire, et de diffusion des ions chlore, ou bien encore de la résistance vis-à-vis les milieux chimiquement agressifs (acides et sulfates).

Dans le chapitre suivant sont exposés les différents résultats des différents essais sur MAP et sur BAP suivis d'interprétations et comparaisons avec ceux obtenus par la littérature.

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

PROPRIETES RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES

Tableau 5.2 : Composition de mortier de référence à base de sable recyclé dans 1m³

Mélanges	K1	K2	K3	K4	K5
E/L (en poids)	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
S/M (%)en volume	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
SP/L (%)	0.6	0.7	0.8	0.9	1
CEM II/A(kg)	678	678	678	678	678
Sable (50%N+50%R) (kg)	1245	1245	1245	1245	1245
Eau(kg)	284,8	284,8	284,8	284,8	284,8

Tableau 5.3 : Propriétés de mortier de référence à base de sable naturel à l'état frais

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Etalement en mini cône (mm)	230	283	288,5	301,0	309,0	313,0	322,5
Temps d'écoulement en V-funnel (s)	/	5.17	5,00	4,20	4,20	4,00	3,55
Observations.	Ressuage	/	Non	Non	Non	Oui	Oui
	Ségrégation	/	Non	Non	Non	Non	Oui

Tableau 5.4 : Propriétés de mortier de référence à base de sable recyclé à l'état frais

	K1	K2	K3	K4	K5
Etalement en mini cône (mm)	225	282	305	323	350
Temps d'écoulement en V-funnel (s)	/	2.5	2.5	2.15	1.85
Observations.	Ressuage	/	Non	Non	Oui
	Ségrégation	/	Non	Non	Oui

On remarque que le mortier à base de sable naturel et le mortier à base de sable recyclé ont un comportement similaire en fonction du dosage en superplastifiant figure 5.1. On observe une augmentation de l'étalement avec l'augmentation du dosage en superplastifiant pour les deux mortiers car le superplastifiant disperse les grains du ciment et améliore la fluidité du mélange. Cependant, il faut noter que l'étalement du mortier à base de sable recyclé reste toujours supérieur par rapport à l'étalement du mortier à base de sable naturel. A un dosage de superplastifiant de 1 % l'étalement a été de 350 mm et il a été accompagné d'un ressuage pour le mortier recyclé, et on note un ressuage à partir du dosage de SP 1.2% pour le mortier à base de sable naturel. Figure 5.2.

Ce comportement est dû à la quantité élevée des fines dans le sable recyclé qui provient de l'ancienne pâte du ciment lors de concassage et lors de malaxage, et à la quantité d'eau élevée en comparaison au mortier naturel due au coefficient élevé d'absorption (9,07 pour le sable recyclé et 0.65 pour le sable naturel).

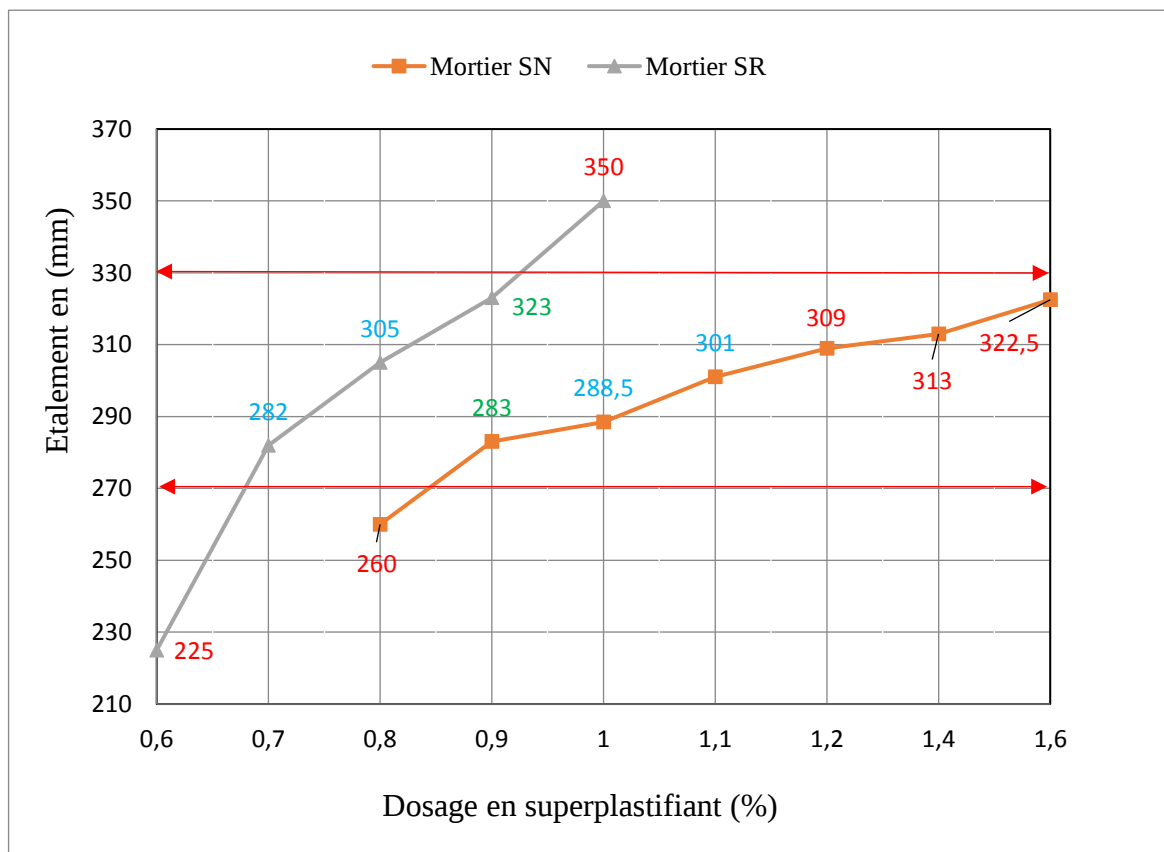


Figure 5.1 : Etalement au mini cône des mortiers en fonction du dosage en Sp.



Figure 5.2 : Etalement au mini cône du mortier SN (en dessus) et mortier SR (en dessous) à un dosage de 1% de Sp.

On remarque que le temps d'écoulement au V-funnel est inversement proportionnel au dosage en super plastifiant, donc $T_{V\text{-funnel}}$ diminue avec l'augmentation du pourcentage du superplastifiant. Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier à base de sable recyclé est inférieur à celui du mortier à base de sable naturel pour le même pourcentage en super plastifiant ce que signifie que la viscosité du mortier diminue en augmentant le dosage en superplastifiant. Le comportement des deux mortiers reste similaire en fonction du dosage en superplastifiant figure 5.3.

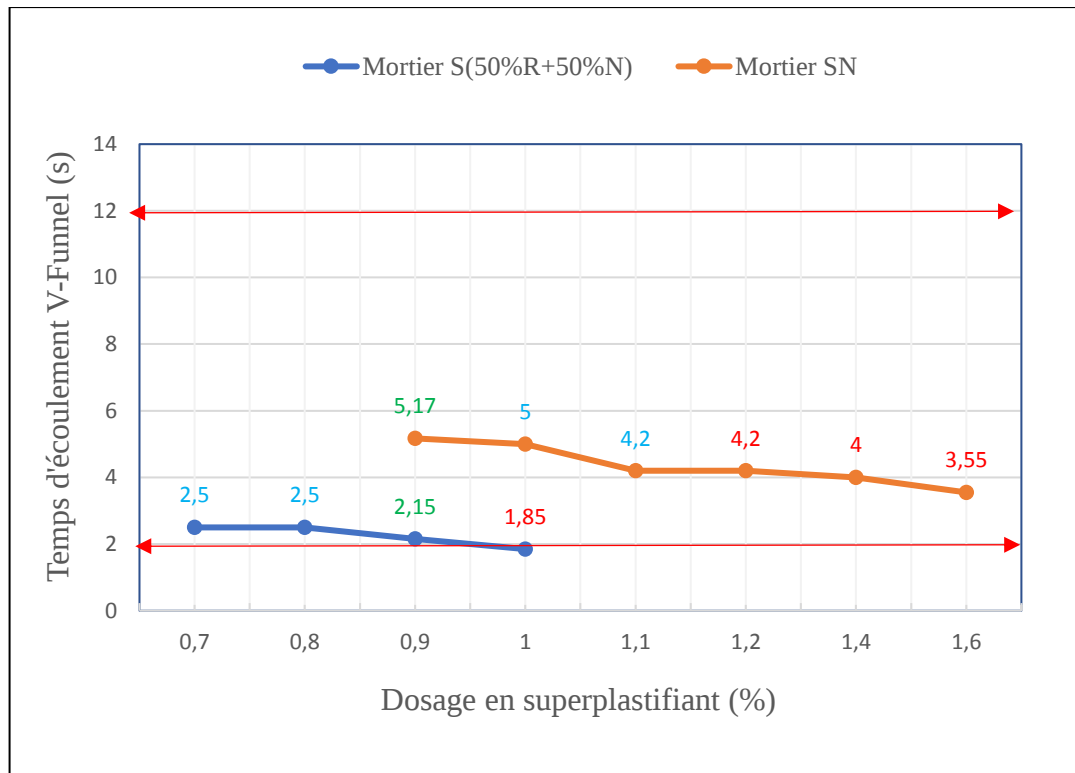


Figure 5.3 : Temps d'écoulement au V-funnel des mortiers en fonction de dosage en Sp.

Par conséquent, on a adopté un dosage en super plastifiant de 0.9% pour les deux mortiers naturels et recyclé car avec ce pourcentage on a obtenu un bon mortier autoplaçant, homogène sans ressuage.

5.3. Performances des BAP à base du granulats recyclés sans ajout à l'état frais

Dans cette partie, on a étudié quatre types de BAP (BAP nommé BAP N à base de 100% granulats naturels, un BAP nommé BAPR avec un pourcentage de 50% granulats recyclé, un BAPR à base de 75% de granulats recyclés et une quatrième composition d'un BAPR à base de 100% granulats recyclés. Le tableau 5.5 présente la composition des différents BAP à base de granulats naturels et recyclés. Le dosage en superplastifiant adopté pour le béton est celui optimisé sur mortier pour les quatre compositions du BAP (0.9%). Le dosage en ciment et en granulats est calculé à l'aide d'un programme Excel (Annexe B), avec un rapport E/P constant 0,42.

Tableau 5.5 : Composition des BAP sans ajouts en kg/m³

Mélanges	E/P	Eau	Ciment	PZ	Sable	G 3/8	G 8/15	SP/L (%)
BAP 0%R	0.42	189	450	0	870	290	580	0.9
BAP 50N/50R		192			870 ^a	290	580	
BAP 25N/75R		193			870 ^b	290	580	
BAP 100%R		194			870	290	580	

Les résultats des propriétés des quatre BAP sont regroupés dans le tableau 5.6, et figures 5.4 à 5.6. D'après la figure 5.4 les résultats de l'essai d'étalement au cône d'Abrams des quatre BAP satisfont les exigences normalisées (660mm et 800mm). Mais pour les deux essais (étalement à la couronne et V-funnel test) on remarque que seul les BAP (BAP50%R et BAP0%R) satisfont les exigences normalisées (650mm-750mm) pour l'essai d'étalement à la couronne et (5sec-12sec) pour l'essai de V-funnel test), figures 5.5 et 5.6.

Les BAP (BAP75%R et BAP100%R) sont en dehors de l'intervalle des deux essais (étalement à la couronne J-Ring et V-funnel test). Cela peut être attribué à la quantité d'eau élevée due au coefficient élevé d'absorption (9,07 pour le sable recyclé et 0.65 pour le sable naturel et 6.5 pour les granulats recyclés et 1.58 pour les granulats naturels).

Alors d'après les résultats obtenus on étudiera seulement les deux BAP (BAPN à 0% de granulats recyclés et BAPR à 50% granulats recyclés et 50% granulats naturels).

Tableau 5.6 : Propriétés des BAP sans ajouts

Descriptions des mélanges	Etalement au cône d'Abrams (Slump test)		Boîte en L (L-Box test)			Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test) (s)	Tamis de Stabilité test 0% à 15%	Etalement à la couronne (J-Ring test)		
	T500 (s)	D (mm) 660---750	T200 (s) ≤1.5	T400 (s) ≤3.5	H2/H1(%) 80% à 85%			D (mm) 650 à 750	ΔH(mm) ≤ 10	T500j (s)
BAP 0%R	2,10	729	1,30	3,40	80,00	7,50	9,24	710,5	9,75	2,10
BAP 50N/50R	1.95	715	0.8	1.5	85.00	6.5	6.2	705.0	9.60	1.95
BAP 25N/75R	0.85	750	1,95	6.8	64.1	20	10.86	580	9.58	0.85
BAP 100%R	1.78	760	2.66	4.8	73.4	24	11.45	546	9.49	1.78

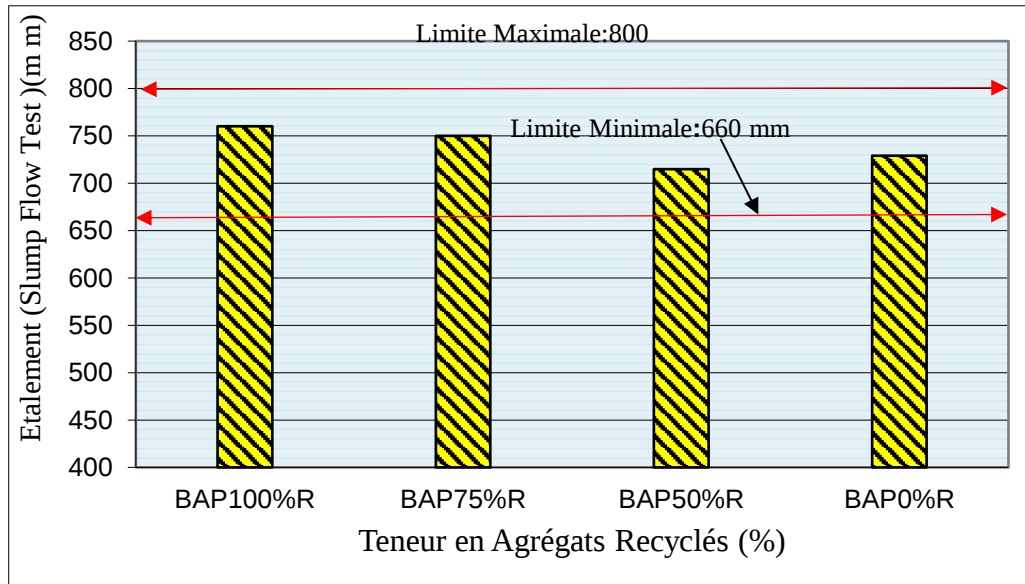


Figure 5.4 : Etalement au cône d'Abrams des différents BAP.

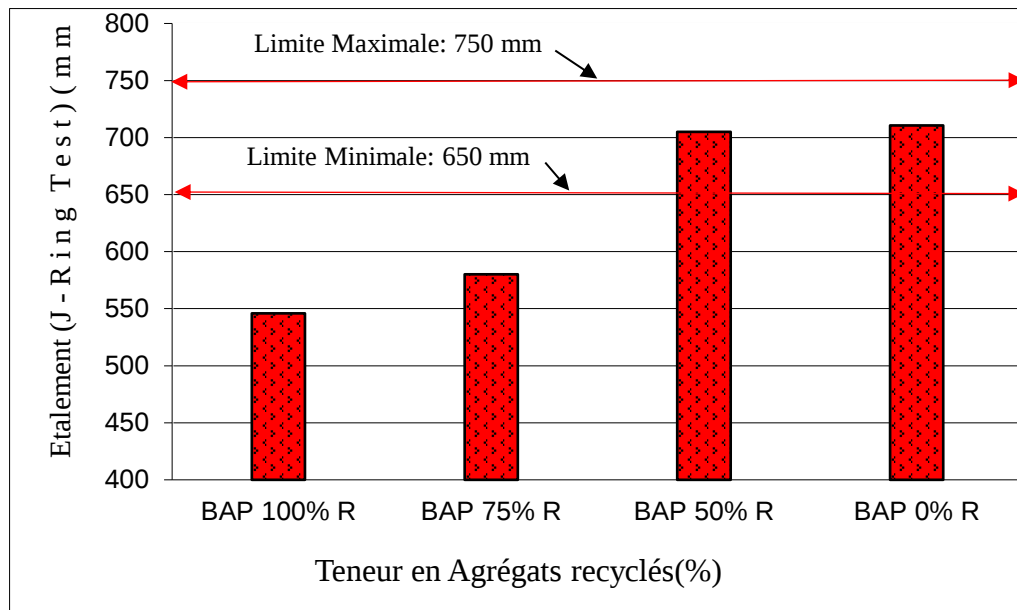


Figure 5.5 : Etalement à la couronne (J-Ring test) des différents BAP.

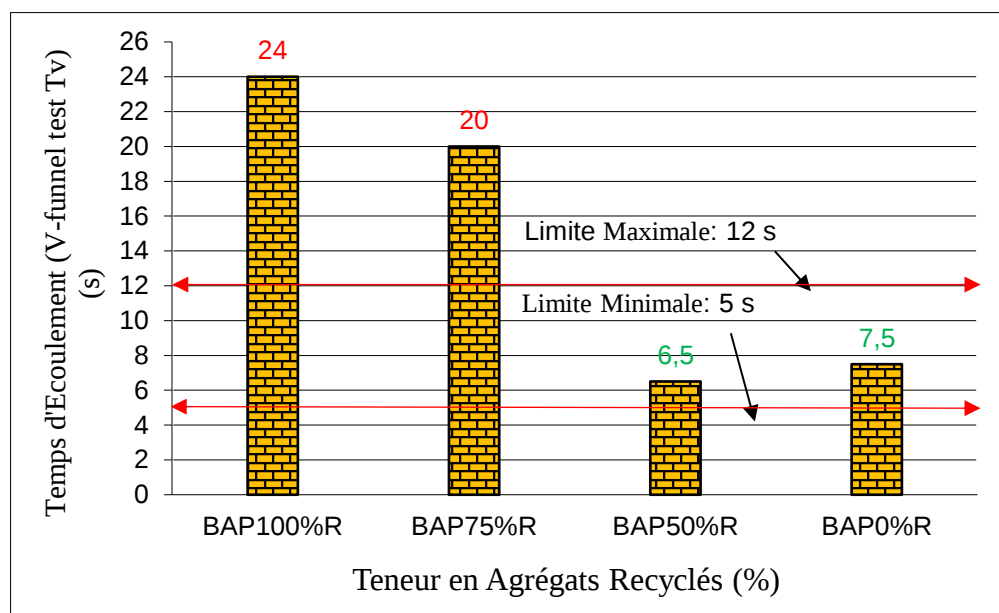


Figure 5.6 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des différents BAP.

Les figures 5.7 et 5.8 représentent les photos des galettes des deux BAP (BAP50%R et 75%R) pour les deux essais (étalement au cône d'Abrams, étalement à la couronne J-Ring test) à titre d'exemple de comparaison. On remarque le blocage au niveau de la couronne du

mélange BAP (75%R / 25%N), cela peut être expliquée par la quantité d'eau élevée due au coefficient élevé d'absorption, et à la forme des granulats ce qui entraîne un freinage de l'écoulement à travers les barres.



Figure 5.7 : Etalement au couronne (J-Ring test) du BAP (50%R/50%N) (à gauche) et BAP (75%R/25%N) (à droite).



Figure 5.8 : Etalement au cône d'Abrams du BAP (50%R/50%N) (à gauche) et BAP (75%R/25%N) (à droite).

5.4. Optimisation du dosage en pouzzolane naturelle pour mortiers (MAP SN et MAP SR)

Dans cette étape on substituera de 0% ,5%, 10%, 15%, et 20% du poids de ciment par de la pouzzolane naturelle afin de connaître l'effet de cet ajout sur le comportement des

mortiers à l'état frais. Les tableaux 5.7, 5.8, résument les compositions du mortier à base du sable naturel et sable recyclé. Les tableaux 5.9, 5.10 et les figures 5.9 et 5.10 résument la performance à l'état frais des mortiers à base de sable naturel et recyclé avec la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle.

Tableau 5.7 : Composition de mortier à base de sable naturel avec l'ajout PZ en kg/m³

Mélanges	E/L %	EAU	CEM II/A	PZ	Sable	Sp %
MAPN 0% PZ	0.42	284,8	678	0	1316	0.9
5% PZ		283.7	641.725	33.775		
10% PZ		282.7	605.65	67.30		
15% PZ		281.6	569.88	100.56		
20% PZ		280.5	534.246	133.562		

Tableau 5.8 : Composition de mortier à base de sable recyclé avec l'ajout de PZ en kg/m³

Mélanges	E/L	EAU	MAPR	PZ	Sable	Sp %
MAPR 0% PZ	0.42	284,8	678	0	1245	0.9
5% PZ		283.7	641.656	33.775		
10% PZ		282.7	605.543	67.28		
15% PZ		281.6	569.669	100.53		
20% PZ		280.5	534.059	133.515		
25% PZ		279.3	498.692	166.231		

Tableau 5.9 : Propriétés de mortier à base de sable naturel avec l'ajout PZ à l'état frais

		MAPN	5% PZ	10% PZ	15% PZ	20% PZ
Etalement en mini cône (mm)		301	309	285	272	254.7
Temps d'écoulement en V-funnel (s)		4.2	5	5.2	6.2	6.4
Observat.	Ressuage	Non	Non	Non	Non	Non
	Ségrégation	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 5.10 : Propriétés de mortier à base de sable recyclé avec l'ajout de PZ à l'état frais

		MAPR	5% PZ	10% PZ	15% PZ	20% PZ	25% PZ
Etalement en mini cône (mm)		310	309	300	292	280	267
Temps d'écoulement en V-funnel (s)		2.4	2.55	2.8	2.90	2.95	3
Observat.	Ressuage	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	Ségrégation	Non	Non	Non	Non	Non	Non

On remarque d'après la figure 5.9 que toutes les compositions répondent aux exigences données par les normes concernant l'étalement au mini cône pour les deux mortiers MAPN et MAPR sauf pour la substitution de 20% avec une valeur de 254.7mm pour MAPN et 25% avec une valeur de 267mm pour MAPR.

En ce que Concerne le temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel), toutes les compositions répondent aux exigences données par les normes soit pour le mortier à base du sable naturel ou le mortier à base du sable recyclé figures 5.10.

Suite aux résultats précédentes de différentes essais, la substitution du ciment en pouzzolane naturelle adopté est (5%,10% et 15%) Pour le BAP N et (5%,10%,15% et 20%) pour BAP R.

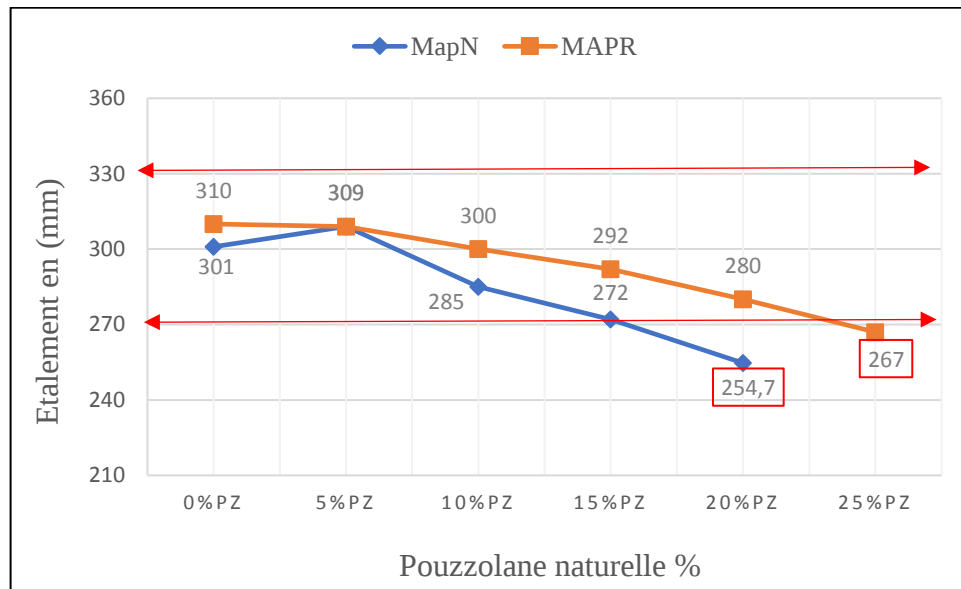


Figure 5.9 : Etalement au mini cône du MAPN et MAPR en fonction du dosage en pouzzolane naturelle.

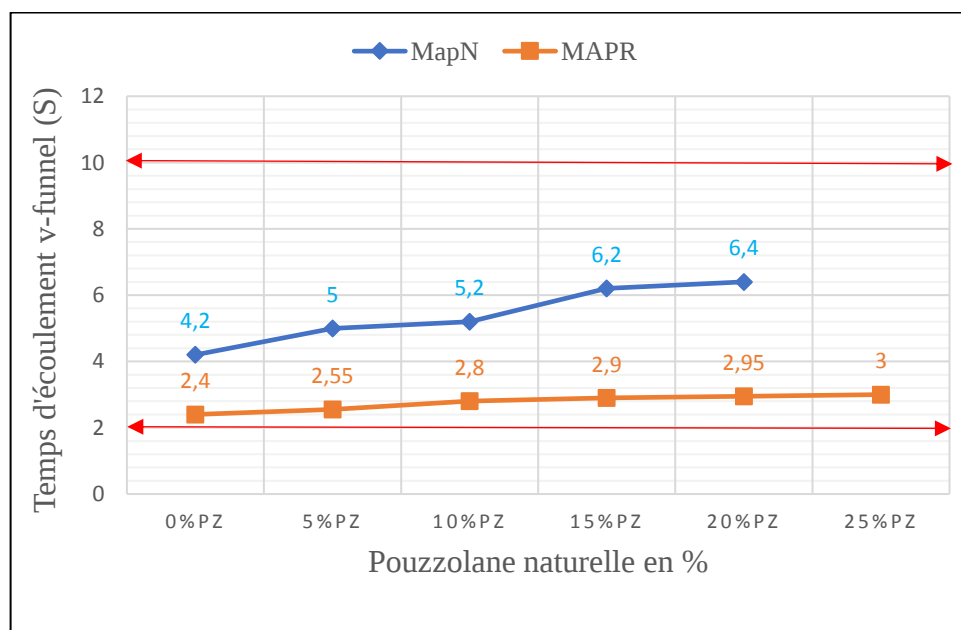


Figure 5.10 : Temps d'écoulement en entonnoir V du MAPN et MAPR en fonction du dosage en pouzzolane naturelle.

5.5. Performances des BAP à base de granulats (naturels / recyclés) et PZ à l'état frais

Afin de connaître l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle sur le comportement du BAP à l'état frais, on substituera de (5% à 15%) pour BAPN et de (5% à 20%) pour BAPR du poids de ciment par la pouzzolane naturelle. Les compositions des deux BAP sont représentées dans le tableau 5.11, et les résultats des différentes propriétés des deux BAP sont résumés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.11: Composition des différents types du BAP sans et avec PZ en kg/m³

Mélanges	E/p %	Eau	Ciment	PZ	Sable	G3/8	G8/15	Sp %
BAPN (Témoin)	0.42	189	449	0	870	290	580	0.9
5% PZ			426	23				
10% PZ			404	45				
15% PZ			381	68				
20% PZ			359	90				
BAP R (Témoin)			449	0	870	290	580	
5% PZ			426	23				
10% PZ			404	45				
15% PZ			381	68				
20% PZ			359	90				
25% PZ			337	112				

Tableau 5.12 : Propriétés des différents types du BAP sans et avec PZ

Descriptions des mélanges	Etalement au cône d'Abrams (Slump test)		Boîte en L (L-Box test)			Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test) (s)	Tamis de Stabilité test 0% à 15%	Etalement à la couronne (J-Ring test)		
	T500 (s)	D (mm) 660-750	T200 (s) ≤1.5	T400 (s) ≤3.5	H2/H1 (%) 80% à 85%			D (mm) 650 à 750	ΔH(mm) ≤10	T500j (s)
BAP N 0% PZ	2,10	729	1,30	3,40	84,00	7,50	9,24	710	9,75	2.27
05% PZ	2.15	705	1.37	3.42	82.00	8.64	10.35	700	9.80	2.36
10% PZ	2.22	690	1.40	3.45	81.50	9.80	11.25	681	9.90	2.48
15% PZ	2.31	670	1.45	3.48	81.00	10.68	12.08	668	10.0	2.60
20% PZ	2.39	630	/	/	/	13.30	/	610	/	/
BAP R 0% PZ	1.95	715	0.8	1.5	84.5	5.6	6.2	705.0	9.60	2.25
05% PZ	2.1	710	1.00	2.20	84.3	8.34	8.70	700	9.80	2.31
10% PZ	2.15	704	1.20	2.35	82.50	9.70	9.86	697	9.89	2.37
15% PZ	2.20	692	1.38	2.50	82.00	10.23	11.33	676	9.91	2.44
20% PZ	2.35	682	1.45	2.76	81.50	12.30	11.50	669	9.95	2.52
25% PZ	2.43	635	/	/	/	13.80	/	620	/	/

5.5.1. Étalement au cône d'Abrams (Slump flow test)

Cet essai est fait pour tester la déformation du béton sous l'effet de son poids propre au milieu libre. La figure 5.11 présente les diamètres d'étalement au cône d'Abrams pour les différents BAP. L'étalement des deux BAP étudiés est conforme aux limites exigées par les normes, sauf pour le BAP à (20% PZ et 25% PZ) de substitution avec des valeurs de 630 mm et 635 mm correspondant à BAPN et BAPR respectivement qui sont en dehors l'intervalle exigée par les normes.

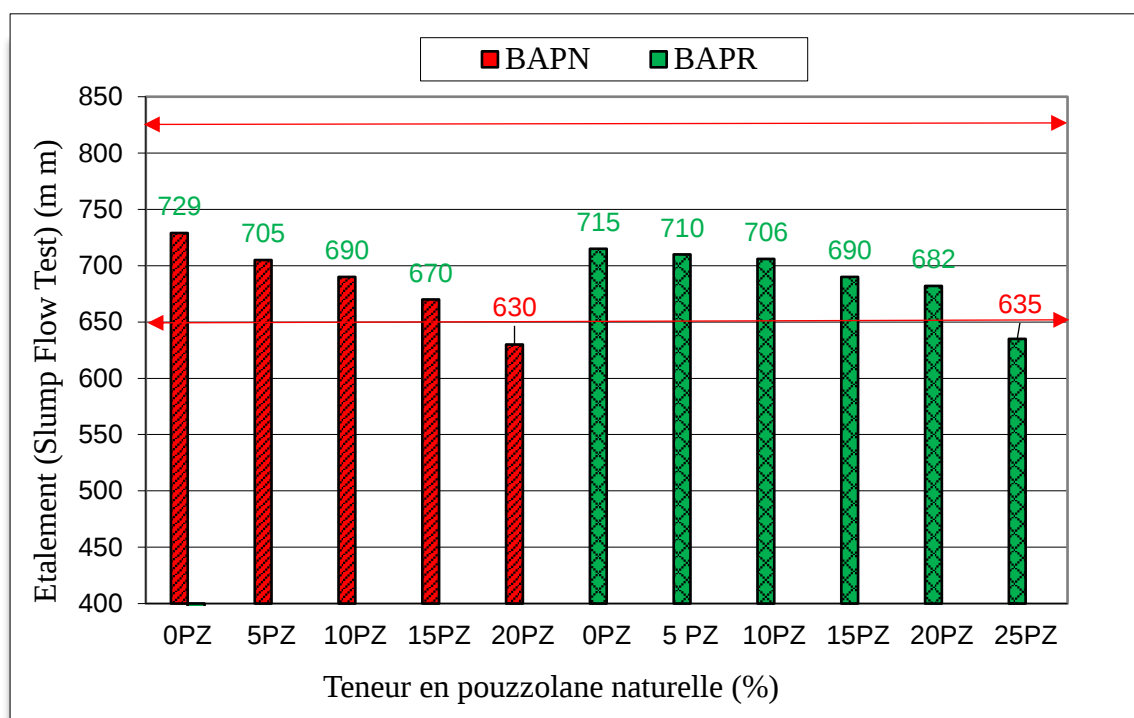


Figure 5.11 : Etalement au cône d'Abrams des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

On remarque que les diamètres d'étalement des deux BAP étudiés sont proches les uns des autres. (Grdic et al., 2010) ont remarqué que le diamètre d'étalement des BAP à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés sont très comparable (735, 725 et 735) mm. (Tu et al., 2006) ont obtenu un étalement au cône d'un BHP à base de 100% granulats recyclés supérieur à celui d'un BHP à base de fines naturelles et gravier recyclés, avec une perte d'ouvrabilité rapide. On note bien d'après les résultats obtenus que les diamètres d'étalement des deux BAP étudiés diminué avec l'augmentation du pourcentage de la

pouzzolane naturelle. (Boukendakdji, 2010) a trouvé qu'un BAP avec 15% du laitier présente un étalement élevé par rapport à un BAP sans ajout.

(Tomasiello et Felitti, 2010) ont substitués la fraction granulaire (4 à 8) mm par le laitier combiné avec les fillers de calcaire et ont montrés que ceci engendre une augmentation du diamètre d'étalement dépasse les 700 mm en comparaison avec les BAP à base de gravier naturel et avec les fillers de calcaire seuls. La pouzzolane augmente la porosité de la pâte du béton et par conséquent son besoin en eau et cela peut expliquer la chute de l'ouvrabilité du BAP à base de la pouzzolane naturelle (Colak, 2003 ; De Schutter, 2005).

D'après la figure 5.12 le temps d'écoulement T_{50} pour toutes les compositions des BAP bétons est inférieur à la limite maximale tolérée de 5 secondes pour les BAP. La comparaison des deux types du BAP montre que le T_{50} du BAPR est toujours inférieure à celui du BAPN pour tous les pourcentages de la pouzzolane naturelle.

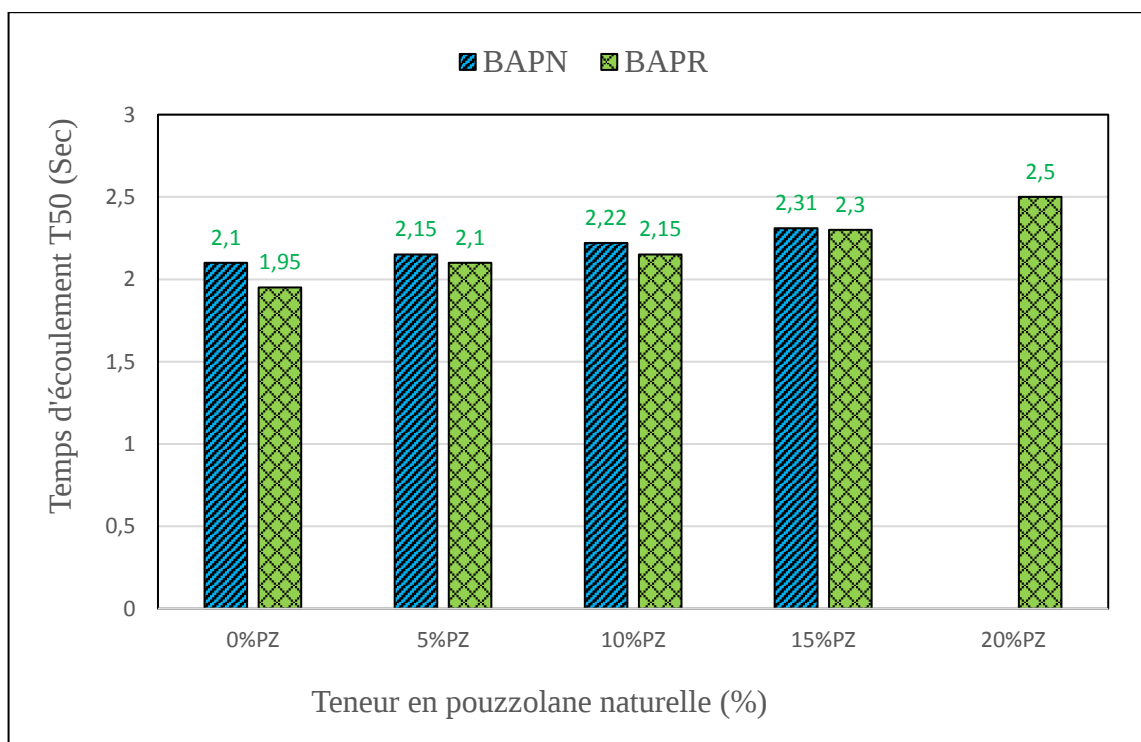


Figure 5.12 : Temps d'écoulement T_{50} des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

5.5.2. Etalement à la couronne (J-Ring test)

L'essai d'étalement au J-ring permet de tester la capacité de passage, remplissage et ainsi le blocage du BAP (De Schutter, 2005). La figure 5.13 présente l'étalement au J-Ring des deux BAP étudiés.

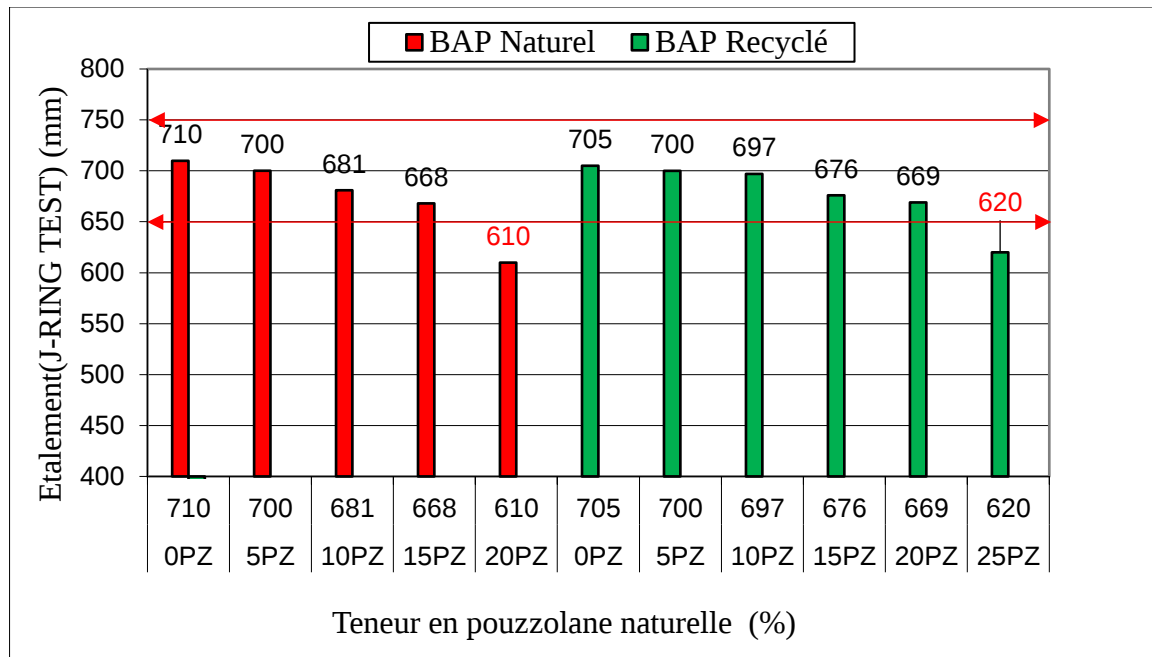


Figure 5.13 : Etalement au cône d'Abrams (J-Ring) des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

On observe que l'étalement au J-Ring obtenu pour les différentes compositions des deux BAP étudiés répond aux exigences du norme d'un bon BAP (650 à 750 mm). Cependant les deux taux de substitutions de 20% PZ pour BAPN et 25% PZ pour BAPR ne satisfont pas les conditions, avec des valeurs de 610 mm et 620 mm respectivement. Il faut noter aussi la chute de l'ouvrabilité des différentes compositions avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle.

Comme il est représenté dans la figure 5.14 le temps d'écoulement T50J du BAPR est aussi inférieur à celui du BAPN avec la pouzzolane naturelle. En ce concerne la différence de hauteur B_j au J-Ring, reste toujours inférieure à la limite maximale de 10 mm, figure 5.15

avec des valeurs de B_j du BAPR inférieures à celles du BAPN pour tous les pourcentages de la pouzzolane naturelle.

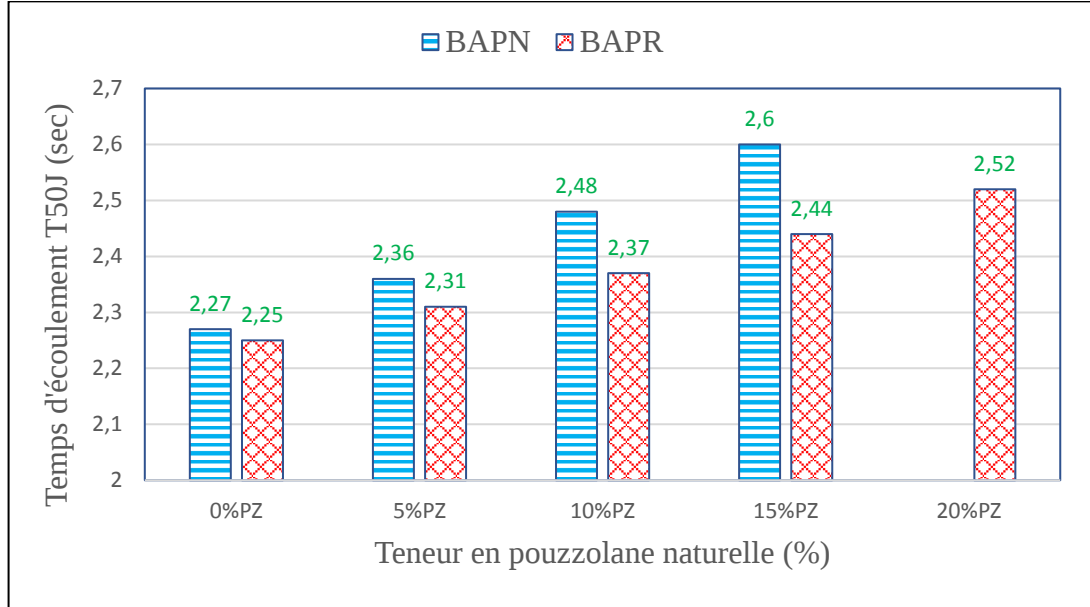


Figure 5.14 : Temps d'écoulement T50J des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

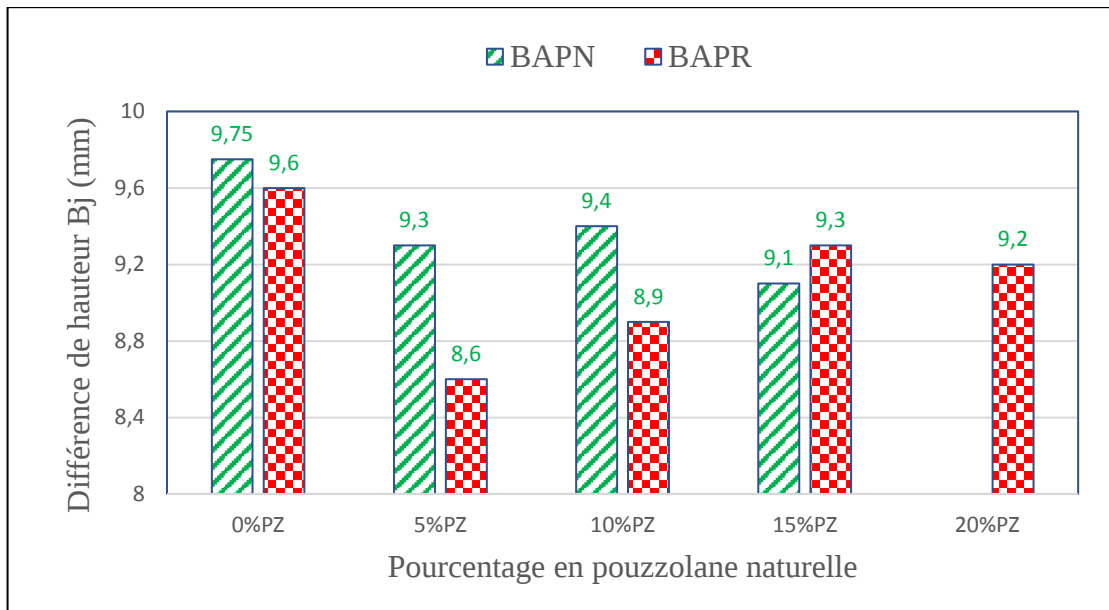


Figure 5.15: Différence de hauteurs B_j au J-Ring des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

5.5.3. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel test)

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de pouzzolane naturelle sont représentés sur la figure 5.16. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange. Les valeurs sont acceptables jusqu'à 15% PZ pour BAPN et jusqu'à 20% PZ pour BAPR. Toutes les valeurs pour les différentes compositions des deux BAP étudiées restent inférieures à la limite maximale qui est égale à 12 secondes. On remarque que le temps d'écoulement T_v augmente avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle. D'après (Park et al., 2005), la viscosité plastique diminue en fonction de l'augmentation de taux de substitution de ciment par l'addition du laitier.

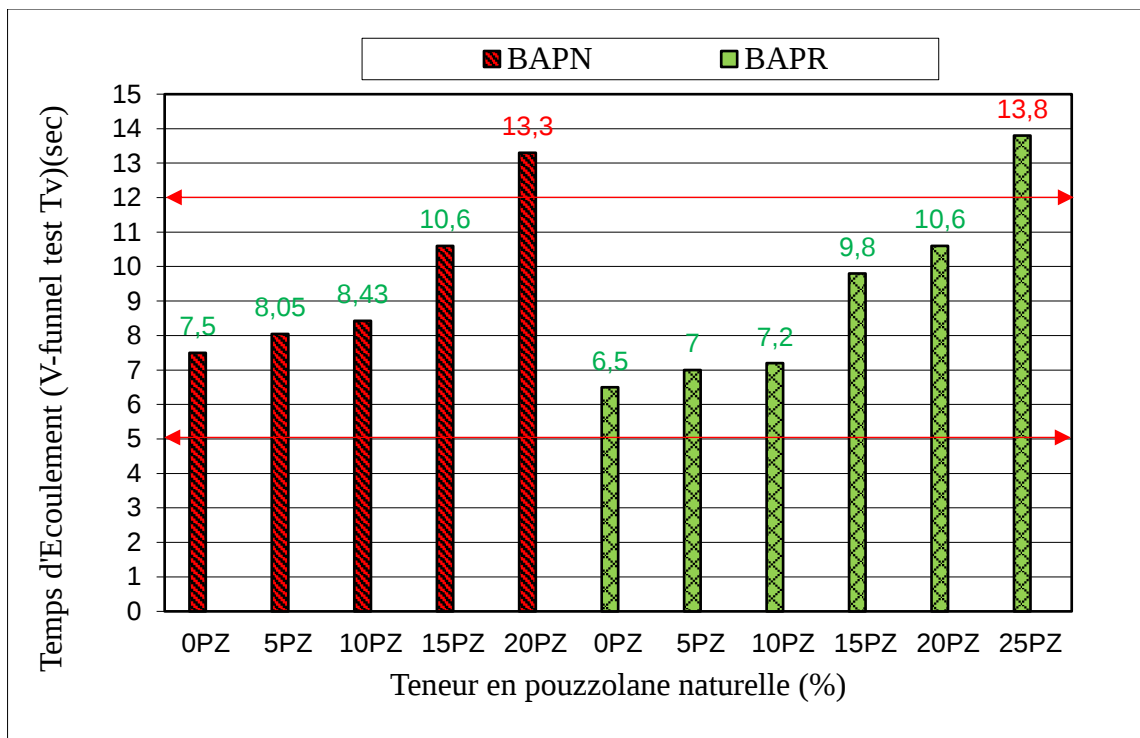


Figure 5.16 : Temps d'écoulement en entonnoir V des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

5.5.4. Essai à la boîte en L (L-Box test)

Les valeurs du rapport H_2/H_1 mesurés à partir de l'essai à la boîte en L sont représentées dans la figure 5.17. Cet essai permet de mesurer l'aptitude du béton à traverser une zone

ferraillée, et il permet aussi de tester la capacité de remplissage. On a observé que le rapport $H2/H1$ est entre (80% et 82.5%) pour le BAP N, Par contre, le rapport est très élevé pour les BAP R et, (81% et 85%).

Des résultats similaires ont été rapportées par (Grdic et al., 2010), avec un taux de remplissage de 94% pour un BAP à base de granulats naturels et un taux de 95% et 98% pour le BAP à base de 50% et 100% de granulats recyclés, (Boukendakdji, 2010) a trouvé un rapport $H2/H1$ de 83%, 86% et 95% pour substitution en laitier de 10%,15% et 20% respectivement. (Debbih, 2012) a trouvés des résultats similaires avec un rapport $H2/H1$ ne dépasse pas 65% pour le BAP (GN) avec un léger blocage au niveau des armatures. Par contre, le rapport est très élevé pour les BAP (GR) et BAP (GN/GR), 95% et 98%, respectivement et sans présence de blocage. Donc, le BAP à base de 50% de granulats recyclés (BAPR) dépasse la limite minimale exigée par les normes qui est égale à 85%, contrairement au BAP à base de granulats naturels. Cette capacité élevée de passage et de remplissage du BAP à base de granulats recyclés est peut-être due au changement de la granulométrie des granulats lors de malaxage.

Dans notre cas on remarque que la capacité de passage et de remplissage du BAP à base de granulats recyclés est élevée par rapport à celle du BAP à base de granulats naturels, cela est peut-être due au nature des granulats recyclés. (Corinaldesi et al., 2002) ont montré en termes d'étalement et L-Box que le BAP à base de granulats recyclés à un comportement satisfaisant.

Les figures 5.18 et 5.19 représentent les valeurs du temps d'écoulement T_{20} et T_{40} mesurés à l'essai de la boîte en L. Les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} sont vérifiés pour toutes les compositions des deux types de BAP. On remarque que les valeurs de temps d'écoulement T_{20} et T_{40} sont presque comparables pour le BAPN pour tous les pourcentages en pouzzolane naturelle. Par contre, on note une augmentation des valeurs de temps d'écoulement T_{20} et T_{40} avec l'augmentation des pourcentages en pouzzolane naturelle pour le BAPR.

(Debbih, 2012) a trouvés que Les valeurs de T_{40} sont vérifiées pour les deux BAP (BAP (GN) avec 15% du laitier) et (BAP (GN) avec 15% de la pouzzolane naturelle) mais pas pour le BAP (GN) sans ajout où la valeur du T_{40} dépasse les 3,50 secondes.

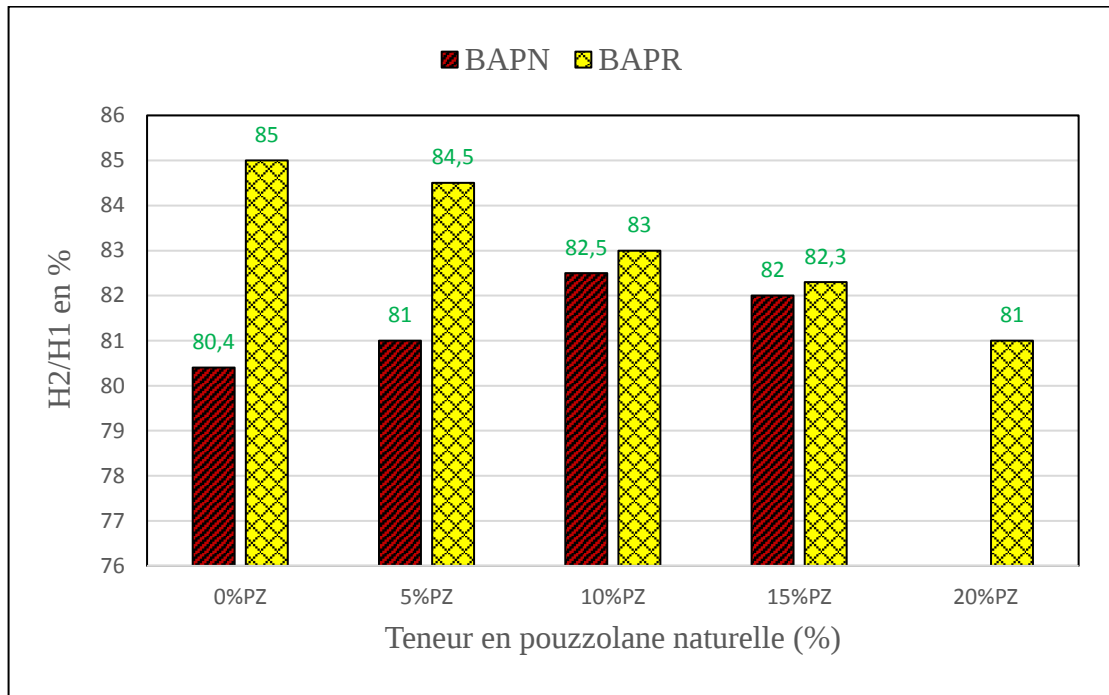


Figure 5.17 : Rapport $H2/H1$ de l'essai à la boîte en L des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

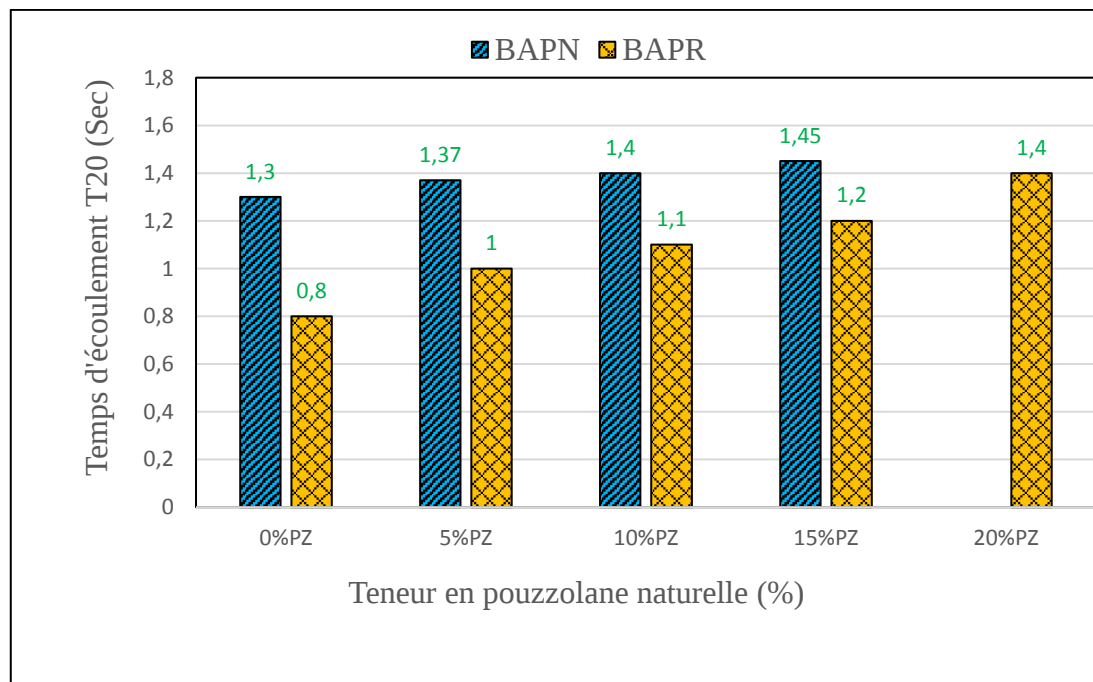


Figure 5.18 : Le temps d'écoulement T20 des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

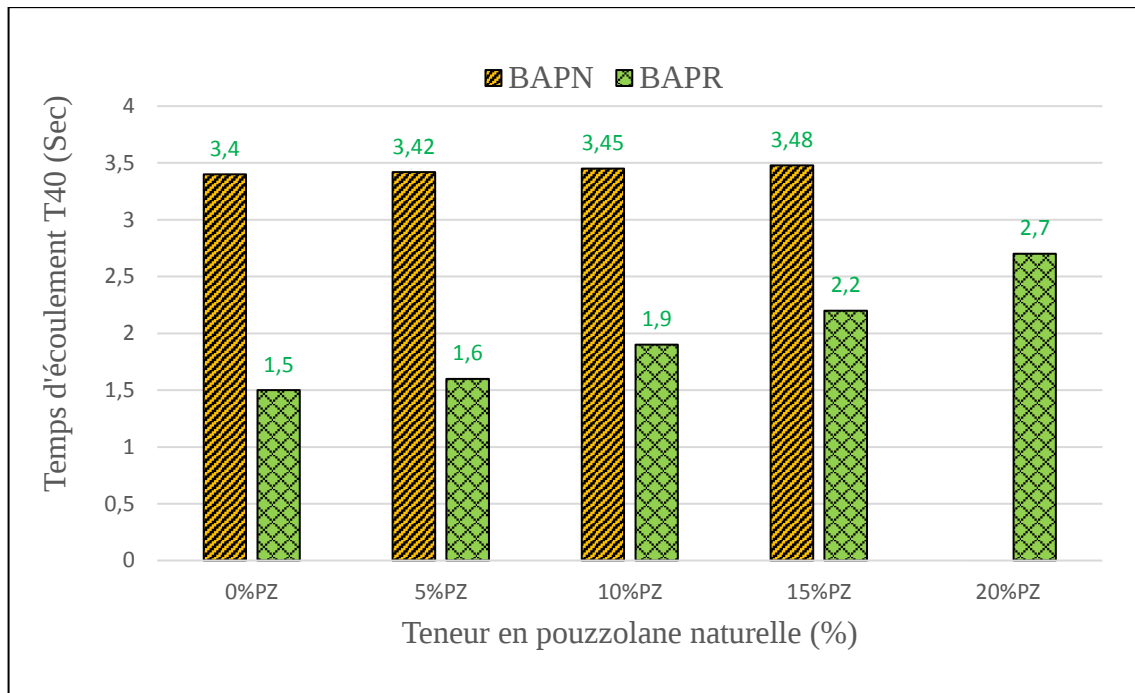


Figure 5.19 : Le temps d'écoulement T40 des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

5.5.5. Essai de résistance à la ségrégation au tamis

Cet essai est proposé dans les recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil (AFGC, 2002). On remarque d'après la figure 5.20 que toutes les compositions des deux types de BAP répondent aux exigences données par les recommandations de (AFGC) ($0 \leq \pi \leq 15\%$ la stabilité est satisfaisante). On note que les valeurs de (π) pour BAPR sont inférieures à celles de BAPN pour tous les pourcentages de la pouzzolane naturelle.

(Necira et al., 2007) ont trouvé un pourcentage de laitance, passant à travers le tamis, égale à environ 9 contre 10 trouvé par (Boukendakdji, 2010) avec le même pourcentage du laitier (15%). Dans notre cas, avec 15% de pouzzolane on a trouvé 11.3 pour le BAPN et 7.6 pour le BAPR.

Cela signifie que le BAPR est plus stable que le BAPN à cause du taux élevé des fines qui provient de l'ancienne pâte du ciment lors de concassage et lors de malaxage dans le BAPR par rapport au BAPN.

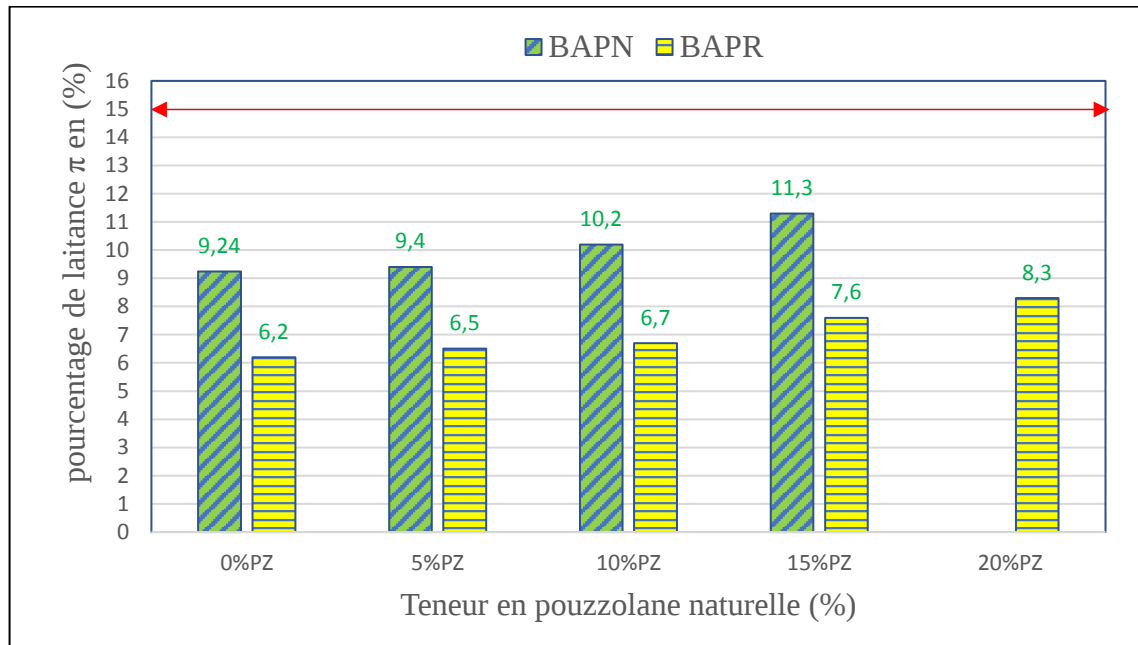


Figure 5.20 : Résultats de la résistance à la ségrégation au tamis des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

5.6. Conclusion

- Le BAP à base de 50% granulats recyclés (BAPR) possède des propriétés comparables à celles du BAP à base de granulats naturels.
- La pouzzolane naturelle diminue l'ouvrabilité des BAP à base de granulats naturels et à base de 50 % granulats recyclés.
- Cependant, pour satisfaire aux exigences normalisées des BAP, le contenu des agrégats recyclés devrait être limité à 50% pour obtenir de bonnes performances.
- La substitution de la pouzzolane naturelle est limitée à 15% pour le BAPN et à 20% pour le BAPR pour l'étude expérimentale de la performance mécanique et durabilité des BAP.

5.7. Effet de la pouzzolane naturelle sur les résistances mécaniques des BAP à l'état durci

Le tableau 5.13 donne les résultats des essais de résistances à la compression et à la traction par flexion pour les neuf BAP étudiés aux âges 7, 28, 56, 90 et 120 jours.

Tableau 5.13 : Résistances mécaniques des différents types du BAP sans et avec PZ

		Résistances R_c et R_{tf} (MPa) BAP N				Résistances R_c et R_{tf} (MPa) BAP R				
Jours	Nature de la Résistance	0% PZ	5% PZ	10% PZ	15% PZ	0% PZ	5% PZ	10% PZ	15% PZ	20% PZ
7	Compression	28.6	28	26	21.8	26.4	24	19.84	19.5	18.5
	Traction par flexion	6.2	5.6	5.1	4.4	6.6	5.8	5.6	5	4.6
28	Compression	32.5	31.5	30.2	24.5	31.5	29.6	24.2	23.2	21.5
	Traction par flexion	6.8	6.7	5.7	5.8	7.6	7.4	6.2	6.8	6.2
56	Compression	37	35.5	35	27.5	38	31.5	28.5	28.3	26.5
	Traction par flexion	7.5	7.2	6.8	6.6	7.6	7.5	6.8	6.9	6.4
90	Compression	40	37.8	35	28	38.7	32.5	29.4	30	27.5
	Traction par flexion	7.7	7.3	7	6.7	7.8	7.7	7	7.2	6.9
120	Compression	40.5	38	35.2	31.5	40	34.4	31	31.5	31
	Traction par flexion	7.9	7.5	7.2	7	8	7.8	7.2	7.5	7.2

5.7.1. Résistance à la compression

La figure 5.21 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle à différents âges pour (BAPN). Une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane naturelle dans le mélange est observée à tous les âges. A 28 jours, cette diminution est de 3.08%, 7.08% et 24.61% respectivement pour des taux de substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle de 5%, 10% et 15%. En comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 15%, on remarque que la différence à 28 jours est de 8,0 MPa, cette différence augmente à 9.5 MPa à 56 jours, à 12 MPa à 90 jours, et à 9 MPa à 120 jours.

La figure 5.22 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle à différents âges pour (BAPR). Une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane naturelle dans le mélange est observée à tous les âges. A 28 jours, cette diminution est de 6.03%, 23.17%, 26.35% et 31.74%, respectivement pour des taux de substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle de 5%, 10%, 15% et 20%. En comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 20%, on remarque que la différence est de 10 MPa à 28 jours, de 11.5 MPa à 56 jours de 11.2 MPa à 90 jours et de 9 MPa à 120 jours. Soit une diminution de 31.74%, 30.26%, 28.94% et 22.5%, respectivement.

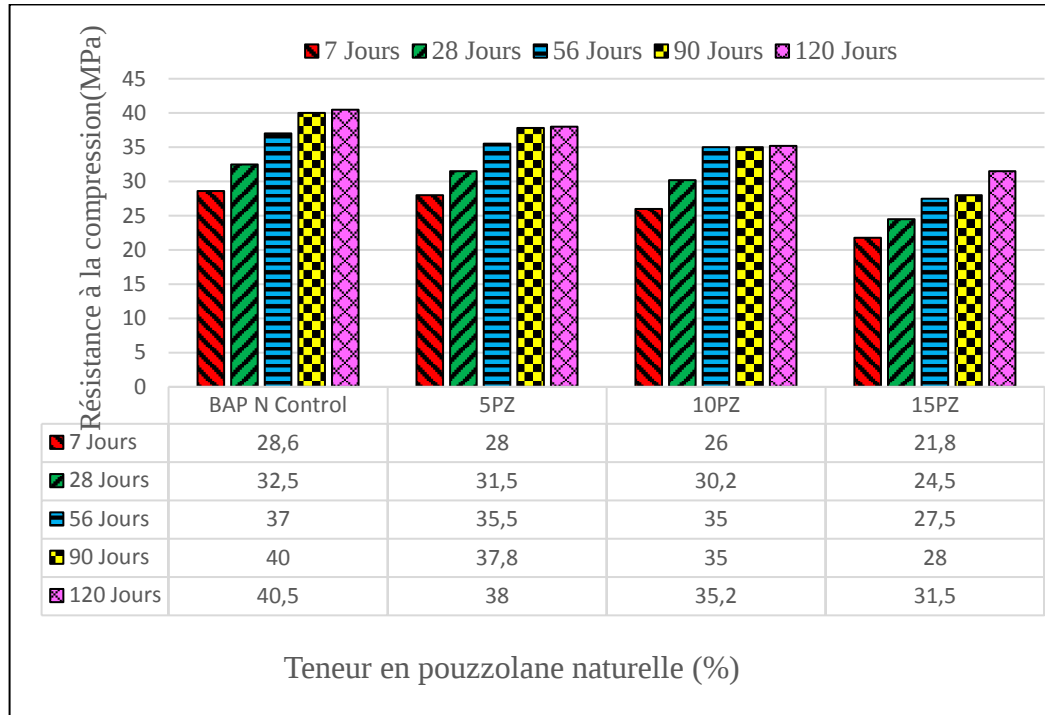


Figure 5.21: Variation de la résistance à la compression du (BAP N).

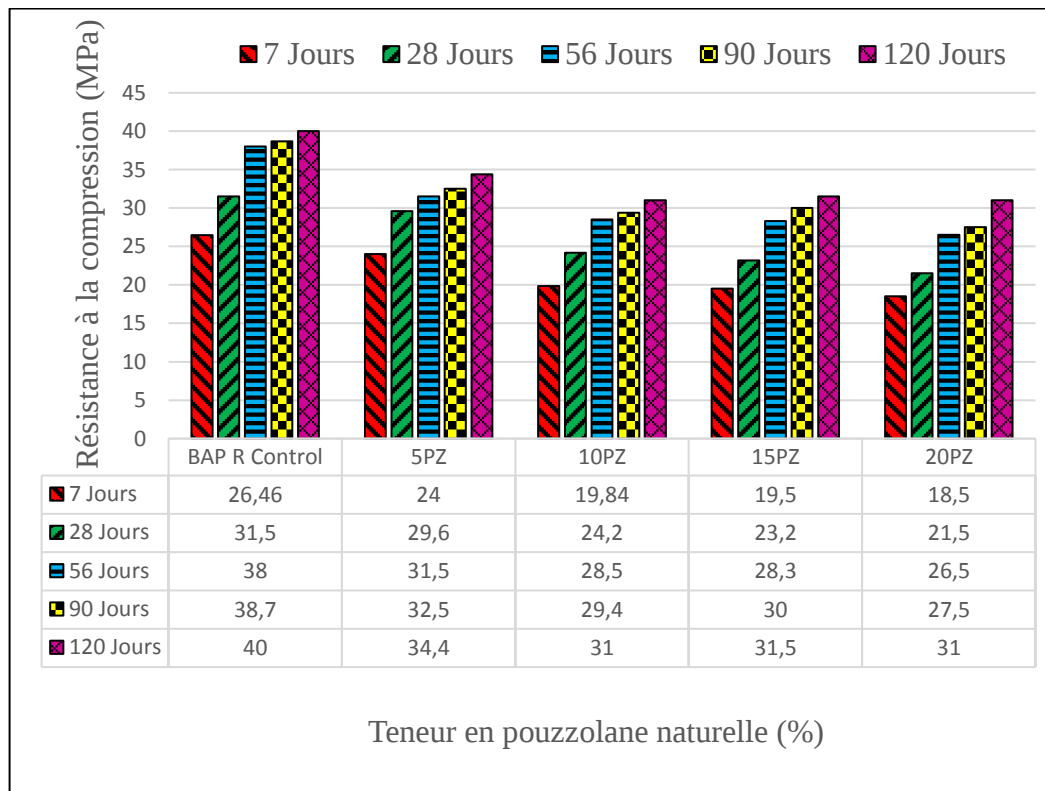


Figure 5.22 : Variation de la résistance à la compression du (BAP R).

Pour mieux visualiser d'évolution de la résistance à la compression, on étudie les différents rapports tels que :

- σ_i / σ_{28} : ($i = 7 - 120$ jours) ;

La figure 5.23 représente le rapport de la résistance à la compression à j jours (σ_i) par celle mesurée à 28 jours (σ_{28}) du BAPN. En comparant l'évolutions des résistances à la compression pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 15%, on observe une évolution de 14%, 23% et 26% pour BAPN à 0%PZ et 12%, 14% et 28% pour BAPN à 15%PZ à 56, 90 et 120 jours respectivement.

Pour le BAP à base de granulats recyclés (BAPR), la résistance à la compression est de 20%, 23% et 27% pour BAPR à 0%PZ et 21%, 25% et 42% pour BAPR à 20%PZ à 56, 90 et 120 jours respectivement, figure 5.24. Ceci montre clairement le développement de la résistance à la compression à long terme (120 jours) des mélanges à base de pouzzolane naturelle. Ceci aussi montre que l'activité de la pouzzolane naturelle est assez lente.

Un effet similaire sur la résistance à la compression a été observé avec la pouzzolane naturelle sur le béton ordinaire (Ghrichi et al., 2007). Toujours dans le cadre d'effet des ajouts combinés, (Fang et al., 1999) ont pu améliorer la résistance à la compression à 28 jours à 69 MPa en substituant au ciment 30% de cendres volantes et 30% de laitier mais en prenant un rapport E/L égale à 0,28. (Bougara et al., 2007) ont expliqué les propriétés mécaniques faibles, à jeune âge, du béton à base de laitier par la lente réactivité du laitier. Ils ont aussi trouvé que la résistance à la compression à long terme augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier.

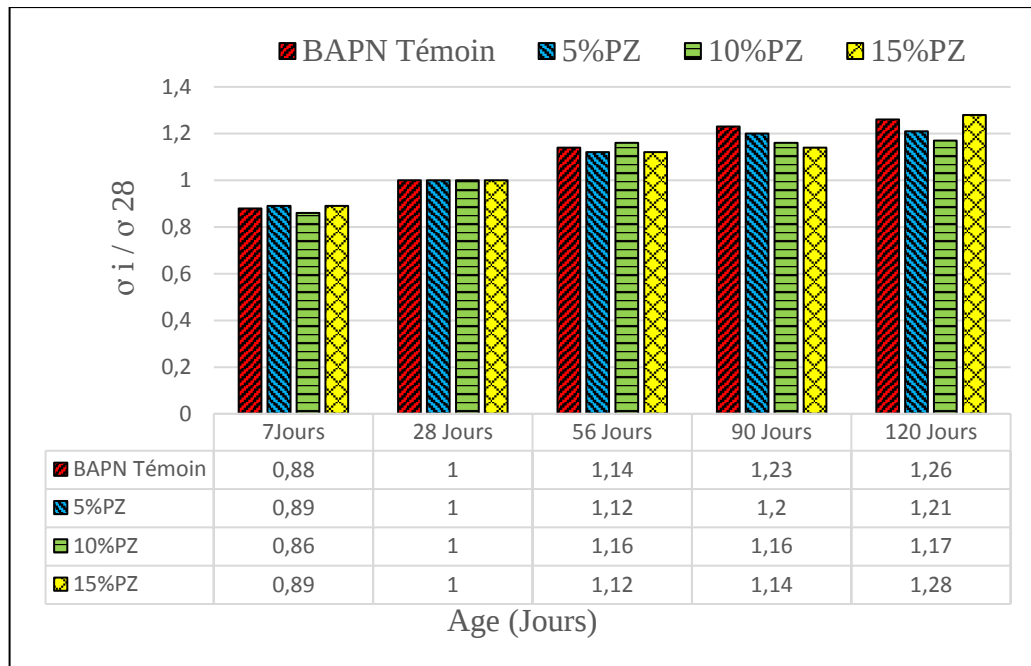


Figure 5.23 : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps du BAPN.

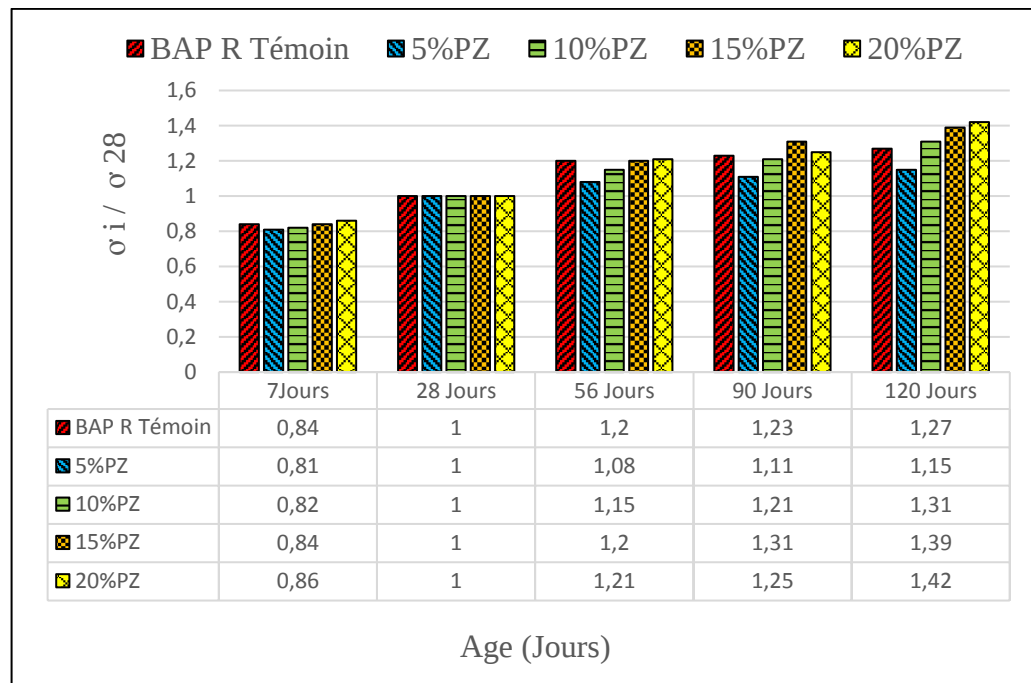


Figure 5.24 : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps du BAPR.

(Ali Aichouba et Ghrici, 2005) ont étudié les effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés physico-mécaniques et de la durabilité des ciments à base de calcaire (CPJ CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie de Chlef - Oued-Sly (ECDE) contenant 10% de calcaire. Ils ont conclu que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge, et que les résistances sont comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier contrôle à l'âge de 90 jours.

5.7.2. Résistance à la traction par flexion

La figure 5.25 montre la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle à différents âges pour (BAPN). Une tendance similaire à celle de la résistance à la compression est observée. A 28 jours, cette diminution est de 4.41%, 16.17% et 14.7% respectivement pour des taux de substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle de 5%, 10% et 15%. En comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 15%, on remarque que la différence est de 1 MPa à 28 jours, de 0.9 MPa à 56 jours, de 1 MPa à 90 jours et de 0.9 MPa à 120 jours. Soit une diminution de 14.7%, 12%, 13% et 11.4% respectivement. Il faut noter que le taux de diminution de la résistance à la traction par flexion est nettement inférieur à la diminution de la résistance à la compression.

La figure 5.26 montre la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle à différents âges pour (BAPR). Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane naturelle dans le mélange est observée à tous les âges. A 28 jours et en chiffres, cette diminution est de 2.63%, 18.42%, 10.52% et 18.42% respectivement pour des taux de substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle de 5%, 10%, 15% et 20%. En comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 20%, on remarque que la différence à 28 jours était de 1.4 MPa, à 56 jours était de 1.2 MPa, à 90 jours était de 0.9 MPa, et à 120 jours était de 0.8 MPa. Soit une diminution de 18.42%, 15.78%, 11.53% et 10% respectivement.

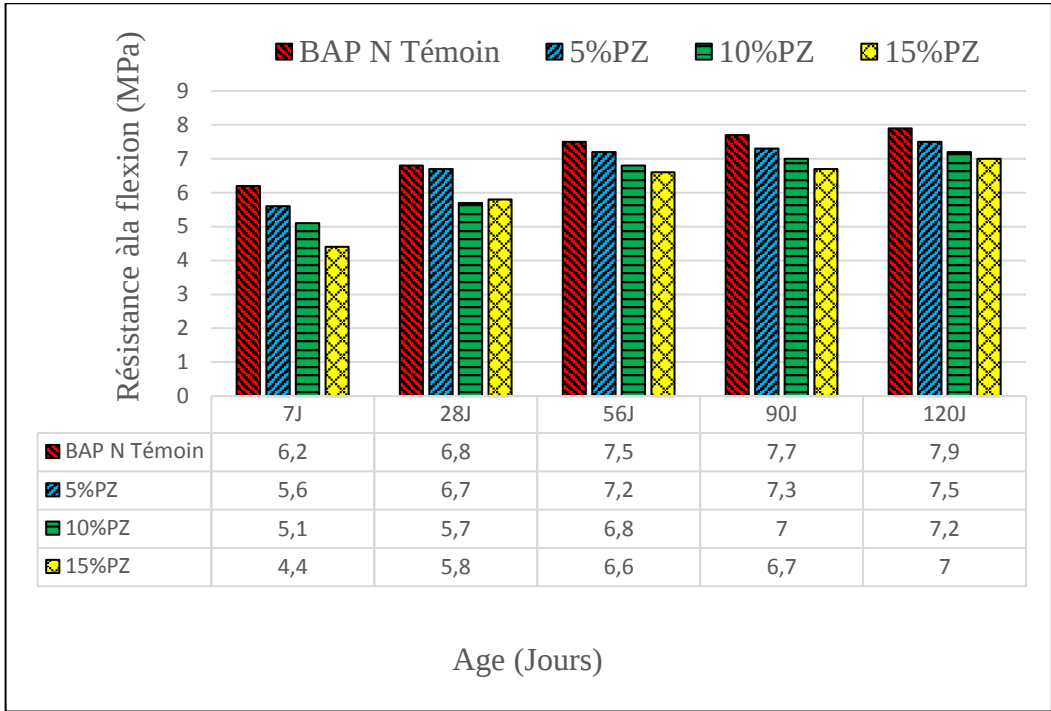


Figure 5.25 : Variation de la résistance à la traction par flexion du (BAP N).

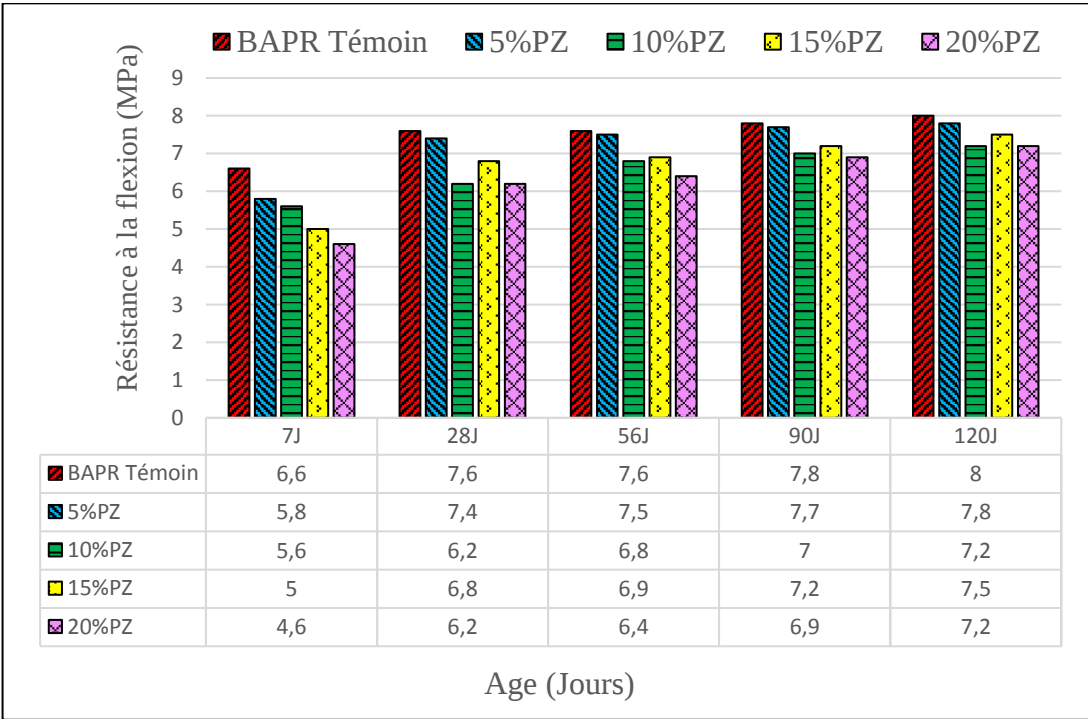


Figure 5.26 : Variation de la résistance à la traction par flexion du (BAP R).

La figure 5.27 représente le rapport de la résistance à la traction par flexion par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps du BAPN. En comparant l'évolutions des résistances à la traction pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 15%, on observe une évolution de 10%, 13% et 16% pour BAPN à 0%PZ et 14%,15% et 21% pour BAPN à 15%PZ à 56,90 et 120 jours respectivement.

La résistance à la traction par flexion des BAP avec granulats recyclés (BAPR) est légèrement supérieure à celle des BAP avec granulats naturels (BAPN). Ceci est probablement due à la forme plus angulaire des granulats recyclés, figure 5.28. En comparant l'évolutions des résistances à la traction pour les deux teneurs en pouzzolane naturelle, 0 et 20%, on observe une évolution de 0%, 2% et 5% pour BAPR à 0%PZ et 3%,11% et 17% pour BAPR à 20% PZ à 56,90 et 120 jours respectivement.

(Ali Aichouba et Ghrici, 2005) ont trouvé que à 90 jours, les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle ont des résistances a la flexion qui dépassent celle du mortier contrôle. Ainsi, la résistance à la flexion d'un mortier contenant 25% de pouzzolane naturelle dépasse la résistance du mortier contrôle de 13%. D'après (Domone, 2007) le rapport entre les résistances à la traction et à la compression pour le BAP est très similaire à celui des bétons ordinaires. (Felekoglu et al., 2007) ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances à la traction élevées comparées à celles des bétons traditionnels.

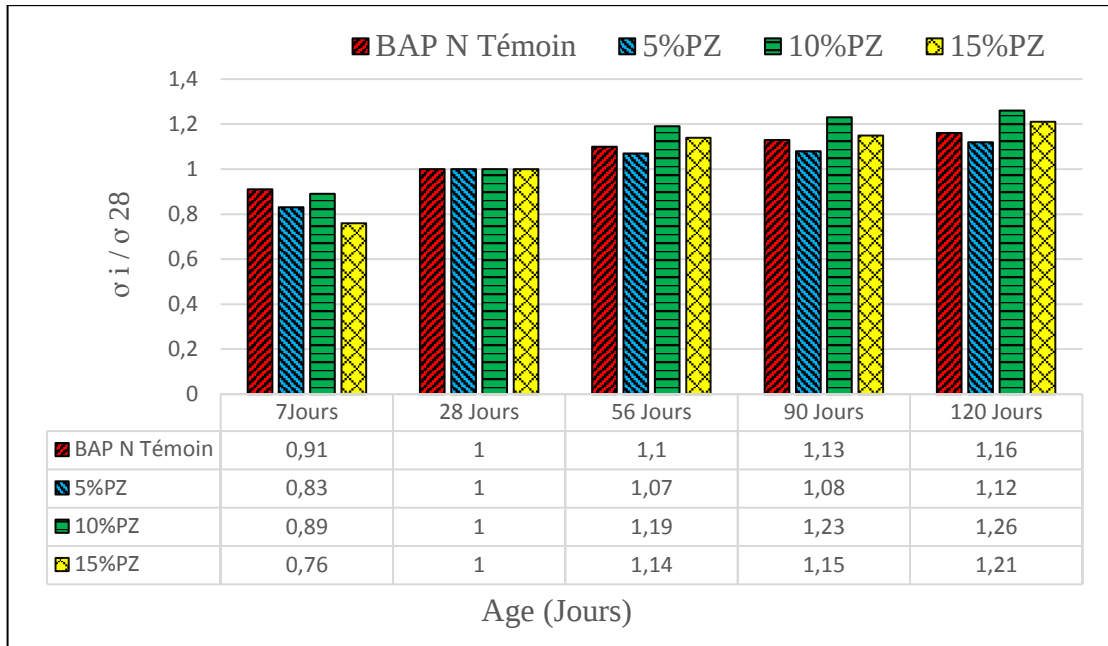


Figure 5.27 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du (BAP N) en fonction du temps avec et sans pouzzolane naturelle.

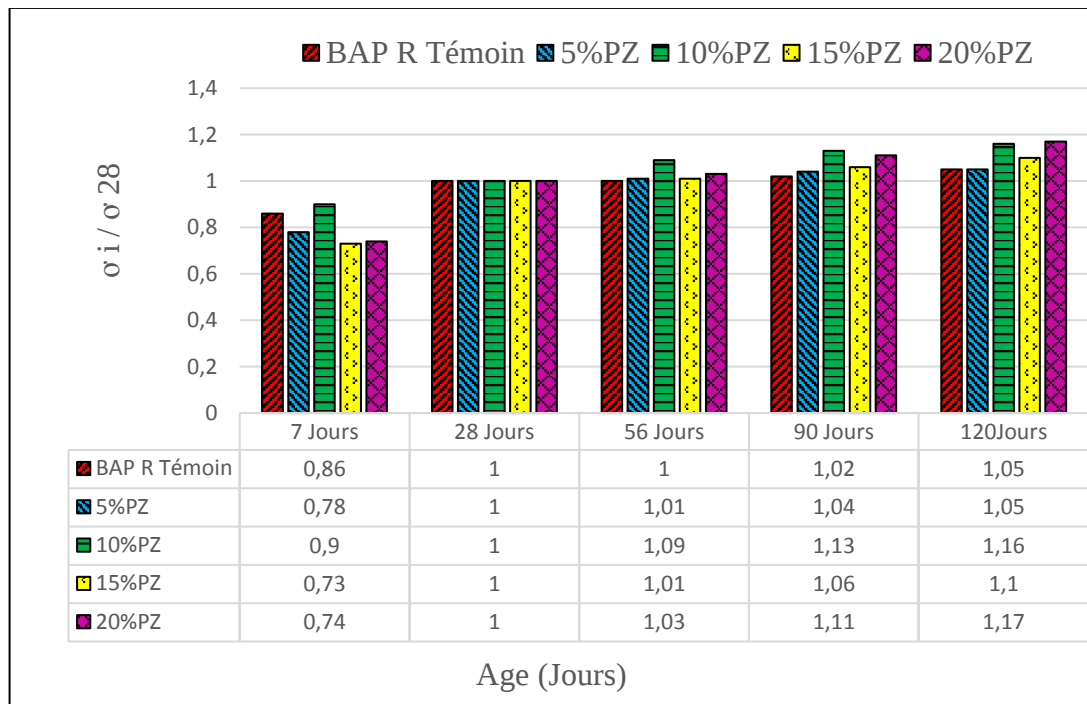


Figure 5.28 : Evolution de la résistance à la traction par flexion du (BAP R) en fonction du temps avec et sans pouzzolane naturelle.

5.8 Corrélation entre R_{tf} et R_c des différents BAP

Les résultats de l'étude des résistances à la compression et traction par flexion ont été corrélés entre eux et la corrélation trouvée avec R^2 est de (0.50 ,0.89 et 0.94) pour BAPN et (0.84, 0.81 et 0.82) pour BAPR à 28, 90 et 120 jours respectivement. Figure 5.29.

On remarque que le coefficient de détermination R^2 pour le béton à base de granulats naturels (BAPN) à 28 jours est assez faible, ce qui implique une mauvaise corrélation entre la résistance de traction par flexion R_{tf} et celle de compression R_c , mais la corrélation a été améliorée par l'augmentation notable de R^2 à 90 et 120 jours, tant que le coefficient de détermination R^2 pour le béton à base de granulats recyclés (BAPR) a été marqué une valeur élevée presque constante à partir de 28 jusqu'à 120 jours. On peut conclure qu'il existe une bonne corrélation entre la résistance de traction par flexion R_{tf} et celle de compression R_c .

On conclure que l'utilisation des granulats recyclés et la pouzzolane naturelle a contribué aux bonnes corrélations entre R_{tf} et R_c .

Dans la littérature le rapport f_t/f_c diminue quand la résistance du béton en compression augmente. Ce rapport varie entre 1/10 et 1/15 pour le béton ordinaire (f_{cj} 30MPa). Pour le béton à haute performance (f_{cj} 40MPa) ce rapport varie entre 1/15 et 1/20.

Un certain nombre de formules empiriques reliant f_t et f_c ont été proposées, la plupart ayant la forme suivante équation (5.1) :

$$f_t = k \cdot (f_c)^n \quad (5.1)$$

Où k et n sont des coefficients. Des valeurs de n variant entre 1/2 et 3/4 ont été proposées.

La première valeur est utilisée par l'American Concrete Institute alors que (Gardner et Poon, 1976) ont trouvé une valeur plus proche de 3/4, des formes cylindriques ayant été utilisés dans les deux cas pour tester les spécimens. L'expression suivante semble donner la meilleure relation entre f_t et f_c équation (5.2) :

$$f_t = 0.3 (f_c)^{2/3} \quad (5.2)$$

Où f_t est la résistance au fendage et f_c la résistance à la compression, toutes deux en MPa mesurées sur des cylindres. Cette expression a été modifiée par (Raphael, 1984) équation (5.3) :

$$f_t = 0.2 f_c^{0.7} \quad (5.3)$$

L'expression suivante, similaire à celles représentées précédemment, est utilisée par le British Code of Practice BS 8007 : 1987 équation (5.4):

$$f_t = 0.12 f_c^{0.7} \quad (5.4)$$

Où f_c la résistance à la compression (MPa) est déterminée sur cube et f_t représente la résistance à la traction directe.

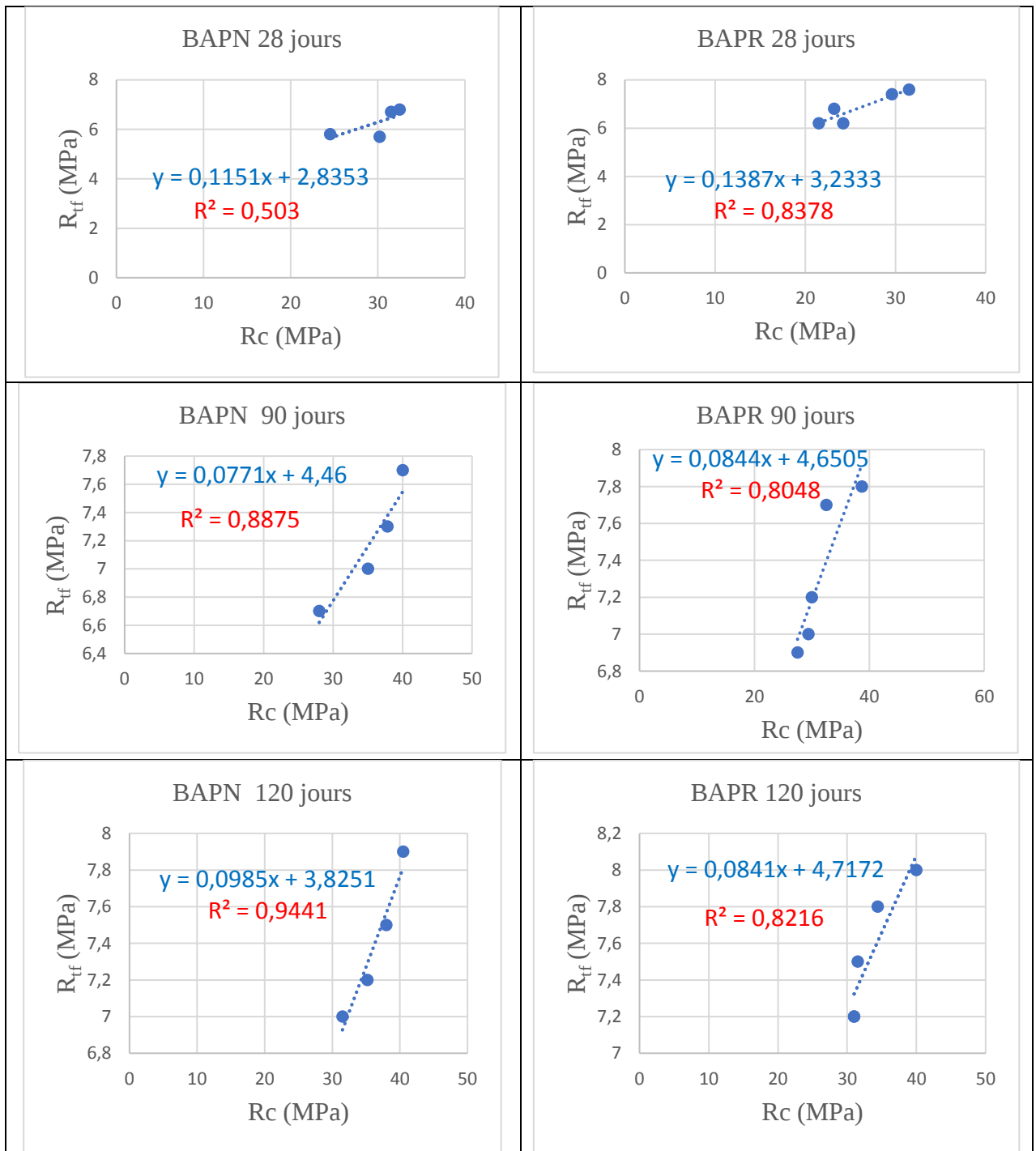


Figure 5.29 : Corrélation entre la résistance à la traction par flexion R_{tf} et la résistance à la compression R_c des différents BAP.

5.9. Conclusion

Après l'étude de l'effet de la pouzzolane naturelle sur les résistances mécaniques des BAP à l'état durci on peut tirer les conclusions suivantes :

- La pouzzolane naturelle améliore la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion à long terme. Ceci est dû à la réaction de la pouzzolane naturelle avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former les C-S-H de deuxième génération.
- L'évolution de la résistance à la compression du BAPN à 15%PZ est de 28% contre 26% pour BAPN à 0%PZ à 120 jours. L'évolution du BAPR à 20%PZ est de 42% contre 27% pour BAPR à 0%PZ à 120 jours.
- L'évolution de la résistance à la traction par flexion du BAPN à 15%PZ est de 21% contre 16% pour BAPN à 0%PZ à 120 jours. Cette évolution pour BAPR à 20%PZ est de 17% contre 5% pour BAPR à 0%PZ à 120 jours.

CHAPITRE 6

DISCUSSION DES RÉSULTATS

(DURABILITÉ)

CHAPITRE 6

DISCUSSION DES RESULTATS : DURABILITE.

6.1. Introduction

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques rhéologiques et mécaniques pour le béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité de la condition de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité (Al-Amoundi et al.,1995). Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera améliorée.

Dans le but de mettre en évidence le comportement des BAP en milieux agressifs nous avons effectué les essais de l'absorption capillaire (la sorptivité), la diffusion des ions chlore, la résistance aux attaques acides (HCl et H₂SO₄) et la résistance aux attaques sulfatiques externes (Na₂SO₄ et MgSO₄).

6.2. Absorption capillaire (la sorptivité)

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus l'absorption capillaire est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. La sorptivité est caractérisée par le coefficient de sorptivité (S) tel que :

$$S = (Q/A) / t^{0.5}$$

Les coefficients de sorptivité (S), sont présentés pour les deux échéances de conservation (28 et 90 jours) sous forme d'histogramme dans les figures 6.1 et 6.2. A partir de la figure 6.1, la comparaison entre les deux formulations du BAP montre des faibles coefficients de sorptivité des formulations du BAP PZ par rapport à celles des BAP références. La grande différence pour cet essai réalisé après 28 jours de cure est notée pour BAP N15, et BAP R20 présente un écart de 14.28% et 13.33% par rapport à celles des BAP références (BAPN et BAPR) respectivement.

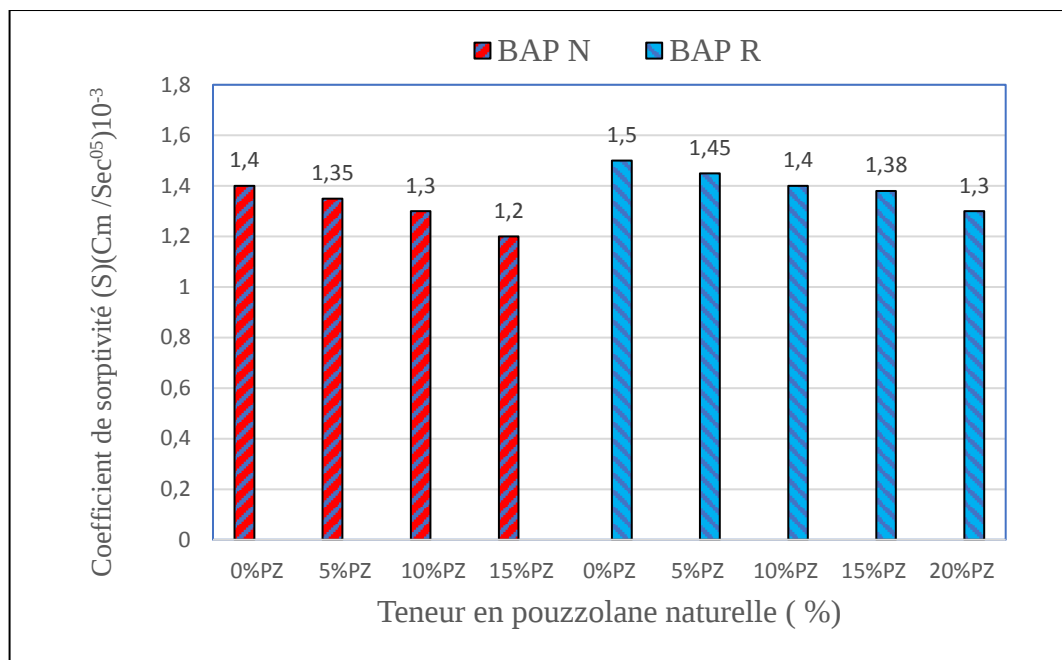


Figure 6.1 : Coefficients de sorptivité des deux BAP à 28 jours.

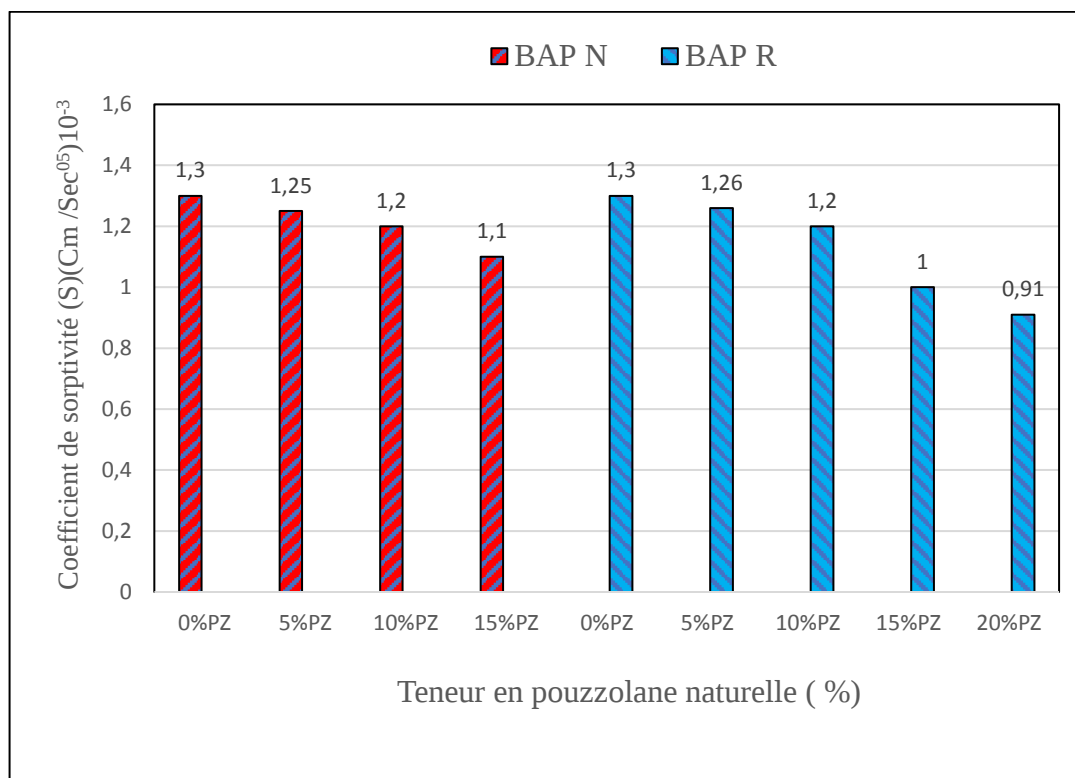


Figure 6.2 : Coefficients de sorptivité des deux BAP à 90 jours.

D'après la figure 6.2 nous remarquons qu'à 90 jours de cure le coefficient de sorptivité est inférieur à celui de 28 jours de cure, et on note une différence de 15.5% pour BAP N15 et 30% pour BAP R20 respectivement par rapport à celles des BAP références.

Nous remarquons que l'incorporation de la pouzzolane naturelle a un effet bénéfique sur la dimension des capillaires de la pâte de ciment durci, puisque l'absorption capillaire renseigne sur la montée de l'eau à travers la porosité ouverte du béton produite par la tension superficielle du liquide. La présence de la pouzzolane naturelle réduit les pores capillaires par le remplissage de ces pores par le gel CS-H de seconde génération formé à partir de la silice de la pouzzolane et la portlandite, l'hydrate résultant de l'hydratation du ciment (Ghrichi et al., 2007).

En ce concerne des deux formulations des BAP sans PZ, ils ont presque la même valeur de coefficient de sorptivité avec une légère différence entre le BAPN et BAPR à 28 jours. Ceci est probablement dû aux différences des coefficients d'absorption des granulats recyclés et naturels.

6.3 Diffusion des ions chlore

La pénétration d'ions chlore peut se traduire suivant plusieurs formes, on peut citer quelques-unes :

- Par suite de la combustion de matières organiques contenant des chlorures.
- Par écoulement d'eau chargée en chlorures
- Par diffusion d'ions dans l'eau
- Par absorption

Les chlorures peuvent progresser jusqu'à une profondeur considérable, lorsque le béton est immergé en permanence.

L'attaque par les chlorures se distingue par le fait qu'elle entraîne la corrosion des armatures provoquant la dégradation du béton environnant. La corrosion des armatures est l'une des causes principales de la détérioration des structures en béton armé partout à travers le monde. Dans cette partie, on traite la résistance à la pénétration d'ions chlores des BAP avec et sans pouzzolane naturelle.

6.3.1. Résultats et discussion d'essai d'immersion totale

D'après les figures 6.3 à 6.5 on constate que la profondeur de pénétration de des ions chlorure de BAP N et de BAP R immergés en solution (3% de NaCl) augmente avec l'augmentation du temps d'immersion. On constate aussi que la profondeur des ions chlores des BAP contient de la pouzzolane naturelle est inférieure à celle du BAP sans pouzzolane, Soit pour les BAP à base de granulats recyclés ou granulats naturels. Ceci montre l'influence de l'addition de la pouzzolane naturelle sur la microstructure du béton, et sur la perméabilité aux ions chlores. (Grici et al., 2006) ont obtenus des résultats similaires pour des bétons ordinaires. A 28 jours la réduction de profondeur de pénétration des ions chlore est de 14% à 64% pour BAPN et de 12% à 56% pour BAPR. La réduction de profondeur de pénétration augmente avec le taux de substitution de pouzzolane. Cette réduction augmente avec l'âge.

A 90 jours, la réduction est d'environ 30%, 55% et 60 % pour BAPN avec 5%PZ, 10%PZ et 15%PZ, respectivement, et d'environ 6.66%, 46.66%, 46.66 % et 60% pour BAPR avec 5%PZ, 10%PZ, 15%PZ et 20%PZ, respectivement. A 120 jours, la réduction est d'environ 25%, 41.66% et 45.83 % pour BAPN avec 5%PZ, 10%PZ et 15%PZ, respectivement, et d'environ 11.11%, 44.44%, 33.33 % et 50% pour BAPR avec 5%PZ, 10%PZ, 15%PZ et 20%PZ respectivement.

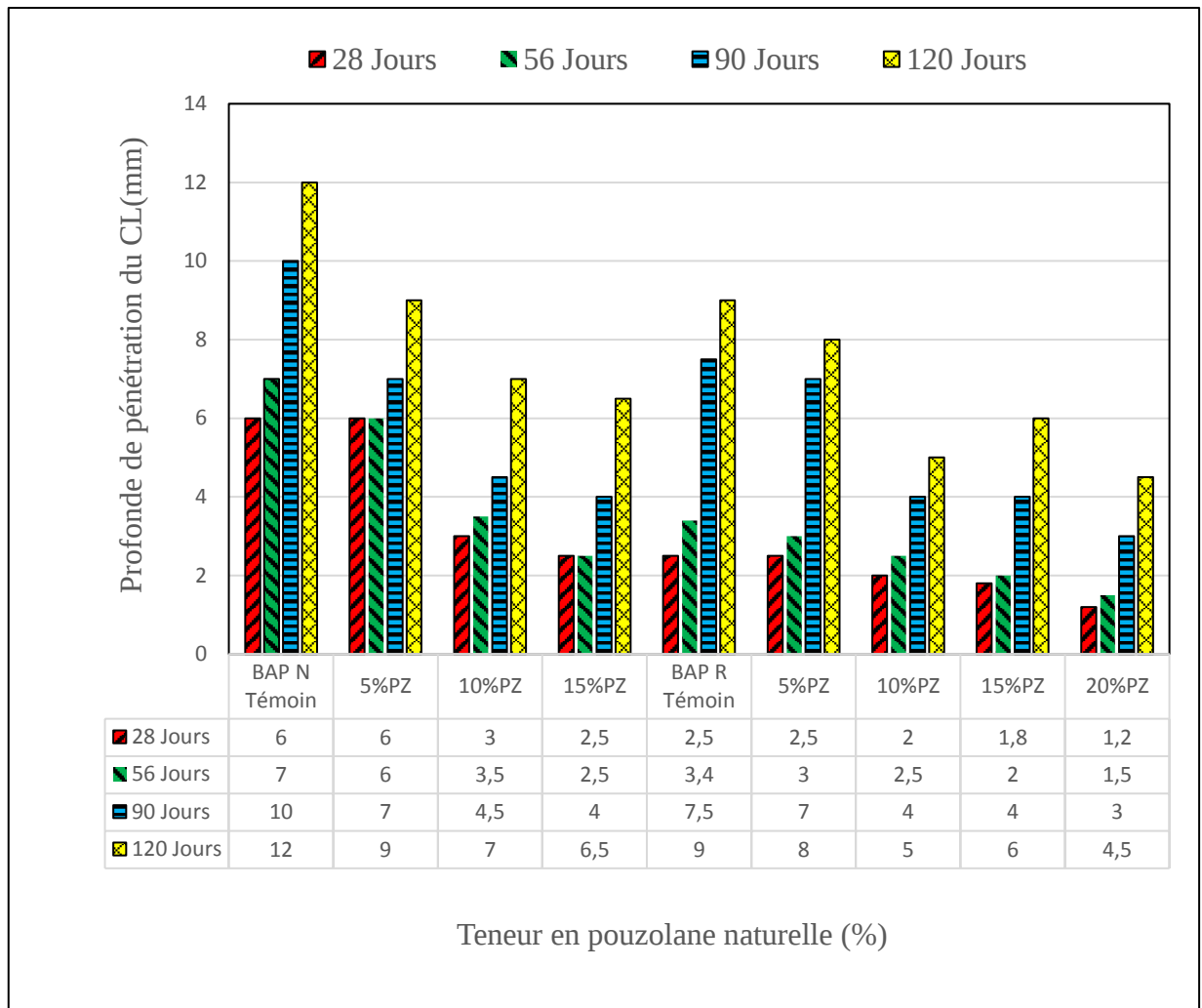


Figure 6.3: Relation entre la profondeur de pénétration des ions Cl^- et le taux de substitution en PZ.

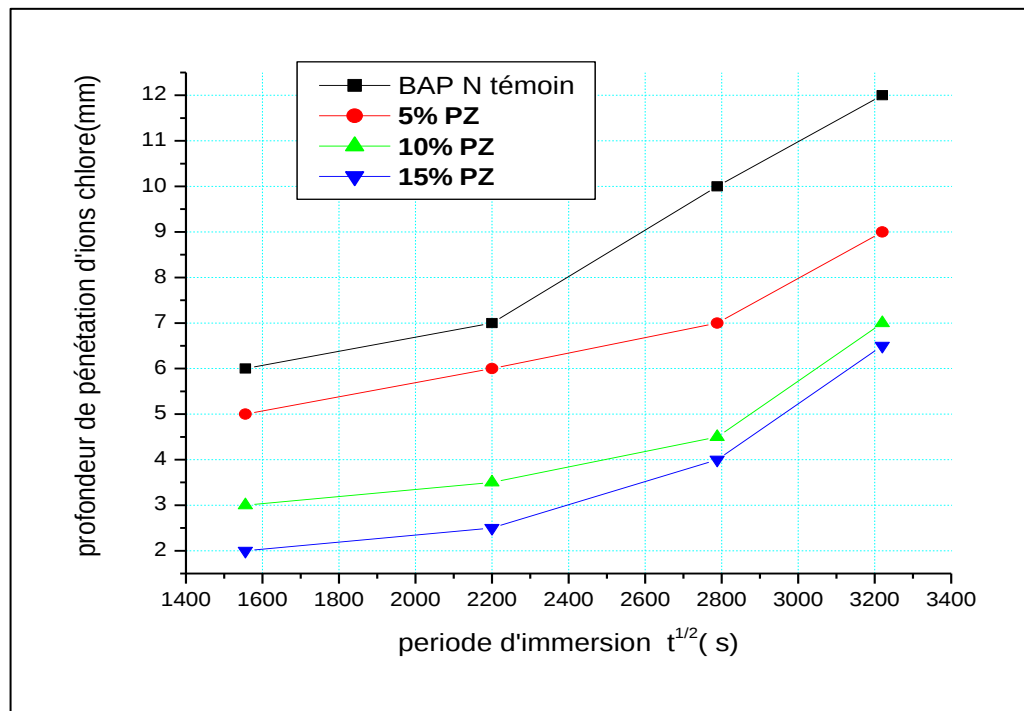


Figure 6.4: Relation entre la profondeur de pénétration et le temps d'immersion des (BAPN).

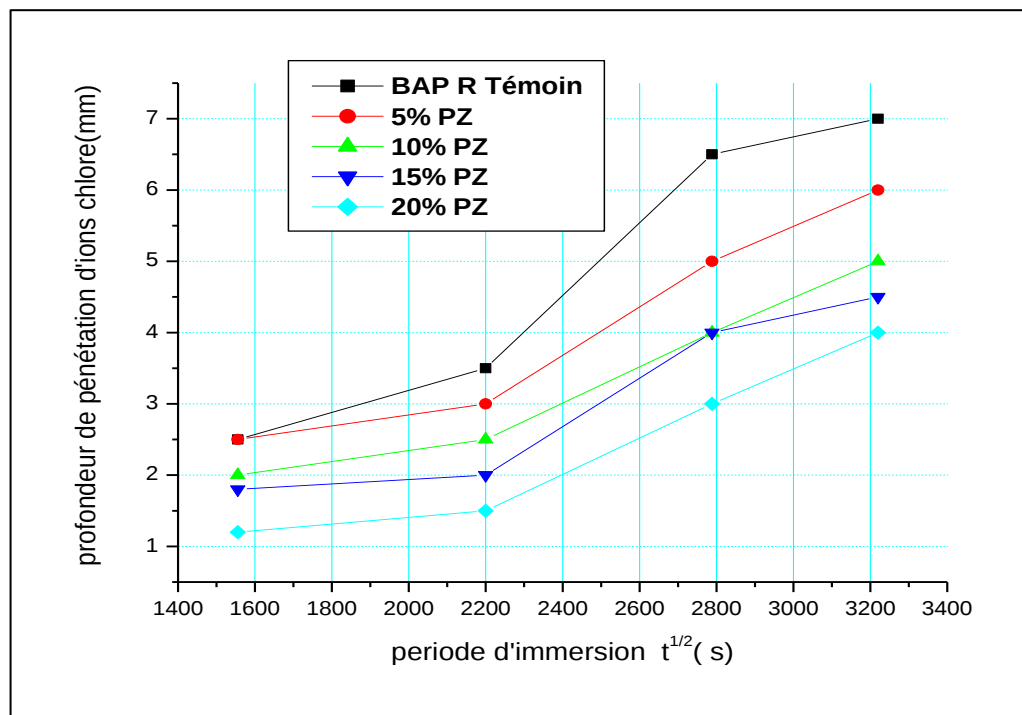


Figure 6.5: Relation entre la profondeur de pénétration et le temps d'immersion des (BAP R).

6.3.2. Coefficient apparent de diffusion

Les courbes basées sur l'équation (4.9) du chapitre 4 sont représentées sur les figures 6.6 (a,b,c,d) et 6.7 (e,f,g,h,i)).

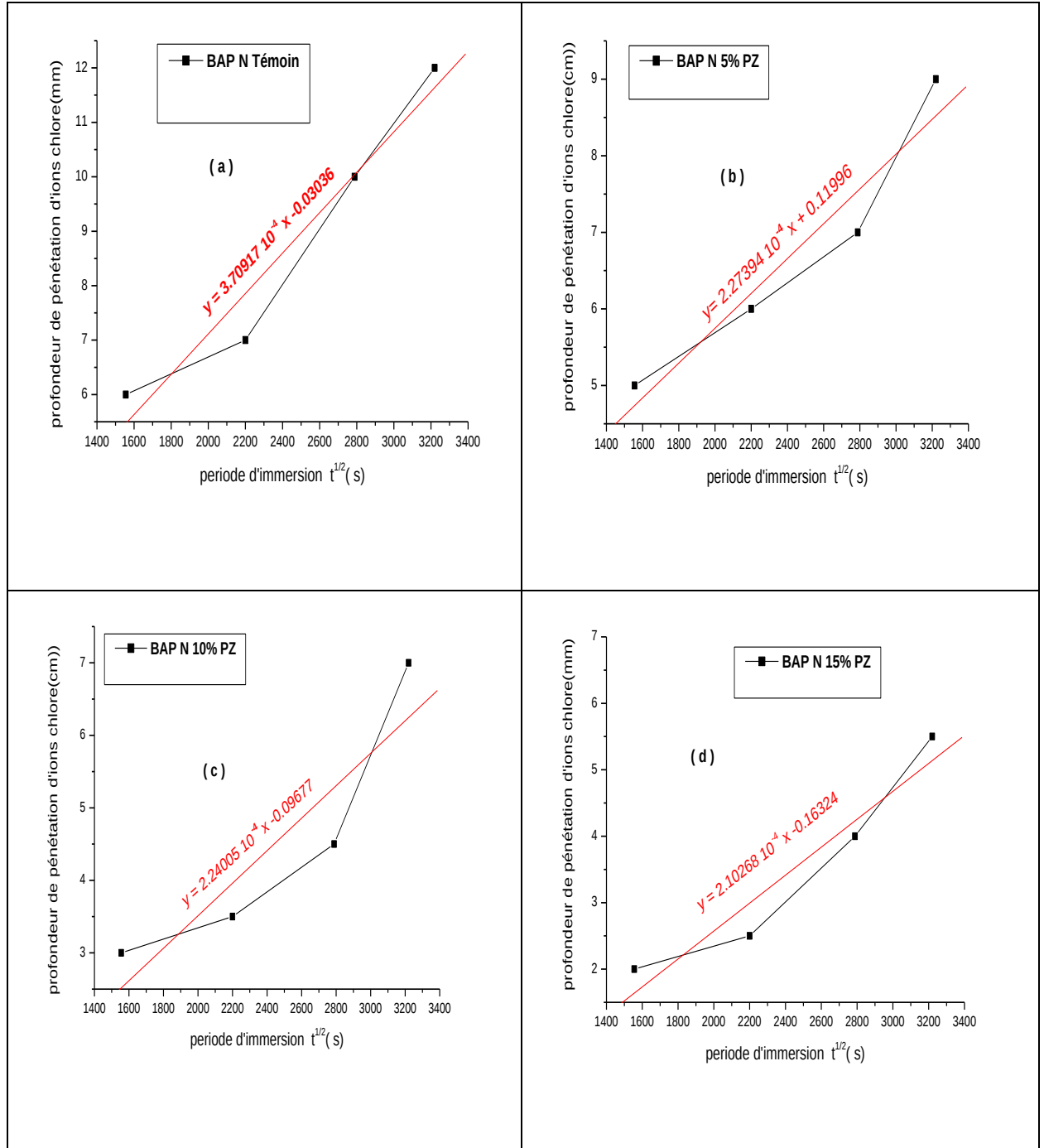


Figure 6.6 (a,b,c,d) : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.

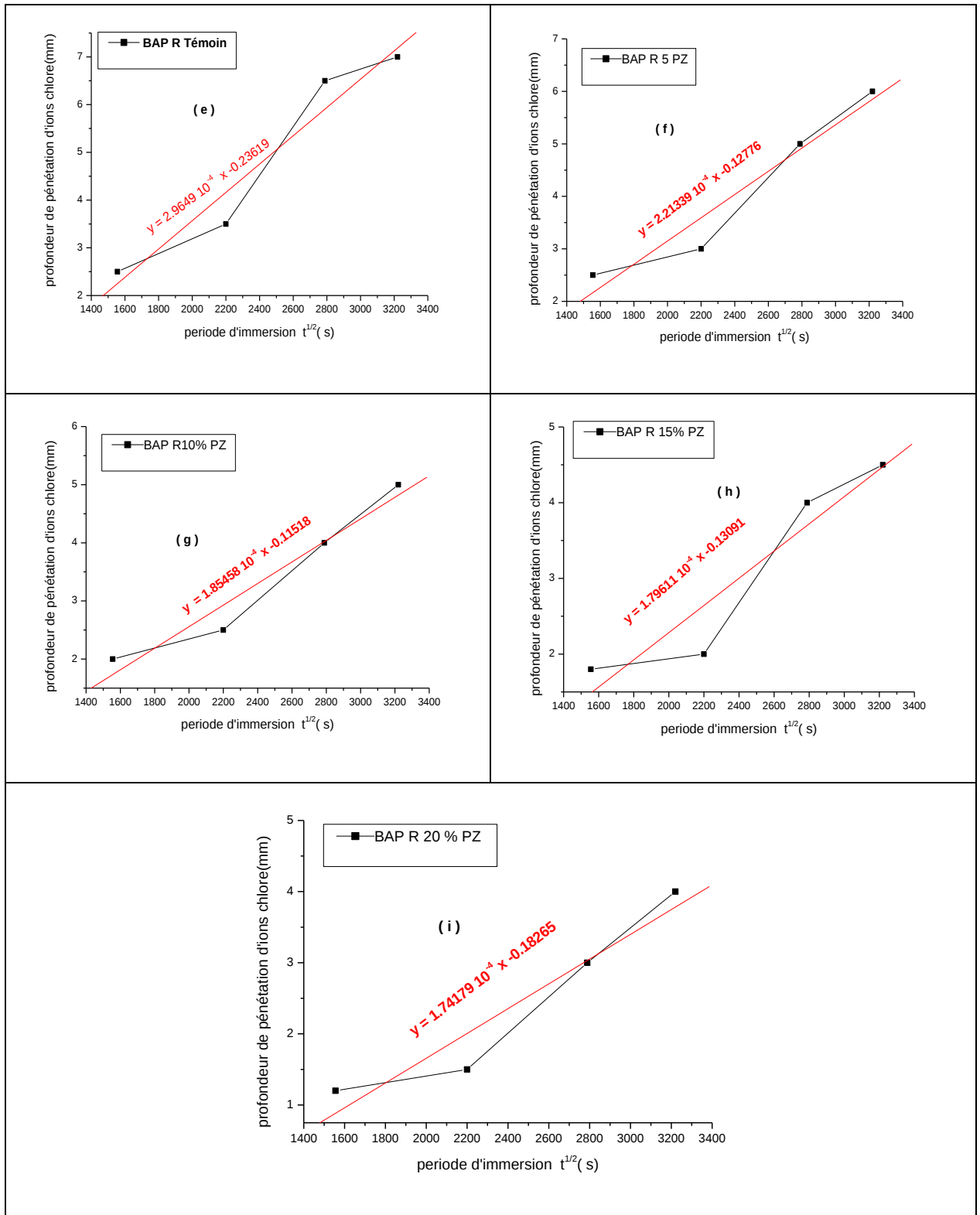


Figure 6.7 (e, f, g,h,i) : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.

La figure 6.8 montre la relation entre le pourcentage de la pouzzolane naturelle et le coefficient apparent de diffusion des ions chlorure (D_a) de BAPN et de BAPR. Le coefficient est beaucoup plus faible pour BAPR que pour BAPN. Les coefficients apparents de diffusion des ions chlorure (D_a) des mélanges avec PZ sont beaucoup plus petits que ceux sans PZ pour les deux BAP.

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour BAPN : $0,86 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$; $0,32 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$; $0,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$ et $0,276 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$ pour 0%, 5%, 10% et 15% de PZ, respectivement. Les valeurs pour les BAPR étaient respectivement de $0,55 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$; $0,306 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$; $0,215 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$, $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$ et $0,19 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$ pour 0%, 5%, 10%, 15% et 20% de PZ.

Le coefficient apparent de diffusion des ions chlorure a tendance de diminuer avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane naturelle. La réduction du coefficient apparent de diffusion des ions chlorure est de 63%, 64% et 68%, respectivement pour 5% de PZ, 10% de PZ et 15% de PZ pour le BAP à base de granulats naturels (BAPN) le même ordre de réduction est obtenu pour le BAP à base de granulats recyclés (BAPR) avec des réductions de 44%, 61%, 64% et 65% respectivement, pour 5% PZ, 10% PZ, 15% PZ et 20% PZ.

La faible pénétration des ions de BAP avec PZ est due à l'imperméabilité de la pouzzolane naturelle qui empêche le passage des ions chlorure. Ceci est en accord avec les résultats d'autres chercheurs (Amiri et al., 2001 ; Amiri et Aït-Mokhtar, 2007 ; Aït-Mokhtar et al., 2002).

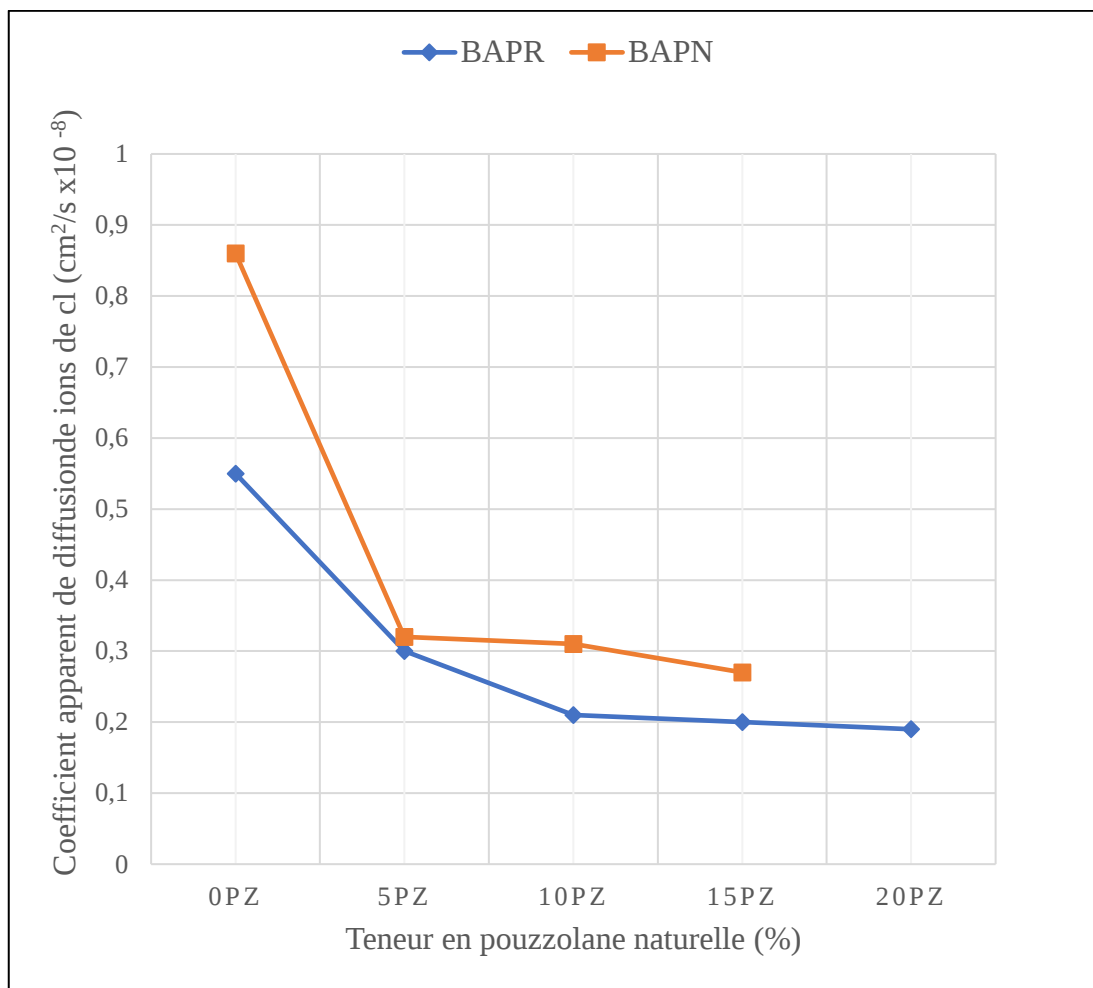


Figure 6.8 : Coefficient apparent de la diffusion des ions chlore des différents BAP.

(Chindaprasirt et al.,2008) ont réalisé une étude sur la résistance à la pénétration du chlorure des mortiers contenant, 20% et 40% de : Carburant de cendre d'huile de palme (POA) ; Cendre de cosse du riz (RHA) et Cendre volante (FA), par l'essai rapide de pénétration de chlore (RCPT) et l'immersion dans une solution 3% NaCl pendant 30 jours. Ils ont trouvé que la charge diminuée par rapport au mortier du ciment sans ajout. Cette diminution est de 59% et 74% pour le mortier de 20% et 40 % de (FA) respectivement, et de 74% et 86% pour le mortier de 20% et 40% de (POA), et finalement de 90% et 97% de diminution pour le mortier de 20% et 40% de (RHA), respectivement. La même tendance a été observée pour l'essai d'immersion.

(Chindaprasirt et al.,2008) ont aussi rapporté une bonne résistance aux ions chlore après immersion dans une solution de 3% NaCl de béton contient 10%,45 et 100% de cendre volante en comparaison à un béton sans ajout.

(Kanish Kapoor et al.,2016) Ont montré que la fumée de silice(SF) et le métakaolin (MK) sont très efficaces pour réduire la pénétration des ions chlorures dans le béton autoplaçant à base de granulats naturels. Les mélangés à base de 10% de (SF) ou (MK) réduit plus la pénétration des ions chlore pour les mélanges de BAP à base de granulats recyclés que les mélanges de BAP à base de granulats naturels.

6.4. Mécanisme de résistance aux attaques acides (H_2SO_4 et HCl)

Les acides sulfuriques (H_2SO_4) et chlorhydriques (HCl), sont des acides inorganiques, classés parmi les menaces naturelles les plus agressives. Des quantités significatives d'acides sont présentes dans les eaux usées (Türkel et al, 2007), leurs présences dans la nature est large, habituellement ils proviennent des usines dans les zones industrielles comme l'industrie chimique et l'industrie agroalimentaire et parfois ils sont dus à l'activité urbaine. L'agressivité de l'acide dépend de son degré de dissociation dans les solutions et, principalement, la solubilité des sels de calcium formés à partir de la réaction acide-base de la pâte de ciment. L'attaque acide se caractérise par le passage total en solution de la portlandite et par la décalcification progressive des C-S-H, et, en d'autres proportions, de l'ettringite et du monosulfoaluminate.

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau 6.1 résume les composants du béton menacés par la corrosion. On distingue deux types de détérioration :

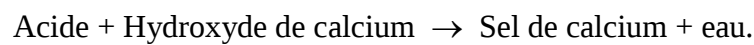
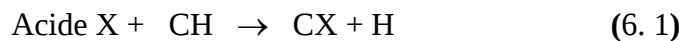
i- L'agression résolvente

ii- Le gonflement

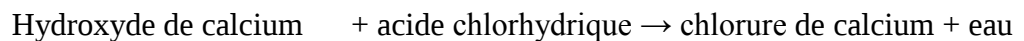
i- Aggression résolvente

Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques

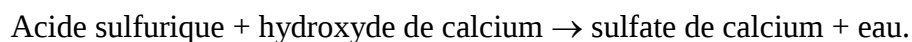
nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de "béton lavé" et la porosité augmente (Hermann,1995). L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous.



Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles.



Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous.

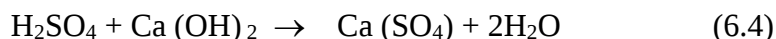


La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment. La deuxième phase étant la réaction acide-silicate de calcium hydraté, cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton. Les attaques acides sont, dans leur principe, similaires au phénomène de lixiviation. En effet, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés.

ii- Effet d'éclatement lié au gonflement

Les attaques sous la forme de gonflement sont provoquées par les réactions des matières transportées dans la structure susceptible de donner naissance à des formations nouvelles très volumineuses.

Le processus d'attaque de H_2SO_4 pourrait être illustré par l'équation suivante.



Acide sulfurique + hydroxyde de calcium $\rightarrow$ sulfate de calcium + eau.

6.5 Résistance à l'attaque par H_2SO_4

6.5.1 Variation de la masse après attaque de H_2SO_4

Pour les deux types de béton (BAPN et BAPR) et pendant les trois premières semaines d'attaque, les résultats montrent la même tendance à la détérioration, figures 6.9 et 6.10. Après quatre semaines, une légère différence de comportement est remarquée.

La comparaison entre BAPN et BAPR confirme que la perte de masse de BAPR est inférieure à 25% que BAPN, ce qui montre l'avantage d'utilisation d'agréats recyclés. Le BAP avec l'addition PZ présente la plus basse perte de masse par rapport au béton témoin. La perte de masse du BAPN avec (5%, 10% et 15%) de PZ est inférieure à celui de BAPN avec 0% de PZ et était respectivement de 6%, 10% et 16% après 28 jours d'immersion et 5%, 13% et 18% après 90 jours d'immersion. Cette diminution de perte de masse pour les BAP avec PZ est probablement due au remplissage des vides dans la matrice cimentaire par les C-S-H de deuxième génération provenant de la réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle avec la portlandite formée l'hors de l'hydratation du ciment.

Une tendance similaire a été observée pour BAPR avec une diminution de 2%, 5%, 8% et 18% après 28 jours d'immersion et 6%, 2%, 4% et 8% après 90 jours d'immersion pour RSCC 5% PZ, RSCC 10% PZ, RSCC 15% PZ et RSCC 20% PZ, respectivement. Des résultats comparables sont rapportés pour le béton vibré avec PZ. (Grici et al., 2006).

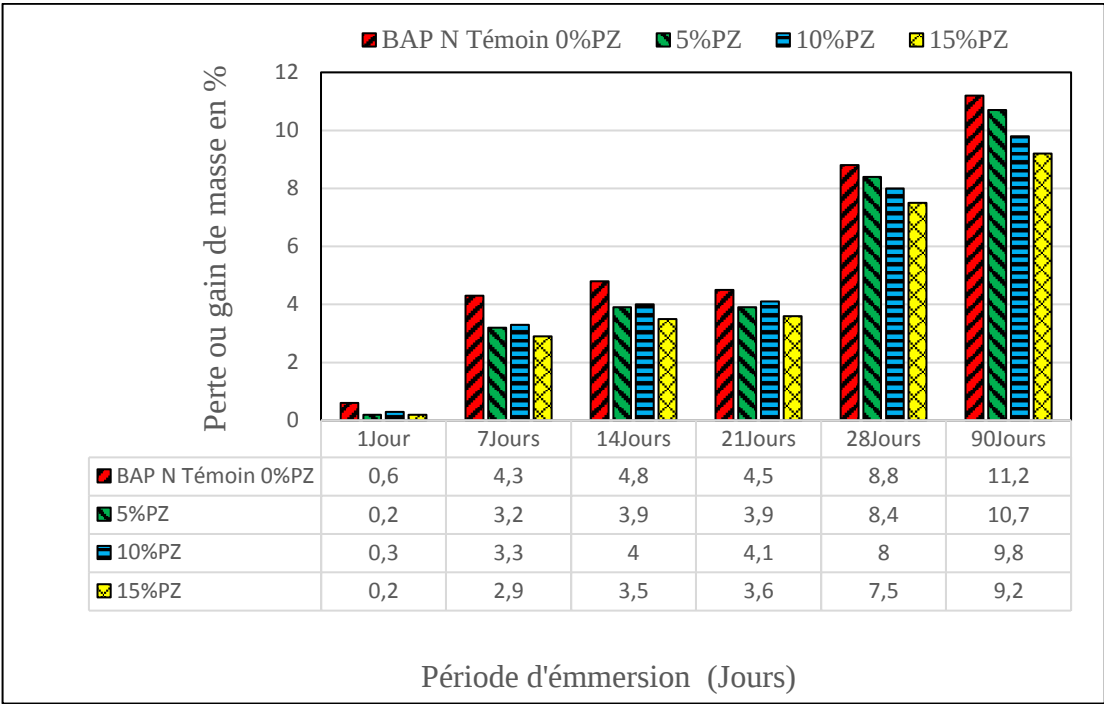


Figure 6.9: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% H_2SO_4 .

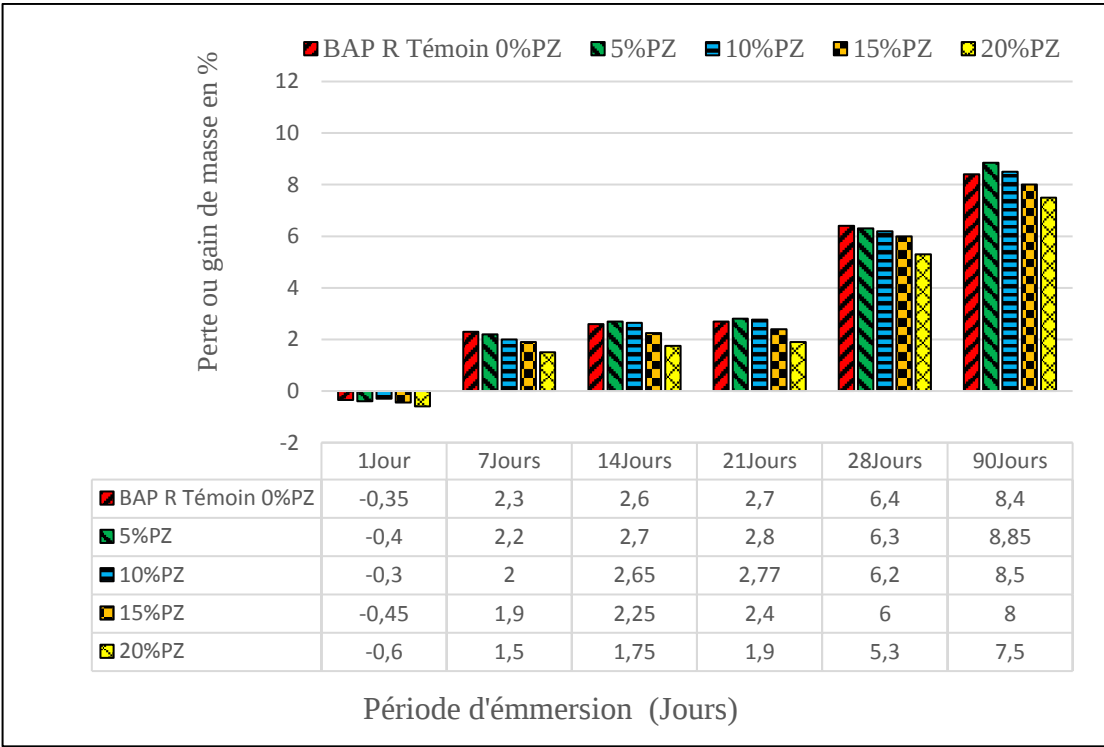
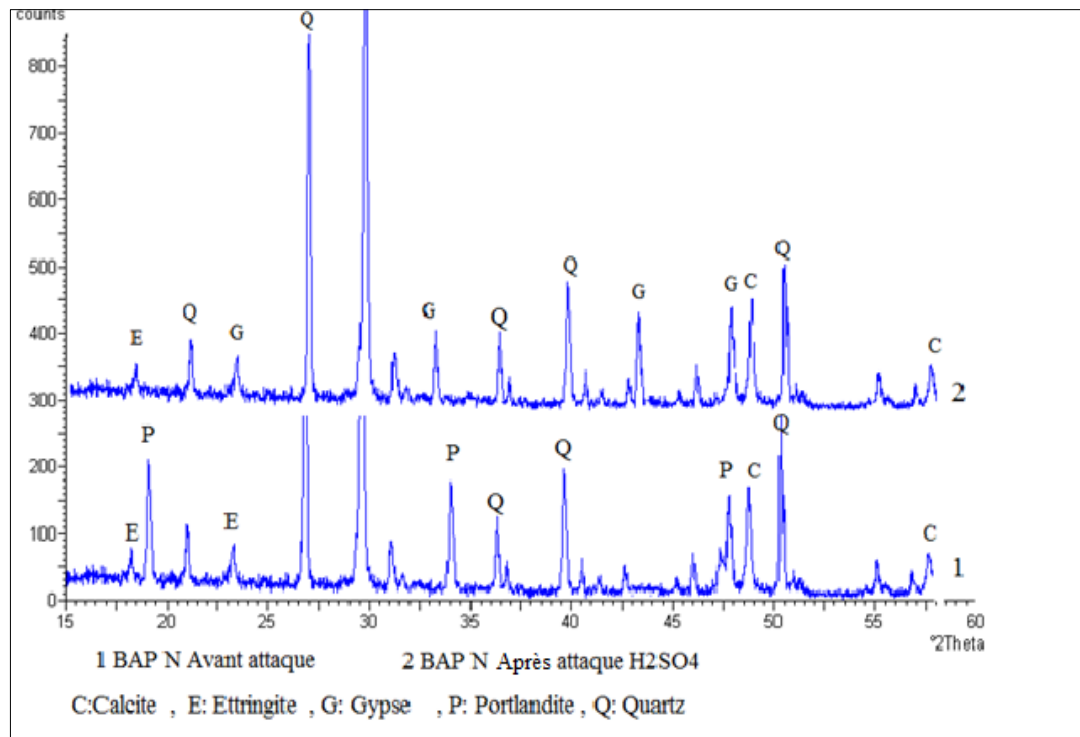
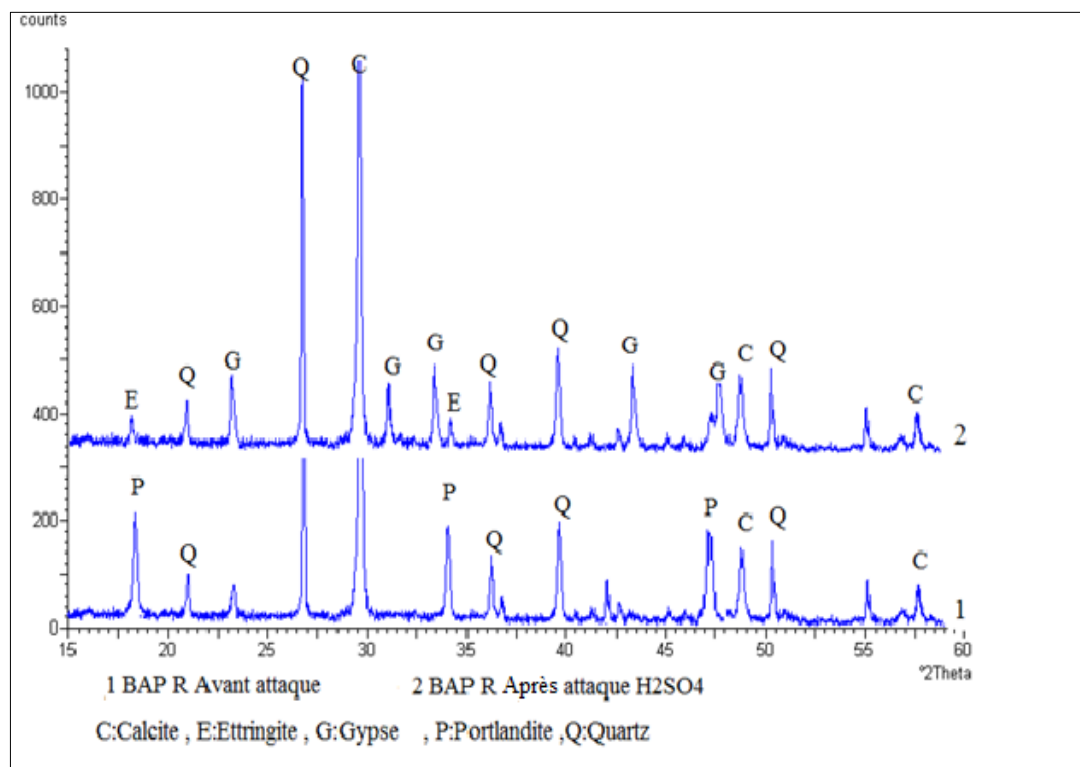


Figure 6.10: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 5% H_2SO_4 .

6.5.2. Analyse DRX

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été menée avant l'attaque d'acide et après 90 jours d'immersion dans la solution 5% H_2SO_4 . La superposition des deux spectres avant et après l'attaque montre l'effet de l'attaque acide de H_2SO_4 sur les surfaces extérieures de BAPN et BAPR figures 6.11 et 6.12. On peut remarquer la présence d'une grande quantité de gypse (G) pour tous les bétons soumis à l'attaque de l'acide H_2SO_4 , ce qui explique la grande dégradation de la surface en contact avec ce type d'acide. L'intensité du gypse ne montre pas une différence significative entre les niveaux de dégradation de chaque béton.

Les spectres avant les attaques sont caractérisés par la présence de portlandite qui semble disparaître après l'attaque de l'acide H_2SO_4 . En effet, en contact avec l'acide sulfurique, l'hydroxyde de calcium (portlandite) réagit pour former du sulfate de calcium équation (6. 5). En outre, le sulfate de calcium constitué par cette première réaction va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) (Bassuoni et Nehdi, 2007), ce qui explique la présence de traces de cet élément, même après l'immersion dans l'acide H_2SO_4 .

Figure 6.11: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque 5% H_2SO_4 .Figure 6.12: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque 5% H_2SO_4 .

6.5.3. Examen visuel

Avant de nettoyer les échantillons retirés de la solution de l'acide sulfurique, une couche blanchâtre facilement lavable avec de l'eau pourrait être observé. Figures 6.13 et 6.14 ont été prises après lavage des couches blanches et montrent clairement la dégradation superficielle des spécimens après l'attaque de l'acide sulfurique. La dégradation est moins importante pour les échantillons avec un taux élevé en pouzzolane naturelle.



Figure 6.13: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% H_2SO_4 .



Figure 6.14: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% H_2SO_4 .

6.6. Résistance aux attaques acides (HCl)

6.6.1. Variation de la masse

Pendant les quatre premières semaines d'attaque, les résultats montrent la même tendance à la détérioration figures 6. 15 et 6.16, pour les deux bétons (BAPN et BAPR). Cependant une légère différence de comportement est observée après 12 semaines.

La comparaison entre BAPN et BAPR confirme que La perte de masse de BAPN est inférieure de 24.63% par rapport au BAPR. Ceci montre que l'utilisation d'agréats recyclés n'a pas un effet bénéfique. Le BAP avec l'addition PZ présente la plus basse perte de masse par rapport au béton témoin. La perte de masse du BAPN avec (5% et 15%) de PZ est inférieur à celui de BAPN avec 0% de PZ et était respectivement de 1.05% et 3.36% après 120 jours d'immersion et 1.38% et 8.77% après 180 jours d'immersion.

Une tendance similaire a été observée pour BAPR avec PZ et BAPR avec 0%PZ de diminution de 5.21%, 8.52%, 13.91% et 21.74% après 120 jours d'immersion et 3.16%, 1.26%, 4.81% et 20% après 180 jours d'immersion pour BAPR 5% PZ, BAPR 10% PZ, BAPR 15% PZ et BAPR 20% PZ, respectivement.

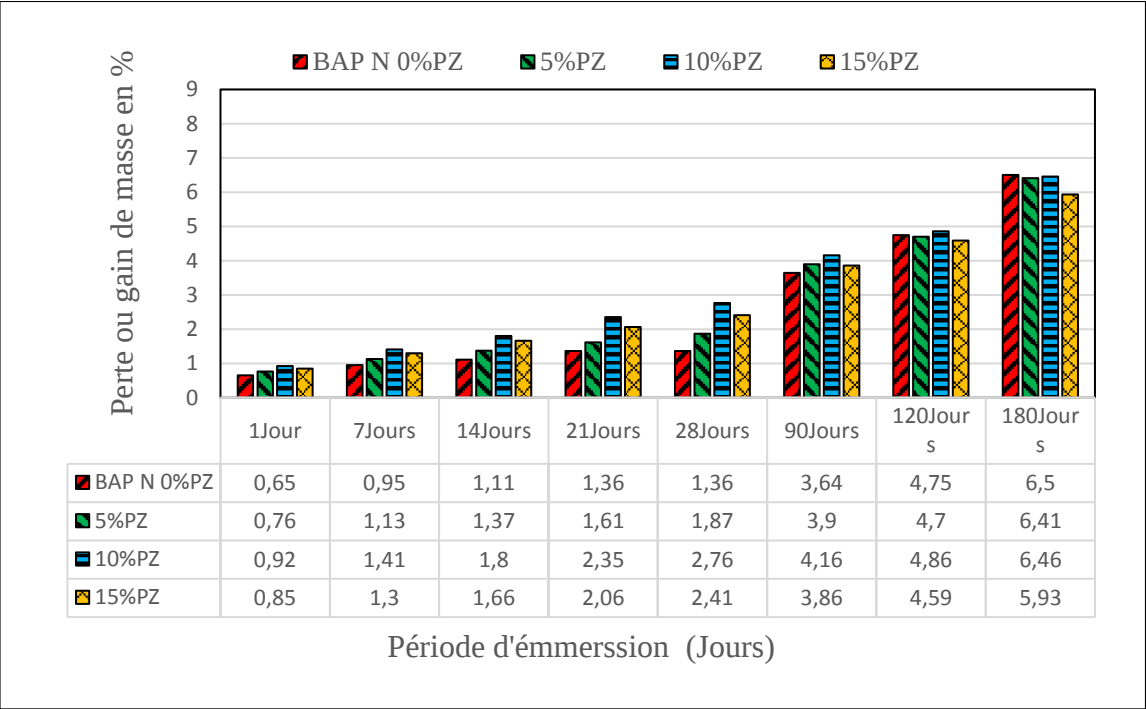


Figure 6.15: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 3% HCl.

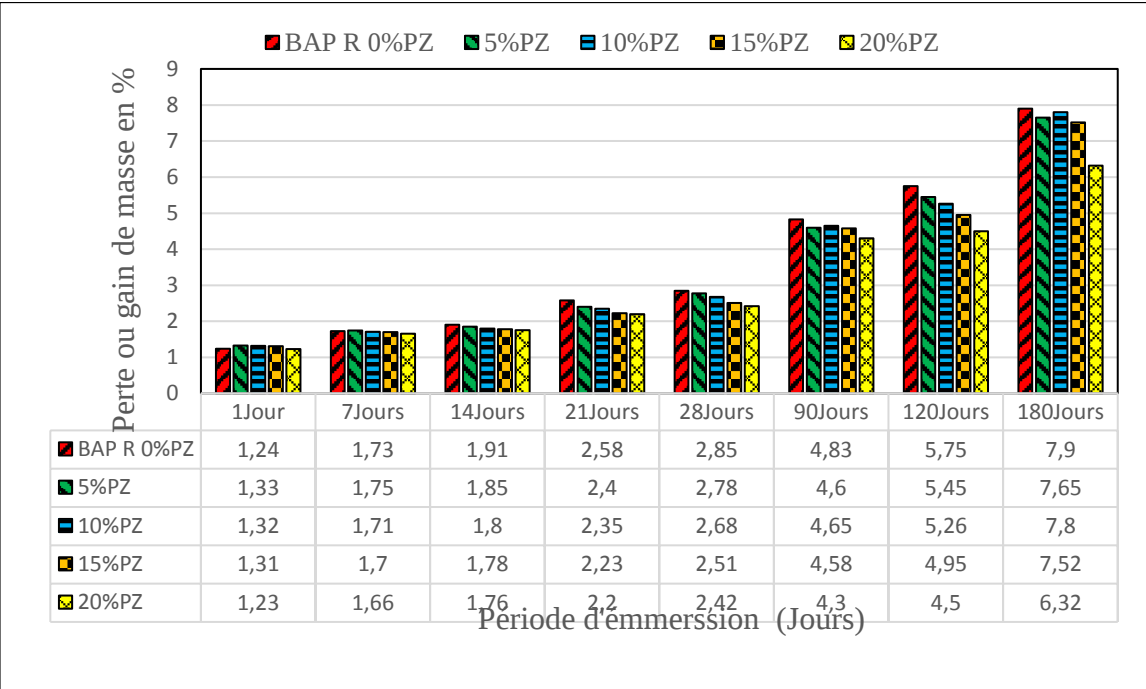


Figure 6.16: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 3% HCl.

6.6.2. Analyse DRX

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été menée avant l'attaque d'acide et après 180 jours d'immersion dans la solution 3% HCl. La superposition de deux spectres avant et après l'attaque montre l'effet de l'attaque acide de HCl sur les surfaces extérieures de BAPN et BAPR figures 6.17 et 6.18. On remarque la présence d'une grande quantité de gypse (G) et de l'ettringite (E) pour tous les bétons soumis à l'attaque de l'acide HCl, ce qui explique la grande dégradation de la surface en contact avec ce type d'acide. L'intensité du gypse ne montre pas une différence significative entre les niveaux de dégradation de chaque béton.

Les spectres avant les attaques sont caractérisés par la présence de portlandite qui semble disparaître après l'attaque de l'acide HCL. En effet, en contact avec l'acide chlorhydrique, l'hydroxyde de calcium (portlandite) réagit pour former du chlorure de calcium équation (6.2). En outre, l'incorporation de la pouzzolane naturelle a pour effet de réduire la sensibilité de ces bétons dans les environnements avec présence de l'acide HCl. En effet, la pouzzolane naturelle réagit avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour produire des C-S-H pouzzolanique. Le remplissage des pores capillaires par le gel C-S-H, réduit la diffusion des ions dans la pâte des BAP et diminue ainsi la cinétique de lixiviation.

Les observations du DRX ont montré la présence de traces de sel de calcium après attaque HCl, cette faible quantité est sûrement due à la dissolution de ce sel en présence d'eau utilisée avant chaque mesure lors du nettoyage des résidus déchaussés.

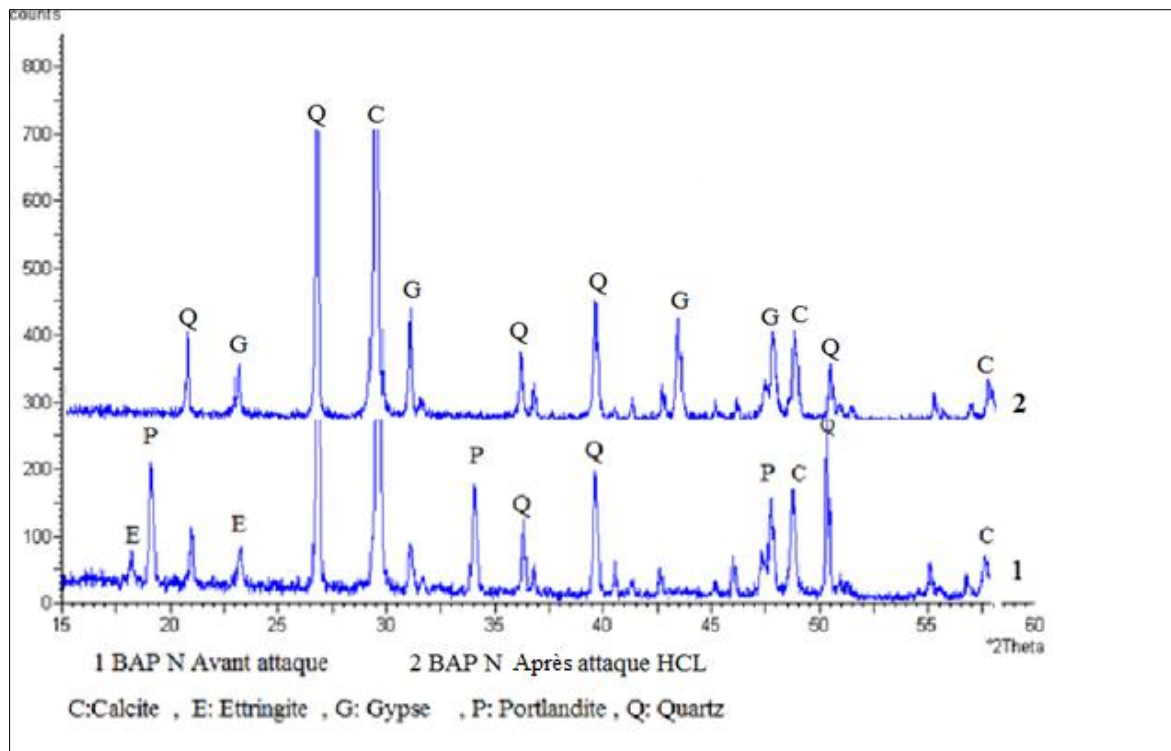


Figure 6.17: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 3% HCl.

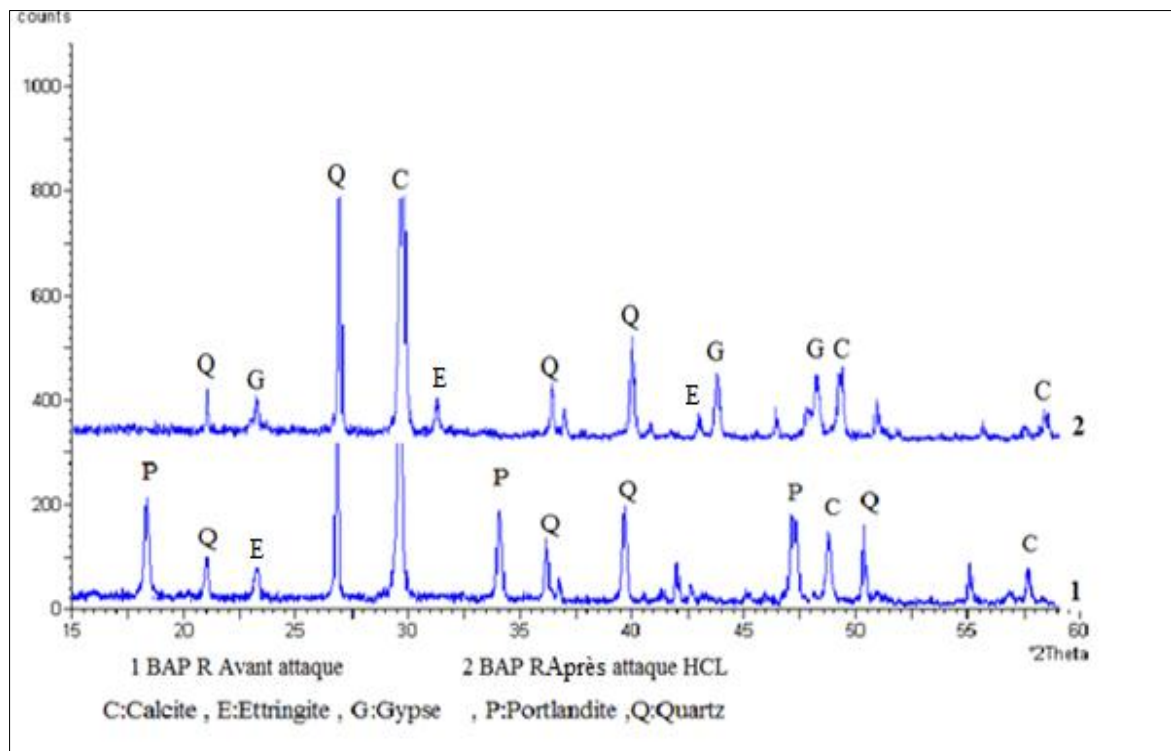


Figure 6.18: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 3% HCl.

6.6.3. Examen visuel

Les figures 6.19 et 6.20 montrent clairement la dégradation superficielle des spécimens après l'attaque de l'acide chlorhydrique. Il est clair que les BAPN /BAPR avec substitution de PZ sont moins dégradés par rapport au BAPN /BAPR témoin.



Figure 6.19: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 3% HCl.



Figure 6.20: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 3% HCl.

La figure 6.21 montre une diminution de la dégradation du BAPN avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle, soit après l'attaque du 3% HCl ou après l'attaque du 5% H₂SO₄. L'ajout de la pouzzolane naturelle aussi été bénéfique pour les mélanges de BAPR ou la dégradation a été réduite figure 6.22.



Figure 6.21: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 3%HCl et 5%H₂SO₄.



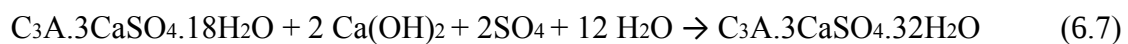
Figure 6.22: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 3% HCl et 5% H₂SO₄.

6.7. Résistance aux attaques sulfatiques externes (Na₂SO₄)

Le processus d'attaque de Na₂SO₄ pourrait être illustré par l'équation suivante.



Le gypse formé par cette réaction, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C₃A anhydre résiduel ou les aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les deux équations suivantes :



6. 7.1. Variation de la masse

A court terme (quatre premières semaines), le même niveau de dégradation est observé pour les deux types de béton (BAPN et BAPR) figures 6.23 et 6.24. A long terme (plus de 16 semaines), une légère différence de performance est observée.

La comparaison entre BAPN et BAPR confirme que le gain de masse de BAPN est inférieur à 18.82% que BAPR après 90 jours d'immersion, ce qui montre que l'utilisation d'agrégats recyclés n'a pas un effet bénéfique. Le BAP avec l'addition PZ présente un gain de masse inférieur par rapport au béton témoin. Le gain de masse du BAPN avec (5%,10% et 15%) de PZ est inférieur à celui de BAPN avec 0% de PZ et était respectivement de 13.27%,13.7% et 21.16% après 120 jours d'immersion et 12.2%,13.7 et 22.62% après 180 jours d'immersion.

Une tendance similaire était observée pour BAPR avec et sans PZ. A120 jours d'immersion la diminution était de 1.43%, 3.57%, 2.5% et 5.36% et après 180 jours d'immersion la diminution était de et 1%, 2.28%, 2.28% et 6.1% pour BAPR avec (5%, 10%, 15% et 20%) PZ, respectivement.

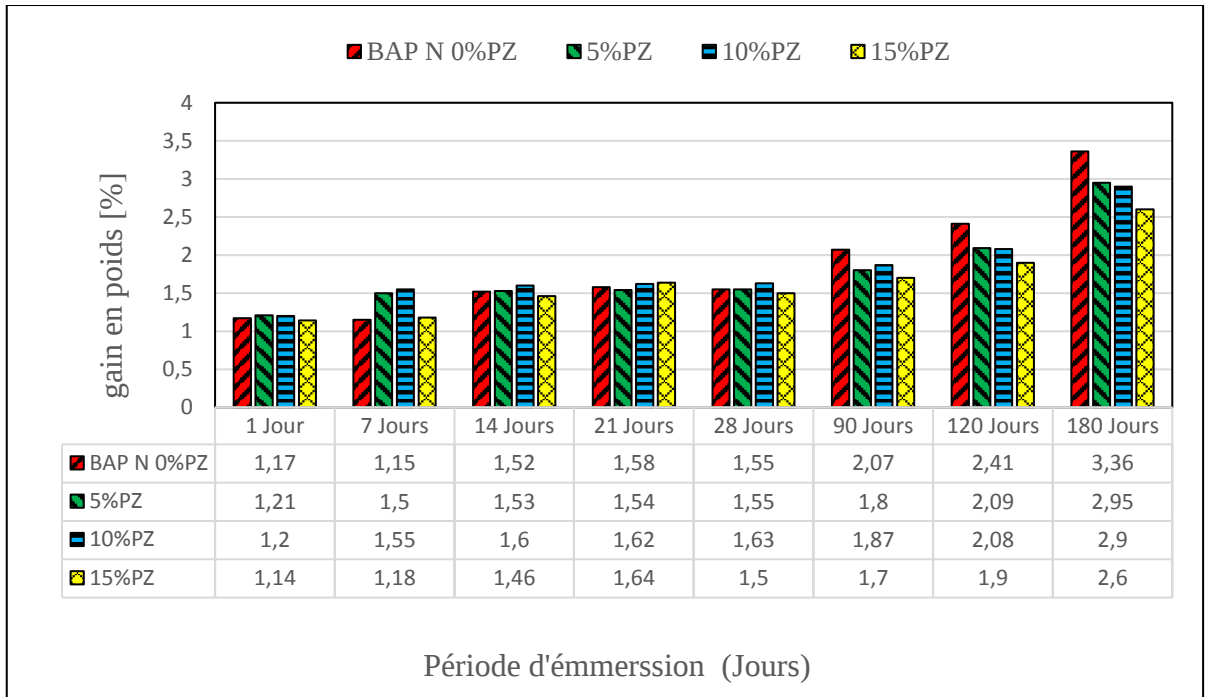


Figure 6.23: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5%Na₂SO₄.

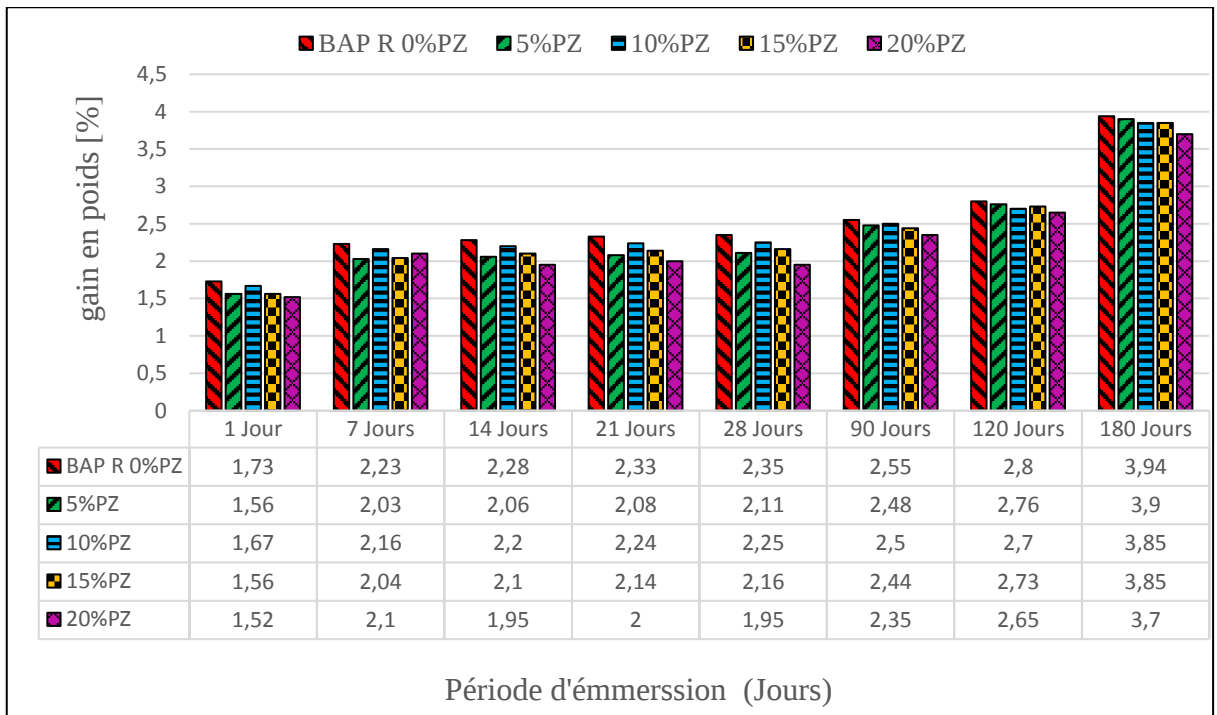


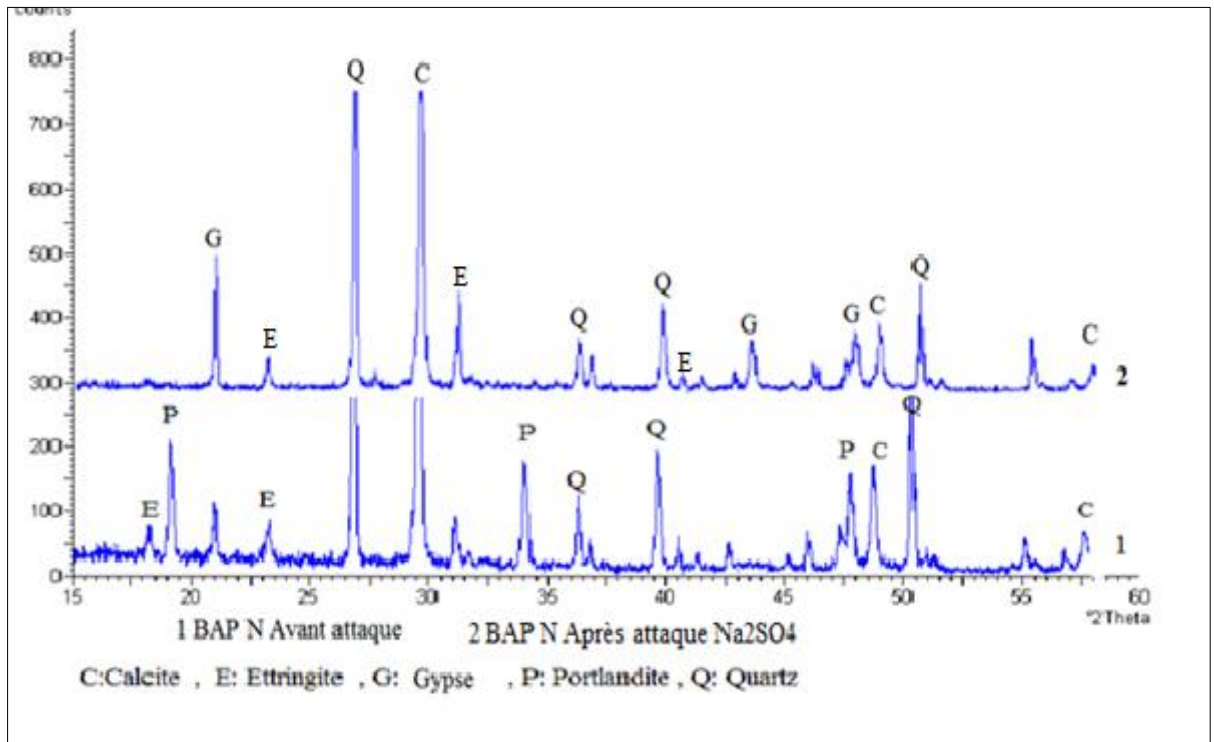
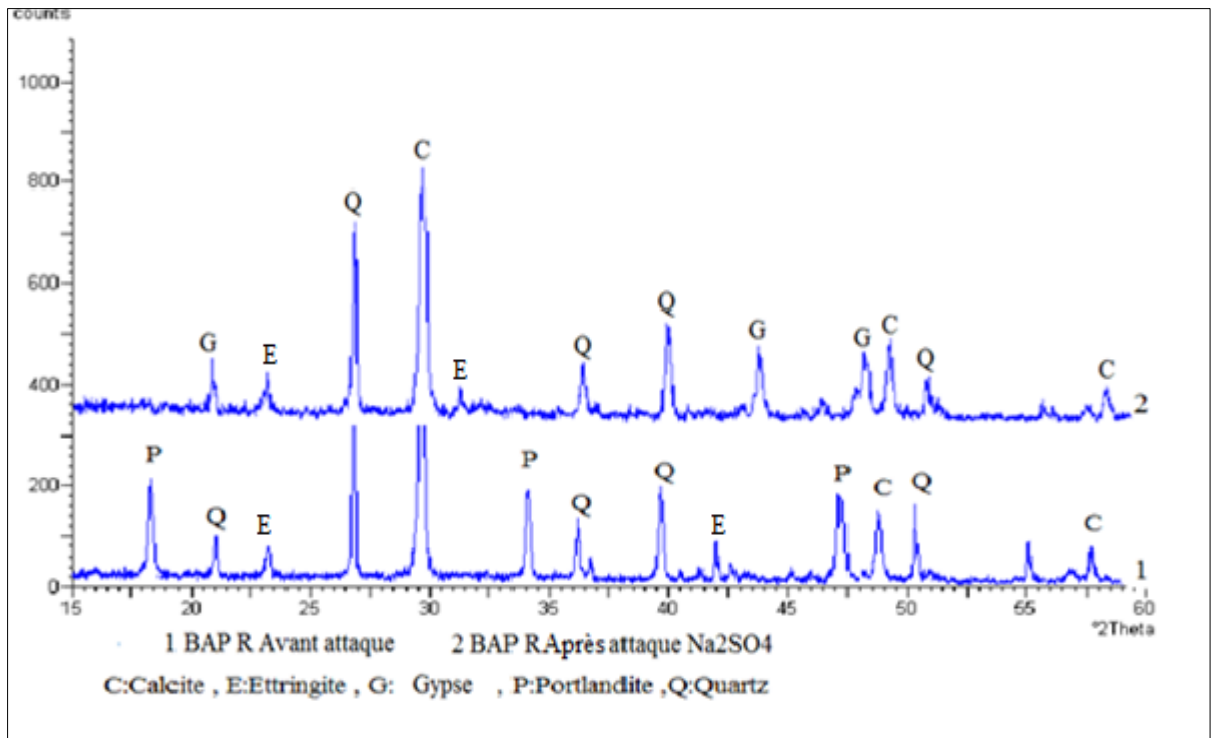
Figure 6.24: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 5%Na₂SO₄.

6. 7.2. Analyse DRX

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été menée avant l'attaque d'acide et après 180 jours d'immersion dans la solution 5% Na_2SO_4 . La superposition de deux spectres avant et après l'attaque montre l'effet de l'attaque de Na_2SO_4 sur les surfaces extérieures de BAPN et BAPR. Figures 6.25 et 6.26. On peut remarquer la présence d'une grande quantité de gypse (G) et de l'ettringite (E) pour tous les bétons soumis à l'attaque de Na_2SO_4 . L'intensité du gypse ne montre pas une différence significative entre les niveaux de dégradation de chaque béton.

Les spectres avant les attaques sont caractérisés par la présence de portlandite qui semble disparaître après l'attaque de Na_2SO_4 . En effet, en contact avec Na_2SO_4 , l'hydroxyde de calcium (portlandite) réagit pour former le gypse équation (6.5). Le gypse formé par cette réaction, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C_3A anhydre résiduel ou les aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les deux équations (6.6) et (6.7).

En outre, l'incorporation de la pouzzolane naturelle a pour effet de réduire la sensibilité de ces bétons dans les environnements avec présence de Na_2SO_4 . En effet, la pouzzolane naturelle réagit avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour produire des C-S-H pouzzolanique. Le remplissage des pores capillaires par le gel C-S-H, réduit la diffusion des ions dans la pâte des BAP et diminue ainsi la cinétique de lixiviation.

Figure 6.25: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 5% Na_2SO_4 .Figure 6.26: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 5% Na_2SO_4 .

6. 7.3. Examen visuel

Les figures 6.27 et 6.28 montrent bien la dégradation superficielle des spécimens après l'attaque de Na_2SO_4 . On observe aussi une diminution de la dégradation avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle, pour BAPN et pour BAPR.



Figure 6.27: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% Na_2SO_4 .



Figure 6.28: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% Na_2SO_4 .

6. 8. Résistance aux attaques sulfatiques externes (MgSO₄)

Le processus d'attaque de MgSO₄ pourrait être illustré par l'équation suivante.



Le gypse formé par cette réaction, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C₃A anhydre résiduel ou les aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les deux équations précédentes (6.6 et 6.7) (section 6.7).

6. 8.1. Variation de la masse

Un constat similaire que celui de l'attaque par Na₂SO₄ a été observé, les deux types de béton (BAPN et BAPR) présentent le même niveau de dégradation jusqu'à quatre semaines d'immersion. Figures 6.29 et 6.30.

La comparaison entre BAPN et BAPR confirme que Le gain de masse de BAPN est inférieur à 22.22% que BAPR après 90 jours d'immersion, ce qui montre que l'utilisation d'agréats recyclés n'a pas un effet bénéfique. Le BAP avec l'addition PZ présente un gain de masse supérieur par rapport au béton témoin durant les premiers quatre semaines, mais à partir de 90 jours d'immersion il y a un changement pour le BAP avec 15% PZ. Le gain de masse du BAPN avec 15% de PZ est inférieur à celui de BAPN avec 0% de PZ et était de 11.18% après 120 jours d'immersion et de 17.1% après 180 jours d'immersion.

Une tendance similaire a été observée pour BAPR avec PZ et BAPR avec 0% PZ en ce que concerne la stabilité, mais on remarque bien qu'à partir du premier jour d'immersion les BAPR avec 15% PZ et 20% PZ présentent un gain de masse inférieur par rapport au béton témoin avec une diminution de, 2.38% et 4.76% après 1 jours d'immersion et de 5.94% et 15.84% après 120 jours d'immersion pour BAPR avec 15% PZ et BAPR avec 20% PZ, respectivement.

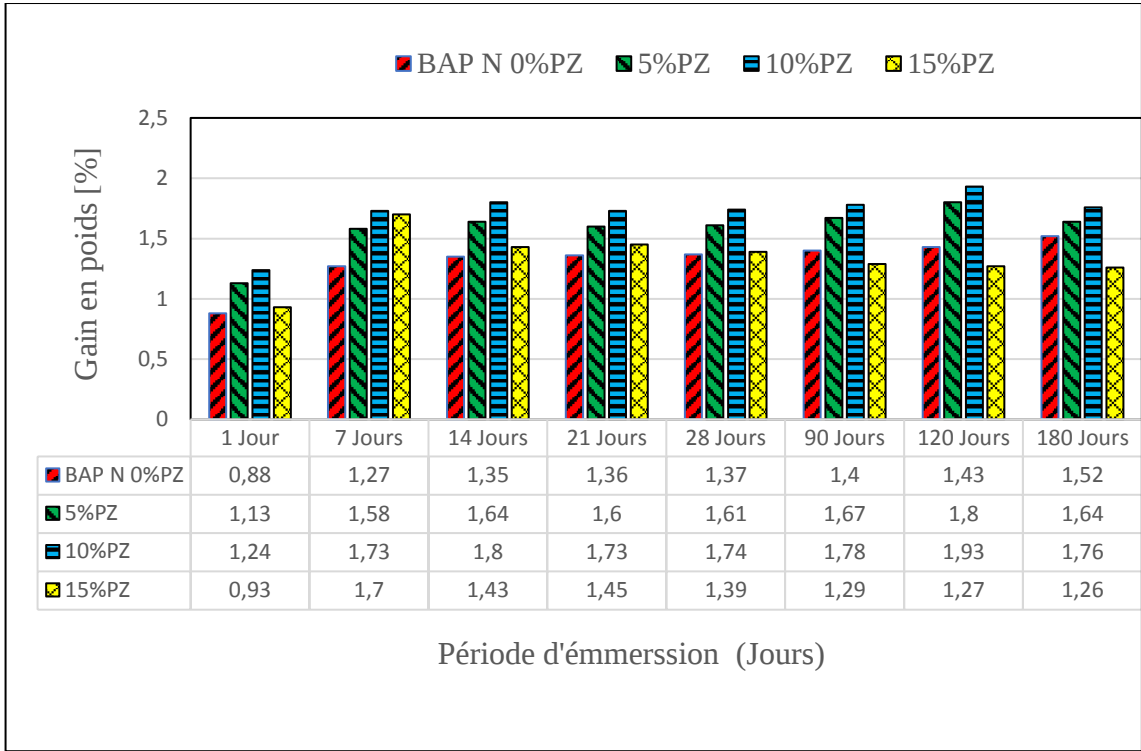


Figure 6.29: Variation de la masse du BAPN en fonction de la période d'immersion dans la solution 5%MgSO₄.

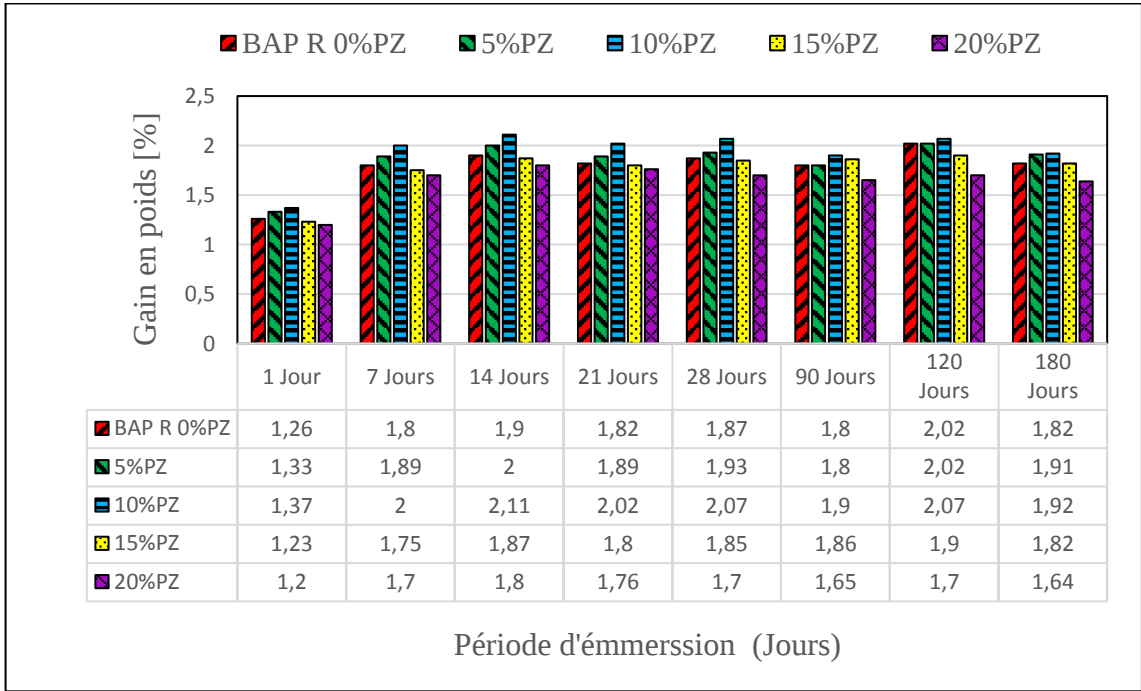


Figure 6.30: Variation de la masse du BAPR en fonction de la période d'immersion dans la solution 5%MgSO₄.

6. 8.2. Analyse DRX

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été menée avant l'attaque d'acide et après 180 jours d'immersion dans la solution 5% MgSO_4 . La superposition de deux spectres avant et après l'attaque montre l'effet de l'attaque de MgSO_4 sur les surfaces extérieures de BAPN et BAPR figures 6.31 et 6.32. On remarque la présence d'une grande quantité de gypse (G) et de l'ettringite (E) pour tous les bétons soumis à l'attaque de MgSO_4 . L'intensité du gypse ne montre pas une différence significative entre les niveaux de dégradation de chaque béton.

Les observations du DRX ont montré la présence du gypse et de l'ettringite après attaque MgSO_4 . Le DRX a montré aussi, la présence de la portlandite avant attaque MgSO_4 pour tous les bétons d'étude et sa disparition dans la zone de surface après attaque.

En outre, l'incorporation de la pouzzolane naturelle a pour effet de réduire la sensibilité de ces bétons dans les environnements avec présence de MgSO_4 . En effet, la pouzzolane naturelle réagit avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour produire des C-S-H pouzzolanique. Le remplissage des pores capillaires par le gel C-S-H, réduit la diffusion des ions dans la pâte des BAP et diminue ainsi la cinétique de lixiviation.

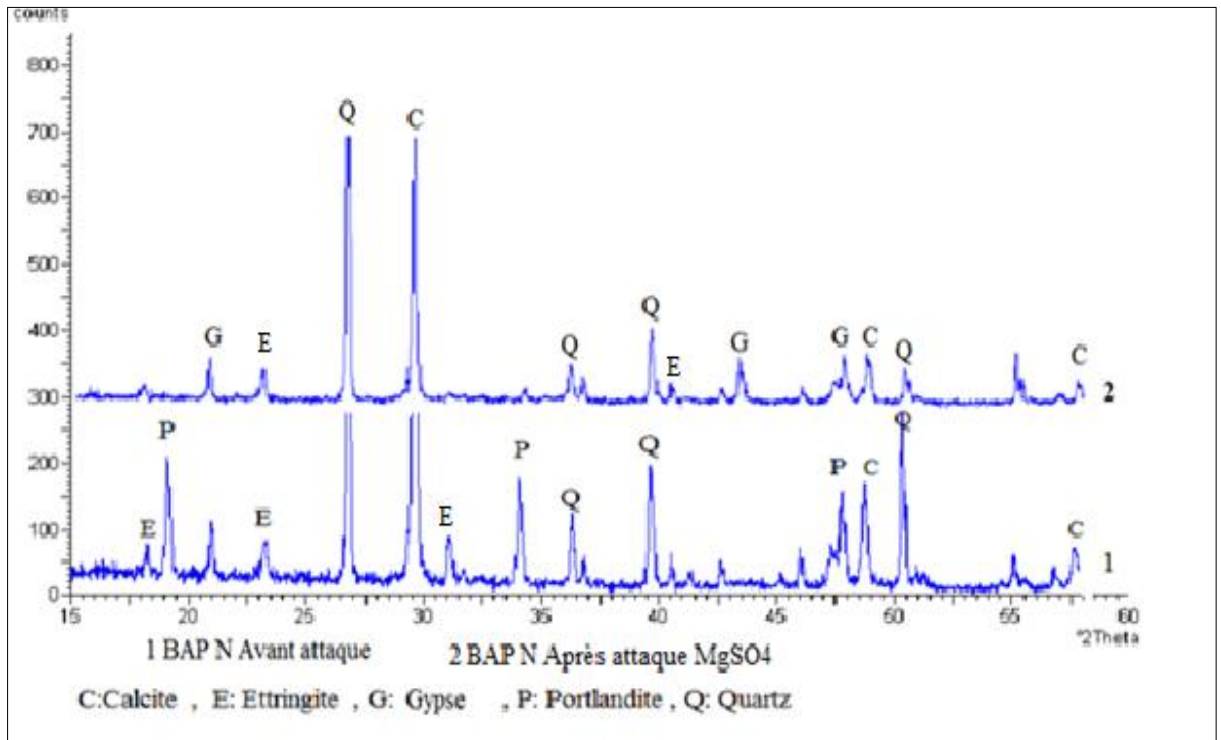


Figure 6.31: Spectres DRX du BAPN avant et après attaque à 5% $MgSO_4$.

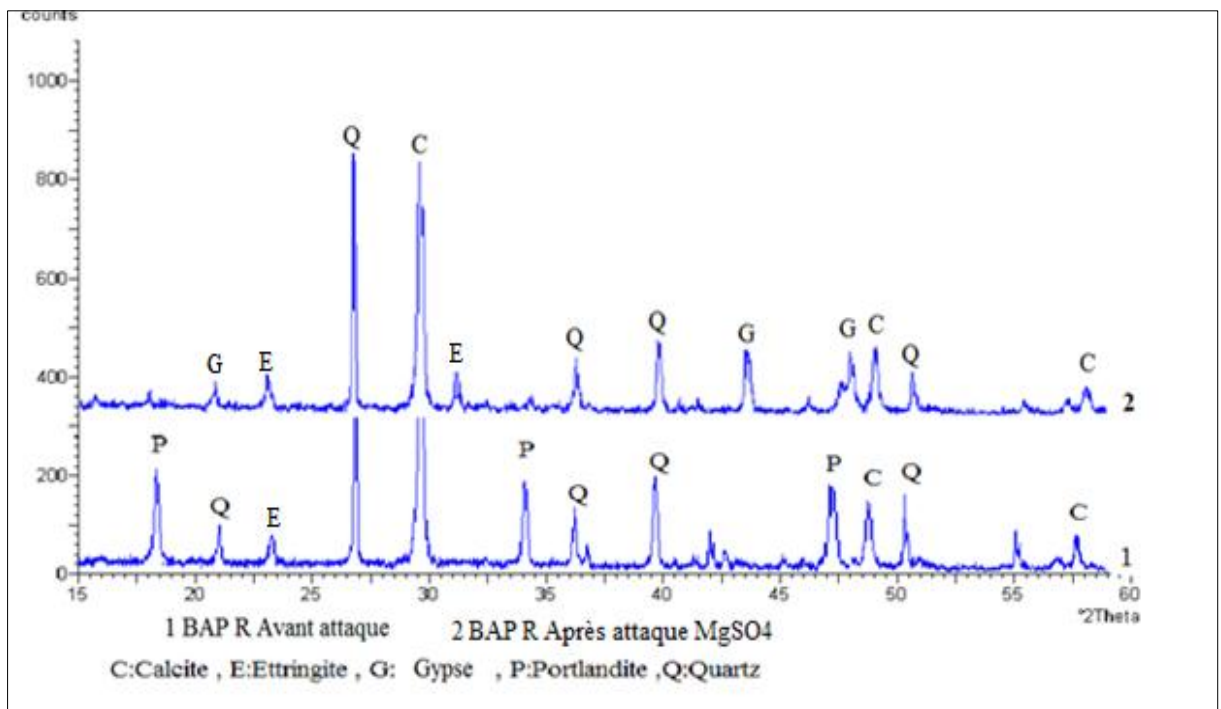


Figure 6.32: Spectres DRX du BAPR avant et après attaque à 5% $MgSO_4$.

6. 8.3. Examen visuel

Les figures 6.33 et 6.34 montrent clairement la dégradation superficielle des spécimens après l'attaque de MgSO_4 . En remarque une diminution de la dégradation avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle, pour les BAP avec granulats recyclés ou naturels.



Figure 6.33: Examen visuel du BAPN avant et après attaque à 5% MgSO_4 .



Figure 6.34: Examen visuel du BAPR avant et après attaque à 5% MgSO_4 .

(Skaropoulou et al.,2013) ont trouvé que dans le cas du sable siliceux, le béton de ciment calcaire a présenté la plus grande perte de masse (17%) après 35 mois d'exposition à la solution de sulfate. Le béton avec la pouzzolane naturelle a montré une perte de masse de 5,5% pour la même période, alors qu'aucune perte de masse n'a été enregistrée dans les spécimens à cendres volantes, des scories du laitier et métakaolin.

6.9. Conclusion

Cette partie avait pour but d'étudier l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance chimique des BAPN et BAPR à la diffusion des ions chlore, à l'acide sulfurique, à l'acide chlorhydrique et finalement à l'attaque des sulfates.

Nous pouvons conclure les conclusions suivantes :

- L'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les BAP est très bénéfique pour réduire la diffusion des ions chlore dans ces bétons. Car la réaction pouzzolanique a certainement engendré la formation d'une microstructure plus fine et moins poreuse.
- Le coefficient de diffusion apparent des ions chlore est diminué avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle. La diminution est plus importante pour les BAPR.
- Les résultats montrent une fragilité de toutes les formulations du BAPN et du BAPR vis-à-vis de l'agressivité de l'acide sulfurique. Tous les bétons d'étude présentent une dégradation progressive avec le temps d'immersion.
- L'incorporation de la pouzzolane naturelle a pour effet de réduire la sensibilité de ces bétons dans les environnements avec présence de l'acide HCl.
- Dans les milieux témoin et sulfatique et pour chaque échéance d'étude, les BAP avec PZ (BAPN / BAPR) présentent des gains en masse moins importants que ceux du BAP control. Les résultats montrent que pour toutes les BAP, la pouzzolane naturelle influe considérablement et positivement sur la résistance des bétons autoplaçants (BAP) dans les milieux contenant des sulfates de sodium Na_2SO_4 , ou MgSO_4 .

CONCLUSIONS GÉNÉRALES
ET
RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

1. Conclusions générales

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la substitution de 50, 75 et 100% de granulats naturels par des granulats recyclés ainsi que la substitution de 5, 10, 15 et 20% du ciment par de la pouzzolane naturelle sur les performances d'un béton autoplaçant (BAP) à l'état frais et à l'état durci, et d'étudier sa durabilité dans des milieux agressifs. D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le BAP à base de 50% granulats recyclés (BAPR) possède des propriétés rhéologiques comparables à celles du BAP à base de granulats naturels.
- La pouzzolane naturelle diminue l'ouvrabilité des BAP à base de granulats naturels et à base de 50 % granulats recyclés.
- La pouzzolane naturelle améliore la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion à long terme. Ceci est dû à la réaction de la pouzzolane naturelle avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment, pour former des CSH de deuxième génération.
- L'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les BAP est très bénéfique pour réduire la diffusivité des ions chlore dans ces bétons. La réaction pouzzolanique engendre certainement la formation d'une microstructure plus fine et moins poreuse. Ces résultats mériteraient une étude plus approfondie.
- Le coefficient de diffusion apparent des ions chlore a diminué avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle. Ce coefficient a diminué de 68% pour 15% de PZ.
- Les coefficients de diffusion apparents des formulations du BAPR sont en général inférieurs à ceux des formulations du BAPN.
- Les résultats montrent une fragilité de toutes les formulations du BAPN et du BAPR vis-à-vis de l'agressivité de l'acide sulfurique. Tous les bétons d'étude présentent une dégradation progressive avec le temps d'immersion. Cette cinétique de dégradation diminue avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane naturelle.
- La superposition des spectres des analyses DRX confirme la présence d'une grande quantité de gypse après l'attaque à l'acide H_2SO_4 .
- L'incorporation de la pouzzolane naturelle a pour effet de réduire la sensibilité des bétons aux environnements avec présence de l'acide HCl. En effet, la pouzzolane naturelle

réagit avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour produire des C-S-H pouzzolaniques. Le remplissage des pores capillaires par le gel C-S-H, réduit la diffusion des ions dans la pâte des BAP et diminue ainsi la cinétique de lixiviation.

- Les observations DRX ont montré la présence de traces de sel de calcium après l'attaque par l'HCl. Cette faible quantité est certainement due à la dissolution de ce sel en présence de l'eau utilisée avant chaque mesure lors du nettoyage des résidus déchaussés. La DRX a montré aussi la présence de portlandite avant l'attaque par l'HCl pour tous les bétons d'étude et sa disparition dans la zone de surface après attaque.
- Dans les milieux témoin et sulfatique et pour chaque échéance d'étude, les BAP PZ (BAPN/BAPR) présentent des gains en masse moins importants que ceux du BAP control. Les résultats montrent que pour tous les BAP, la pouzzolane naturelle influe considérablement et positivement sur la résistance des (BAP) aux milieux contenant des sulfates de sodium Na_2SO_4 , ou MgSO_4 .

2-Recommandations :

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont été limités à l'étude de l'effet de la pouzzolane naturelle et des agrégats recyclés sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des BAP. D'autres aspects restent à étudier. Ainsi, nous recommandons pour les futurs travaux, de se pencher sur les thèmes suivants :

- Fabriquer des BAP avec d'autres ajouts minéraux tels que le Méta kaolin ou le laitier ou un mélange d'ajouts.
- Réaliser des essais de mesure d'indicateurs de durabilité comme la perméabilité au gaz et l'immersion à l'eau de mer à long terme.
- Réaliser des essais d'attaque par d'autres types d'acides tels que l'acide phosphorique (H_3PO_4) et l'acide nitrique (HNO_3).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI. Standard practice for selecting proportions for normal heavy weight and mass concrete. (ACI 211.1-91). 1991. p. 33.
- Adekunle, S., Ahmad, S., Maslehuddin, M., Al-Gahtani, H.J., Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers. *Cem.Concr. Compos.* 62, Vol. 2015.pp. 125-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp> .
- AFGC. Association Française de Génie Civil.Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires. *Annales du bâtiment et des travaux publics*. Juin 2000.
- AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons. Toulouse.1997.
- Aït-Mokhtar, A., Amiri, O., Dumargue, P., Sammartino, S., A new model to calculate water permeability of cement-based materials from MIP results. *Adv. Cem. Res.*Vol. 14 (N 2), 2002.pp. 43-49.
- Ajdukiewicz,B.A., Alina,T.K., Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete.*Journal of Advanced Concrete Technology*.Vol. 5.2007.pp. 259-273.
- Akash,Rao., Kumar,N.Jha., Sudhir,Misra., Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources Conservation and Recycling*. Vol.50. 2007. pp. 71–81. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.05.010.
- Al-Amoundi,O.S.B., Maslehuddin,M., Saadi,M.M., Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements, *ACI Materials Journal*.Vol.92.N°1.1995. pp.15-24.
- Ali Aichouba.A, Ghrici.M, Effets de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire. Colloque CMEDIMAT 2005, ENSET Oran 06 et 07(2005).
- American Society for Testing and Materials, Standard Practice for Making and Curing. Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM C 192. 2007.
- Amiri, O., Aït -Mokhtar, A., Dumargue, P., Touchard, G., Electrochemical modelling of chlorides migration in cement based materials. Part II: experimental study - calculation of chlorides flux. *Electrochim. Acta*.Vol. 46, 2001. pp.3589-3597.
- Amiri, O., Aït-Mokhtar, A., Method of determination of diffusion coefficients of chloride in concrete. In: *GranDuBe* (in French), AFGC e RGC&U. ENPC press, France, May 2007. p. 437. ISBN 978-2-85978-425-6.
- Arora,S., Singh,S.P., Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse

recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* Vol.102.2016. pp. 782–791.

Assem, A.A.H., Lachemi, M., Khandaker, M., Hossain, A., Effect of Metakaolin and Silica Fume on the durability of Self-Consolidating Concretes. *Cement and Concrete Composites*. Vol.34. N°6. 2012. pp.801-807.

Assié, S., Durabilité des bétons autoplaçant. Thèse de Doctorat INSA-UPS de Toulouse. 2004.

Association française de Génie Civil (AFGC) Bétons Autoplaçants Recommandations provisoires, juillet (2002), 63 pages.

ASTM C 267-96, Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Structures, June (1996).

ASTM, Standard Practice for Making and Curing, Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International. West Conshohocken. PA. USA. ASTM C 192. 2007.

ASTM, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. ASTM C1012-04.2004.

Bairagi, N.K., Ravande, K., Pareek, V.K., Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources conservation and recycling*. 1993. pp. 109-126. 0921-3449/92.

Bairagi, N.K., Vidyadhara, H.S., Ravande, K., Mix design procedure for recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol.4.No 4.1990. pp.188-193. 0950 - 0618/90/040187 – 06.

Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L., Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction, *Cement and Concrete Research*. Vol. 37(7).2007. pp.1070–1084.

Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L., Durability of self-consolidating concrete to different exposure regimes of sodium sulfate attack, *Materials and Structures*, Vol .42,(2009), pp.1039–1057.

Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E., Kenai, S., Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Constr. Build.Mater.* Vol.31, 2012.pp. 251-257.

Benchaa, B., Kadri, E., Azzouz, L., Kenai, S., Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cem. Concr. Compos.* Vol. 34, 2012.pp. 1167-1173.

Benosman, A.S., Taibi, H., Mouli, M., Belbachir, M., Elaboration et caractérisation de composites mortier-polymère. *Congrès international Réhabilitation des Constructions et Développement Durable*. Alger. 3-4 mai.2005. T.2. pp.163-167.

Bomstein, D., Bazire, Y.P., Les déchets tiennent la route. *Environnement Magazine*. N° 1615, 2003. pp. 49-57.

Bosiljkov, V.B., SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*. Vol.33. 2003. pp.1279–1286. doi: 10.1016/S0008/-8846(03)00013-9.

- Boudali, S., Kerdal, D.E., Ayed, K., Abdulsalam, B., Soliman, A.M., Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. *Construction and Building Materials*. Vol. 124.2016. pp. 705–713.
- Bougara, A., Lynsdale, C., Ezziane, K., Activation of Algerian slag in mortars, *Construction and Building Materials*. Vol 23.2007. pp. 542–547.
- Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., Rouis, F., Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Constr. Build. Mater.* Vol. 23, 2009. pp.2593-2598.
- Boukendakdji, O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Optimisation des conditions opératoires. Thèse de Doctorat de l'Université Saad Dahled Blida.2010. 199 pages.
- Bouzoubaâ, N., Lachemi, M., self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. *Cement and Concrete Research*. Vol.31. 2001. pp .413–420. PII: S 0008-8846 (00)00504-4.
- Butler, L., West, J. S., Tighe, S. L., The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*. Vol. 41. 2011. pp. 1037–1049.
- Carro-Lopez, D., Gonzalez-Fonteboa, B., de Brito, J., Martinez-Abella, F., Gonzalez-Taboada, I., Silva, P., Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 96.2015. pp. 491–501.
- Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J.R., Ledesma, F., Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*. Vol. 89.2015. pp. 36–47.
- Celik, K., Meral, C., A Comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Constr. Build. Mater.* Vol.67, 2014. pp. 14-19.
- Chai, H., Design and testing of SCC Ph.D Thesis. University College of London (UCL). April .1998. 259 pages.
- Chakradhara, Rao. M., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V., Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*. Vol. 44.2011. pp. 205–220. DOI 10.1617/s11527-010-9620-x
- Chindaprasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H.T., Sirivivatnanon, V., Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete, *Construction and Building Materials*. Vol. 21.2007. pp. 356–361.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V., Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, *Construction and Building Materials*. Vol. 22.2008. pp. 356–361.
- Colak, A., Characteristics of pastes from a portland cement containing different amount of naturel pozzolan. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33.2003. pp. 585-593.

- Colleparidi, M., Marcialis, A., Turriziani, R., The penetration of de-icing agents in cement pastes. *IL Cem.* Vol.69, 1972. pp. 143-150.
- Corinaldesi, V., Ortand, G., Moriconi, G., Self-compacting concrete incorporating recycled aggregate. 2002. pp. 455-464.
- Cussigh, F., Sonebi, M., De Schutter, G., Project testing SCC-segregation test method. *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC.* Reykjavik, Islande août. 2003. pp. 311-322.
- De larrard, F., Concrete mixture-proportioning - A scientific approach, *Modern Concrete. Technology Series.* N°9. E&FN SPON. 1999.
- De Schutter, G., Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, European research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete. *Growth Contract No. GRD2-2000-30024*, September. 2005. 23 p. Available in www2.cege.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC.
- Debbih, A., Performance d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés, laitier et la pouzzolane naturelle. *Thèse de Magister de l'Université Saad Dahled Blida.* 2012. 157 pages.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R., Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites.* Vol. 32. 2010. pp. 421-426.
- Debieb, F., Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates. *Thèse de Doctorat de l'USTHB.* 2007. 163 pages.
- Dinakar, P., Sethy, K.P., Sahoo, U.C., Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Mater Des.* Vol. 43. 2013. pp. 161-169.
- Domone, P., Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method. *Department of Civil. Environmental and Geomatic Engineering. University College London : London, UK.* 2009.
- Domone, P.L.J., Jin, J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete. *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete.* Stockholm. RILEM Proceedings, Paris. PRO 7. 1999. pp. 109-120.
- Domone, P.L., A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites.* Vol 29. 2007. pp. 1-12.
- Domone, P.L., Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement & Concrete Composites.* Vol. 28. 2006. pp. 197-208. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003.
- Edamatsu, Y., Nishida, N., Ouchi, M., A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. In : *Proceedings of the first international. RILEM symposium on self-compacting concrete.* Stockholm. Sweden. 1999. Rilem. Paris. pp. 309-320.
- Edamatsu, Y., Sugamata, T., Ouchi, M., A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests. In : *International RILEM symposium on self-compacting concrete.* RILEM Publications. 2003. pp. 345 – 354.

EFNARC The European guidelines for self-compacting concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. 2005. 68p. www.efnarc.org.

EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete. 2002. p. 32.

EL Hilali, A., Thèse de doctorat. Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) influence des fines calcaires et des fibres végétales. Ecole doctorale de science et ingénierie. Univ Cergy pontoise. 17.12.2009.

Evangelista, L., de Brito, J., Concrete with fine recycled aggregates: a review. Eur. J. Environ. Civ. Eng. Vol. 18 (2), 2014. pp. 129-172.

Evangelista, L., de Brito, J., Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites. Vol. 29. 2007. pp. 397–401. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.

Fang, W., Jianxiong, C., Changhui, Y., Studies on Self-Compacting High-Performance Concrete with high volume mineral additives. Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete. Sweden. 1999. pp. 569-578.

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

Gardner, N.J., Poon, S.M., Time and temperature effects on tensile, bond, and compressive strengths, J. Amer. Concr. Inst., Vol. 73, N° 7. 1976. PP. 405-9.

Gasti, T., Caractérisations et formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recycles. Mémoire de Magister de l'Université Yahia Farès – Médéa. 2010. 112 pages.

Ghazi, FK., Jadiri, Al RS., New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements. ACI Mater J. Vol. 107 (5). 2010. pp. 490-497.

Ghrichi, M., Kenai, S., Meziane, E., Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. J. Mater. Sci. Vol. 41, 2006. pp. 6965-6972.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0227-0>.

Ghrichi, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., Kadri, E., Some Engineering Properties of Concrete Containing Natural Pozzolana and Silica Fume. Journal of Asian Architecture and building engineering. 2006. pp. 349-354.

Ghrichi, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. Cement & Concrete Composites. Vol. 29. 2007. pp. 542–549.

Gonzalez, B., Fonteboa, Marty nez-Abella, F., Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Building and Environment. 2007. doi: 10.1016/j.buildenv.2007.01.008.

Goto, S., Tsunetani, M., Yanagida, H., Kondo, R., Diffusion of chloride ion in hardened cement paste. Yogyo-Kyokai-Shi. Vol. 87 (3), 1979. pp. 126-133.

- Grdic,Z.J., Gordana,A., Topilic-Curcic, G. A., Despotovic, I.M., Ristic,N.S., Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 24.2010. pp. 1129-1133.
- Güneyisi,E., Gesoglu,M., Algin,Z., Yazıcı,H., Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates.*Construction and Building Materials*. Vol. 113.2016. pp. 622–630.
- Hachana, AK., Benaichi, E., Mezguiche,B., Mellas,M., Etude des bétons à base des agrégats des déchets de demolition. Magister. Université Biskra. 2008.
- Hansen,T.C., Recycled concrete aggregate and fly ash produce concrete without Portland cement.*Cement and Concrete Research*. Vol.20.1990. pp.355-356. 0008-8846/90.
- Hayakawa, M., Matsuoka, Y., Yokota, K., Application of super workable concrete in the construction of 70-story building in Japan.Second CANMET/ACI on advances in concrete technology. Las Vegas.ACI. Vol. 154-20. 1995. pp. 381-397.
- Hermann,K., Dégâts du béton dus à l'agression des ions de sulfate, *Bulletin du ciment*.Vol. 60, n° 4.1992.
- Hermann,K., Substances chimiques exerçant une action sur le béton. *Bulletin du ciment* Vol.63, n° 12.1995.
- Jacobs, F., Hunkeler, F., Design of self-compacting concrete for durable concrete structures. *Proceedings of First International Symposium on Self- Compacting Concrete*. (PRO 7). Stockholm. Suède. 13-15 September. 1999. pp .397-407.
- Jaubertie,R., Dégradations de mortiers sous différents milieux sulfatiques. *Annales du bâtiment et des travaux publics*. Septembre-Octobre.1999.
- Juan,M.S., Gutiérrez, P. A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 23.2009. pp. 872–877.
- Kaid,N., Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques. Thèse de Magister. l'USTMB d'Oran. 2000.
- Kaid,N., Cyr, M., Julien,S., Khelafi,H., Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach. *Construction and Building Materials*. Vol.23. 2009. pp.3457–3467.
- Kaid,N., Khellafi,H., Etude de l'influence de l'utilisation d'un ajout pouzzolanique local sur les caractéristiques d'un mortier par analyse micro structurale. Colloque CMEDIMAT 2005. ENSET. Oran. 06 et 07 Décembre 2005.
- Kanellopoulos, A., Petrou, M.F., Ioannou, I., Durability performance of selfcompacting concrete. *Constr. Build. Mater*.Vol. 37, 2012. pp.320-325.
- Kanish Kapoor,M.E., , Singh,S.P., Singh,B., Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. Vol. 128.2016. pp. 67–76.

- Kenai, S., Debieb, F., Azzouz, L., Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. In: International Congress for Challenges of Concrete Construction. University of Dundee, UK, 2002.pp. 383-392.
- Kenai, S., Menadi, B., Debbih, A., Kadri, E.H., Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolan on rheology of self-compacted concrete. Key Eng. Mater. Vol. 600, 2014. pp.256-263, 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.256.
- Kenai, S., Debieb, F., Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés, Materials and Structures, Vol. 44, (2011), pp. 815–824.
- Khaleel, O.R., Abdul Razak, R.H., Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate. Mater Des. Vol.53. 2014. pp.691–700.
- Khatib, J.M., Performance of self-compacting concrete containing Fly ash. Construction and Building Materials. Vol. 22.2008. pp.1963–1971.doi: .1016/j.conbuildmat.2007.07.011.
- Khatib, J.M., Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research. Vol.35. 2005. pp. 763-769.
- Khayat, K.H., Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal. May. Vol. 96- 3.1999. pp. 346-353.
- Kou, S.C., Poon, C.S., Properties of Self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites. Vol. 31.No. 9.2009. pp.622-627.
- Kou, S.-C., Poon, C.-S., Etxeberria, M., Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 33, 2011, pp. 286–291.
- Lee, K.M., Lee, H.K., Lee, S.H., Kim, G.Y., Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. Cement and Concrete Research. Vol. 36.2006. pp. 1279–1285.
- Lin, Yong-Huang, Tyan, Yaw-Yuan, Chang, Ta-Peng, Chang, Ching-Yun, An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. Cem. Concr. Res. Vol.34, 2004. pp. 1373-1380.
- Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, M., Lopez-Colina, C., Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. Waste Management. Vol. 29.2009). pp. 3022–3028.
- L'UEPG, Union Européenne des Producteurs de Granulats. Rapport 2005.
- Malesev, M., Radonjanin, V., Marinkovic, S., Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. Sustainability. Vol. 2. N° 5.2010. pp. 1204-1225.
- Mouli, M., Etude des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication des bétons légers et bétons à haute performance. Thèse de Doctorat d'état. Université Mohammed Boudiaf (USTMB) d'Oran, Décembre 2006.

- Mouli, M., Khelafi, H., Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*. Vol. 43. 2008.pp 31–36.
- Nagataki, S., Fujiwara, H., Self-compacting property of highly flowable concrete. Second CANMET/ACI on advances in concrete technology. Las Vegas. ACI.Vol.154-20. 1995. pp.301-314.
- Nawa,T., Izumi,T., Edamatsu,Y., State-of -the-art report on materials and design of self-compacting concrete. *Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete*. Japan. 1998.pp.160-190.
- Necira,B., Guettala, A., Chabi,S., Formulation des bétons autoplaçants: Effet des ajouts minéraux et des adjuvants. *Sciences Technologies et Développement – Andru*, N°2 .2007. pp. 66-79.
- Neville, A.M., *Propriétés des bétons*. Édition Eyrolles 2000.
- Okamura, H., Ouchi, M., Self-compacting concrete. Development, present and future, *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete (PRO 7)*. Stockholm, Suède. 1999. pp.13-15.
- Okamura, H., Ozawa, K., Mix design for self-compacting concrete. *Concr Lib JSCE*.Vol.25. 1995. pp.107–20.
- Okamura, H., Self-compacting high-performance concrete. *Concr Int Design Constr*. Vol.19(7). 1997.pp.50–54.
- Okamura,H., Ouchi,M., Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 1- 1, 2003. pp. 5-15.
- Pani, L., Francesconi, L., Concu, G., Influence of replacement percentage of recycled aggregate on recycled aggregate concrete properties. *fib Symposium Prague*. 2011. pp.1-10.
- Park, C.K., Noh, M.H., Park, T.H., Rheological properties of cementitious material containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35.2005. pp. 842-849.
- Pera, J., Husson, S., GUILHOT, B., Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*. 1999. pp.99-105.
- Petersson,Ö., Billberg, P., Van, B.K., A model for Self-Compacting Concrete. *International Rilem Conference on Production methods and workability of concrete.RILEM Proceedings*. Vol.32. 1996. pp.483-492.
- Rakesh,K., Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete.*Construction and Building Materials*.Vol. 142. 2017. pp. 248–255.
- Raphael, J.M., Tensile strength of concrete. *ACI Materials Journal*.Vol81. N°.2. 1984.PP.158-65.
- Roziere,E., Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle.Thèse de doctorat. l'Ecole Centrale de Nantes. 2007.

- Sadek, D.M., El-Attar, M.M., Ali, H.A., Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *J. Clean. Prod.* Vol. 121, 2016. pp.19-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., Sadeghi-Nik, A., The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *J. Clean. Prod.* Vol. 112, 2016. pp. 2363-2373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.
- Safiuddin, M., Salam, M., Jumaat, M.Z., Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 11(4). 2011. pp. 1023-1041.
- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., Taylor, A.H., Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31. 2001. pp. 707-712.
- Şahmaran, M., Christian, H.R., Yaman, İ. Ö., The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*. Vol. 22. 2008. pp. 1963–1971. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003.
- Sedran, T., Les Bétons Autonivelants, bulletin LCPC 196. Réf. 3889. 1995. pp. 53-60.
- Senas, L., Priano, C., Marfil, S., Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Constr. Build. Mater.* Vol. 113, 2016. pp. 498-505.
- Siad, H., Lachemi, M., Kamali-Bernard, S., Sahmaran, M., Hossain, A., Assessment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment. *Constr. Build. Mater.* Vol. 80, 2015. pp. 141-154.
- Skaropoulou, A., Sotiriadis, K., Kakali, G., Tsvivilis, S., Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack. *Cement Concr Compos.* Vol. 37. 2013. pp. 267–275.
- Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete. *Materials and Structures*. Vol. 35. 2002. pp. 462-469.
- Sua-iam, G., Gritsada, M., Natt, Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *J. Clean. Prod.* Vol. 78, 2014. pp. 184-194.
- Tiwari, A., Singh, S., Nagar, R., Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review. *J. Clean. Prod.* 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.130>.
- Tomasiello, S., Felitti, M., EAF slag in self-compacting concrete. *Architecture and Civil Engineering*. Vol. 8. 2010. pp. 13-21.
- Tu, T-Y., Chen, Y-Y., Hwang, C-L., Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 36. 2006. pp. 943-950.
- Turcry, P., Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation. Thèse de

doctorat.de l'Ecole Centrale de Nantes. 2004. 213 pages.

Türkel,S., Felekoglu,B., Dulluc, S., Influence of various acids on the physico–mechanical properties of pozzolanic cement mortars. *Sadhan* Vol. 32. N° 6.2007. pp. 683–691.

UNI 7928 Concrete-Determination of the Ion Chloride Penetration. UNI – Ente Nazionale Italiano Di Unificazione, Milano, piazza A. Diaz, 2, (December 1978).

Van,B. K., Montgomery,D., Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*.Stockholm, Sweden. 1999. pp. 227-238.

Vinay Kumar, B.M., Ananthan, H., Balaji, K.V.A., Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in selfcompacting concrete mixes. *J. Build. Eng*.Vol. 9, 2017. pp.100-108. [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jobbe.2016.11.013](http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.11.013).

Yazici, H., The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 22. 2008. pp.456–462. doi: 10.1016/j.consbuidmat.2007.01.002.

Zhu, W., Gibbs, C., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol.35. 2005. pp.1457– 1462. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.001.

ANNEXES

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

A.1. Les Données :

Pour un volume du mortier de $V=1.7$ L (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$
- Sable: $\rho_S = 2650 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau: $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b = 0.58$

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

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.42$ ou (par volume) $E/C = 1.323$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp = 0.9 \%$ du poids de ciment (ou poudres).

A.2. Calcul d'humidite du sable :

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

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

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

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

A.3. Calcul des quantites de chaque constituant :

A.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment $\%C$:
$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{parvolume})} \times 100$$

La quantité de ciment C en kg :

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

A.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

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

A.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

A.3.4. L'eau

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

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

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau1

$$E_1 = E \times 0.70$$

Eau2

$$E_2 = E \times 0.30$$

Composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier

Entré les données dans les cellules en rouge

Valeurs calculées dans cellules en noir

Référence du mélange

Essai N°

CEM II 42,5 +

Date 15/08/2012

0

% de pozzoulane

0

% de Poudre de Marbre

Volume de mortier (litres)

1000,00

Sable/mortier vol

0,50

E/P par vol.

1,315

Poudre vol (%)

21,598

Eau volume (%)

28,402

Composition Poudre (vol %)

Type

Résultats

Ciment portland

100

Etalement (cm)

Pozzoulane

0

Poudre de Marbre

0

Temps d'écoulement (sec)

superplast - MEDAFLOW30

0,9

% (Sp/P)

Densité relative

3,13

Teneur en eau du sable

	Humidité (%ab)	Absorption (%)	Correction (%)
Poids humide (gms)	200	0,00	0,58
Poids sec (gms)	200		

Matériaux	Volume Litres	Densité kg/m ³	Masse kg	Contenance d'eau %	Poids mélange kg
Poudre	215,983	3130	676,026		676,026
Ciment	214,611	3150	676,026		676,026
Pozzoulane	0,000	2612	0,000		0,000
Poudre de Marbre	0,000	2700	0,000		0,000
Eau	284,017	1000	284,0		287,443 W1 201,210
Superplastifiant MEDAFLOW 30		1070	6,08	70	4,259 W2 86,233
Sable	500,000	2650	1325,000	-0,58	-7,685 1325,000
Total	998,629				2294,553

E/P poids = 0,4201

1,7 Volume (ℓ)		Poids mélange g
Poudre		1149,244
Ciment	0,365	1149,24
Pozzoulane	0,000	0,00
Calcaire	0,000	0,00
Eau efficace	0,4828	488,65 W1 342,1
	E théorique	482,83 W2 146,6
Superplastifiant MEDAFLOW 30		10,34
Sable	0,8500	2252,5

ANNEXE B

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

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

B.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V=40$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : $\rho_G = 2650 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : $\rho_{AG} = 2550 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2560 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - Coefficient d'absorption du sable : $Ab_S = 0.65$
 - Coefficient d'absorption du gravier : $Ab_G = 3.75$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

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

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A = 1\%$ du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}} = 1.324$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volume}} / \rho_A = 0.42$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) : $\%Sp = 0.9\%$ du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

B.2. Calcul d'humidité

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

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

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

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

B.3. Calcul des différents composants

B.3.1. Gravier

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

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

B.3.2. Sable

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

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

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

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

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

Le pourcentage du sable S dans le béton :

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

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

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

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

B.3.3. Ciment

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

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

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

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

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

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

B.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

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

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

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

B.3.5. Eau :

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

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

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

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

L'eau contenu dans le sable : e_1

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

L'eau contenue dans le gravier : e_2

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

L'eau contenu dans le superplastifiant : e_3

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 70}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

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

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

Avec :

Eau1

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

Eau2

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

Composition du béton

Entrée des données en rouge

Référence:

Date

15/08/2012)

Mesures d'humidité

Densités relatives	Gravier	2,65	Absorptions (%)		Pds Humide		Pds sec	% Humidité
pouzzolane Poudre de Marbre	Sable	2,63	Gravier 3/8	3,75	8/15	3000	2999,4	0,02
	Ciment	3,15	Gravier 8/15	1,61	3/8	1600	1598,3	0,11
	PZ	2,6	Sable	0,65	Sable	500	500	0,00
	MP	2,7						

Gravier

Densité	1339	kg/m ³		% gravier	32,8	vol % de béton
percent	65	%		Gravier	870,4	kg/m3
8/15:3/8	2,00			8/15	580	kg/m3
				3/8	290	kg/m3

Air

Air	1	vol % de béton
-----	---	----------------

Sable

volume mortier	66,2	vol % de béton		% Sable	33,1	vol % de béton
Sable	50	vol % de mortier		Sable	870,0	kg/m3
				G/S	1,000	

Pate

volume	33,1	vol % de béton		% Eau	18,8	vol % de béton
E/P volume	1,324			Eau	188	kg/m3
Poudre	14,23	vol % de béton				
Ciment	100	vol % de poudre		Ciment	14,23	vol % de béton
				Ciment	448	kg/m3
Pouzzolane	0	vol % de poudre		% Fines 01	0,00	vol % de béton
				PZ	0	kg/m3
Poudre de Marbre	0	vol % de poudre		% Fines 02	0,00	vol % de béton
Densité relative poudre	3,15			MP	0	kg/m3
E/P Poids	0,420			Poudre	448	kg/m3
				E/C	0,420	

Superplastifiant: MEDAFLOW 30

dosage	0,9	% liquid de poudre		superplast	4,04	kg/m3
--------	-----	--------------------	--	------------	------	-------

Volume de Mélange (litres)

Volume de Mélange (litres)	40	litres
----------------------------	----	--------

Densité Béton

Densité Béton	2381	kg/m3		Poids Mélange	95,25	kg
---------------	------	-------	--	---------------	-------	----

Poids Mélange

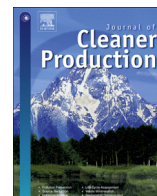
	prop.mél	Pds mél	absorption	humidité	extra eau	Poids		
	kg/m3	kg	%	%	kg	kg	g	
Gravier 8/15	580	23,21	3,75	0,02	-0,87	22,34	22343,6	
GravierGravier 3/8	290	11,60	3,75	0,11	-0,42	11,18	11181,8	
Sable	870	34,80	0,65	0,00	-0,23	34,57	34572,2	
Ciment CPA 42,5	448	17,93				17,93	17934,0	
Pouzzolane	0	0,00				0,00	0,0	
Poudre de Marbre	0	0,00				0,00	0,0	
Eau	188	7,54					0,0	
Superplastifiant	4,04	0,16		70	0,11	0,161	161,4	
composition eau						8,94	Eau 1 70%	6,258
							Eau 2 30%	2,682
								2681,9
total	2381	95,2			-1,40	95,13		

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ANNEXE C

PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES

INTERNATIONALES



Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan



Mohammed Omrane ^{a, b}, Said Kenai ^{a, *}, El-Hadj Kadri ^c, Abdelkarim Aït-Mokhtar ^d

^a Geomaterials Laboratory, Civil Engineering Department, University of Blida, P.O. Box 270, Blida, Algeria

^b Geo-materials Laboratory(LDMM), Civil Engineering Department, University of Djelfa, Algeria

^c Laboratory L2MGC, University of Cergy Pontoise, F9500, Cergy Pontoise, France

^d University of La Rochelle, LaSIE, UMR CNRS 7356, Av. Michel Crépeau, 17042, La Rochelle cedex 1, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 November 2016

Received in revised form

12 July 2017

Accepted 17 July 2017

Keywords:

Self compacting concrete (SCC)

Recycled concrete aggregates

Natural pozzolan

Rheology

Mechanical properties

Durability

ABSTRACT

The use of recycled concrete aggregates from rubble and demolition waste in combination with cementitious additions in concrete has several practical, ecological and economic advantages by reducing carbon dioxide emissions, reducing the excessive consumption of natural resources and contributes to a cleaner production of concrete. In this paper, rheological, mechanical and durability properties of self-compacting concrete (SCC) using recycled concrete aggregates and natural pozzolan (PZ) are evaluated. Four concrete mixes were manufactured, by varying the level of substitution by weight of both coarse and fine natural aggregates by fine and coarse recycled aggregates. The substitution levels were fixed at 0%, 50%, 75% and 100%. The cement was also partially replaced by weight from 5% to 25% by natural pozzolan. The performance at the fresh state of SCC was discussed using the following tests (slump test, J-Ring, flow time test V-funnel, L-Box and sieve stability tests). Compressive strength was measured at the ages of 7, 28, 56, 90 and 120 days. Considering the importance of studying the durability of SCC in aggressive environments, the behavior of chloride ions diffusion was analyzed using the Fick's second law and the loss in mass after immersion in sulfuric acid (H_2SO_4) was also investigated. The results indicate the possibility of using 50% recycled coarse and fine aggregates for performing self-compacting concrete. The NSCC and RSCC mixtures containing PZ develop a comparable compressive strength to mixtures without PZ at 120 days. The incorporation of 15% and 20% PZ in NSCC and RSCC decreased the penetration depth of chloride ions to 50% and also decreased the mass loss under sulfuric acid attack.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

A large quantity of waste materials from construction and buildings demolition sites is generated all around the world (Kenai et al., 2002). The removal and disposal of these wastes cause significant environmental problems as disposal sites are lacking especially around big cities. The recycling and reuse of concrete wastes as aggregates are of great importance to the environment protection because, it can minimize the environmental pollution and protect the nature by reducing the use of natural aggregates resources.

Self-compacting concrete (SCC) is characterized by its high flow capacity and can therefore spreads through congested

reinforcement, fills all open and confined corners of the form and consolidates only by its own weight. SCC usually has a higher paste ratio and contains some mineral addition such as slag, natural pozzolan and silica fume.

The performance of SCC with various mineral additions has been widely investigated. Self-compacting mortars (SCM) made with binary and ternary sand improved significantly the compressive strength and satisfied the SCM limits in terms of slump flow and V-funnel time (Benchaa et al., 2012). The incorporation of a high volume of fly ash had only a slight negative effect on workability, whereas a high Rice husk ash (RHA) volume tended to decrease both workability and segregation. RHA could be used at a level of up to 25% and still gives satisfactory workability (Sua-iam and Makul, 2014).

SCC mixtures exhibit a better durability potential compared to ordinary vibrated concrete because of the increased fines content in

* Corresponding author.

E-mail address: sdkenai@yahoo.com (S. Kenai).

Table 1
Chemical composition of cement and natural pozzolan.

Compound (%)	Cao	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Loss on ignition
Pozzolan	12.4	43	19	9.5	4	3.0	1.4	–	6.5
Cement	63.6	20.5	5.8	2.6	0.9	0.4	0.9	3.3	–
	C ₃ S		C ₂ S			C ₃ A		C ₄ AF	
	60.4		13.2			11		7.9	

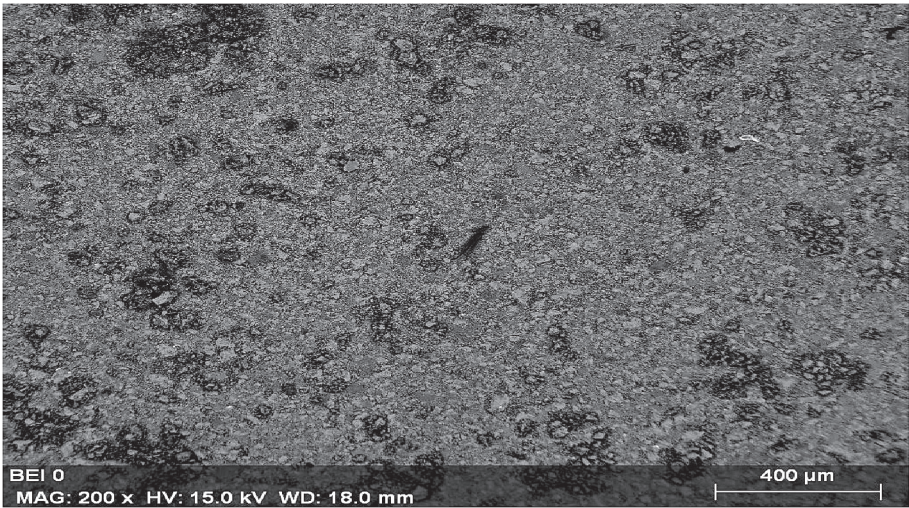
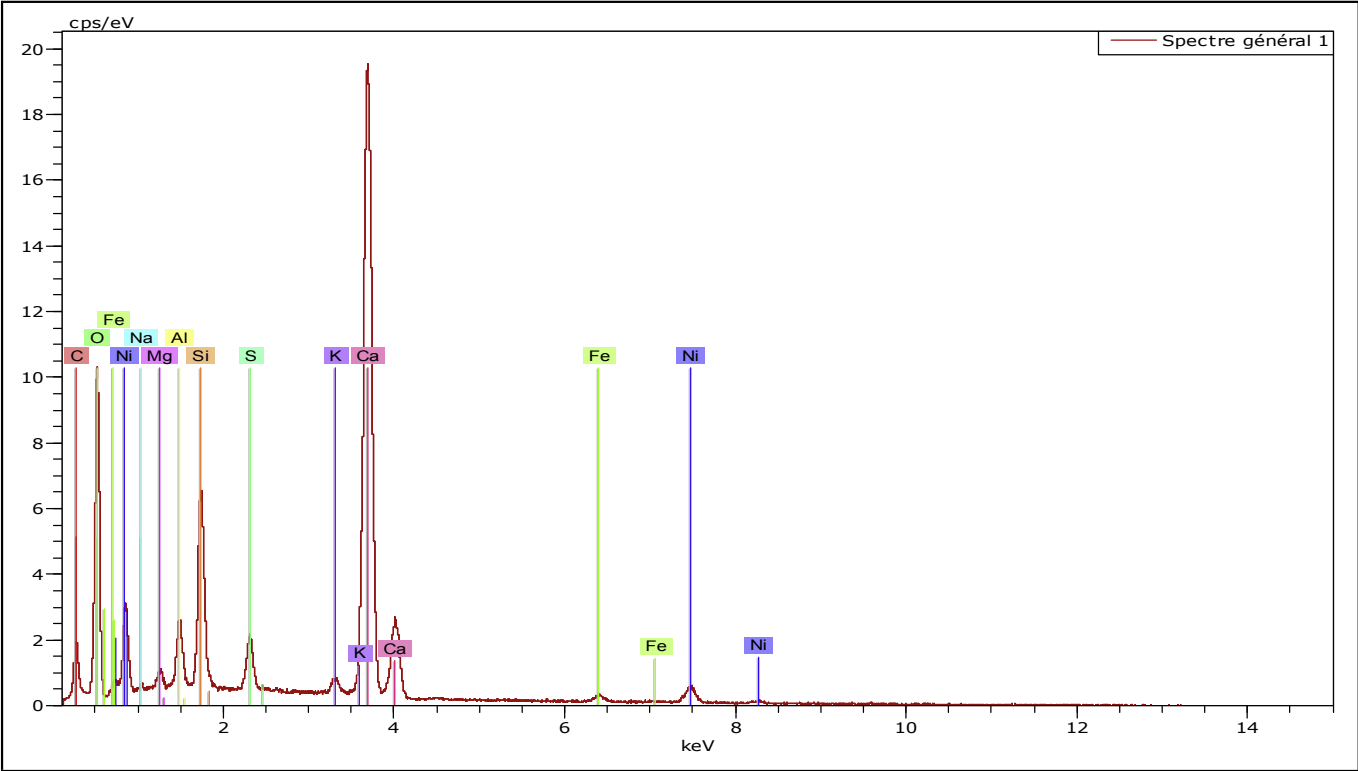


Fig. 1. (a): XRD spectrum of cement. **Fig. 1 (b):** Scanning electron microscopy (SEM) of cement.

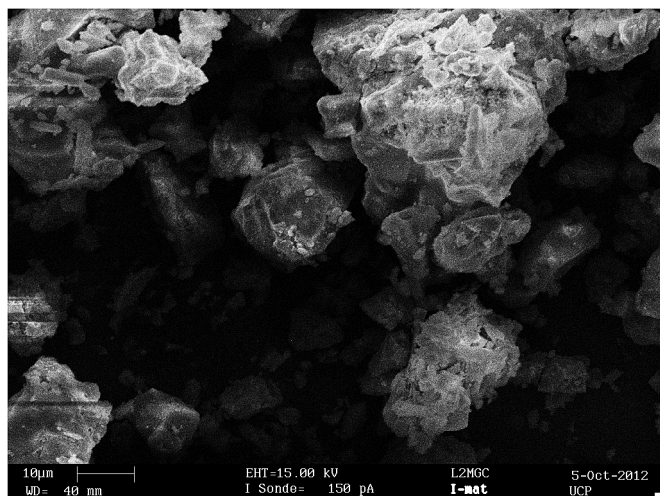


Fig. 2. Scanning electron microscopy (SEM) of natural pozzolan.

Table 2
Physical and mechanical properties of natural and recycled concrete aggregates.

Properties	NG3/8	NG8/15	NS0/5	RG3/8	RG8/15	RS 0/5
Specific weight (kg/m ³)	2641	2660	2632	2425	2447	2415
Bulk density (kg/m ³)	1232	1400	1535	1200	1230	1213
Water absorption (%)	1.6	1.6	0.7	6.8	6.5	9.0
Sand equivalent	—	—	69.3	—	—	84.0
Porosity (%)	—	3.9	—	—	14	—
Los-Angeles (%)	—	22	—	—	23	—

NG3/8 natural gravel, NG8/15 natural gravel, NS0/5 natural sand, RG3/8 Coarse crushed concrete aggregates, RG8/15 coarse crushed concrete aggregates, RS 0/5 fine crushed concrete aggregates.

SCC which refines the microstructure and hence the pore network of the material (Kanellopoulos et al., 2012). The use of metakaolin (MK) and silica fume (SF) significantly reduces the chloride permeability of SCC (Assem et al., 2012). Binary and ternary mixes made with blended cements with either Por high volume fly ash (FAF) demonstrated higher resistance to the chloride migration compared to the control mixes (Celik and Meral, 2014). SCC mixtures containing limestone filler presented a high physical deterioration under Mg_2SO_4 attack especially for the 30 MPa class, with 18% mass loss (Siad et al., 2015). The use of PZ in conjunction with the other locally available waste materials such as limestone powder, cement kiln dust and pulverized steel slag, as mineral fillers produces SCC mixtures with high strength at short and long term (Adekunle et al., 2015).

However, the use of recycled aggregates to produce SCC is comparatively less investigated especially for recycled fine aggregates. Fine aggregates from gravel quarries or from demolition sites are usually damped. Fine aggregates could be replaced by fine recycled aggregates provided that the properties of the recycled aggregates are taken into account in the mix design and production (Evangelista and de Brito, 2014). SCC mixes containing 20% coarse and fine recycled concrete aggregates failed to satisfy the EFNARC requirements for SCC (Vinay Kumar et al., 2017). Natural pozzolan (PZ) decreases the flowability of both SCC with natural aggregates and with recycled aggregates (Kenai et al., 2014). However, durability of mixtures incorporating recycled aggregates showed better performance than mixture with natural aggregate and pozzolan under cyclic environmental conditions combined with sodium sulfate exposure (Boudalia et al., 2016). Using of waste powders as

mineral additives in SCC enhances its physical, mechanical properties and durability-related properties compared with the control mix of the same cement content (Sadek et al., 2016). Replacement of fine aggregates with PET particles can reduce mechanical, rheological and durability properties of SCC. Mechanical properties of concrete containing silica fume were more effective than those of concrete containing fly ash at the early ages. However, these values were almost similar at 90 days (Sadrilmomtazi et al., 2016). The proper selection of the admixture to be used to make SCC allows the replacement of 50% of the coarse aggregate and 20% of the natural fine aggregate, in order to obtain a good performance material to be used in resistant structures (Senas et al., 2016). The following optimum range of replacements by various industrial by-products were proposed for glass waste, steel slag, copper slag, ashes, waste foundry sand, and granite dust, 10–30%, 40–60%, 40–60%, 20–50%, 15–30% and 15–40%, respectively (Tiwari et al., 2016).

PZ is widely available and has been used for partial replacement of cement ordinary and SCC concrete. It has many advantageous properties such as reduction of CO₂ gas emission during cement production, cost reduction, heat evolution decrease and increase in chemical resistance. The use of SCC is hindered by its high cost. The simultaneous use of locally available PZ and both fine and coarse recycled aggregates could result in a cleaner production of aggregates giving an environment friendly concrete with less cement and with lower cost. This will also contribute to reduce the decline in the available natural resources.

The objective of this study is to evaluate the results of an experimental investigation on the mechanical, rheological properties and durability of SCC made with recycled fine and coarse aggregates and PZ as a cement replacement material. The natural aggregates (both coarse and fine) are substituted by crushed concrete aggregates at varying weight rates of 0, 50, 75 and 100%. The cement was also partially replaced by weight from 5% to 25% by natural pozzolan.

2. Experimental investigation

2.1. Materials

The type of cement used in all mixtures was CEM II/A-L 42.5R with a fineness of 300 m²/kg. Natural pozzolan (PZ) was used to partially replace cement with substitution level of 5%, 15% and 25% and the fineness of PZ being (400) m²/kg. Chemical composition of cement and natural pozzolan is shown in Table 1. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) are used for the determination of the mineralogical composition of the cement, (Fig. 1(a) and (b)).

Natural pozzolan is obtained by grinding in laboratory mill after storage for 24 h at 50 °C to remove humidity. The obtained natural pozzolan was sieved in an 80 µm sieve. Fig. 2 presents a scanning electron microscopy (SEM) picture of the natural pozzolan used.

Recycled aggregates were obtained by crushing in a laboratory mechanical crusher of 1 m × 1 m × 0.1 m concrete slabs. The slabs were manufactured in the laboratory for a 25 MPa grade concrete and stored for 28 days in water before being crushed. The crushed material is passed through sieves to obtain the various recycled aggregate fractions. The properties of aggregates are presented in Table 2. The grading curves of aggregates are presented in Fig. 3. The visual inspection of aggregates revealed their greater angularity, roughness, and porosity of crushed concrete aggregates as compared to natural aggregates (Fig. 4). Also, the surface hardness of crushed concrete aggregates was less than that of natural aggregate due to the porous state of the reclaimed mortar. The density of natural aggregates is higher than that of recycled

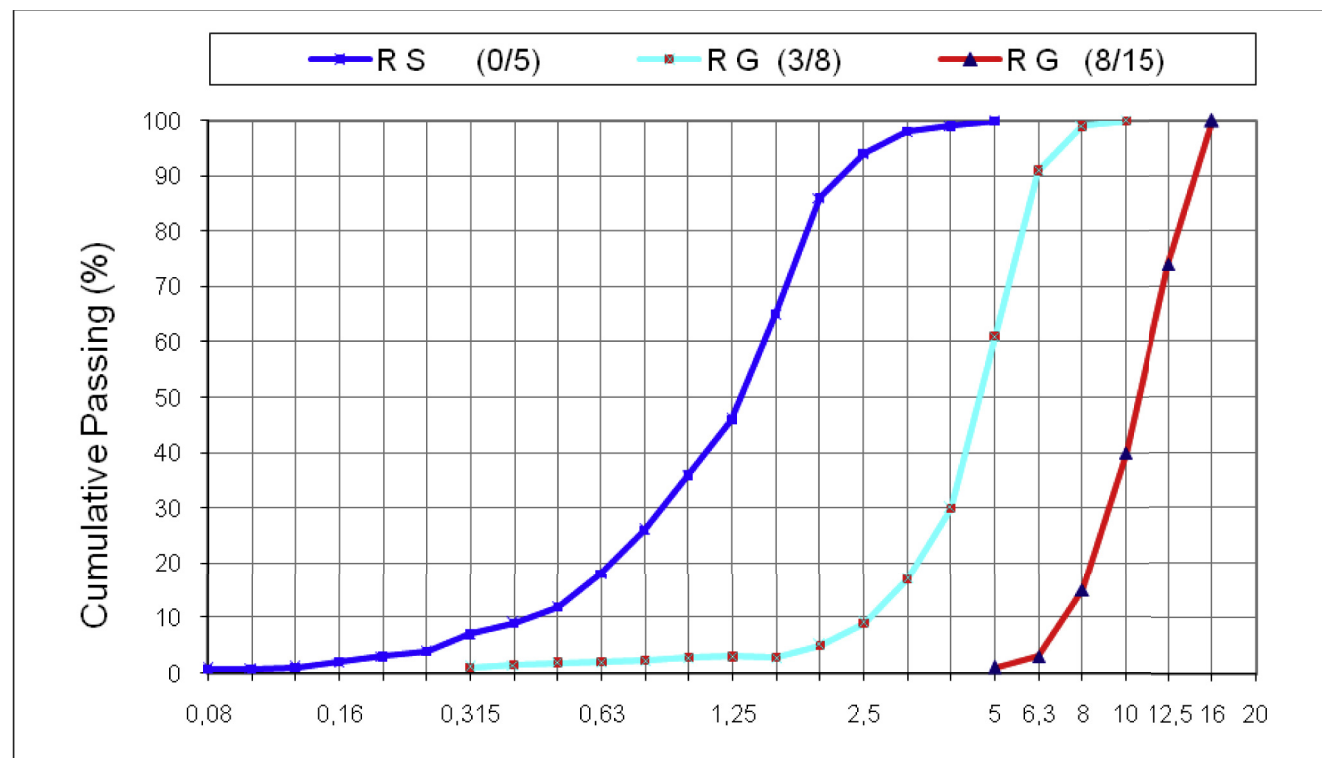
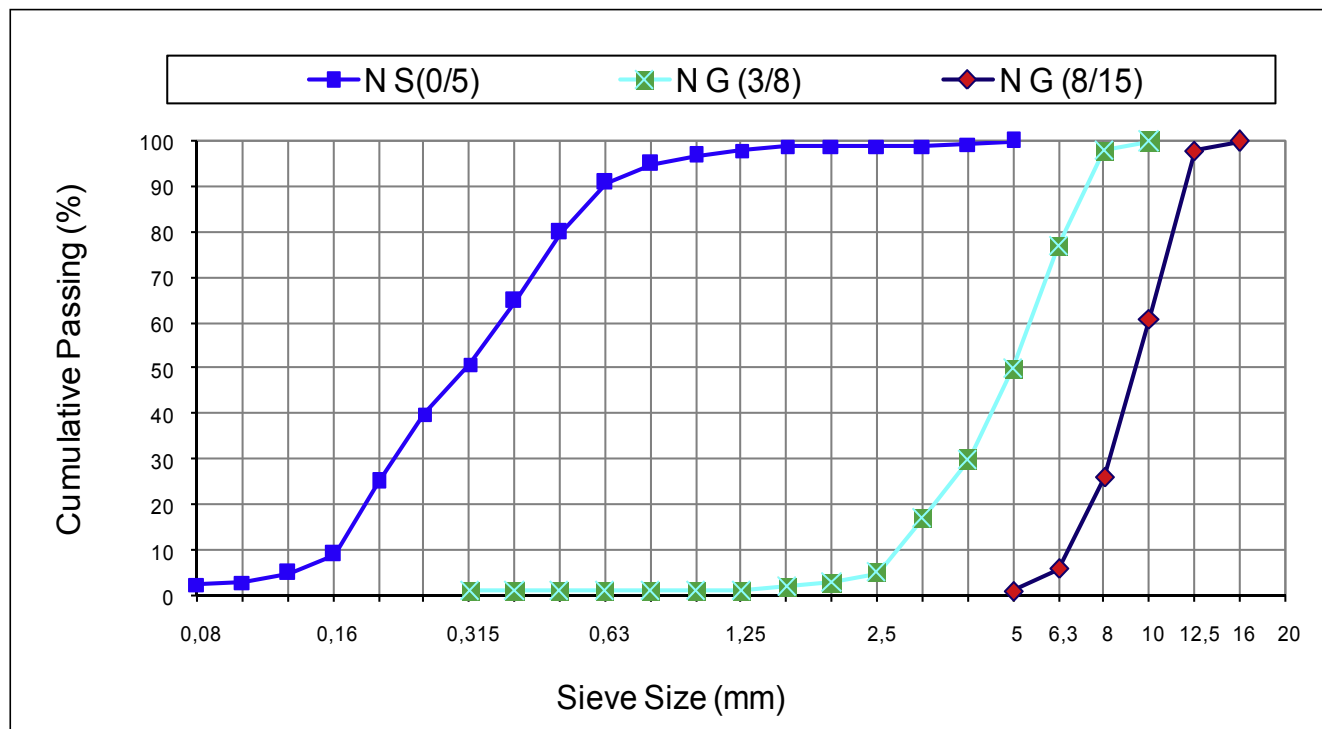


Fig. 3. Grading curves of different types of aggregates.



Recycled concrete aggregate
(Angularity, roughness and
porosity: relatively high)).

Natural coarse aggregate
(Roughness and porosity:
relatively low).

Fig. 4. Visual appearances of recycled concrete aggregates and natural coarse aggregates.

Table 3

Concrete mixture proportioning.

Mix description	W/P	W (kg/m ³)	Powder (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	PZ (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	RG3/8 (kg/m ³)	RG8/15 (kg/m ³)	super-plasticizer (%)
Control (N SCC)	0.42	189	449	449	0	870	290	580	0.9
5 PZ				426	23				
10 PZ				404	45				
15 PZ				381	68				
20PZ				359	90				
Control (R SCC)				449	0	870 ^a	290 ^a	580 ^a	
5 PZ				426	23				
10 PZ				404	45				
15 PZ				381	68				
20PZ				359	90				
25PZ				337	112				

^a (50% natural (Sand, C agg. 3/8, C agg. 8/15) + 50% Recycled (Sand,C agg. 3/8, C agg. 8/15)).

Table 4

Fresh properties of SCC.

Mix description	Slump test		L-Box test			V-funnel test (s)	Sieve stability test (%)	J-Ring	
	T500 (s)	D (mm)	T200 (s)	T400 (s)	H2/H1 (%)			D(mm)	DH (mm)
Control N SCC	2.1	729	1.3	3.4	80	7.5	9.2	710.5	9.7
5 PZ	2.1	705	1.3	3.4	81	8.0	9.4	700	9.3
10 PZ	2.2	690	1.4	3.4	82.5	8.4	10.2	681	9.4
15 PZ	2.3	670	1.4	3.5	82	10.6	11.3	668	9.1
20 PZ	2.7	627	—	—	—	—	—	—	—
Control R SCC	2	715	0.8	1.5	85	6.5	6.2	705	9.6
5 PZ	2.1	710	0.9	1.6	84.8	7.0	6.5	700	8.6
10 PZ	2.2	706	1.1	1.9	83	7.2	6.7	697	8.9
15 PZ	2.3	690	1.2	2.2	82.3	9.8	7.6	676	9.3
20 PZ	2.5	682	1.4	2.7	81	10.6	8.3	669	9.2
25 PZ	2.7	635	—	—	—	—	—	—	—

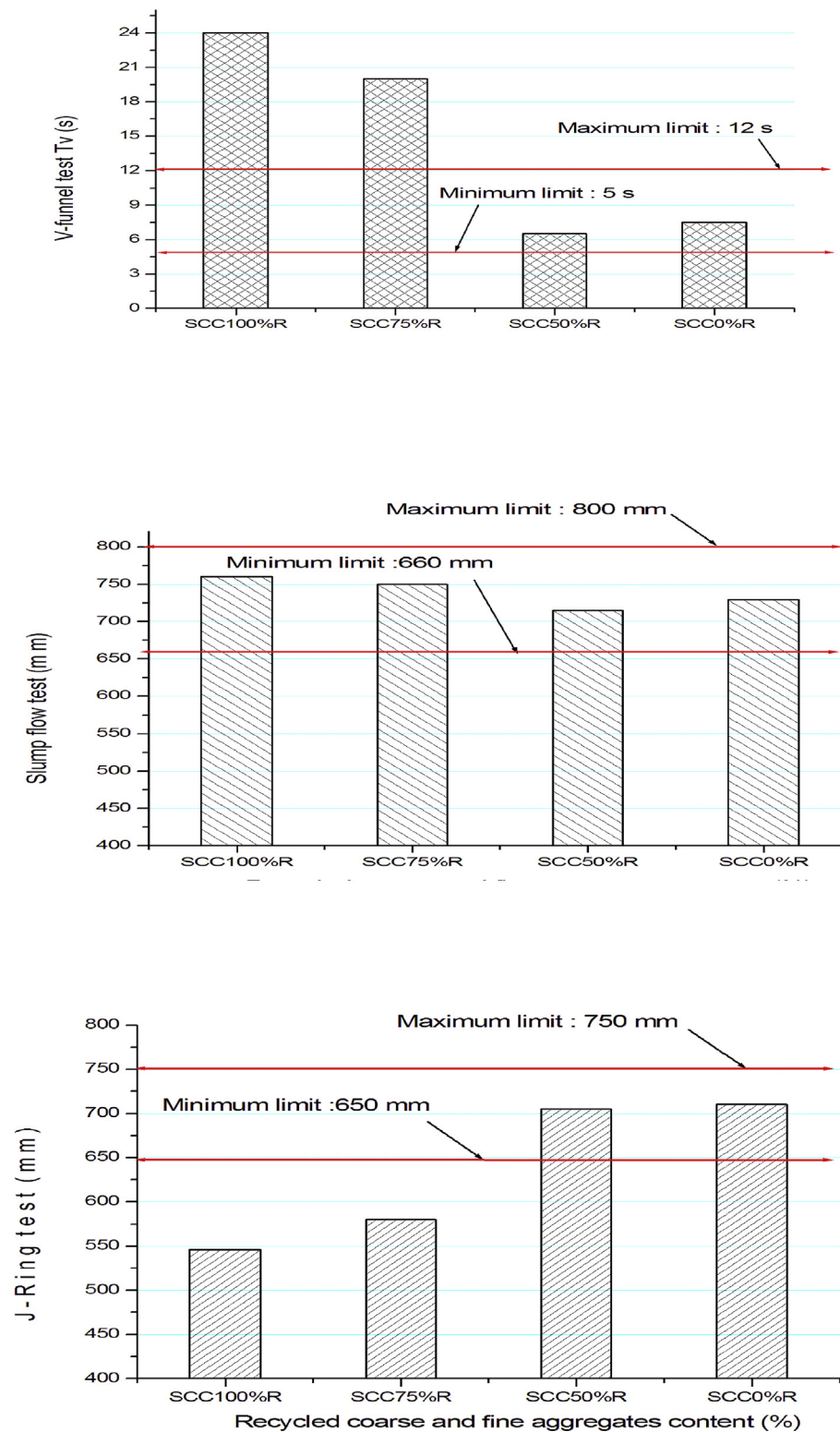


Fig. 5. Properties at the fresh state of SCC vs. recycled coarse and fine aggregates content (%).

aggregates and the recycled aggregates have a greater value of water absorption compared to natural aggregates. The presence of old adhered mortar and cement paste whose porosity to water is higher than that of natural aggregates induces a greater quantity of water absorption for the recycled aggregates. Accordingly, a suitable mix design is needed to obtain recycled aggregates concrete which satisfy the desired conditions (Okamura and Ouchi, 1999; Lin et al., 2004; Bairagi et al., 1990). The super-plasticizer (SP) used was an Ether polycarboxylates that complies with EN 934-2.

2.2. Mix proportion

Four mixes concrete were made by varying the level of substitution by weight of both fine and coarse natural aggregates by fine and coarse recycled aggregates. The substitution levels were fixed at 0%, 50%, 75% and 100%. A total of eleven (11) concrete mixes were prepared while keeping the water/powder ratio constant of 0.42. The ratio of replacement for natural pozzolana were (5%, 10%, 15%, and 20%) for natural self-compacting concrete (NSCC) and (5%, 10%, 15%, 20% and 25%) for recycled self-compacting concrete (RSCC) by mass of cement. The concrete mix proportions are summarized in Table 3.

2.3. Mixing

After homogenization of the powder and aggregates for 30 s in a rotary mixer, (2/3) of water was added and mixed for 60 s. Thereafter the remaining (1/3) of the water with SP were introduced, and the concrete was mixed for 300 s. The mixing process was stopped for 120 s and then the concrete was discharged from the mixer after the mixing process was restarted again for 30 s.

3. Tests

The performance of the concrete at the fresh state was evaluated through various tests. slump flow and V-funnel tests were used to measure the filling ability (EFNARC, 2005). The passing ability was measured using the L-Box J-Ring tests (EFNARC, 2005). The segregation resistance was determined by sieve GTM stability test (EFNARC, 2005). The compression strength was measured at 7, 28, 56, 90 and 120 days of age on the half samples obtained after the bending test following NFP 15-451 recommendations.

Cylindrical specimens having dimensions of (100 × 200) mm were used for chloride ions penetration tests. After casting, all cured samples were immersed in water which contains lime at $20 \pm 3^\circ\text{C}$ for a duration of 28 days, then the specimens were split to cylinders 100 mm in diameter and 50 mm thick. The cylindrical and the top of surfaces of the obtained specimens were recovered with a resin strip.

The resistance to penetration of chloride was calculated according to UNI 7928 (1978). The cured specimens were immersed in test solutions at 20°C for 28, 56, 90 and 120 days for chloride ion penetration. The concentration of the solution was 3% of sodium chloride (NaCl) in full immersion. The test solution was changed every 28 days. After 28, 56, 90 and 120 days of immersion, the depth of penetration of chloride ions was measured after dividing the specimens into two halves and spraying an (AgNO_3) indicator of a molarities of 0.1 N.

The loss in mass after immersion in sulfuric acid solution (H_2SO_4) was also measured after 1, 7, 14, 21, 28 and 90 days of immersion. XRD analysis were performed on the outer face in contact with the acid solution. Digital photos were taken for visual examination.

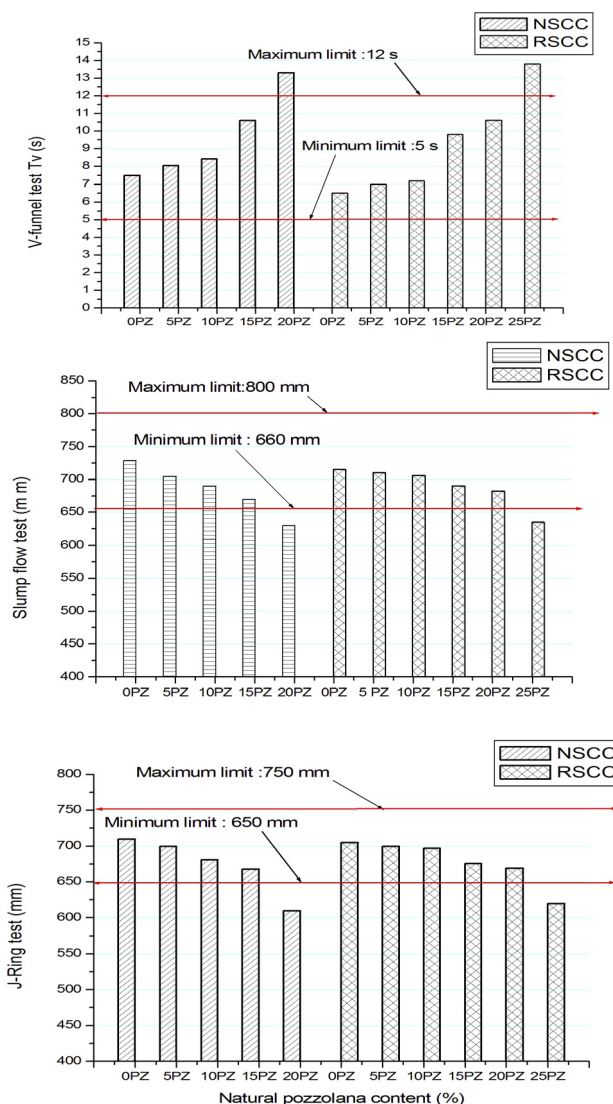


Fig. 6. Properties at the fresh state of NSCC and RSCC vs. natural pozzolana content (%).

4. Results and discussion

4.1. Workability

Table 4 summarizes the fresh properties SCC mixes. It was found that among the four tested mixtures, only the two mixtures NSCC and RSCC (with 50% recycled coarse and fine aggregates) have fulfilled all the SCC requirements of the slump, V-funnel and J-Ring tests as is clearly shown in Fig. 5. Hence, the fine and coarse recycled aggregates substitution level with natural aggregates was fixed at 50% for all the remaining tests.

It can be seen from Fig. 6 that up to 15% for PZ NSCC and up to 20% for PZ RSCC, the slump flow is comparable with that of control concrete and is within the interval of (650–800 mm) accordance to the suggested of EFNARC (EFNARC, 2005). But, at 20% PZ for NSCC and 25% PZ for RSCC, the natural pozzolana decreased the slump flow of SCC, to 625 mm and 630 mm, respectively.

The V-funnel flow time increases with increase in the natural pozzolana content. The V-funnel flow time was in the interval of (5–

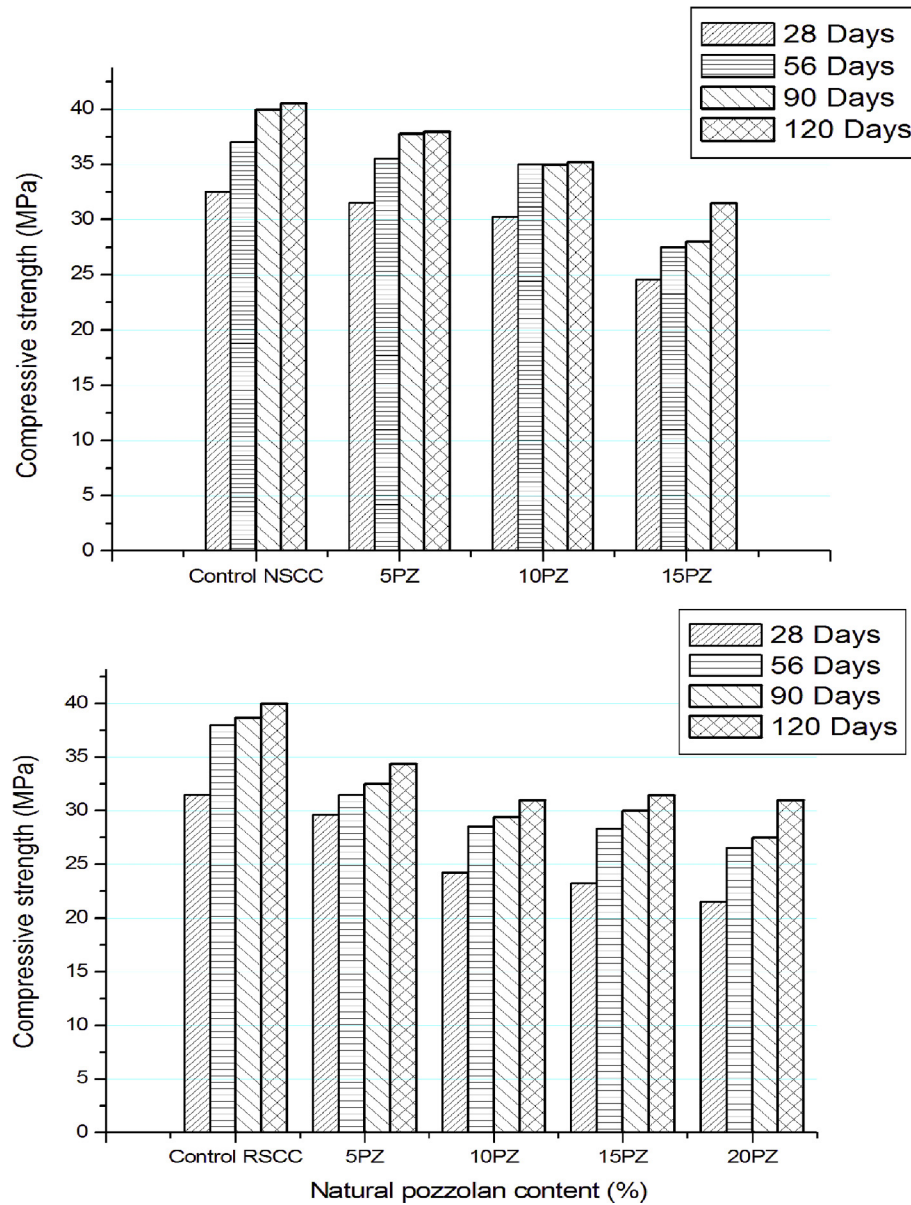


Fig. 7. Compressive strength of NSCC and RSCC vs natural pozzolan content (%).

12) seconds for all mixes except those for replacement levels higher than 15% for NSCC and 20% for RSCC. J-Ring diameter was always in the 650–750 mm range for all mixes except for higher replacement rates 15% for NSCC and 20% for RSCC (Fig. 6).

The L-Box results for all concrete mixtures gave height ratios greater than 80%, except for 15% or higher replacement level for NSCC and above 20% for RSCC. The segregation resistance for all mixes was in the interval of (0–15%) and hence in conformity of the recommendations of EFNARC.

4.2. Mechanical properties

The results of the compressive strength of (NSCC and RSCC) are shown in Fig. 7. It can be clearly seen (Fig. 7) that at all ages the

strength of NSCC decreases with increase in the percentage of natural pozzolan. Similarly, for RSCC, the strength decreases for all ages. However, a slight increase of the relative strength at long term (120 days) is observed for higher natural pozzolan content. This could be due to the pozzolanic activity of natural pozzolan which has a high content of SiO_2 . Similar results were reported for SCC with PZ. This is in agreement with the findings of other researchers using pozzolanic materials such as PZ or slag (Belaidi et al., 2012; Boukendakdji et al., 2009).

4.3. Resistance to the penetration of chloride ions (full immersion)

Chloride ingress within concrete is a complex phenomenon that involves physico-chemical processes. However, for comparison

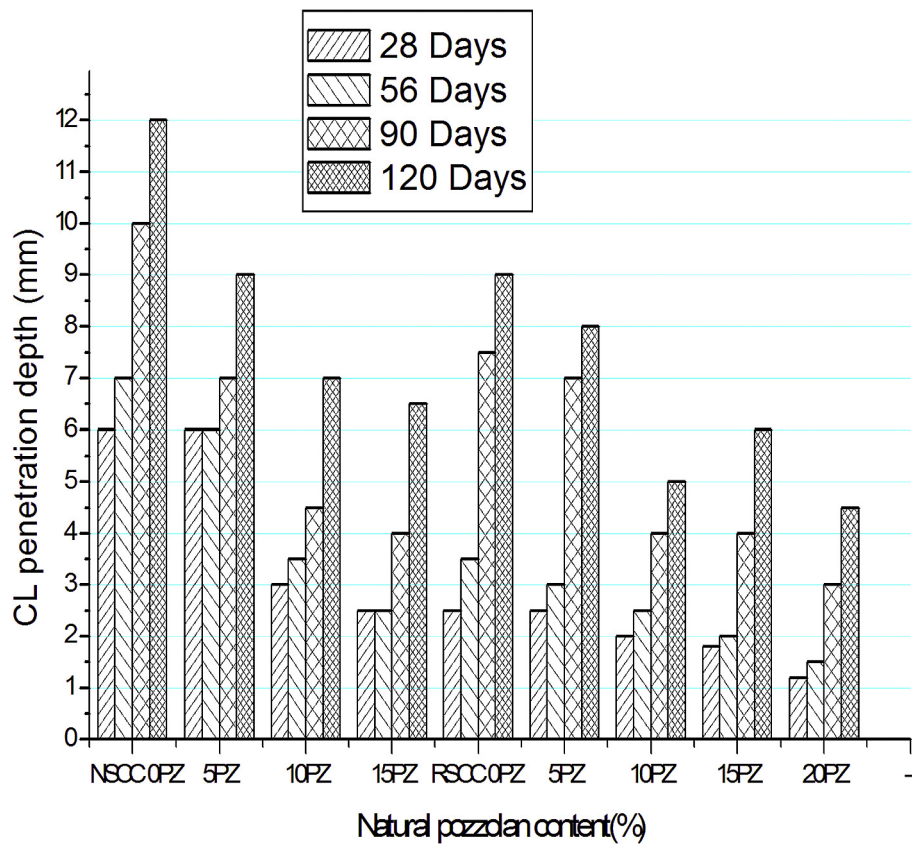


Fig. 8. (NSCC and RSCC)-natural pozzolan ratios vs. Cl- penetration depth after 3% NaCl solution immersion.

purposes, it can be considered that the depth of penetration of chloride ion follows the second law of Fick. This problem could be treated by simply finding the solution of the following equation:

$$Q/Q_0 = 1 - \operatorname{erf}\left(x/2\sqrt{Dt}\right) \quad (1)$$

Q: concentration of chloride ions
 X: depth of penetration of chloride ions.
 Q₀: concentration chloride ions.
 t: immersion time in the solution
 D: diffusion coefficient of chloride ions.
 erf: the error function.

An approximation of formula (1) is given by the following expression (Collepardi et al., 1972):

$$X = 4\sqrt{Dt} \quad (2)$$

From Figs. 8 and 9, it can be seen that the penetration depth of chloride ions of NSCC and RSCC immersed in solution of (3% NaCl) increases with the increase of the immersion time. Whatever the

addition ratios of PZ, the penetration depth of chloride ions of (NSCC and RSCC) made with PZ is significantly lower than that of SCC without PZ confirming the results found by other investigators (Ghrici et al., 2006).

The graph $x = f(t)$ is linear and $x - \sqrt{t}$ curves have a negative intercepts on the $\sqrt{t}$ -axis whatever types of SCC and the ratio of PZ. This shows that the $x - \sqrt{t}$ curves do not follow Fick's second law exactly. Accordingly the calculation of the apparent chloride ion diffusion coefficient by the new equation (3) can be recommended (Goto et al., 1979):

$$x = 4\sqrt{D_a t} + k \quad (3)$$

D_a: the apparent diffusion coefficient of chloride ions.
 k: empirical constant.

D_a calculated from the slopes of the $x - \sqrt{t}$ lines. The empirical equations based on equation (3) are shown in Figs. 10(a–d) and Fig. 11 (e–i).

Fig. 12 shows the relationship between the natural pozzolan content and the apparent of chloride ions diffusion coefficient (D_a)

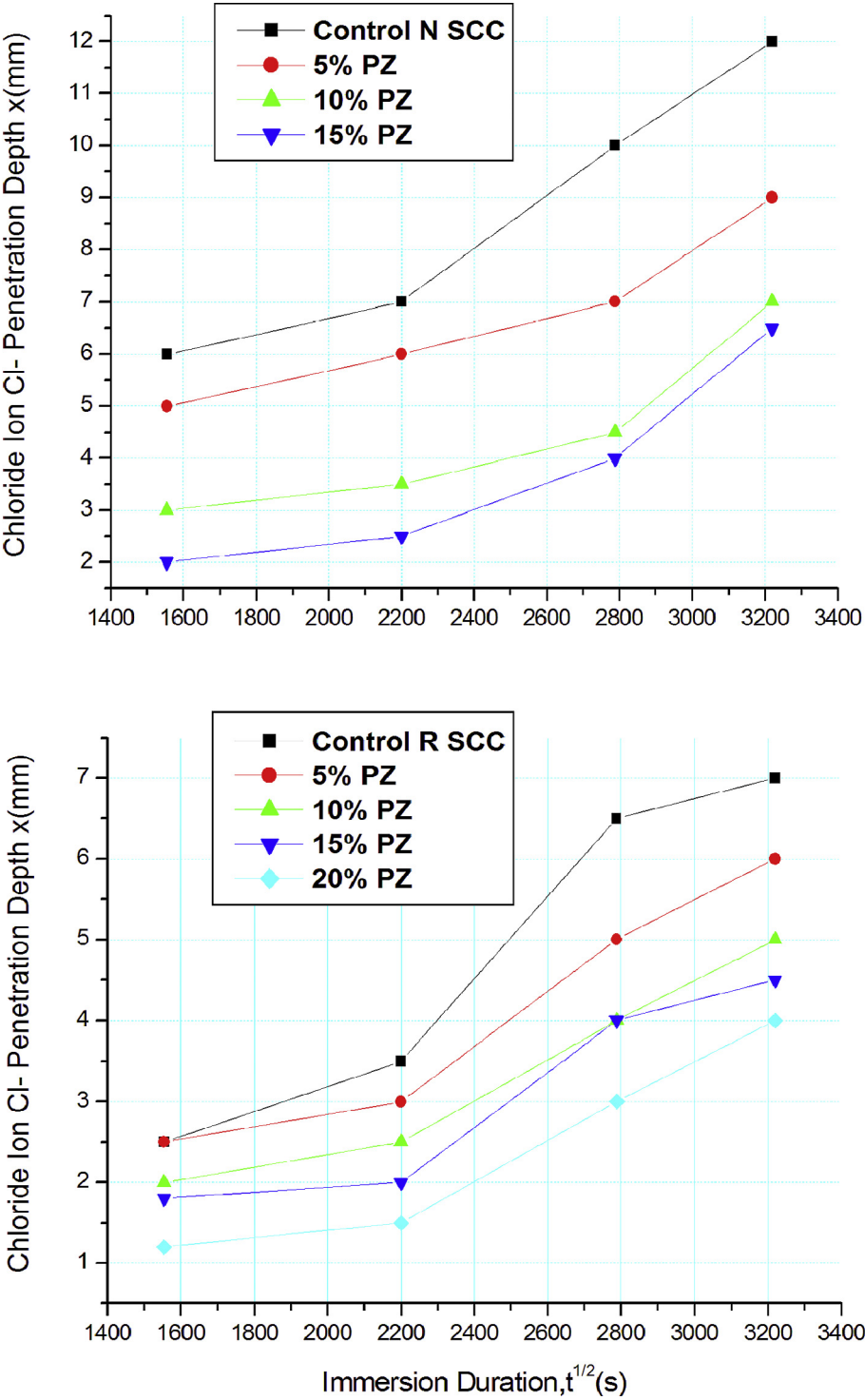


Fig. 9. Immersion duration vs. Cl- penetration depth of NSCC and RSCC.

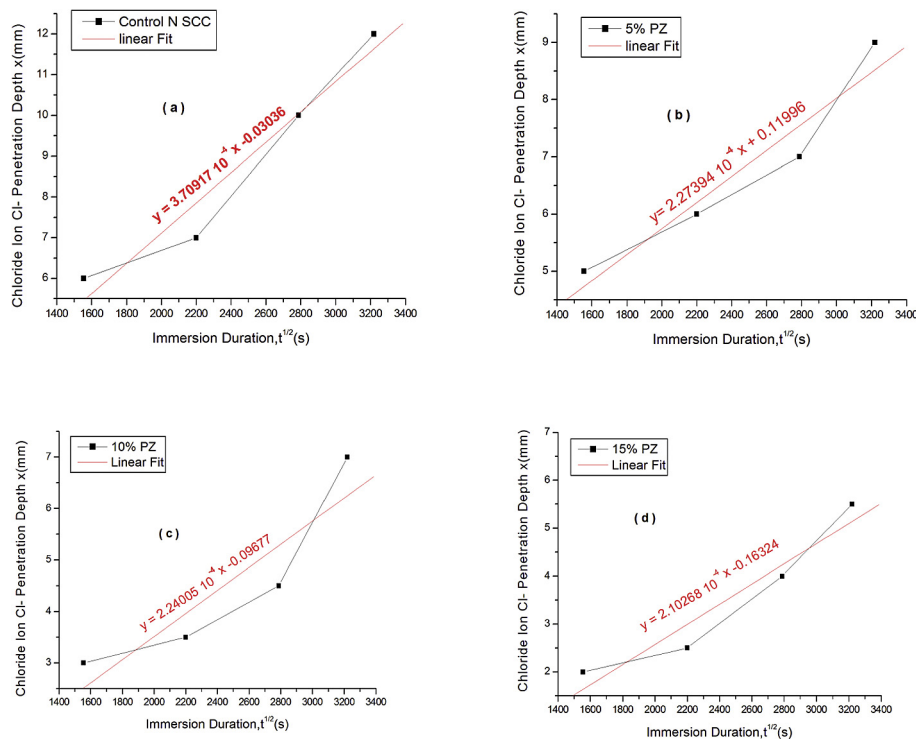


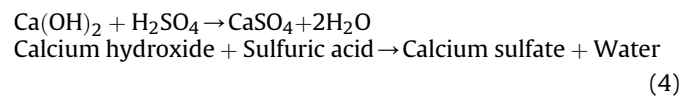
Fig. 10. (a–d): Immersion duration versus chloride ion penetration depth of NSCC for 3% NaCl immersion.

of NSCC and RSCC. D_a of RSCC is much lower than that of NSCC. D_a of mixtures with PZ is much smaller than that without PZ for both NSCC and RSCC mixes. The following values were obtained for NSCC: $0.86 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $0.32 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $0.31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and $0.276 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ for 0%, 5%, 10% and 15% of PZ respectively. The values for RSCC were respectively $0.55 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $0.306 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $0.215 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $0.2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $0.19 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ for 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of PZ.

D_a tends to decrease with the increase of natural pozzolan content. D_a for mixtures with 5% PZ, 10%PZ and 15% PZ were reduced by 63%, 64% and 68%, respectively, when compared to that of 0% PZ for NSCC. The decreases for D_a were comparable for RSCC apparent coefficient D_a . The decreases were 44%, 61%, 64% and 65%, respectively, for 5% PZ, 10% PZ, 15% PZ and 20% PZ. The low chloride ions penetration of SCC with PZ is due to the impermeability of the natural pozzolan which prevents the passage of chloride ions. This is in agreement with the findings of other researchers (Amiri et al., 2001; Amiri and Ait-Mokhtar, 2007; Ait-Mokhtar et al., 2002).

4.4. Resistance to H_2SO_4 attack

The resistance to acid attack was measured by immersion in a solution of 5% H_2SO_4 . The monitoring of the mass was conducted for 3 months of immersion and XRD analysis were performed on the exterior surface in contact with the acid solution. Digital photos were taken for visual examination. The attacking process of H_2SO_4 could be illustrated by the following equation.



4.4.1. Mass change

According to the procedure of ASTM C 267 (1997), the specimens are cleaned with fresh water to remove damaged concrete, then allow free air for 30 min before proceeding with weighing. This operation is performed after each week of immersion for 12 weeks. The acidic solution is renewed after each reweighing (ASTM C 192, 2007). The variation of the mass of each test piece is calculated from the following relationship:

$$\Delta M\% = [(M_0 - M_i)/M_0] \cdot 100$$

(5)

ΔM : change in mass (%)

M_0 : the mass of the specimen before exposure to acid attack (g)

M_i (i = 1, 7, 14, 21, 28): the mass after (i) days of attack (g).

For both type of concrete (NSCC and RSCC) during the first four weeks of attack, the results show the same deterioration trend (Fig. 13). After 12 weeks, a slight difference in behavior is noticed. The comparison between NSCC and RSCC Confirms that the mass loss of RSCC is less than 23% than NSCC which shows the beneficial

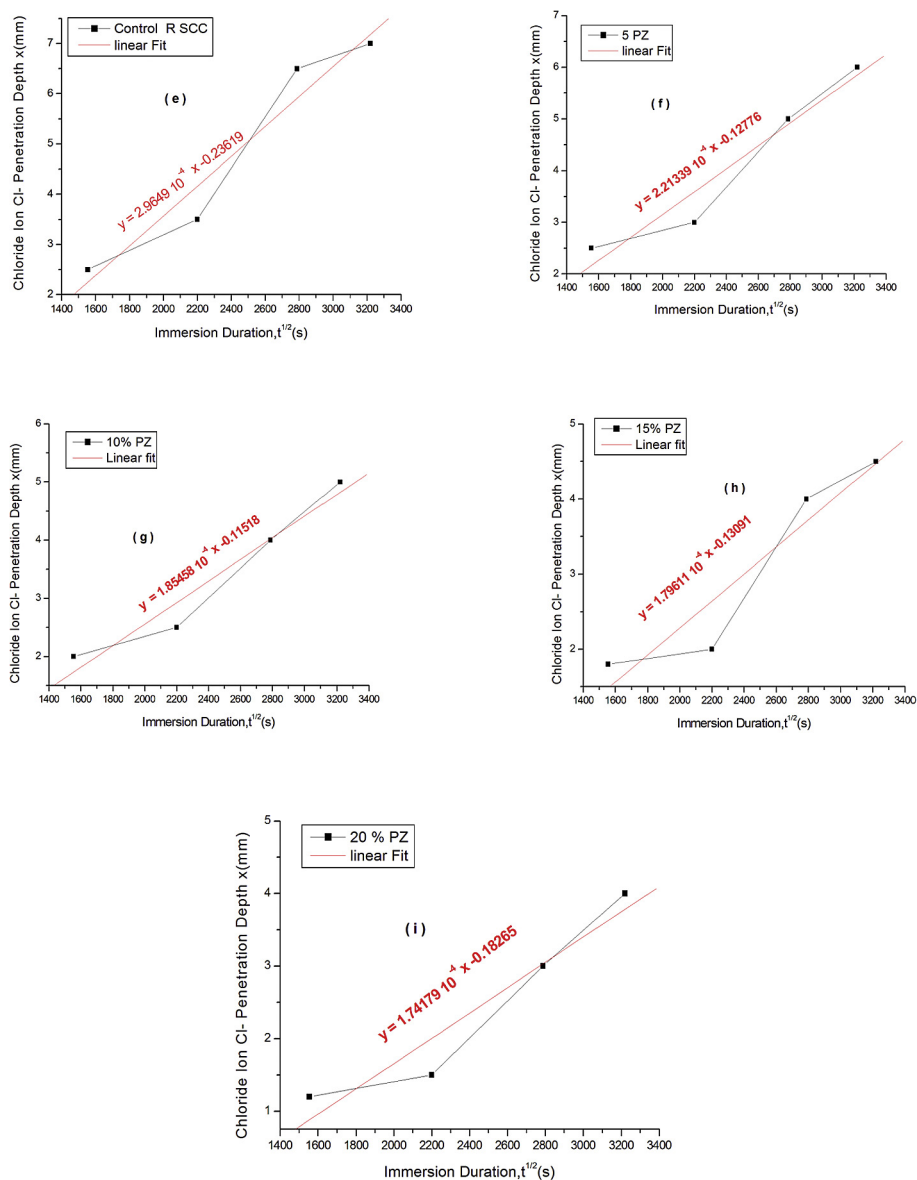


Fig. 11. (e–i): Immersion duration versus chloride ion penetration depth of RSCC for 3% NaCl immersion.

use of recycled aggregates. SCC with PZ addition exhibits the lowest mass loss compared to control concrete. The mass loss of NSCC with (5%, 10% and 15%) of PZ is lower than that of NSCC with 0% PZ and was respectively of 6%, 10% and 16% after 28 days of immersion and 5%, 13% and 18% after 90 days of immersion. Similar trend was observed for RSCC with a decrease of 2%, 5%, 8% and 18% after 28 days of immersion and 6%, 2%, 4% and 8% after 90 days of immersion for RSCC 5% PZ, RSCC 10%PZ, RSCC 15%PZ and RSCC 20%PZ, respectively. Comparable results are reported for ordinary vibrated concrete with PZ (Ghrici et al., 2006).

4.4.2. Mineralogical analysis

The mineralogical analysis by X-ray diffraction was conducted before the attack of acid and after 90 days of immersion in H_2SO_4 solution. The superposition of two spectra before and after attack shows the effect of acid attack of H_2SO_4 on the outer surfaces of both NSCC and RSCC (Fig. 14). It can be noticed the presence of a large amount of gypsum (G) for all concretes subjected to the attack of the acid H_2SO_4 , which explains the great degradation of the surface in contact with this type of acid. The intensity of gypsum peaks does not show a significant difference between the levels of degradation of each concrete.

The spectra before attacks are characterized by the presence of Portlandite which seems to be disappearing after the attack of the acid H_2SO_4 . Indeed, in contact with sulfuric acid, calcium hydroxide (Portlandite) reacts to form calcium sulfate (equation (4)). In addition, calcium sulfate formed by the first reaction reacts with the calcium aluminate phase in the cement to form hydrated calcium trisulfoaluminate (ettringite) (Bassuoni and Nehdi, 2007).

This could explain the presence of traces of this element, even after immersion in sulfuric acid H_2SO_4 .

4.4.3. Visual examination

Before cleaning the samples withdrawn from the solution of sulfuric acid, a whitish layer easily washable with water could be observed. The photos shown in Fig. 15 was taken after washing the white layer and show clearly the surface degradation of the specimens after sulfuric acid attack.

5. Conclusion

The experimental results show the beneficial effect of using both fine and coarse recycled aggregates for a cleaner production of an environment friendly SCC with a lower cost. However, to fulfill all recommended conditions of SCC, the recycled aggregates content should be limited to 50% to achieve good performance. For up to 15% PZ for NSCC and up to 20% PZ for RSCC, the slump flow is comparable with that of control concrete whereas the V-funnel flow time increases with increase in the PZ content. The L-Box results for all concrete mixtures gave height ratios greater than 80%, except for 15% or higher replacement level for NSCC and above 20% for RSCC. The NSCC and RSCC mixtures containing PZ develop a comparable compressive strength to mixtures without PZ for NSCC and RSCC mixtures at 120 days. The depth of penetration of chloride ions and the apparent chloride ions diffusion coefficient of NSCC and RSCC mixes containing PZ are smaller than those of NSCC and RSCC mixtures without PZ and usually tend to decrease with increasing PZ content. This is due to the finer pore size distribution

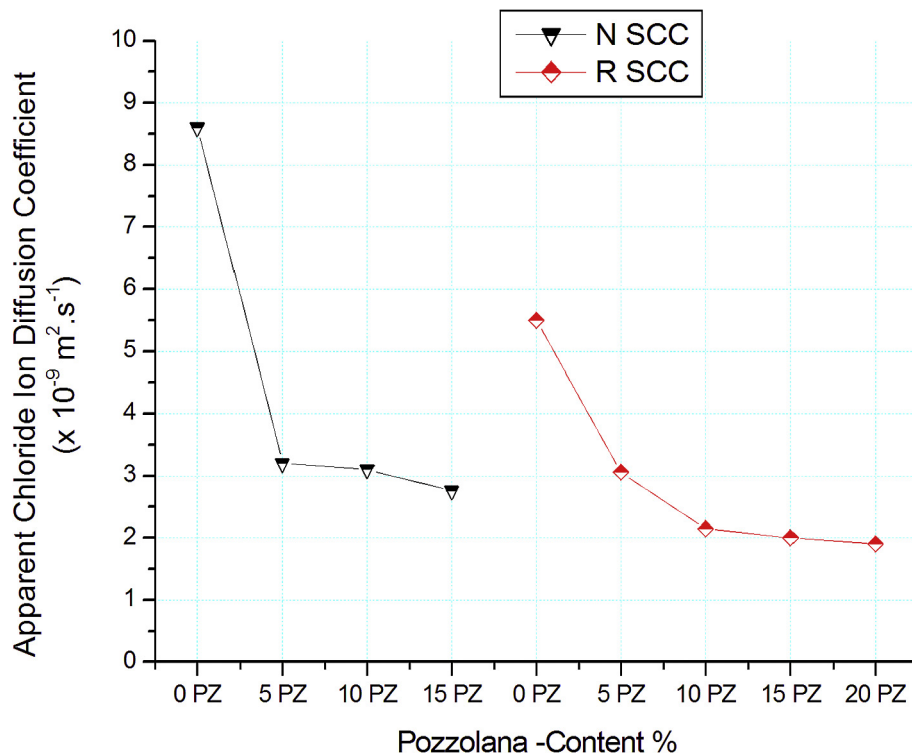


Fig. 12. Natural pozzolan-content versus apparent chloride ion diffusion coefficient of natural pozzolan (NSCC, RSCC) mixtures.

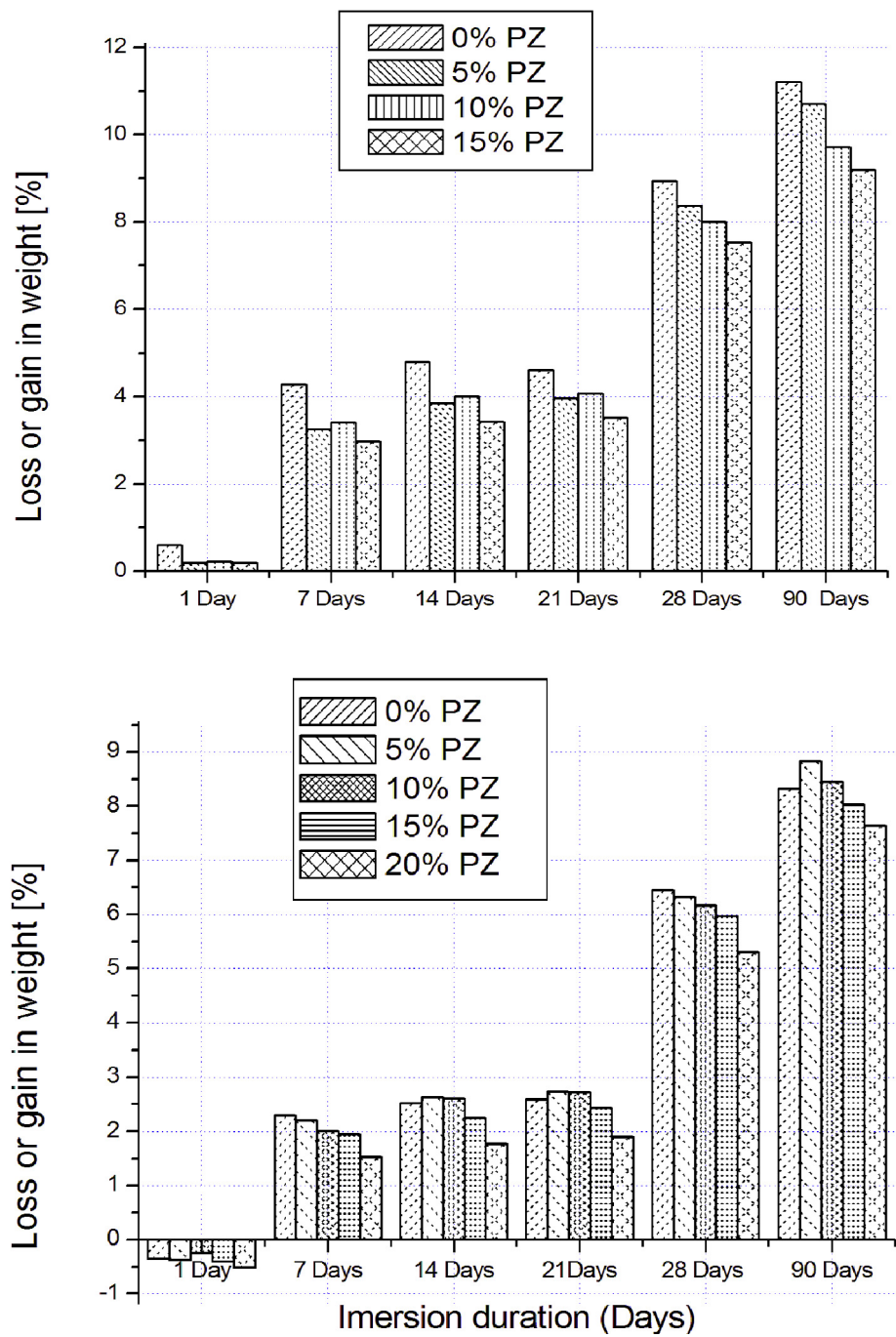


Fig. 13. Change in mass of NSCC and RSCC versus the immersion duration for 5% H₂SO₄.

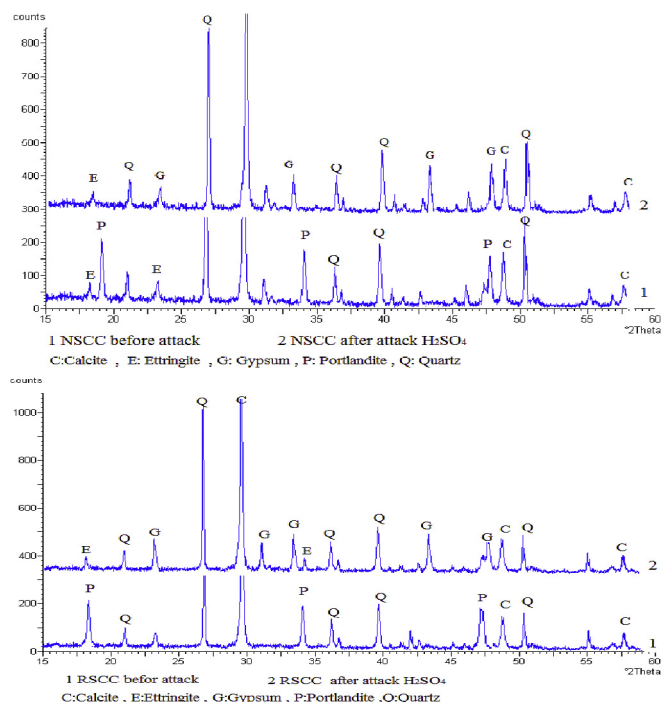


Fig. 14. The XRD spectra of NSCC and RSCC before and after attack H_2SO_4 .

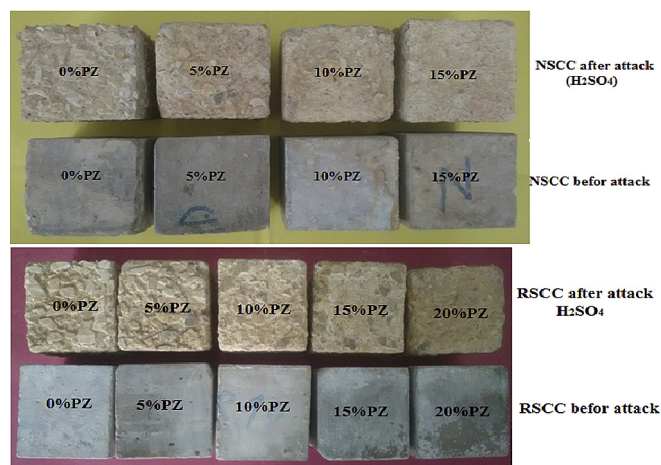


Fig. 15. Sample degradation of NSCC and RSCC after 90 days of immersion in the sulfuric acid solution.

in the presence of PZ. The apparent diffusion coefficients (D_a) for mixtures with 5% PZ, 10%PZ and 15% PZ were reduced by 63%, 64% and 68%, respectively, when compared to that of 0% PZ for NSCC. The decreases for D_a were comparable for RSCC. The incorporation of 15% and 20% of PZ in NSCC and RSCC respectively has a beneficial effect on the resistance to sulfuric acid (H_2SO_4) attack. The comparison between NSCC and RSCC confirms that the mass loss of RSCC is less than 23% than NSCC which shows the beneficial use of recycled aggregates. Further investigation is needed to study the durability of RSCC using higher concrete strength classes and variable concrete from demolition sites for longer time and under various aggressive environments and/or under hot climate.

References

- Adekunle, S., Ahmad, S., Maslehuddin, M., Al-Gahtani, H.J., 2015. Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers. *Cem. Concr. Compos.* 62, 125–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.06.001>.
- Ait-Mokhtar, A., Amiri, O., Dumargue, P., Sammartino, S., 2002. A new model to calculate water permeability of cement-based materials from MIP results. *Adv. Cem. Res.* 14 (N 2), 43–49.
- American Society for Testing and Materials, 1997. *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Amiri, O., Ait-Mokhtar, A., May 2007. Method of determination of diffusion coefficients of chloride in concrete. In: *GranDuBé* (in French), AFGC – RGC&U. ENPC press, France, ISBN 978-2-85978-425-6, p. 437.
- Amiri, O., Ait-Mokhtar, A., Dumargue, P., Touchard, G., 2001. Electrochemical modelling of chlorides migration in cement based materials. Part II: experimental study - calculation of chlorides flux. *Electrochim. Acta* 46, 3589–3597.
- Assem, A.A., Hassan, A.A., Lachemi, M., Hossain, M.A., 2012. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concretes. *Cem. Concr. Compos.* 34, 801–807.
- American Society for Testing and Materials, 2007. *Standard Practice for Making and Curing. Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM C 192.
- Bairagi, N.K., Vidyadhara, H.S., Tech, M., Ravande, K., 1990. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 4, 188–193.
- Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L., 2007. Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cem. Concr. Res.* 37, 1070–1084.
- Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E., Kenai, S., 2012. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 31, 251–257.
- Benchaa, B., Kadri, E., Azzouz, L., Kenai, S., 2012. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cem. Concr. Compos.* 34, 1167–1173.
- Boudalia, S., Kerdal, D.E., Ayed, K., Abdulsalam, B., Soliman, A.M., 2016. Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. *Constr. Build. Mater.* 124, 705–713.
- Boukendaqji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., Rouis, F., 2009. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 2593–2598.
- Celik, K., Meral, C., 2014. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Constr. Build. Mater.* 67, 14–19.
- Collepardi, M., Marcialis, A., Turriziani, R., 1972. The penetration of de-icing agents in cement pastes. *IL Cem.* 69, 143–150.
- EFNARC, May 2005. *European Guidelines for Self-compacting Concrete: Specification, Production and Use*. Self-compacting concrete European project group.
- Evangelista, L., de Brito, J., 2014. Concrete with fine recycled aggregates: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2), 129–172.
- Ghrichi, M., Kenai, S., Meziane, E., 2006. Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *J. Mater. Sci.* 41, 6965–6972. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0227-0>.
- Goto, S., Tsunetani, M., Yanagida, H., Kondo, R., 1979. Diffusion of chloride ion in hardened cement paste. *Yogyo-Kyokai-Shi* 87 (3), 126–133.
- Kanellopoulos, A., Petrou, M.F., Ioannou, I., 2012. Durability performance of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 37, 320–325.
- Kenai, S., Debieb, F., Azzouz, L., 2002. Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. In: *International Congress for Challenges of Concrete Construction*. University of Dundee, UK, pp. 383–392.
- Kenai, S., Menadi, B., Debbih, A., Kadri, E.H., 2014. Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolan on rheology of self-compacted concrete. *Key Eng. Mater.* 600, 256–263. [10.4028/www.scientific.net/KEM.600.256](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.256).
- Lin, Yong-Huang, Tyan, Yaw-Yuan, Chang, Ta-Peng, Chang, Ching-Yun, 2004. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Res.* 34, 1373–1380.
- Okamura, H., Ouchi, M., 1999. *Self-compacting concrete—development, present and future*. In: *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. RILEM Publications, France, pp. 3–14.
- Sadek, D.M., El-Attar, M.M., Ali, H.A., 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *J. Clean. Prod.* 121, 19–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.
- Sadmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., Sadeghi-Nik, A., 2016. The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *J. Clean. Prod.* 112, 2363–2373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.
- Senas, L., Priano, C., Marfil, S., 2016. Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Constr. Build. Mater.* 113, 498–505.
- Siad, H., Lachemi, M., Kamali-Bernard, S., Sahmaran, M., Hossain, A., 2015. Assessment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment. *Constr. Build. Mater.* 80, 141–154.

- Sua-iam, Gritsada, Makul, Natt, 2014. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *J. Clean. Prod.* 78, 184–194.
- Tiwari, A., Singh, S., Nagar, R., 2016. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review. *J. Clean. Prod.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.130>.
- UNI 7928, 1978. Concrete determination of the Ion Chloride Penetration. UNI – Ente Nazionale Italiano Di Unificazione, Milano, Piazza A. Diaz, 2, December 1978.
- Vinay Kumar, B.M., Ananthan, H., Balaji, K.V.A., 2017. Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self-compacting concrete mixes. *J. Build. Eng.* 9, 100–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.013>.

Communications internationales

Communication internationale: Performance of self-compacting concrete using recycled concrete aggregate and natural pozzolana. International Civil Engineering and Architecture Symposium for Academicians. May 17—20 2014 side, Antalya, Turkiye.

Communication internationale: Attaque chimique d'un BAP à base d'agréats recyclés et de pouzzolane naturelle dans un milieu agressif. 13th Arab Structural Engineering conférence Blida, Algeria, (13-15) décembre 2015.

Communication internationale: Durabilité d'un BAP à base des agrégats recyclés et de pouzzolane naturelle dans un milieu agressif. 6^{ème} Colloque international de la recherche appliquée et de transfert de technologies. CRATT 2017 Hammamet 14 — 16 Avril 2017, Tunisie.

Communication internationale: Durabilité d'un BAP à base des agrégats recyclés et de pouzzolane naturelle dans des milieux agressifs. 35^{ème} RUGC. 22 — 24 Mai 2017 Nantes, France.