

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie civil

Laboratoire des matériaux de Génie Civil et d'Environnement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Thèse de Doctorat en Génie Civil

Présentée Par

Mr : Zakaria SKENDER

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Université de Médéa

Magister en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger

Intitulée :

Durabilité Du Béton Auto-plaçant à Base de Sable de Concassage

Soutenue publiquement le 03/06/2020 Devant le jury composé de :

Président : Mr. BENYOUSSEF EI-Hadi

Professeur, ENP

Directeur : Mr. BALI Abderrahim

Professeur, ENP

Co-Directeur : Mme. MITICHE KETTAB Ratiba

Professeur, ENP

Examineurs : Mr. BELKACEMI Smain

Professeur, ENP

Mr. ABADLIA Mohamed Tahar

Professeur, UMB Boumerdes

Mr. BOUHICHA Mohamed

Professeur, Univ Laghouat

Mr. BOURZAM Abdelkrim

Professeur, USTHB

ENP 2020

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie civil

Laboratoire des matériaux de Génie Civil et d'Environnement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Thèse de Doctorat en Génie Civil

Présentée Par

Mr : Zakaria SKENDER

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Université de Médéa

Magister en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger

Intitulée :

Durabilité Du Béton Auto-plaçant à Base de Sable de Concassage

Soutenue publiquement le 03/06/2020 Devant le jury composé de :

Président : Mr. BENYOUSSEF EI-Hadi

Professeur, ENP

Directeur : Mr. BALI Abderrahim

Professeur, ENP

Co-Directeur : Mme. MITICHE KETTAB Ratiba

Professeur, ENP

Examineurs : Mr. BELKACEMI Smain

Professeur, ENP

Mr. ABADLIA Mohamed Tahar

Professeur, UMB Boumerdes

Mr. BOUHICHA Mohamed

Professeur, Univ Laghouat

Mr. BOURZAM Abdelkrim

Professeur, USTHB

ENP 2020

ملخص

شهدت الجزائر تطوراً كبيراً في مجال البناء والأشغال العمومية على مدار العقد الماضي، مما أدى إلى زيادة كبيرة في استهلاك الحصى. بالإضافة إلى ذلك، ساهم الحظر المفروض على استخدام الرمال الغرينية لأسباب فنية وبيئية في نقص الرمال؛ ولذلك فإن رمال المحاجر يمكن أن تساعد في سد هذه الفجوة. ومع ذلك، فإن رمل المحاجر يحتوي على نسبة عالية (14 إلى 25 %) من المواد الناعمة (عناصر أصغر من 80 ميكرون)، والتي تتجاوز متطلبات المعايير المعمول بها. أثبتت الدراسات السابقة على إمكانية استخدام رمل المحاجر مع وجود المواد الناعمة بنسبة تصل إلى 15% لتصنيع الخرسانة العادية دون التأثير على أدائها الميكانيكي. في حين أنه، قد تم إجراء عدد قليل فقط من الدراسات حول متانة الخرسانة المرصوفة ذاتياً المصنوعة من رمال المحاجر.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحليل هذا النوع من الخرسانة من خلال إجراء اختبارات تجريبية لتأثير المواد الناعمة الجيرية الناتجة عن رمل المحاجر سلوك الخرسانة المرصوفة ذاتياً عن طريق اختبارات في الحالة اللينة، وكذلك الحالة الصلبة والديمومة عن طريق اختبارات النفاذية (الماء والغاز وأيونات الكلور)، وكذلك المسامية الكلية وامتصاص الماء عن طريق الخاصية الشعرية والكرينة. تعتمد الدراسة التجريبية على صناعة خليط من الخرسانة المرصوفة ذاتياً والتي تحتوي على نسب مختلفة من المواد الناعمة التي تم استبدالها جزئياً برمال المحاجر و/أو الإسمنت بنسبة 0، 5، 10، 15، 20، و25%.

كشفت النتائج التجريبية أن الاستبدال الجزئي للرمل و/أو الإسمنت بالمواد الناعمة للحجر الجيري بنسبة تصل إلى 20 % في الخرسانة ذاتية الضغط في الحالة اللينة قد أدى إلى خصائص ملموسة. ومع ذلك، في الحالة الصلبة، مع استبدال الرمل بنسبة 15 %، لوحظت زيادة في قوة الضغط وانخفاض في نفاذية الماء وأيونات الكلوريد، في حين لوحظت زيادة في نفاذية الغاز. أما استبدال الجزئي للإسمنت بنسبة 5 %، فقد ساهم في تحسين قوة الضغط وانتشار أيونات الكلوريد، غير أنه انخفضت نفاذية الماء والغاز في العينات الخاصة باستبدال الإسمنت بالمواد الناعمة إلى نسبة 15 %.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المرصوفة ذاتياً، المواد الناعمة، رمل المحاجر، مقاومة الضغط، الديمومة، النفاذية.

Abstract

Algeria experienced a considerable development in the field of the building construction and public works during the last two decades. This generated a considerable increase in the consumption of aggregates. Moreover, the prohibition of use of the alluvial sands for technical and environmental reasons, contributed to the lack of sand. The use of the crushed sand can contribute to make up the sand deficit. However crushed sand contains a high percentage (14 to 25 %) of fines (elements lower than 80 μm), which exceed the requirements of the existing standards. Former studies showed the potential use of the crushed sand containing up to 15% of fines, for the manufacture of concrete without affecting its mechanical performances. However, only few studies were carried out on the durability of self-compacting concrete based on the crushed sand. The main objective of the present research is the investigation of this type of concrete by an experimental study of the influence of crushed sand limestone fines on the behaviour of fresh self-compacting concrete by specific tests, as well as the hardened state and durability using permeability tests (water, gas and chlorine ions), total porosity, water absorption by capillarity and carbonation depth. The experimental study is based on self-compacting concrete containing various percentages (0, 5, 10, 15, 20 and 25%) of limestone fines as partial replacement for crushed sand and / or cement respectively.

The experimental result, revealed that the incorporation of LF up to 20% in SCC as partial replacement of sand and cement at fresh state, led to appreciable properties. However, at hardened state, the amount of 15% for sand replacement an increase in compressive strength and a decrease in the water and chloride-ion diffusion, while an increase in the gas diffusion were noticed. For 5% cement replacement, an improvement in compressive strength and chloride ions diffusion was obtained, whereas the water permeability and the gas diffusion decreased at 15% of LF substitution.

Key words: Self-compacting concrete, Limestone Fine, Crushed Sand, Compressive strength, Durability, Permeability.

Résumé

L'Algérie a connu un développement considérable dans le domaine de la construction du bâtiment et des travaux publics durant les deux dernières décennies, à engendré un accroissement important de la consommation de granulats. En plus, l'interdiction d'utilisation des sables alluvionnaires pour des raisons techniques et environnementales, a contribué au manque de sable; le sable de concassage peut contribuer à combler ce déficit. Cependant, le sable de concassage contient un pourcentage élevé (14 à 25 %) en fines (éléments inférieurs à 80 μm), dépassant les exigences des normes en vigueur. Des études antérieures ont montré la possibilité d'utilisation du sable de concassage contenant jusqu'à 15% de fines pour la fabrication du béton ordinaire sans affecter ses performances mécaniques. Cependant, quelques études seulement ont été réalisées sur la durabilité des bétons autoplaçant fabriqués par des sables concassés. L'objectif principal de la présente recherche est l'analyse de ce type de béton par une investigation expérimentale de l'influence des fins calcaires issues de sable de concassage sur le comportement de béton autoplaçant à l'état frais par des essais spécifiques, ainsi que l'état durci et la durabilité par des essais de perméabilité (eau, gaz et ions chlorures), porosité totale, absorption d'eau par capillarité et profondeur de carbonatation. L'étude expérimentale est basée sur des bétons contenant différents pourcentages volumique (0, 5, 10, 15, 20 et 25 %) de fines substituées partiellement au sable de concassage et/ou ciment respectivement.

Les résultats expérimentaux ont révélé que la substitution partielle de sable et /ou ciment par des fines calcaires jusqu'à 20% dans le béton autoplaçant à l'état frais a conduit à des résultats de propriétés appréciables. Néanmoins, on a observé à l'état durci, avec 15% de remplacement du sable, une augmentation de la résistance à la compression et une diminution de la perméabilité à l'eau et des ions chlorure, alors qu'une augmentation de la diffusion de gaz a été enregistrée. Le remplacement partiel du ciment à 5%, une amélioration de la résistance à la compression et de la diffusion des ions chlorure a été obtenue, alors que la perméabilité à l'eau et la diffusion des gaz diminuaient à 15% de substitution.

Mots clés : Béton autoplaçant, Fines calcaires, Sable de concassage, Résistance à la compression, Durabilité, Perméabilité.

REMERCIEMENTS

Merci, au Bon DIEU "**Allah**" le Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Cette thèse est le fruit d'un long travail qui n'aurait pu arriver à terme sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à ce que chacune d'elles sache que je la remercie sincèrement.

Je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à mes directeurs de thèse Monsieur BALI Abderrahim, Professeur à l'Ecole nationale polytechnique d'Alger, qui malgré ses occupations et responsabilités, n'a pas hésité à consacrer de son temps pour me faire bénéficier de ses orientations, ses conseils aux moments importants, Professeur BALI restera pour moi une référence scientifique et pédagogique de très grande qualité que je solliciterai encore durant toute ma carrière professionnelle. Et, Madame MITICHE KETTAB Ratiba, Professeur à l'Ecole nationale polytechnique d'Alger sans qui ce travail n'aurait pu être finalisé sans sa précieuse contribution. Aussi mes chaleureux remerciements vont vers cette personne, pour sa gentillesse, ses conseils et ses orientations pour mener ce travail avec ses corrections minutieuses.

Je souhaite également remercier les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail :

- Professeur BENYOUSSEF El-Hadi Président du jury de thèse
- Professeur BELKACEMI Smain Examineur de thèse
- Professeur ABADLIA Mohamed Tahar Examineur de thèse
- Professeur. BOUHICHA Mohamed Examineur de thèse
- Professeur BOURZAM Abdelkrim Examineur de thèse

Je suis très reconnaissant à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu entretenir des discussions et échanger des idées, qui m'ont fait avancer dans ce travail de recherche, particulièrement Professeur BENYOUSSEF El-Hadi qui m'a énormément aidé sur l'explication des phénomènes complexes. Je lui témoigne ici toute ma gratitude.

Ce travail n'a pu être réalisé que grâce à la collaboration du Staff technique du laboratoire de Génie Civil de l'Université de Médéa et ce par la mise à ma disposition de tous les moyens pour essais pour les bétons autoplaçants, je les remercie vivement, particulièrement Docteur BOUKHELKHAL Djamila, Ex responsable du laboratoire.

En grande partie, ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Matériaux en Génie Civil et Environnement (LMGCE) de L'Ecole Nationale polytechnique avec l'assistance de Mademoiselle SAKHRI Samia ingénieur de laboratoire.

Mes remerciements aussi à monsieur le directeur du laboratoire de Génie Civil de l'université de Laghouat Dr MARRAH Ahmed, pour l'accueil et la mise en disposition de l'enceinte des essais de Carbonatation Accélérée.

Je ne saurais oublier de remercier vivement mon Cher frère Dr SKENDER Abdelhak, Maître de conférences à l'université de MEDEA, pour sa précieuse correction apportée sur la publication.

Mes vifs remerciements vont aussi à mon cher ami Dr IRKI Lyes pour sa précieuse aide dans l'accomplissement de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également au responsable de la société GRANITEX, particulièrement Mr GUENOUN Mohamed qui a contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture des superplastifiants.

Enfin mes chaleureux remerciements vont à ma chère mère, mes sœurs, mes frères, et particulièrement ma femme et mes deux enfants pour leur patience et soutien moral tout au long la réalisation de cette thèse.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	
Liste des figures.....	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	19

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction	24
I.2. Définition d'un BAP.....	24
I.3. Avantages techniques.....	25
I.4. Impact socio-économiques.....	25
I.5. Caractéristiques des bétons autoplaçants	27
I.6. Domaines d'emploi des BAP.....	27
I.7. Mise en œuvre des BAP	28
I.8. Coulage des BAP	29
I.9. Coffrage pour les BAP	30
I.10. Vibration	31
I.11. Cure des BAP.....	31
I.12. Transport	31
I.13. Matériaux constituant un BAP.....	32
I.13.1. Liants	33
I.13.2. L'eau de gâchage.....	33
I.13.3. Adjuvants.....	33
I.13.4. Superplastifiants	34
I.13.5. Agents de viscosité.....	35
I.13.6. Gravillons	37
I.13.7. Sables.....	38
I.14. Spécificité d'un béton autoplaçant	38
a) Volume de pâte et quantité de fines élevées	38
b) Quantité des fines élevées (particules <80 µm)	39
I.15. Ajouts minéraux	39
a) Les produits artificiels.....	40

b) Les produits naturels.....	40
I.16. Méthodes de formulation de béton autoplaçant	41
I.16.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon).....	42
I.16.2. Formulation CBI (Suède)	42
I.16.3. Formulation JSCE (Japon)	43
I.16.4. Formulation LCPC (France).....	43
I.16.5. Introduction	44
I.16.6. Valorisation du sable de concassage	45
I.16.7. Particularité des matériaux calcaires de carrière	46
I.16.8. Fines calcaires	46
I.16.9. Influence des fines calcaires sur l'hydratation de ciment.....	46
I.16.10. Normalisation des sables de concassage	47
I.17. Effet des fillers calcaires sur BAP à l'état frais (ouvrabilité)	48
I.18. Effet des fillers calcaires sur le béton et les BAP à l'état durci	49
I.18.1. Résistance à la compression	49
I.18.2. Résistance à la traction	53
I.18.3. Module d'élasticité E	55
I.18.4. Retrait	57
I.19. Conclusion.....	60

Chapitre II : Durabilité

II.1. Introduction.....	62
II.2. Porosité	63
II.2.1. Porosité et distribution des pores	63
II.2.2. Connectivité et tortuosité	64
II.3. Mécanisme de transport dans le béton	65
II.3.1. Perméabilité.....	65
II.3.2. Diffusion	66
II.4. Effet des fillers calcaire sur la durabilité des bétons et de BAP	67
II.4.1. Porosité.....	67
II.4.2. Perméabilité à l'eau	68
II.4.3. Perméabilité au gaz	70

II.4.4. Diffusion des ions chlore	72
II.4.5. L'absorption d'eau	74
II.4.6. Résistance aux sulfates.....	75
II.4.7. Carbonatation	77
II.5. Conclusion	80

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés et formulation du béton autoplaçant

III.1. Introduction	82
III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	82
III.2.1. Le ciment	82
III.2.2. Le filler	82
III.2.3. L'adjuvant.....	83
III.2.4. L'eau de gâchage.....	84
III.2.5. Les granulats	84
a) Sable	84
b) Gravier.....	84
III.3. Formulations des bétons autoplaçants adoptées	86
III.3.1. Formulation du mortier	87
III.3.1.1. Détermination du rapport Eau/Liant (E/L).....	88
III.3.1.2. Optimisation rapport Sable/Mortier (S/M).....	88
III.3.1.3. Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	89
III.3.1.4. Confection des mortiers	89
III.4. Formulation du BAP de référence	89
III.4.1. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M), Eau/Liant (E/L) et Superplastifiant/Liant (Sp/L).....	90
III.4.2. Procédure de malaxage	90
III.5. Conclusion.....	91

Chapitre IV : Procédure expérimentale

IV.1. Généralités :.....	93
IV.2. Essais sur mortier à l'état frais.....	93

IV.2.1. Essai d'Etalement au Mini-Cône.....	93
IV.2.2. Essai à Mini-Entonnoir en V (V-Funnel test).....	94
IV.2.3. Essais sur BAP à l'état frais	94
IV.2.4. Essais d'Etalement (Flow test)	95
IV.2.5. Essai de T ₅₀	96
IV.2.6. Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test).....	97
IV.2.7. Essai de la boîte en L (L-Box test)	98
IV.2.8. Essai de stabilité au Tamis (résistance à la ségrégation).....	99
IV.2.9. Confection des éprouvettes et conditionnement.....	101
IV.2.10. Variables étudiées des bétons autoplaçants.....	101
IV.3. Essais sur béton à l'état durci.....	103
IV.3.1. Résistance à la compression	103
IV.3.2. Essai de carbonatation accélérée	104
IV.3.3. Essai de perméabilité à l'eau	105
IV.3.4. Essai de perméabilité au gaz.....	107
IV.3.5. Essai de diffusion des ions chlorure	109
IV.3.6. Essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité).....	111
IV.3.7. Essais de porosité accessible à l'eau (porosité totale).....	113
IV.4. Récapitulatif du programme des essais réalisés	114
IV.4.1. Essais sur mortier.....	114
IV.4.2. Essais sur le béton.....	115
IV.4.2.1. Essais sur le béton à l'état frais.....	115
IV.4.2.2. Essais sur le béton à l'état durci.....	116
IV.5. Conclusion.....	116

Chapitre V : Résultats expérimentaux et interprétations

V.1. Introduction	118
V.2. Effet des fines calcaires sur les propriétés des BAP à l'Etat frais.....	118
V.2.1. Etalement au cône d'Abrams (Flow test).....	118
V.2.2. Temps T ₅₀ au cône d'Abrams	119
V.2.3. Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel)	120
V.2.4. Rapport H ₂ /H ₁ de l'essai de la Boîte en L (L-Box)	121

V.2.5. Stabilité au Tamis	122
V.3. Effet des fines calcaires sur les propriétés des BAP à l'Etat durci	123
V.3.1. Résistance à la compression.....	123
V.3.2. Perméabilité à l'eau.....	126
V.3.3. Perméabilité aux Gaz	128
V.3.4. Diffusion des ions chlorure.....	130
V.3.5. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité).....	132
V.3.6. Porosité totale.....	135
V.3.7. Carbonatation accélérée	136
a) Examen visuel.....	137
b) Suivi de masse	139
V.3.8. Corrélations entre les propriétés de durabilité du Béton autoplaçant	141
a) Corrélation entre Résistance à la Compression et Profondeur de Pénétration D'eau	141
b) Corrélation entre la Porosité Totale et la Charge Totale Passée et le Coefficient de Perméabilité aux Gaz	142
c) Corrélation entre la Porosité Totale et la Sorptivité	144
d) Corrélation entre la Charge Totale Passée et la Sorptivité	145
Conclusion générale et perspectives	148
Références bibliographiques.....	152
ANNEXE.....	169

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Pourcentage des fines admises dans le sable concassé selon diverses normes pour la confection des bétons et mortiers (Benachour et al. 2008).	48
Tableau I. 2 : Module d'élasticité relatif (Bonavetti et al. 2000).	56
Tableau II.1 : Variation du coefficient de perméabilité à l'eau (Tsilivilis <i>et al.</i> 2003).	69
Tableau II.2 : Profondeur de carbonatation des mortiers au ciment au calcaire	78
Tableau III.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5.....	82
Tableau III.2 : Composition chimique et propriétés physiques du filler.	83
Tableau III.3 : Propriétés physiques des granulats.	85
Tableau IV.1 : Catégories des BAP selon l'étalement et la destination d'utilisation.....	96
Tableau IV.2 : Proportions des différents mélanges.....	102
Tableau IV.3 : Seuil pour l'essai de perméabilité à l'eau.(von Beton 1991).	107
Tableau IV.4 : Echelle de Whiting pour l'essai de perméabilité aux ions chlorures.....	111

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Composition d'un béton ordinaire BO et d'un BAP - aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	32
Figure I. 2 : Action des superplastifiants - défloculation des grains de ciment(Bethmont 2005)	34
Figure I. 3: Influence de la quantité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton (Shindoh & Matsuoka 2003).	35
Figure I. 4: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant d'après (Tangtermsirikul et al. 1991).....	36
Figure I. 5: Volumes relatifs de la pâte de ciment pour un béton vibré et un béton autoplaçant (Bétons 2004)	39
Figure I. 6 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (REF) correspondant (Gibbs & Zhu 1999).	50
Figure I. 7 : Résistance à la compression des pâtes de ciments (Felekoğlu, 2007).....	51
Figure I. 8 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton (Menadi et al. 2009).....	52
Figure I. 9 : Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benabed et al. 2016).....	53
Figure I. 10 : Variation de la résistance à la traction en fonction de pourcentage des fines calcaires (Gesoglu et al. 2012).	54
Figure I. 11 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benabed et al. 2016).....	54
Figure I. 12 : Variation module d'élasticité en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benachour et al. 2008).....	57
Figure I. 13 : Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire (Pentti 1999).	58
Figure I. 14 : Retrait plastique des formules de BAP et de béton ordinaire (Turcry 2003).	58
Figure I. 15 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières calcaires ajoutées (Celik & Marar 1996).....	59
Figure I. 16 : Retrait de séchage en fonction du taux de fines calcaires (Bui & Montgomery 1999).....	60

Figure II.1 : Représentation schématique d'un solide poreux et différent type des pores.(Ollivier & Vichot 2008)	62
Figure II.2 : Structure des pores dans une pâte de ciment(Ollivier & Vichot 2008).....	63
Figure II.3 : Représentation schématique d'un solide poreux interconnecté perméable et un solide poreux imperméable (Gagné 2008).....	64
Figure II.4 : Définition de la perméabilité (Ollivier & Vichot 2008).....	66
Figure II.5 : Profondeur de la pénétration d'eau des différents bétons à 90 jours (Menadi <i>et al.</i> 2009).....	70
Figure II.6 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants (Zhu <i>et al.</i> 2001).....	70
Figure II.7 : Effet de la qualité d'ajout calcaire sur les propriétés du béton (Tsvilis <i>et al.</i> 1999).....	71
Figure II.8 : Pénétration des ions chlore des bétons après 45 jours d'immersion dans une solution avec 3% de NaCl (Bonavetti <i>et al.</i> 2000).	72
Figure II.9 : Perméabilité aux ions chlorure des BAP des différents types d'additions minérales à différents taux de remplacement (Uysal <i>et al.</i> 2012).....	73
Figure II.10 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP et deux bétons vibrés (Zhu <i>et al.</i> 2001).....	74
Figure II.11 : Comparaison de Profondeurde carbonatation des BAP et béton ordinaire a testés à 9 mois et 42,5 mois (Valcuende & Parra 2010)	79
Figure III.1 : Courbes granulométriques des sables et des graviers.	85
Figure IV.1 : Essai d'Etalement pour mortier.	93
Figure IV.2 : Essai à l'Entonnoir en V pour mortier.	94
Figure IV.3 : Mesure du diamètre d'étalement.....	95
Figure IV.4 : Cas d'un mauvais béton autoplaçant.	97
Figure IV.5 : Dispositif de l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel).....	98
Figure IV.6 : Dispositif de l'essai L-Box.	99
Figure IV.7 : Essai de stabilité au tamis.	100
Figure IV.8 : Dispositif pour l'essai de compression.	103
Figure IV.9 : Schéma de l'enceinte de carbonatation accélérée.....	105
Figure IV.10 : Schéma illustrant le principe de mesure.	105

Figure IV.11 : Dispositif pour l'essai de perméabilité de béton à l'eau.....	106
Figure IV.12 : Dispositif pour l'essai de perméabilité de béton à gaz.	108
Figure IV.13 : Schéma représentatif du principe de fonctionnement de l'essai de perméabilité aux ions chlorés.	109
Figure IV.14 : Dispositif de saturation des éprouvettes.	110
Figure IV.15 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	112
Figure IV.16 : Détermination de la sorptivité.....	113
Figure IV.17 : Diagramme des essais réalisés sur mortier.	114
Figure IV.18 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.	115
Figure IV.19 : Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.	116
Figure V.1 :Effet des fines calcaires sur l'étalement au cône d'Abrams	119
Figure V.2 : Effet des fines calcaires sur le T ₅₀	120
Figure V.3 :Effet des fines calcaires sur le temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V121	
Figure V.4 :Effet des fines calcaires sur le rapport (H ₂ /H ₁) de l'essai de la Boîte en L.....	122
Figure V.5 :Effet des fines calcaires sur la résistance à la ségrégation au tamis.....	123
Figure V.6 :Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression en substitution au sable	124
Figure V.7 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression en substitution au ciment	125
Figure V.8 : Effet des fines calcaires sur la perméabilité à l'eau	127
Figure V.9 :Effet des fines calcaires sur la perméabilité aux Gaz.....	129
Figure V.10 : Effet des fines calcaires sur la diffusion des ions chlorure	132
Figure V.11 : Effet des fines calcaires sur l'absorption d'eau par capillarité (substitution au sable).....	133
Figure V.12 : Effet des fines calcaires sur l'absorption d'eau par capillarité (substitution au ciment).....	134
Figure V.13 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorptivité (substitution au sable)	134
Figure V.14 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorptivité (substitution au ciment)	135
Figure V.15 : Effet des fines calcaires sur la porosité totale	136

Figure V.16 :Effet des fines calcaires sur la profondeur de carbonatation à 28 jours.....	137
Figure V.17 : Examen visuel des échantillons de BAP et la mesure de profondeur de carbonatation à 28 jours.....	138
Figure V.18 : Variation de masse due à la carbonatation des BAP (Substitution au sable)...	139
Figure V.19 : Variation de masse due à la carbonatation des BAP (Substitution au ciment)	140
Figure V.20 : corrélation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau (substitution dans le sable).....	141
Figure V.21.a : corrélation entre la porosité totale et la charge total passé (substitution dans le sable)	143
Figure V.21.b : corrélation entre la porosité total et le coefficient de perméabilité à gaz (substitution dans le sable)	143
Figure V.22 : corrélation entre la Résistance à la Compression et la Charge Totale Passée. (Substituées dans le sable).....	144
Figure V.23 : corrélation entre la résistance à la compression et la charge totale passée (substitution dans le ciment)	145
Figure V.24 : corrélation entre la charge totale passée et la sorptivité (Substitution dans le ciment)	146

LISTE DES ABREVIATIONS

A	Section apparente en cm^2
AFGC	Association Francaise de Génie Civil
BAN	Béton autonivelant
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
BO	Béton ordinaire
BV	Béton vibré
C	Ciment
CBI	Institut du Ciment et du Béton
CaCO_3	Carbonate de calcium
CPA CEMI42,5	Ciment portland ordinaire de classe 42.5
CEMII	Ciment portland composé
C_3A	Aluminate tricalcique
C_2S	Silicate bicalcique
C_3S	Silicate tricalcique
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
CO_2	Dioxyde de carbon
CaO	Oxyde de calcium
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hydroxyde de calcium
Dmax	Diamètre maximal des Granulats
D_f	Coefficient de diffusion
E/C	Rapport Eau sur Ciment
E/F	Rapport Eau sur Fines
E/L	Rapport Eau sur Liant
EFNARC	The European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete
FFB	Fédération française du béton

G	Gravier
G/S	Rapport Gravier sur Sable
H	Hauteur du spécimen
HR	Humidité relative
ITZ	Zone de transition inter faciale
I_0	Courant en ampères, immédiatement après l'application du champ électrique.
I_t	Courant en ampères à t minute après l'application du champ électrique
J_x	Flux du constituant dans la direction x.
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
k	Perméabilité
k_{app}	Coefficient de perméabilité apparente
l/m^3	Litre par Mètre cube
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
m/h	Mètre par heure
Mf	Module de finesse
MAP	Mortier autoplaçant
MPa	Méga pascal
M_{air}	Masse des spécimens à l'air immédiatement retiré de l'eau
M_{sec}	Masse des spécimens a l'état sec
M_{eau}	Masse des spécimens immergés dans l'eau
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
NF P	Norme française
NaCl	Chlorure de sodium
N_2	Molécule d'azote
P	Pression absolue
Pa	Pression atmosphérique
Q	Débit volumique

Q	Charge totale en coulombs.
REF	Référence
S	Coefficient de sorptivité du spécimen ($\text{cm/s}^{1/2}$).
Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
S/M	Rapport Sable sur Mortier
SSB	Surface spécifique de Blaine
SCC	Self-Compacting Concrete
Sub ciment	Substitution dans le ciment
Sub Sable	Substitution dans le sable
T	Tortuosité
t	Temps en seconde
T50	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).
μ	viscosité
μm	MicroMètre
dx	épaisseur
dp	pression
$\partial c/\partial x$	Gradient de concentration dans direction de x.
ε	Porosité en %

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est considéré parmi les matériaux les plus utilisés à travers le monde, dans le domaine de la construction du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de ses propriétés telles que sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles qu'une bonne tenue au feu, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc..., qui lui permettent une utilisation pour réaliser divers ouvrages, notamment des bâtiments, des ponts, des autoroutes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires. Toutefois, le béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences.

Dans ce contexte, le béton autoplaçant (B.A.P) constitue une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des ouvrages. Ce type de béton a été utilisé pour la première fois au Japon vers la fin des années 80. Il se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité et fluidité qui lui permettent de se compacter de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage.

Le béton autoplaçant, comparé au béton ordinaire, est devenu de plus en plus populaire dans le monde. Dans la majorité des cas, les composants du béton autoplaçant sont identiques à ceux du béton ordinaire, avec une forte teneur en filler, tels que les cendres volantes, les fines calcaires, etc. (El Mir & Nehme 2015). Toutefois, les exigences spécifiques du BAP en termes d'auto-compactage, de fluidité élevée, de capacité de passage, de déformabilité et de résistance élevée à la ségrégation, nécessitent une formulation bien précise des proportions des matériaux. Les BA renferment un minimum de volume des gros agrégats, une grande quantité de fines, des adjuvants essentiellement des super plastifiants, (Silva & De Brito 2017) et éventuellement un agent colloïdal qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange.

La production du béton a engendré une forte demande de granulats dans de nombreux pays à travers le monde. En Algérie, en particulier, au cours des deux dernières décennies, la production de béton a augmenté, tandis que les ressources naturelles ont considérablement diminué. Cette situation est la conséquence de l'expansion démographique considérable qui est évaluée à 42 millions d'habitants en 2018, induisant un besoin important dans le domaine de la construction, notamment les logements, les infrastructures et les équipements. Afin de répondre aux exigences de cet accroissement populaire, l'état a déployé des moyens financiers importants en entreprenant de grands projets, tels que: la construction de deux

millions de logements, la création de nouvelles villes, la construction des barrages et transferts d'eau, la réalisation de projet autoroutier (est-ouest et nord-sud environ 4.500 km) et de projet ferroviaire (12.500 km); 10.000 ouvrages d'art; 25 km de tunnels; la réalisation de 13 stations de dessalement d'eau de mer et 10 centrales électriques. (Safiddine *et al.* 2017). Par conséquent, l'exploitation excessive des sables naturels (mer ou rivières) pour réaliser ces projets, a certainement menacé les richesses naturelles menant à l'érosion des berges de mer et de rivières. Pour ces raisons, les autorités publiques ont promulgué des lois consistant l'interdiction absolue de l'exploitation abusive des sables de mer et alluvionnaires.

Face à cette situation préoccupante, et devant la nécessité de mettre à la disposition du secteur de la construction les quantités de sable demandées qui sont estimées à des millions de tonnes, et pour pallier à l'utilisation excessive des sables naturels pouvant conduire à la raréfaction de ce matériau, de nouvelles solutions doivent être explorées. Les sables de concassage issus des roches calcaires semblent posséder des propriétés mécaniques et physiques adéquates pour constituer un matériau de remplacement approprié des sables alluvionnaires. À cet effet; il peut donc être largement utilisé pour la production de béton à faible coût.

Selon des données de la littérature, dans de nombreux pays au monde, la production des poudres de calcaire (déchets) est estimée à 21,2 millions de tonnes au Royaume-Uni, 18 millions de tonnes en Grèce et 30 millions de tonnes en Turquie. (Algin & Turgut 2008). En Algérie, il existe environ 1000 carrières de granulats avec une capacité de production de 15 millions de tonnes de sable de concassage (sous-produit ou déchet), représentant ainsi une richesse naturelle qui n'est pas exploitée à sa juste valeur. De plus, le sable produit par ces carrières de granulats contient un taux de fines (particules inférieures à 80µm) de 14 à 25% en poids qui dépasse la limite autorisée 7% selon la norme (Committee 2003)(ASTM C33),

A cet effet, plusieurs chercheurs dans leurs travaux se sont concentrés sur ces teneurs en fines dans le sable, et leur utilisation dans le béton sans affecter les propriétés principales. Par conséquent, compte tenu de ces données, les normes ont augmenté la limite des fines autorisée pour le sable et / ou ciment, pour permettre son utilisation dans les applications en béton (Menadi *et al.* 2009). Selon la norme britannique (BS 882), la teneur en fines autorisée dans le sable peut atteindre 16%; Les normes françaises (NF P 18 541, 301, X 540) tolèrent jusqu'à

18%, alors que les fines calcaires sont incorporées dans le béton comme substitution de ciment jusqu'à 35% selon la norme européenne (EN 197).

L'effet des ajouts calcaires au ciment ou du sable de concassage sur les propriétés mécaniques et de durabilité des mortiers et des bétons ordinaires a été étudié par plusieurs chercheurs (Celik & Marar 1996; Kenai *et al.* 1999; Tsvivilis *et al.* 2003; Menadi *et al.* 2009). Cependant, peu d'études ont été effectuées sur la durabilité des bétons autoplaçants à base de ces matériaux (sable de concassage).

L'exploitation des matériaux locaux considérés comme des déchets, dans la fabrication des matériaux de construction, a toujours été une préoccupation d'autant plus qu'elle contribue à une économie dans le domaine de construction. L'intérêt général de cette étude est la valorisation du sable de concassage Algérien, pour la fabrication des bétons autoplaçants, en tant que ressource alternative aux sables naturels surexploités.

L'objectif principal de cette étude, est de compléter les études antérieures sur les propriétés mécaniques et durabilité des bétons autoplaçants. Dans un premier temps on étudie l'effet des fines calcaires issues de sable de concassage partiellement substituées dans le ciment et/ou le sable sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais. En deuxième lieu, on analyse l'impact de ces fines sur la durabilité à long terme des bétons. La durabilité a été étudiée en utilisant des essais de perméabilité à l'eau, au gaz (azote), aux ions chlorures, aussi que la porosité totale à l'eau, absorption d'eau par capillarité et la carbonatation accélérée.

Ce travail est constitué de deux parties principales, une première théorique et une seconde expérimentale. La thèse comporte cinq chapitres.

La partie théorique présente dans un premier chapitre une synthèse bibliographique sur le béton autoplaçant ses caractéristiques et spécifications, ses propriétés à l'état frais et durci, les différentes formulations pour sa composition, ainsi que l'influence des principaux constituants, sur ses propriétés, en particulier l'effet des fines calcaires du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques et, mécaniques des bétons autoplaçants.

Le deuxième chapitre, est consacré à la durabilité notamment le phénomène de transport et ses mécanismes dans les milieux cimentaires poreux. Nous exposons également l'effet des fines calcaires sur la durabilité, en particulier la perméabilité du béton et du BAP

Dans la partie expérimentale nous présentons en troisième chapitre, la caractérisation des matériaux utilisés et la formulation adoptée.

Le quatrième chapitre résume le protocole expérimental réalisé sur les BAP à l'état frais, durci et la durabilité dans le cadre de cette étude.

A la fin de cette partie, dans le cinquième chapitre, nous avons analysé et interprété les résultats expérimentaux obtenus pour les différents essais réalisés.

Enfin, nous terminons ce travail de recherche par une conclusion générale, qui rappelle les objectifs de cette étude et les principaux résultats obtenus ainsi que d'éventuelles recommandations et perspectives.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie A: Le béton autoplaçant-état de connaissance

I.1. Introduction

La construction des ouvrages en utilisant le béton traditionnel, nécessite une phase de vibration lors de sa mise en œuvre afin de remplir correctement les coffrages pour obtenir à la fin l'élément souhaité. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui nécessite un savoir-faire particulier (Boukendakdji 2010).

L'idée proposée était d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans aucune vibration extérieure, engendrant la naissance d'un nouveau matériau appelé béton autoplaçant. Il est apparu au Japon (université de Tokyo) à la fin des années 1980 pour des raisons économiques (réduction de la main d'œuvre, rapidité de mise en place); le premier prototype a été accompli en 1988 en utilisant des matériaux disponibles sur le marché Japonais. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes Performances BHP (Ozawa 1989), aujourd'hui sont connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons auto nivelants, selon les applications (Okamura & Ouchi 2003) .

Connaissant actuellement un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis, il s'est progressivement répandu dans le reste du monde; son élaboration représentait un saut technologique important dans l'évolution des techniques de mise en œuvre, en remplacement des moyens et des techniques traditionnellement employées dans les bétons ordinaires (AMURA & Ouchi 1999).

I.2. Définition d'un BAP

Par définition, les bétons autoplaçants se caractérisent par une grande fluidité et déformabilité, une bonne stabilité, une forte résistance à la ségrégation et au ressuage, une mise en place sous le seul effet de la gravité et une aptitude à s'écouler sans vibration dans des coffrages complexes et des ferraillements denses tout en donnant un aspect final homogène. Grâce à leur formulation et à leur homogénéité, ils donnent des structures résistantes et durables. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton des avantages techniques et un impact socio-économique important par rapport au béton ordinaire (AMURA & Ouchi 1999).

I.3. Avantages techniques

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. On peut résumer les avantages techniques dans les points suivants (Boukendakdji 2010):

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers ;

De plus, l'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. L'utilisation des BAP 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: bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc. (Walraven 2003) précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site, les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes (Boukendakdji 2010).

I.4. Impact socio-économiques

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique (Bétons 2004):

- Une diminution de la pénibilité des tâches ;
- Une réduction des risques d'accident ;
- Une réduction du coût de la main d'œuvre ;
- Une réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant.

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales ;
- Compatibilité des matériaux ;
- Etanchéité des coffrages ;
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier ;

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation. Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain. Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles (Bouras 2011).

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également doit se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre, du temps de coulage, des délais de fabrication, etc. Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais directs et indirects, donc par « l'approche globale » suggérée par Mailer, cité par (Bouras 2011). Même si

l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socio-économiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir (Bouras 2011).

I.5. Caractéristiques des bétons autoplaçants

La spécificité des bétons autoplaçants par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre, se compactant sous l'effet de leur propre poids. A cet effet, les essais, mis au point pour caractériser le matériau à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables des BAP : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme contradictoires, elles sont toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées. Or, en l'absence de défauts de parements (ressuage, bullage), les éventuelles pertes d'homogénéité ne sont pas décelables en surface. Elles se caractérisent par une séparation des gros granulats du fluide suspendant, ce qui est particulièrement néfaste pour les propriétés mécaniques finales de la structure. Il est donc indispensable de s'assurer en amont que l'ensemble du matériau restera stable, aussi bien lors de la phase de mise en œuvre qu'après, i.e. durant la période dite « dormante » précédant la prise (Boukendakdji 2010).

I.6. Domaines d'emploi des BAP

Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées. Il existe deux catégories de bétons fluides (Okamura & Ouchi 2003):

- Les bétons autonivelants (BAN), employés pour un coulage horizontal (de dallages industriels, planchers et chapes flottantes) ont des résistances en compression équivalentes à celles des bétons ordinaires jusqu'à 40MPa, du fait des forts rapports $E/C < 0,5$. Ce béton est moins visqueux que le béton autoplaçant et plus robuste vis-à-vis de la ségrégation, malgré une plus grande fluidité, rendue possible grâce à l'ajout d'agents viscosants.

- Les bétons autoplaçants (BAP), employés pour un coulage vertical (voiles) peuvent atteindre des résistances beaucoup plus élevées comme celles d'un béton à hautes performances, soit jusqu'à 80MPa. Cette gamme de résistance plus étendue est obtenue en jouant sur la teneur en eau ou sur la nature des poudres (ciment et additions minérales) qui peuvent être inertes, hydrauliques ou pouzzolaniques.

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles ;
- Obtention de très bonnes qualités de parement ;
- De plus ces caractéristiques ont par ailleurs une implication directe du point de vue économique mais aussi social ;

Parmi les ouvrages réalisés en utilisant des BAP on peut citer (Okamura & Ozawa 1996):

- Le pont suspendu Akashi Kaikyo au Japon où le BAP contenant un filler a été utilisé pour le massif d'ancrage du plus long pont suspendu au monde (3910 m). Le volume de BAP utilisé est de 380 000 m³. Grâce à l'utilisation du BAP, il a été possible de couler une quantité de béton 1900 m³/jour. La densité de ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires ont été de 20%.
- Le bâtiment Landmark Tower où un BAP d'excellence déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur.
- Le pont Kiba Park où 650 m³ de béton autoplaçant possédant une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa ont été utilisés.

I.7. Mise en œuvre des BAP

La principale différence, entre un béton ordinaire et béton un autoplaçant, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement très fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale

D'une manière générale, les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à leur facilité de coulage sur de

longues distances et de grandes hauteurs. Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants. Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage), le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages. Il est important de limiter leur hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage.

En terme de mise en œuvre, les bétons autoplaçants offrent des conditions plus souples que le béton ordinaire du fait de l'élimination de la vibration. Un autre avantage majeur des BAP que nous joindrons également dans la partie traitant de leur impact économique se résume dans la réduction de la durée de la phase de coulage: l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la vidange de la benne se fait plus rapidement, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure de l'élément est plus facile à réaliser (Boukendakdji 2010).

I.8. Coulage des BAP

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage (AFGC 2008). L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de (AFGC 2008), quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m).

Les BAP exercent, compte tenu de leur fluidité et de leur long maintien de rhéologie, des pressions hydrostatiques plus importantes sur les coffrages lorsque les vitesses de bétonnage sont élevées. Il convient donc de soigner la fixation des réservations, des armatures, des fourreaux et des boîtiers et la stabilité des coffrages pour résister à la pression hydrostatique .

I.9. Coffrage pour les BAP

Pour la préparation des coffrages pour les BAP, notamment l'étanchéité et l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons ordinaires (AFGC 2008); le coffrage doit être rigide, étanche et résistant. Les recommandations de la FFBC (de Génie-civil 2003) précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

La hauteur du coulage doit être compatible avec la tenue du coffrage à la poussée du béton. De plus, des études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage (Billberg 2003; Leemann & Hoffmann 2003). D'après (Assaad & Khayat 2006), l'augmentation de la vitesse de coulage de 5 à 25 m/h induit une augmentation de pression de 15% de l'hydrostatique sans, toutefois, un effet significatif sur la chute des pressions avec le temps. Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos (Ovarlez & Roussel 2006). La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer et se comporte toujours comme un fluide (Ovarlez & Roussel 2006).

Dans le cas de coulage par pompage, la perte de pression pour un BAP est de l'ordre de 40% par rapport au béton vibré (Maeda 1999), et selon l'étude faite par (Assaad & Khayat 2005) la pression latérale exercée sur le coffrage d'un BAP ayant un étalement de 650 ± 15 mm est significativement influencé par la concentration des gros granulats. Plus le volume de ces derniers est important, moins importante est la pression maximale initiale et plus vite elle diminue.

I.10. Vibration

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons ordinaires, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme (5-25°C), des dispositions particulières sont à prendre selon les recommandations FFB(de Génie-civil 2003). (Andriamanantsilavo *et al.* 2003) ont étudié l'influence de la vibration sur la cinétique des pressions pour les pâtes ayant un rapport eau/ciment ($E/C=0,36$). L'absence de vibration entraîne un ralentissement du déroulement des différentes phases. Ce ralentissement est d'autant plus significatif que la hauteur du mélange augmente. L'absence de vibration retarde l'annulation de la pression de 90 minutes.

I.11. Cure des BAP

Une attention particulière doit être portée à la cure des BAP ; une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau. Le faible ressuage(Okamura & Ouchi 2003) des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait plastique(Turcry 2003)(AFGC 2008). D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre(AFGC 2008). D'après les recommandations de la FFB(de Génie-civil 2003), comme pour tous les bétons ayant reçu un produit de cure, le ponçage ou le grenailage est obligatoire avant la pose de tout revêtement solidaire au support. Cette préparation doit être réalisée le plus tard possible dans le cas des bétons autonivelants, au minimum après 28 jours(Committe 2006).

I.12. Transport

Le temps de malaxage est légèrement plus long que pour un béton classique, afin que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible.

En raison de sa fluidité élevée, le BAP ne peut être transporté qu'au moyen d'un camion malaxeur. Il est indispensable de faire tourner la toupie lentement pendant toute la durée du transport. L'hyper-fluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements lors du transport, un clapet de fermeture est recommandé pour les transports dans des endroits à forte pente. À l'arrivée sur le site, un brassage à vitesse élevée durant deux minutes environ doit être effectué avant le déchargement du BAP(Bétons 2004).

La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et la conformité à la formule nominale. Cette opération est essentiellement basée sur la mesure de l'étalement.

En effet, la formulation des BAP est particulière par l'utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite est donc la mise en place d'un suivi plus important.

I.13. Matériaux constituant un BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposées pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont: les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité. La figure I.1 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le béton autoplaçant.

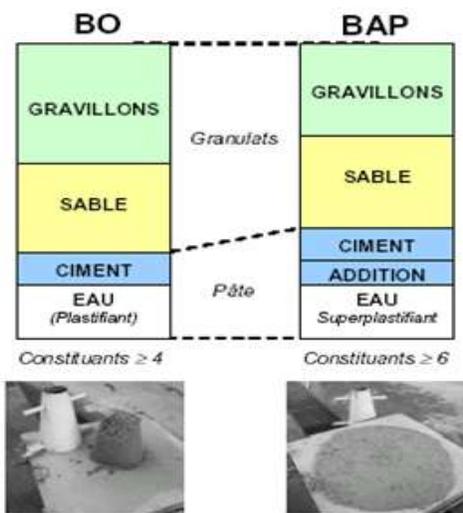


Figure I. 1: Composition d'un béton ordinaire BO et d'un BAP - aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP

I.13.1. Liants

Les performances des BAP sont liées à la composition du ciment utilisé principalement ; Tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP qui nécessite un dosage plus élevé par rapport aux bétons conventionnels. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

L'ouvrabilité du béton contenant des ajouts minéraux est largement améliorée par rapport au béton fabriqué uniquement avec de ciment ordinaire. Cette amélioration est souvent attribuée à la grande finesse et à la caractéristique des surfaces de leurs grains qui créent des zones de glissement dans la pâte. En plus, la pâte de liant est augmentée par la présence d'un ajout plus léger ce qui engendre une faible cohésion entre les particules favorisant leur dispersion (Boukendakdji 2010).

Les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons sont également influées par la présence des ajouts minéraux. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et plus dense (Lange *et al.* 1997).

I.13.2. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du béton autoplaçant ne doit pas présenter un excès d'impuretés, qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, ...etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation du ciment, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

I.13.3. Adjuvants

Afin d'obtenir la très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant, on utilise généralement un adjuvant à base de polycarboxylates. Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut-être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de

prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du béton autoplaçant (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires. Sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé avec perte des performances recherchées du béton autoplaçant (Bétons 2004).

I.13.4. Superplastifiants

L'apparition des bétons autoplaçants et des Bétons à Hautes Performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (NAKAMURA & OGAWA 2000; Bury & Christensen 2002). Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du poids du ciment (Boukendakdji 2010). L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (figure I.2). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles (Khayat 1996).

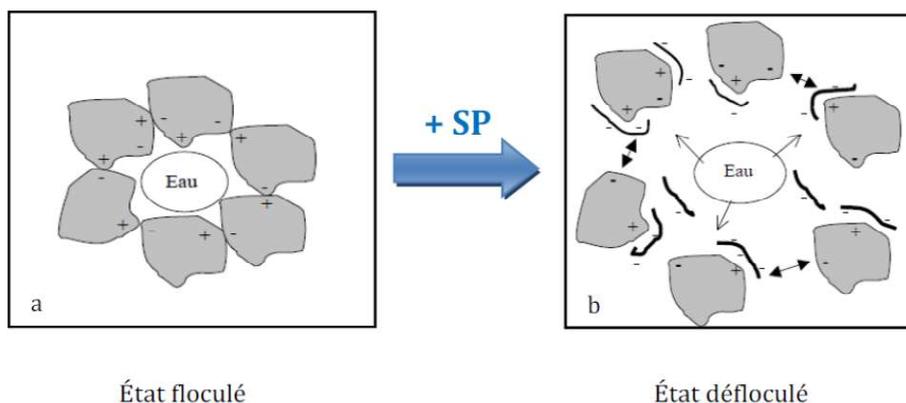


Figure I. 2: Action des superplastifiants - défloculation des grains de ciment (Bethmont 2005) .

La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition interfaciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C élevé de 0,55; le

ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition interfaciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance interfaciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apportent une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorisent également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance interfaciale est semblable avec et sans superplastifiant(Flatt 2001).

Des résultats antérieurs montrent, qu'avec un rapport E/C de 0.35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition interfaciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peut améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité, il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles(Jiang *et al.* 2001), la Figure I.3 montre que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant(Shindoh & Matsuoka 2003).

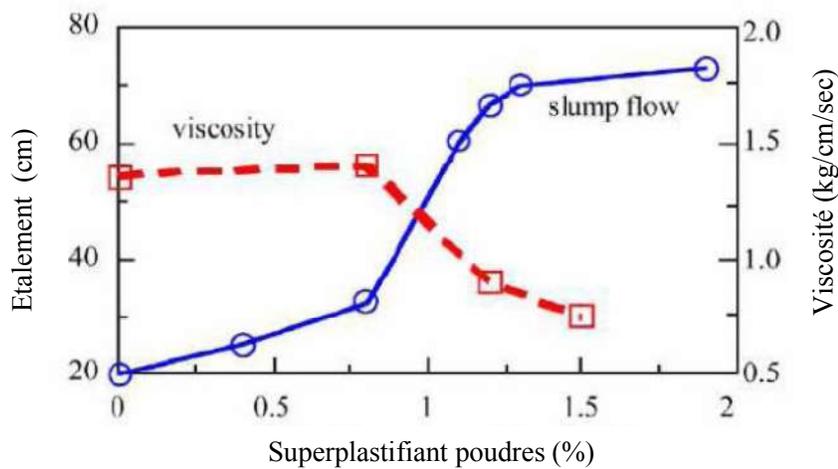


Figure I. 3: Influence de la quantité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton(Shindoh & Matsuoka 2003).

I.13.5. Agents de viscosité

Certaines compositions de BAP peuvent contenir des agents de cohésion, appelés aussi agents de viscosité. Ces produits, minéraux ou organiques, ont pour but de diminuer la

sensibilité du béton frais vis-à-vis du ressuage et de la ségrégation, augmentant ainsi la robustesse de la formule de béton (AFGC 2008).

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles. Il existe trois catégories générales pour les agents de viscosité : les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques (Khayat & Ghezal 2003).

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage (Rols *et al.* 1999). Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges (Lachemi *et al.* 2004).

Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique, l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/fines élevés, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils peuvent s'avérer superflus dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50 MPa). Pour la gamme intermédiaire des bétons, leur utilité est à étudier au cas par cas (AFGC 2008).

Cependant, l'action de ces produits est d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage figure I.4.

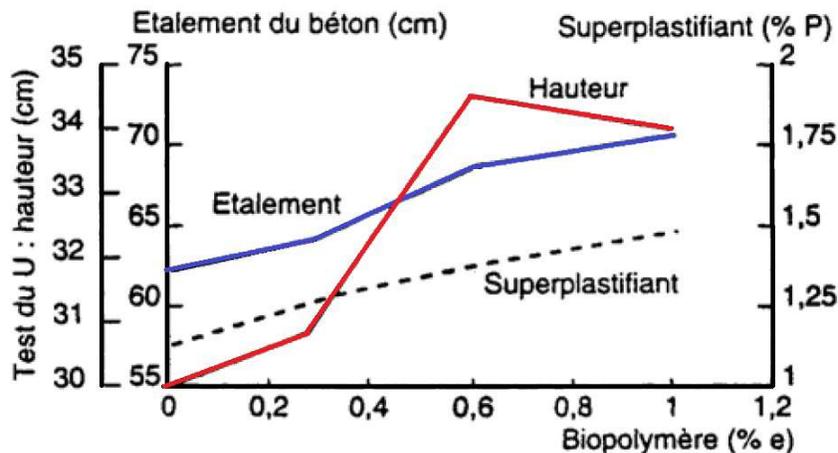


Figure I. 4: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant d'après (Tangtermsirikul *et al.* 1991)

(Petersson & Billberg 1999) ont démontré durant leur investigation sur le blocage des bétons autoplaçants, que l'utilisation d'un agent de viscosité provoque une perte d'ouvrabilité dans les BAP comparés à ceux qui contiennent uniquement des fillers. L'agent de viscosité donne plus de stabilité au BAP mais ne peut en aucun cas remplacer l'ajout minéral. Quand le blocage n'est pas le vrai problème, dans un mélange, l'agent de viscosité peut être utilisé, avec ou sans ajout minéral pour garder la stabilité.

I.13.6. Gravillons

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats concassés ou roulés, les granulats légers et recyclés sont également utilisés (Tu 2005). L'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants a pu être mise en évidence de même qu'il est recommandé d'utiliser des granulats roulés. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation.

Ils sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée et leur volume doit être limité. 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, et qui peut être corrigé selon le confinement de la structure étudiée.

Selon les recommandations de (AFGC 2008), le diamètre maximal des gravillons (D_{\max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec (D_{\max}), cela conduit à diminuer le volume de gravillons. Le choix d'un D_{\max} plus important est donc possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

Il est considéré que le volume des gros granulats, dans le béton, est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. (Okamura & Ouchi 2003) ont rapporté dans leur travail que la diminution de la capacité de remplissage est due à l'augmentation de la quantité des gros granulats dans le béton. (Yammine 2007), ont remarqué dans les travaux effectués que, la fluidité des BAP était influencée par la fraction volumique granulaire (G+S). De plus, les BAP contenant une fraction granulaire de l'ordre de 62% ont présenté une fluidité recommandée.

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

I.13.7. Sables

Un sable avec une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption d'eau convient parfaitement à la fabrication du BAP de bonne qualité. Les sables roulés sont préférables par rapport aux sables concassés. En effet, l'utilisation des sables dans la BAP dépend de leur disponibilité locale (Skarendahl 2003). Le type du sable et son module de finesse ont un effet important sur les propriétés des bétons autoplaçants.

(Kim *et al.* 1997), ont étudié l'influence du type de sable et son module de finesse sur les propriétés à l'état frais des mortiers. Ils ont utilisé trois types de sables (sable alluvionnaire roulé, sable concassé et sable de mer) avec des modules de finesse différents de (2,64; 2,87 et 3,38) respectivement. Ils ont remarqué que le temps d'écoulement sur l'essai de V-Funnel des bétons fabriqués avec le sable concassé et le sable de mer est plus important à celui du sable roulé.

Les résultats de l'étude effectuée (Benchaâ 2014) sur l'influence du type de sable sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants, montrent une amélioration des caractéristiques rhéologiques avec l'utilisation du sable de concassage et du sable alluvionnaire. Par contre, une diminution des propriétés des mortiers autoplaçants a été remarquée avec l'augmentation du dosage en sable dunaire dans la composition.

I.14. Spécificité d'un béton autoplaçant

a) Volume de pâte et quantité de fines élevées

Les formules de bétons autoplaçants actuellement réalisées au Japon et au Canada se caractérisent par un fort dosage en liant (Baron 1999). Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons en particulier dans les milieux ferraillés. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important, typiquement de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres (AFGC 2008). Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45% du volume total, alors que dans un béton

traditionnel il est de 20 à 35%, et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte. (Figure I.5).

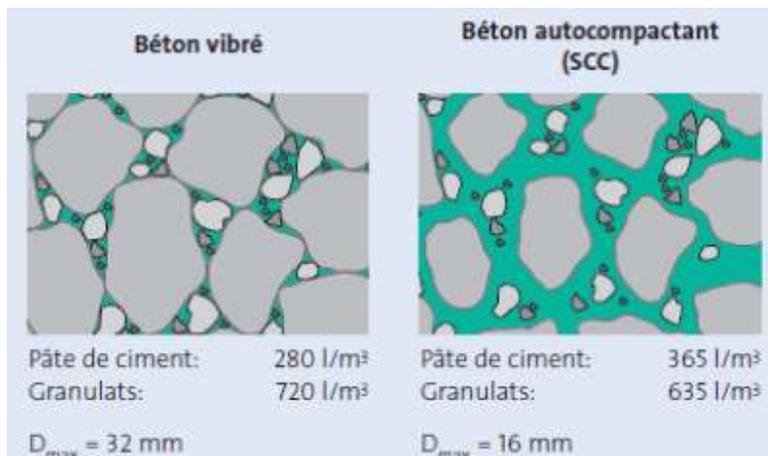


Figure I. 5: Volumes relatifs de la pâte de ciment pour un béton vibré et un béton autoplaçant (Bétons 2004)

b) Quantité des fines élevées (particules <80 µm)

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, et donc garantir un compromis entre la stabilité et la maniabilité du béton (Ferraris *et al.* 2001), les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendres volantes, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est fait pour répondre aux exigences de résistance à la compression et de durabilité imposées par les normes applicables (AFGC 2008). Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature (Neville *et al.* 2000).

I.15. Ajouts minéraux

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). L'incorporation de ces ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton, à réduire la quantité de

combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature (El Barrak 2003), et permet d'obtenir un ciment composé plus économique. De plus, Les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes ou quasi inertes telles que le calcaire, la poussière. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

a) Les produits artificiels

- Le laitier des hauts fourneaux ;
- Les cendres volantes ;
- La fumée de silice ;
- L'argile calcinée (méta kaolin) ;
- Les déchets d'incinération ;
- Les déchets de briques concassées ;

b) Les produits naturels

- La pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories) ;
- Le calcaire ;
- L'argile opaline (blanchâtre) ;
- Les additions siliceuses (sable) ;

Parmi ces ajouts minéraux cités ci-dessus, nous avons choisi les fines calcaires pour être un élément de substitution au ciment et au sable dans ce présent travail. On étudiera son influence sur la formulation et le comportement de béton autoplaçant à l'état frais, durci et sa durabilité.

L'augmentation du dosage des fines dans un béton, pour un dosage constant en ciment, implique l'augmentation de la concentration volumique en solides et donc, favorise généralement la croissance de la viscosité du béton. Par contre, pour un dosage en poudre (ciment et addition) constant, la substitution du ciment par de l'addition peut influencer l'écoulement du béton en fonction du type de l'addition. En effet, certaines additions comme la fumée de silice ont une demande en eau importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et mécaniques du béton, et augmenter la viscosité. D'autres

additions comme les fines des laitiers de hauts fourneaux et les cendres micronisées ont de leur côté une faible demande en eau par rapport au ciment, et sont donc bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçants et à hautes performances, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons. (Lange *et al.* 1997) et (Cyr & Mouret 2003)

L'utilisation de filler calcaire dans les ciments complète, par sa grande finesse, la distribution granulométrique du mélange, ainsi il diminue le frottement inter-particules, assure une meilleure compacité du béton et libère une partie de l'eau de gâchage (Yahia *et al.* 2005).

I.16. Méthodes de formulation de béton autoplaçant

La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité, compacité et résistance). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m³, cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, ...etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis (Sedran 1995).

Fabriquer un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant; chaque cas, utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux), doit mettre au point sa propre formulation. De diverses approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant ; nous présentons d'une façon générale les principales approches.

I.16.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura. Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide.
- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier.
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'Entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'Étalement au cône).

I.16.2. Formulation CBI (Suède)

La méthode de formulation suédoise est développée par l'Institut du Ciment et du Béton (CBI) (Billberg 1999). Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par (Tangtermsirikul & Bui 1995) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures, et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide, estimant pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

I.16.3. Formulation JSCE (Japon)

La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) a proposé une procédure qui inclut la provision pour l'utilisation d'un agent de viscosité (Petersson & Skarendahl 2000). Dans cette formulation, le résultat du mélange de proportions des constituants, dépend non seulement de l'utilisation ou non d'un agent de viscosité, mais aussi de son type.

Les points principaux de cette formulation sont présentés comme suit :

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'auto-compactabilité désirée, et la dimension maximale des granulats est limitée à de 20 ou 25 mm.
- Les rapports eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci.
- Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience.

I.16.4. Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par (Sedran & De Larrard 1999) est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Une proportion de liant (ciment + addition) est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente. Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée.

Partie B : Sable de concassage

I.16.5. Introduction

Les granulats alluvionnaires, occupant plus de 70% du volume du béton, représentent désormais une ressource non renouvelable, dont les sables sont les plus couramment utilisés pour la confection des bétons entrant dans la réalisation des ouvrages. A cet effet, les prélèvements excessifs de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources naturelles et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement.

De nombreuses régions du monde vivent cette situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats pour la fabrication du béton, les sables de concassage sont très souvent l'unique alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, et à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières de concassage sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « sous-produits ou déchets », car ils sont riches en fines ; ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons hydrauliques, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.

Plusieurs pays ont été déjà amenés à prendre des mesures de préservation des ressources alluvionnaires en imposant des règles strictes limitant les prélèvements. En Algérie, par exemple, le gouvernement a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] et une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux (Instruction, 2007). De plus, une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable. C'est le cas aussi au Maroc où une loi relative à l'exploitation des carrières a été promulguée en 2002. Elle vise à valoriser les sables de concassage lavés en tant qu'alternative aux sables alluvionnaires pour la fabrication des bétons hydrauliques (Norme Marocaine 10.1.165, 1995). Cette loi introduit de nouvelles exigences normatives propres à ce matériau. Cité par (Joudi 2012).

Par contre, sur le plan technique et notamment sur site, le problème de sable de concassage est toujours soulevé surtout en ce qui concerne sa propreté et l'effet de ses fines sur les propriétés du béton. En plus, la majorité des stations ne comportent pas les

équipements nécessaires permettant le lavage des sables et l'élimination des argiles afin d'avoir un taux de fines toléré. A cet effet, ce matériau a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, à l'échelle nationale et internationale pendant les dernières décennies, dans le but de valoriser son utilisation dans le béton hydraulique.

I.16.6. Valorisation du sable de concassage

Les nombreuses études s'intéressant à la valorisation des matériaux calcaires dans les bétons ont montré généralement le rôle important des fillers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur limitant. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires par exemple (Felekoglu 2007; Benachour *et al.* 2008), le but étant de définir la quantité de fillers pouvant être admise dans le sable de concassage, voire se substituer au ciment. La transposition des résultats aux bétons est alors délicate, dans la mesure où le gravillon modifie significativement le comportement du composite. D'autres travaux ont été réalisés directement sur des bétons, à partir de sables de carrière plus ou moins fillérisés de diverses origines (Donza *et al.* 2002). Là aussi, la généralisation des observations faites sur ces mélanges peut poser certaines difficultés, en raison notamment de la variabilité des propriétés des produits.

En Tunisie par exemple, le gouvernement a lancé un programme visant la valorisation des sables calcaires de concassage, pour leur emploi dans les différents domaines de construction, suite à l'achèvement des études par (Achour *et al.* 2008a; Achour *et al.* 2008b) en 2010 par (Akrouf *et al.* 2010) en 2012 par (Joudi-Bahri 2012; Joudi-Bahri *et al.* 2012) et en 2012 par (R'mili & Ouezdou 2012). Le résultat de ces travaux montre concrètement la faisabilité du béton calcaire en Tunisie. Ils ont également contribué à la rédaction du premier manuel technique sur l'utilisation des ressources calcaires dans ce pays.

En Suède, afin de mieux comprendre l'influence des caractéristiques des sables de concassage sur l'ouvrabilité du béton, un projet de recherche a été lancé en 2003 réalisé par (Westerholm *et al.* 2007; Westerholm *et al.* 2008).

En Algérie, plusieurs études ont été développées dans le but d'éclaircir l'influence des sables de concassage et leurs fines sur les propriétés du béton à l'état frais et durci, notamment ceux réalisés (Kenai *et al.* 2004; Benachour *et al.* 2008; Menadi *et al.* 2009), Mais peu de travaux de recherche ont été effectués sur l'effet des fines calcaires issues de sables de

concassage sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et particulièrement sa durabilité. Et par conséquent, malgré tous ces travaux achevés, le sable de concassage reste toujours un sujet d'actualité pour les chercheurs dans le monde entier (Bala *et al.* 2018; Kumar & Sashidhar 2018; Reddy & Dadapeer 2018).

I.16.7. Particularité des matériaux calcaires de carrière

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevée. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau (efficace) plus élevées qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

I.16.8. Fines calcaires

Par définition, les fillers calcaires sont des produits secs infiniment divisés, obtenus par broyage et /ou sélection, provenant de gisement des roches calcaires ; le calcaire doit contenir une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure ou égale à 75% en masse.

Le calcaire est un important matériau pour la fabrication de ciment, son utilisation comme addition au ciment Portland améliore certaines propriétés du béton frais et durci, dans la norme européenne, le ciment CEMI contient 5% de filler calcaire, tandis que le CEMII-A et CEMI-B contiennent jusqu'à 20% et 35% de calcaire respectivement.

I.16.9. Influence des fines calcaires sur l'hydratation de ciment

Généralement le calcaire a été considéré comme un additif inerte dans une pâte de ciment hydratante. Bien qu'il soit convenu que le calcaire n'est pas pouzzolanique, plusieurs études ont montré qu'il a une réactivité significative. Il en résulte des carbo-aluminates de calcium de la réaction de carbonates et d'aluminate de calcium selon la réaction chimique suivante:



Il est rapporté par (Nehdi) que, plusieurs auteurs ont observé que l'hydratation de C_3A a été supprimée par des ajouts de CaCO_3 en raison de la formation de carboaluminate de

calcium sur les grains de C_3A . Il a été noté en outre que la formation d'étringite et sa conversion en mono-sulfo-aluminate ont été accélérées en présence de $CaCO_3$.

(Ramachandran & Zhang 1986) et (Rahhal & Talero 2005) ont remarqué que l'addition de $CaCO_3$ accélère l'hydratation de ciment ; cet effet d'accélération est plus prononcé avec l'augmentation du taux et de la finesse du filler calcaire.

Selon (De Larrard 2000), les fines calcaires ne sont ni inertes, ni gratuites, et une petite quantité de ce produit est toujours bénéfique sitôt que le ciment contient des aluminates. La quantité optimale des fines calcaires augmente quand la dose de superplastifiant augmente et quand la résistance visée diminue. De même, l'incorporation de fines calcaires est plus attrayante quand le taux de C_3A du ciment est élevé.

Selon les travaux récents effectués par (Moon *et al.* 2017) ont montré que l'addition de fines calcaire accélère l'hydratation du ciment en fournissant des sites de nucléation pour les produits d'hydratation. En outre, les mélanges contenant du ciment et des fines calcaires avec une grande finesse ont une influence significative sur la réaction d'hydratation et le développement de la résistance.

I.16.10. Normalisation des sables de concassage

Les fines sont généralement obtenues pendant le processus de concassage des roches calcaires. Le vocable « fines » selon la norme NF P 18-540, désigne l'ensemble des grains passant à travers le tamis de $80\ \mu\text{m}$, alors que les précédentes normes indiquent que la teneur en fines était définie par le passant à $63\ \mu\text{m}$.

Des normes ont été établies précisant la teneur admissible des fines dans le sable de concassage, souvent appelées « fillers » ou bien aussi « poussière de concassage », selon le cas d'utilisation. Du point de vue physique, l'addition des fines dans le mélange de béton joue un rôle important notamment l'effet de dilution, et également le renfort mécanique, et le blocage de propagation de fissures (Coussot 2012). En fait, plusieurs normes tenaient en compte les résultats des études antérieures de recherche. Le Tableau 1.1 résume le pourcentage de taux de fines dans le sable.

Tableau I. 1 : Pourcentage des fines admises dans le sable concassé selon diverses normes pour la confection des bétons et mortiers (Benachour et al. 2008).

Pays	Allemagne	Canada	Italie	Belgique	USA	France	Royaume -Uni	Algérie
Norme et référence	DIN 4226	CSA A231	Uni 7 163	NBN 589-102	ASTM C33	NF P 18 541, 301, X 540	BS 822	DTR BE 2.1
Date	1971	1973	1972	1969	1997	1994-1983- 1997	1992	1991- 2010
Teneur en fines dans le sable (%)	< 4	< 3-5	< 3-5	< 3-5	< 5-7	< 12-18	< 16	< 16

Les teneurs en fines sont exprimées en pourcentage massique.

I.17. Effet des fillers calcaires sur BAP à l'état frais (ouvrabilité)

Généralement, l'effet des fillers sur les propriétés du béton et du mortier, à l'état frais, dépend de plusieurs facteurs, la finesse, la granulométrie, la forme et la texture des particules, l'ouvrabilité du béton contenant des ajouts minéraux est largement améliorée par rapport au béton au ciment ordinaire. Cette amélioration est souvent attribuée à la grande finesse et à la caractéristique des surfaces de leurs grains qui crée des zones de glissement dans la pâte. En plus, la pâte de liant est augmentée par la présence d'un ajout plus léger ce qui engendre une faible cohésion entre les particules favorisant leur dispersion.

La présence des fillers calcaires à un effet positif sur la demande en eau et la maniabilité du béton. Généralement, les ciments à base d'ajouts calcaires demandent moins d'eau que les ciments sans ajouts ; cet effet peut être attribué à la répartition très large des particules du calcaire par rapport à celles du clinker qui permettent aux particules de calcaire de combler les vides entre les particules des ciments et par conséquent diminue le besoin en eau (Menadi2009).

L'ajout de fillers calcaires avec des surfaces spécifiques Blaine élevées améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné, où ils augmentent leur compacité, améliorent leur résistance à la ségrégation. Il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP). Une augmentation de la surface Blaine des fillers conduirait à une diminution du dosage en SP et à une diminution de l'ouvrabilité au cours du temps (El Hilali 2009).

Tandis que, l'effet de l'addition des fines calcaires, comme substitution au sable de concassage est totalement différent à celui de ciment. Selon les travaux de recherches effectuées par (Benabed *et al.* 2012) et (Safiddine *et al.* 2017), ont remarqué néanmoins, une diminution sur l'étalement du mortier auto-compactant tout en augmentant le contenu des fines calcaires. De manière générale, l'incorporation des fines calcaires affecte la maniabilité des bétons autoplaçants, cette diminution est probablement due à l'augmentation de la surface spécifique des agrégats fins, ce qui nécessite par conséquent davantage plus d'eau pour mouiller la surface des particules (Bosiljkov 2003). Il a été rapporté que le remplacement d'un matériau par un autre présentant des surfaces spécifiques différentes peut modifier la surface humide, ce qui entraîne une modification de la quantité d'eau adsorbée (Nehdi *et al.* 1998).

(Benabed *et al.* 2012), ont signalé une augmentation sur le temps d'écoulement tout en augmentant la teneur en fines calcaires substituées au sable de concassage. Ceci est dû à l'augmentation de la viscosité des bétons autoplaçants. (Omar *et al.* 2012) ont étudié l'influence de substitution de sable de concassage avec différents pourcentages (25%, 50% et 75%) sur les propriétés des bétons. Ils ont remarqué que l'utilisation du sable concassé comme granulats fins améliore l'étalement du béton et ceci grâce l'existence de fines.

I.18. Effet des fillers calcaires sur le béton et les BAP à l'état durci

I.18.1. Résistance à la compression

Les ajouts minéraux permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau (Lange *et al.* 1997). Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, augmente la cohésion de l'ensemble et limite le ressuage du béton autoplaçant.

Des travaux de recherches ont montré que la présence des fillers calcaires dans un mélange de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges (Péra *et al.* 1999; De Larrard 2000). Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées 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. D'après les travaux de recherches effectués par (Gibbs & Zhu 1999; Sonebi & Bartos 1999), une évolution de la résistance à la compression a été remarquée pour les mélanges des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés (Figure I.6). La présence de poudre de calcaire accélère l'hydratation de C_3S et augmente la résistance à la compression à jeune âge (Gibbs & Zhu 1999).

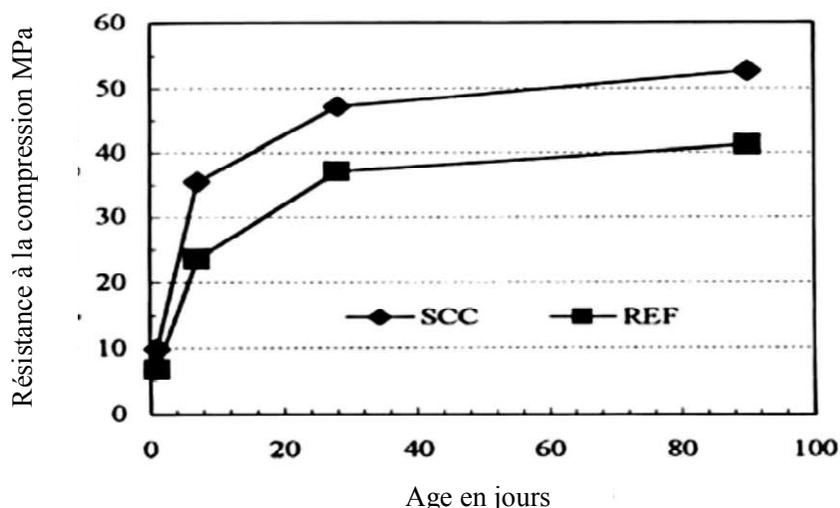


Figure I. 6: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (REF) correspondant (Gibbs & Zhu 1999).

Un béton Autoplaçant avec un rapport E/L similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie (Klug & Holschemacher 2003). De plus, certains auteurs (Petersson 2001) affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

Une étude a été effectuée par (Felekoglu 2007) sur l'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du béton (fabrication des BAP), dix pâtes de ciment ont été formulées en

substituant le ciment par 10, 20, 30 et 40%, avec deux types de fines calcaires utilisés. Les résultats ont montré qu'un taux de substitution de 10% de fines calcaires issus des filtres de carrières (QLP) augmente la résistance à la compression à 7 et à 28 jours ; au-delà de cet âge la résistance diminue (Figure I.7).

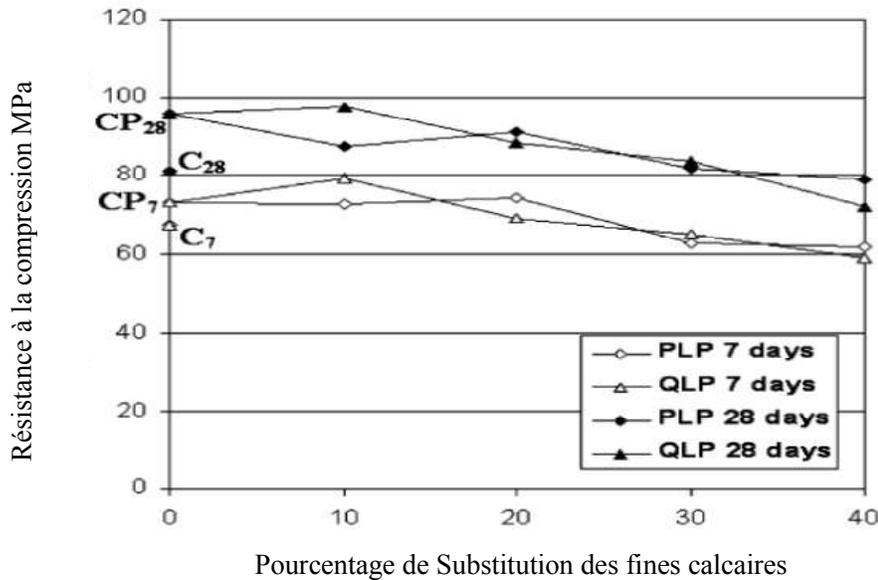


Figure I. 7 : Résistance à la compression des pâtes de ciments (Felekoğlu, 2007).

Une autre étude, a été réalisée par (Menadi *et al.* 2009), examinant l'influence des fines calcaires issues de sable de concassage sur les performances du béton ordinaire (Figure I.8). Quatre types de ciment avec différentes surface spécifique (268, 297, 308 and 330 m²/kg) ont été utilisés tout en maintenant un rapport E/C constant. Sur la base des résultats expérimentaux de cette étude, ils ont remarqué que l'incorporation de 15% des fines calcaires augmente la résistance à la compression à court terme ; 28 jours dans le béton ont tandis qu'une réduction à 90 jours de cure sur de la résistance à la compression a été observé, à l'exception pour le mélange fabriqué avec le ciment qui présente une surface spécifique faible.

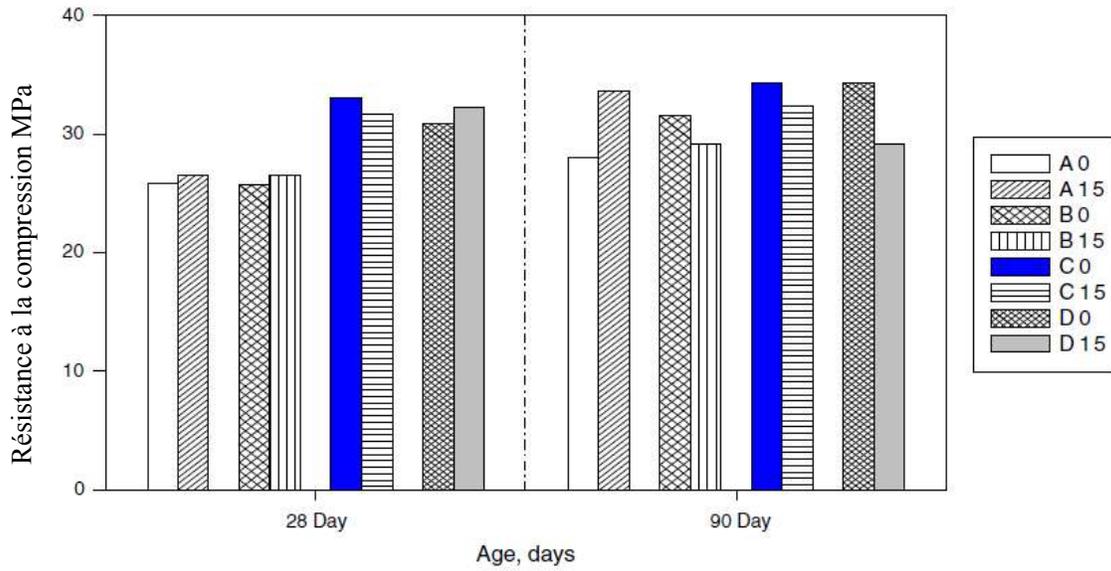


Figure I. 8 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression de divers mélanges de béton (Menadi et al. 2009).

(Sadhouari *et al.* 2009) ont rapporté dans leur étude que la résistance à la compression est très influencée par la variation de la teneur en fines, à cet effet, des bétons ont été formulés avec les sables de concassage. Ces bétons ont été réalisés avec différentes teneurs en fines, de l'ordre de (0, 5, 10, 15 et 20%). Ils ont remarqué une ressemblance sur les allures des courbes, indépendamment de l'âge du béton. De plus, la résistance à la compression atteint la valeur maximale avec un taux de fines de 15% pour tous les mélanges.

Un autre travail a été réalisé par (Benabed *et al.* 2016) sur les bétons autoplaçants fabriqués avec de sable de concassage. Ces auteurs ont constaté que la résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours augmente jusqu'à un maximum lorsque la teneur en fines calcaires dans le sable de concassage est de 10%. Pour un taux de fines calcaires supérieurs à 10%, la résistance à la compression diminue. Ceci est probablement dû à une pâte de ciment insuffisante pour recouvrir toutes les particules de sable broyées, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la compression. Pour les éprouvettes sans ou avec seulement 5% de fines de calcaire, il n'y'a pas assez de particules fines pour combler tous les vides entre la pâte de ciment et les particules de sable concassées et, par conséquent, des valeurs de résistance à la compression inférieures à celles des éprouvettes contenant 10% de fines de calcaire (Figure I.9).

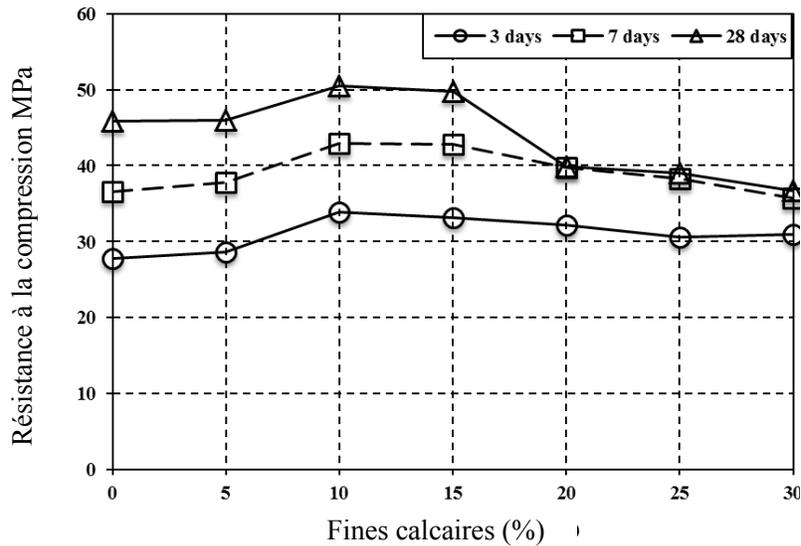


Figure I. 9 : Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benabed et al. 2016).

I.18.2. Résistance à la traction

Généralement la résistance à la traction des bétons autoplaçants est nettement supérieure à celle des bétons vibrés (Klug & Holschemacher 2003). (Sonebi & Bartos 1999) ont observé que la résistance à la traction à 28 jours pour les BAP (conservés dans l'eau) est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

L'utilisation de fines calcaires améliore également la résistance à la traction des bétons, d'après le travail effectué par (Gesoglu *et al.* 2012) sur l'effet des ajouts sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Ils ont remarqué que la résistance à la traction des bétons présente relativement la même tendance avec la résistance à la compression ; les valeurs maximum de la résistance à la traction ont été atteintes avec un taux de fines calcaires de 10% substitué au ciment. (Figure I.10).

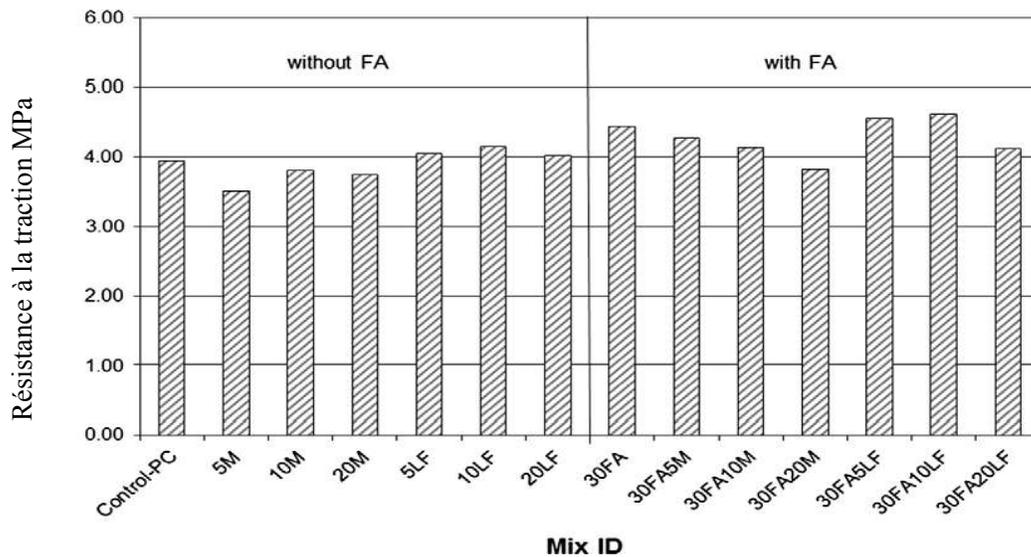


Figure I. 10 : Variation de la résistance à la traction en fonction de pourcentage des fines calcaires(Gesoğlu et al. 2012).

Les mêmes résultats ont été trouvés par d'autres chercheurs en utilisant de sable concassé,(Benabed *et al.* 2016). Une substitution de 10% de sable concassé avec des fines calcaires, augmente au maximum la résistance à la flexion des bétons autoplaçants a tous les âges, au-delà de ce taux sa résistance diminue (Figure I.11).

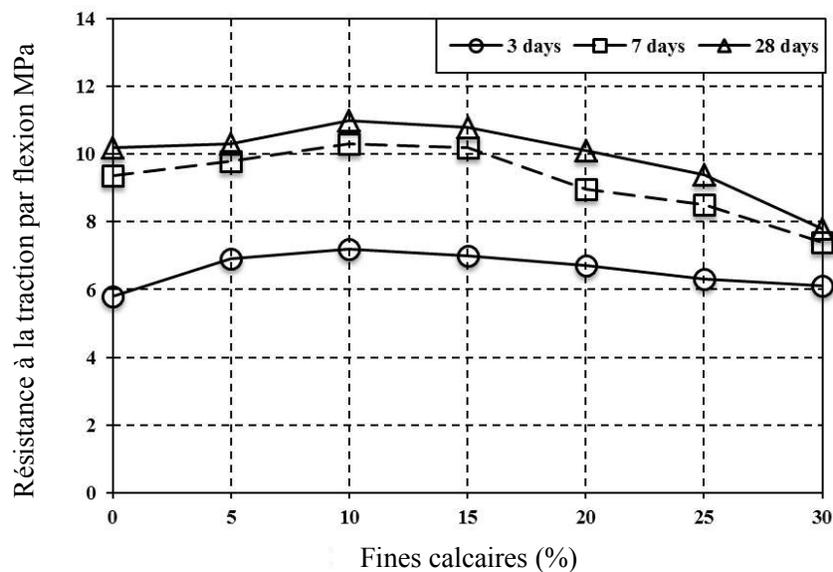


Figure I. 11 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benabed et al. 2016).

Les performances mécaniques des mortiers sont améliorées par addition de fines calcaire ou restent équivalentes à la valeur de référence. Les résistances optimales à la compression et à la flexion sont obtenues entre 0 et 25% en masse des particules fines remplacé au sable, l'addition de 15% de fines calcaire présente la valeur maximale de résistance à la traction des mortiers. Ceci peuvent être interprété comme étant dû à l'effet de remplissage de vide et au renforcement de la pâte de ciment (et/ou au renforcement de la liaison pâte de ciment/agrégat de sable) permis par la présence de fines calcaire.(Benachour *et al.* 2008).

(Imen *et al.*) ont étudié l'influence des fillers calcaires de sables de concassage à différents taux de 0 et 24% sur les performances mécaniques des bétons. Ils ont remarqué que, les résistances mécaniques sont améliorées avec l'augmentation de taux de fillers. De plus, les fillers calcaires ajoutés en quantité n'altèrent pas significativement la résistance à la traction.

I.18.3. Module d'élasticité E

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les granulats qui occupent environ 70% du volume, le type et la quantité de ces derniers ainsi que leur module d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton, choisir des agrégats ayant un module élevé augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticité peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires.

(Persson 2001) a constaté que le module d'élasticité d'un béton autoplaçant ne diffère pas significativement de celui du béton ordinaire, tandis que d'autres chercheurs ont indiqué que le module élasticité est plus faible par rapport à ceux des bétons vibrés(Assié 2004; Holschemacher 2004).

(Domone 2007), a analysé plus de 70 études, il a montré que le module d'élasticité des BAP diffère légèrement de celui des BV si le rapport G/S est inférieur ou égal à 1. Par contre, si le rapport G/S est plus élevé pour les BV que pour les BAP, les valeurs du module d'élasticité des bétons autoplaçants sont plus faibles que celles des bétons vibrés.

(Assié *et al.* 2006) ont trouvé que, d'une part et malgré qu'avec un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires. D'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

(Felekoğlu *et al.* 2007) ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel. En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte dans les bétons autoplaçants.

Dans le même contexte, l'utilisation de granulats calcaires peut aussi influencer sur le module d'élasticité des bétons, selon le travail récent effectué par (Aquino *et al.* 2010) ont montré que la résistance et le module d'élasticité augmentent avec l'augmentation de pourcentage de sable calcaire. Cette augmentation est relativement faible mais le béton testé devient plus élastique et résistant avec la présence de calcaire.

(Bonavetti *et al.* 2000) ont étudié l'influence initiale de cure sur les propriétés mécaniques, notamment le module d'élasticité des bétons fabriqués avec des ciments au calcaire ; trois types de cure ont été considérés dans cette étude (cure complète, cure dans l'air et cure humide). Ils ont remarqué que les bétons fabriqués à base d'ajout calcaire, présentaient un module d'élasticité légèrement faible par rapport au béton de référence, pour une cure humide et cure complète à l'âge de 28 jours. Par ailleurs, une augmentation du module d'élasticité des bétons au calcaire est observée à tous les âges dans le cas de la cure à l'air libre. La valeur du module d'élasticité de ce béton a augmenté de 8% et 13% par rapport au béton de référence à 28 jours (Tableau I.2).

Tableau I. 2 : Module d'élasticité relatif (Bonavetti *et al.* 2000).

Age du béton	Cure complète			Cure humide			Cure dans l'air		
	C0	C10	C20	C0	C10	C20	C0	C10	C20
3 jours	1,00	1,11	1,14	-	-	-	0,95	1,08	1,09
7 jours	1,00	1,07	1,09	-	-	-	0,88	0,94	0,97
28 jours	1,00	0,97	0,93	0,91	0,89	0,88	0,75	0,80	0,84

Avec : C0, C10 et C20 c'est le taux de fines calcaire.

Dans le travail de recherche effectué par (Benachour *et al.* 2008) sur l'influence des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés des mortiers, une évolution de module d'élasticité est remarquée avec l'augmentation de taux de substitution de fines calcaires. Cette évolution suit symétriquement la variation de rapport (E/C) et la porosité: plus la porosité augmente, plus le mortier devient flexible. L'addition de 15% des fines calcaires dans le sable augmente au maximum le module d'Young. Au-delà de ce taux de substitution, le module d'élasticité diminue de 23% par rapport au mortier de référence (Figure I.12).

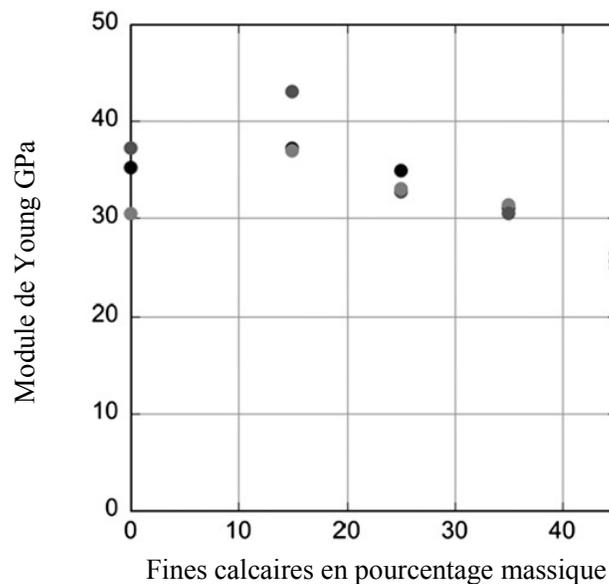


Figure I. 12 : Variation module d'élasticité en fonction de pourcentage des fines calcaires (Benachour et al. 2008)

I.18.4. Retrait

Pour les déformations à jeune âge (retrait plastique), plusieurs travaux ont comparé ce type de retrait du BAP à celui du béton vibré (Pentti 1999; Turcry 2003). Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (Figure I.13).

(Turchy 2003) a remarqué sur les résultats des travaux de recherches, que l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés (Figure I.14). Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par

conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant.

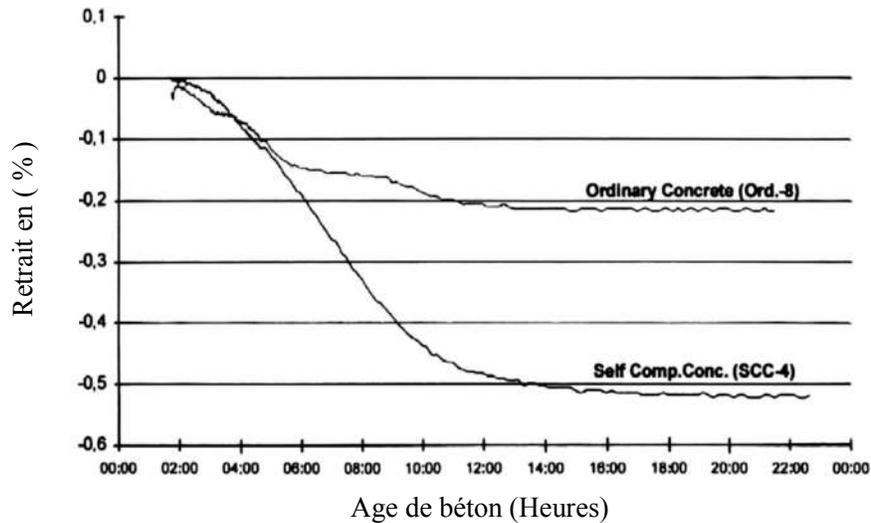


Figure I. 13: Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire (Pentti 1999).

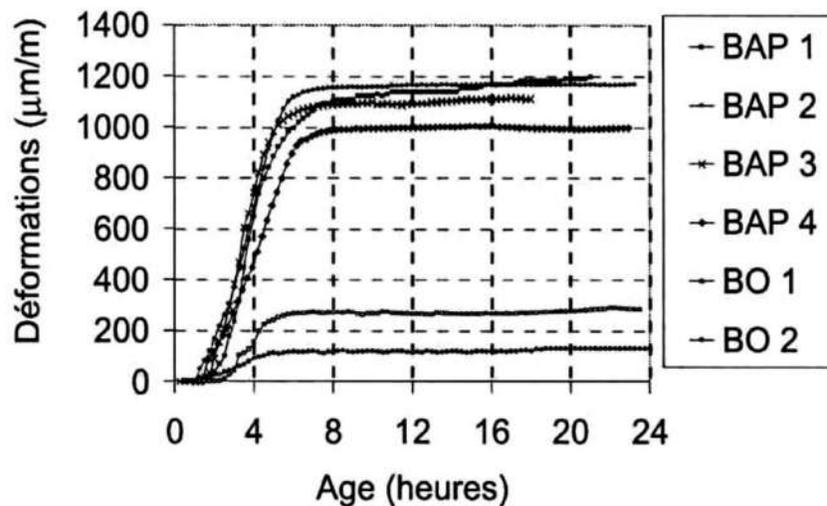


Figure I. 14 : Retrait plastique des formules de BAP et de béton ordinaire (Turcry 2003).

L'étude réalisée par (Celik & Marar 1996) sur l'effet d'ajout des poussières issues des roches calcaires concassées sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons. Le sable a été partiellement remplacé par des taux de fines de (5, 10, 15, 20, 25 et 30%). Une augmentation de retrait de séchage est remarquée sur les bétons fabriqués avec des taux de poussières allant de 0 à 10%, au-delà de ce taux de substitution on constate une diminution

progressive du retrait (Figure I.15). Les bétons les plus résistants sont les mélanges les plus compacts, les moins poreux et qui s'opposent le plus à la pénétration de l'eau. Cependant, ce sont les mélanges qui ont enregistré le retrait le plus élevé.

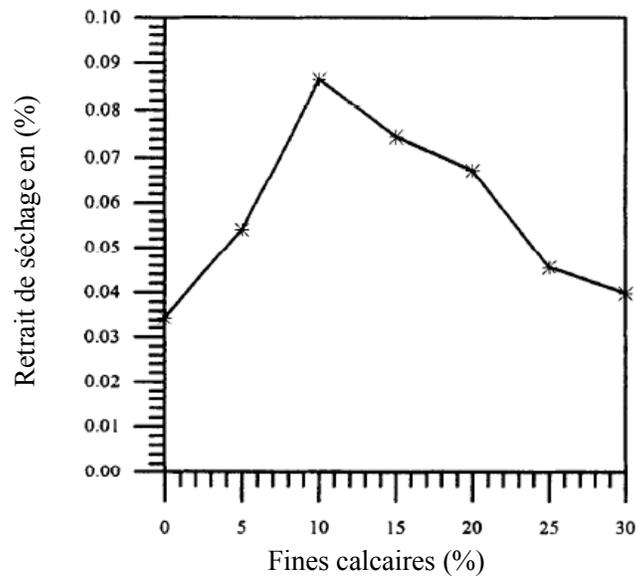


Figure I. 15 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières calcaires ajoutées (Celik & Marar 1996).

(Sonebi & Bartos 1999) ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). L'augmentation du volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L conduisent à diminuer le retrait de séchage (Neville *et al.* 2000). Un effet positif des fines calcaires a été remarqué sur le retrait de séchage des BAP ; le mélange contenant des fines calcaires présente des valeurs de retrait de séchage faible par rapport à celle de référence. La valeur la plus faible a été enregistrée avec un taux de fines de 40% (Figure I.16). L'ajout de fine calcaire affecte le retrait de séchage s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquate (Bui & Montgomery 1999).

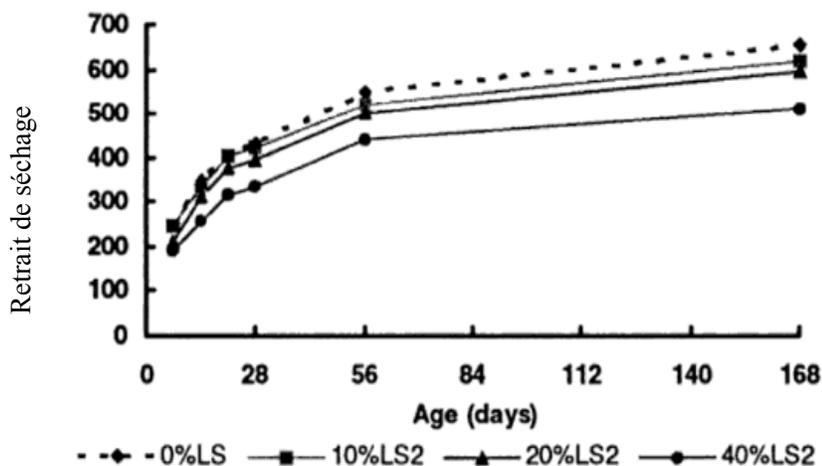


Figure I. 16 : Retrait de séchage en fonction du taux de fines calcaires (Bui & Montgomery 1999).

I.19. Conclusion

Dans cette lecture de la littérature sur les BAP, on peut sortir avec une conclusion donnant les points essentiels de ce qu'il faut retenir. C'est que les BAP nécessitent la fluidité et la stabilité qui sont des propriétés apparemment contradictoires, la formulation des BAP est donc relativement complexe elle nécessite de trouver un bon compromis. La diversité des formulations, toutes basées sur l'expérimentation, et convergeant vers un seul but, la satisfaction des trois caractéristiques du BAP à savoir : la capacité au remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

Différentes méthodes de formulation ont été proposées à partir d'une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une optimisation du squelette granulaire, ces méthodes demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP. A l'heure actuelle, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée

Cette recherche bibliographique a monté également l'intérêt de l'incorporation de additions minérales particulièrement les fines issues des roches calcaires, et leur effets sur certaines propriétés des mortiers et bétons autoplaçants à l'état frais et durci.

CHAPITRE II : DURABILITE

II.1. Introduction

La durabilité du béton pour ouvrages caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité et confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement le plus long temps possible. La durabilité d'une structure en béton est liée étroitement à sa perméabilité. En pratique, la durabilité dépend du choix des matériaux, de la composition du béton, ainsi que du degré de supervision durant la mise en place, la compaction et la cure du béton.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou phénomène interne au béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimique ou mécaniques.

La durabilité des matériaux cimentaires dépend largement de leur résistance à l'intrusion d'espèces agressives dans leurs pores. Ces agents agressifs peuvent être présents sous forme liquide ou gazeuse, leurs transports dans le béton se fait par l'intermédiaire du réseau des pores dans la matrice du ciment ou par les microfissures. La perméabilité de ces agents dans le béton est fortement influencée par le volume, la dimension la continuité et la connectivité des pores (Figure II.1).

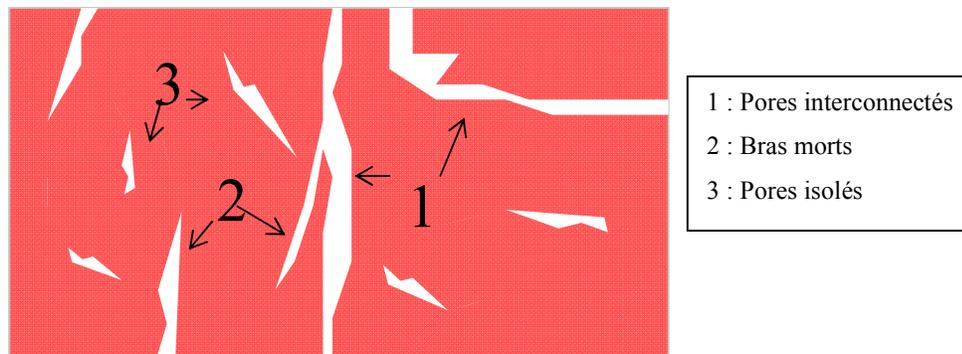


Figure II.1 : Représentation schématique d'un solide poreux et différent type des pores.(Ollivier & Vichot 2008)

La durabilité du béton est ainsi intimement liée à ses capacités d'échanges avec le milieu extérieur qui sont conditionnées par la nature des phases en présence, mais aussi par les caractéristiques de sa structure poreuse. La recherche d'une forte compacité sera toujours une condition nécessaire pour une bonne durabilité. Le béton étant un matériau composite

associant une phase granulaire et une phase liante, sa structure poreuse dépend de l'arrangement granulaire et de la structuration de la phase liante.

II.2. Porosité

II.2.1. Porosité et distribution des pores

La pâte de ciment durci est un matériau poreux, composé de deux types de pores notamment les pores capillaires et les pores de gel C-S-H, les pores capillaires ont un diamètre de $1,3 \mu\text{m}$. Ils représentent la partie du volume brut qui n'a pas été rempli par les produits de l'hydratation (Neville *et al.* 2000). Ces produits occupent plus du double du volume de la phase solide initiale. Les dimensions des pores capillaires interconnectés sont principalement responsables de la perméabilité du pâte durcie et de sa vulnérabilité (Figure II.2).

Le volume des pores du gel C-S-H est plus petit que le volume des pores capillaires, et sont classés dans la région de $0,0015$ et $0,0020 \mu\text{m}$ de diamètre. La quantité et les dimensions de ces pores dans la matrice cimentaire dépend de plusieurs, tel que : le type de ciment utilisé, le rapport E/C, l'âge et le taux d'hydratation ainsi que les premiers sept jours qui sont considérés comme la période critique où le système des pores de la pâte de ciment se forme et se structure (Neville *et al.* 2000).

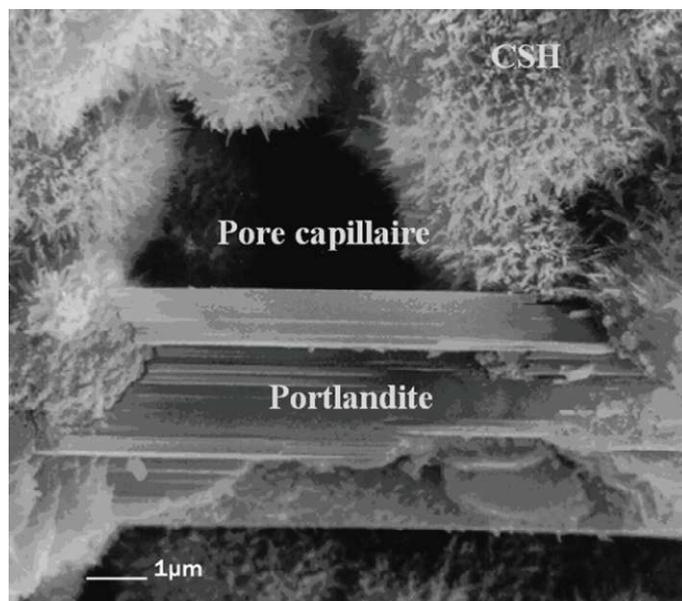


Figure II.2 : Structure des pores dans une pâte de ciment (Ollivier & Vichot 2008)

II.2.2. Connectivité et tortuosité

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci, peut être aussi caractérisée à travers des paramètres tels la connectivité ou la tortuosité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton (Figure II.3).

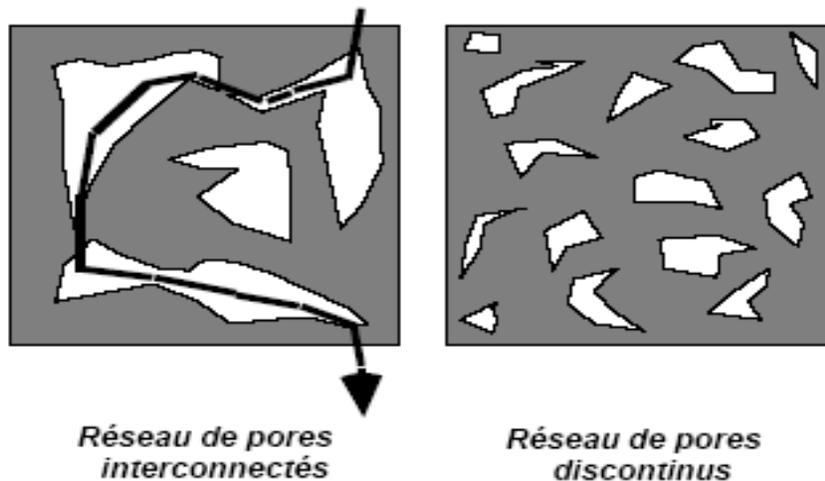


Figure II.3 : Représentation schématique d'un solide poreux interconnecté perméable et un solide poreux imperméable (Gagné 2008).

La connectivité est un paramètre microscopique qui caractérise le degré avec lequel une structure est connectée ; elle peut être définie par la relation suivante :

$$C = b - n + 1 \quad (\text{III.1})$$

Où :

b : nombre de branches (pores, bras, cavités).

n : nombre de nœuds connectés aux différentes branches.

La tortuosité T du milieu caractérise les obstacles ou cheminement de fluide dans la structure poreuse ; elle est définie comme un rapport de la distance parcourue par le fluide L_e sur la surface effective du déplacement L , ou bien le carré de ce rapport. Elle est définie par Garman est donnée par la relation suivante :

$$T = (L_e / L)^2 \quad (\text{III.2})$$

Où :

L_e : longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon.

L : longueur de l'échantillon poreux ou distance parcourue par le fluide dans la direction de l'écoulement.

II.3. Mécanisme de transport dans le béton

Le béton est un matériau poreux, composé d'une phase solide et d'un espace poreux ou espace des vides. Deux grandeurs physiques caractérisant l'aptitude des bétons à résister l'intrusion d'agent extérieures plus au moins agressive sont la perméabilité et la diffusion. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte – granulats.

II.3.1. Perméabilité

La perméabilité d'un matériau est définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Il s'agit donc d'une propriété macroscopique des matériaux poreux ayant une porosité ouverte interconnectée. Les bétons durables sont, en général, des bétons de faible perméabilité dans la mesure où la faible perméabilité limite la pénétration des agents agressifs au sein du béton. Cette condition n'est pas toujours suffisante, car les phases solides du béton peuvent être plus ou moins réactives vis-à-vis des agents agressifs.

La durabilité des bétons dépend de sa perméabilité, (Neville *et al.* 2000) a suggéré que l'importance d'éliminer les capillaires continus pourrait être considérée comme une condition nécessaire pour que le béton soit classé de bonne qualité.

La perméabilité k d'un matériau poreux est définie par la relation de Darcy qui exprime le débit volumique Q d'un fluide de viscosité μ qui traverse une épaisseur dx de matériau de section apparente A sous la différence de pression dp (Figure II.4).

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (\text{III.3})$$

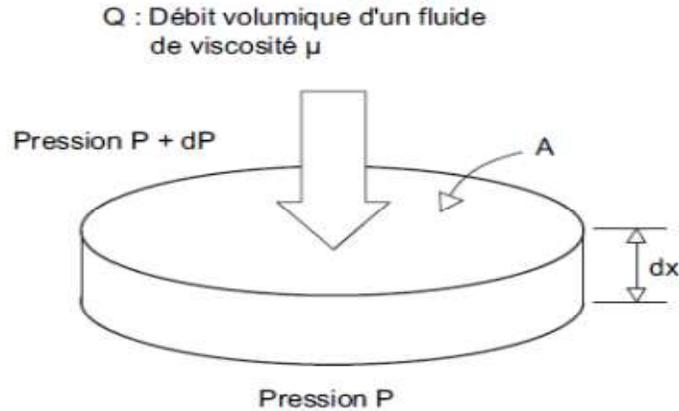


Figure II.4 : Définition de la perméabilité (Ollivier & Vichot 2008).

II.3.2. Diffusion

La diffusion comme la perméabilité, est liée aussi à la structure poreuse des bétons ; le mécanisme de transport ou transfert par diffusion est différent de celui de perméabilité. Selon (Ollivier & Vichot 2008), la diffusion désigne le processus de transport d'une espèce chimique à travers un solide poreux à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration.

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe une différence de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone moins concentrée jusqu'à ce qu'il y ait équilibre des concentrations.

Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse.

Le premier mode concerne le transport d'espèces ioniques en solution dans la phase aqueuse interstitielle ; il intervient par exemple lors de l'attaque du béton par les sulfates de l'eau de mer ou par l'acide carbonique d'un sol riche en matières organiques. Le processus est caractérisé par un coefficient de diffusion D défini par la première loi de Fick :

$$J_x = -D_f \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{III.4})$$

Où .

J_x : Flux du constituant dans la direction x.

D_f : Coefficient de diffusion.

$\frac{\partial c}{\partial x}$: Gradient de concentration dans direction de x.

Les transports de gaz dans les bétons ne se produisent généralement pas par écoulement (sous l'effet de différences de pression) mais plutôt par diffusion dans l'air contenu dans les pores ou les fissures du matériau.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant. Les règles applicables pour les bétons courants (ordinaire) restent donc normalement applicables aux BAP. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz et à l'eau), la diffusion des ions chlore, l'absorption capillaire d'eau, la carbonatation, la résistance aux agents agressifs et la résistance au gel - dégel. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- Un volume de pâte élevé.
- La présence d'additions minérales en quantité importante.
- Un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

II.4. Effet des fillers calcaire sur la durabilité des bétons et de BAP

II.4.1. Porosité

La porosité des bétons a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches, notamment l'effet des additions minérales. La substitution du ciment Portland par des fillers calcaires a été étudiée sur des pâtes de ciment par (Guemmadi *et al.* 2008). Quatre fillers de finesses variables ont remplacé le ciment avec les pourcentages suivants : 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 40%. Les résultats ont révélé que la substitution du ciment portland par les fillers calcaires les plus fins, à un taux de 15%, diminue la porosité totale et améliore la résistance à la compression, notamment si les fines ont une surface spécifique élevée.

(Tsvivilis *et al.* 1999) ont effectué des essais sur des bétons ordinaires, confectionnés avec deux types de ciment (C1 et C2) dont les compositions chimiques et minéralogique sont différentes, et trois types de fillers calcaires (L1, L2 et L3) avec un taux élevé de CaO. Ils ont trouvé que les bétons à base de ciment avec ajout calcaire ont une porosité inférieure à celle

comparée avec les bétons avec des ciments purs, et la taille moyenne des pores semble être affectée par le contenu de l'ajout calcaire. Les ciments contenant 10% de calcaire ont une taille moyenne des pores inférieure comparée à celle des ciments purs. L'augmentation de la quantité d'ajout calcaire donne une augmentation relative de la taille moyenne des pores. Avec 35% d'ajout calcaire, des valeurs extrêmement élevées de taille moyenne de pores sont obtenues. Cette dernière ne semble pas être liée à la qualité du calcaire tandis qu'elle est affectée par la finesse du ciment.

Les échantillons de béton fabriqués avec des fines calcaires présentent une porosité inférieure à celle des échantillons fabriqués seulement avec de ciment ; les résultats ont révélé que l'échantillon contenant 10% de fines calcaires présentait la plus faible valeur de la porosité 11,6% (Tsvivilis *et al.* 2003).

Les tests de Prosimètre à mercure sur des échantillons de bétons, montrent que les fines calcaires produisent un meilleur tassement des particules, ce qui entraîne une porosité inférieure et une structure plus fine dans les BAP que celle dans les bétons ordinaires. (Valcuende & Parra 2010)

(Barluenga *et al.* 2015) ont étudié les propriétés à l'état durci des BAP contenant des additions minérales substituées au ciment. Les résultats de cette étude, montrent que le remplacement partiel du ciment par 50% de fines calcaires a légèrement augmenté la porosité et la perméabilité à la vapeur d'eau des BAP.

II.4.2. Perméabilité à l'eau

La pénétration d'eau, ions chlorure ou autres substances agressives dans le béton, est le facteur le plus important du processus physique et chimique de détérioration, et c'est la microstructure du béton qui contrôle principalement les phénomènes physique et chimique associés avec le mouvement de l'eau et le transport des ions dans le béton. La microstructure est affectée par plusieurs facteurs, notamment la composition chimique de ciment et les additions minérales, le rapport E/C et la dimension et la répartition des pores dans la matrice cimentaire.

(Tsvivilis *et al.* 2003) ont étudié la perméabilité des bétons confectionnés avec des ciments au calcaire, en utilisant deux classes de ciment et une variante d'ajout calcaire. Les résultats de l'étude ont montré que les bétons confectionnés avec les ciments au calcaire présentent des valeurs inférieures de la perméabilité à l'eau comparée à celles des bétons confectionnés avec des ciments sans ajout. Le béton avec 20% d'ajout calcaire présente la plus faible valeur de la

perméabilité à l'eau. Ils ont conclu que l'ajout calcaire a un effet positif sur la perméabilité à l'eau des bétons (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Variation du coefficient de perméabilité à l'eau(Tsivilis *et al.* 2003).

Classe de résistance	Code	% d'ajout calcaire	Perméabilité a l'eau kw (m/s × 10 ⁻¹¹)
42,5R	LC1	0	2,39
	LC2	10	2,30
	LC3	15	2,22
	LC4	20	2,00
2,5R	LC5	20	1,81
	LC6	25	2,07
	LC7	35	2,23

(Menadi *et al.* 2009) ont observé qu'il y a une réduction de la pénétration d'eau à 90 jours de cure, pour tous les échantillons de béton contenant des fines calcaires, la pénétration d'eau était maximale pour tous les bétons confectionnés avec le ciment A avec et sans fines calcaires. Tandis que, les plus faibles valeurs de la pénétration d'eau ont été observées pour les bétons fabriqués avec les ciments C et D avec et sans fines calcaire. Ils ont montré également que l'incorporation de 15% des fines calcaires substituées au sable de concassage pour ces deux types de ciment ont donné des pénétrations similaires et l'incorporation des fines calcaires substituées au sable de concassage jusqu'au 15% dans les bétons pour tous les types de ciment, peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et réduire la perméabilité à l'eau (Figure II.5).

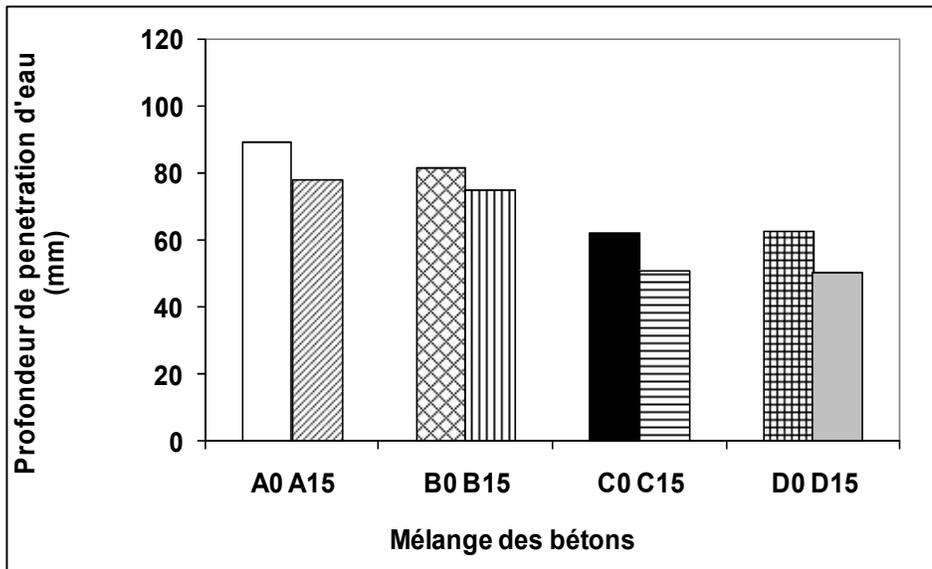


Figure II.5 : Profondeur de la pénétration d'eau des différents bétons à 90 jours (Menadi *et al.* 2009).

II.4.3. Perméabilité au gaz

Des résultats (Zhu *et al.* 2001; De Schutter *et al.* 2003) relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés (Figure II.6). Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales dans les BAP.

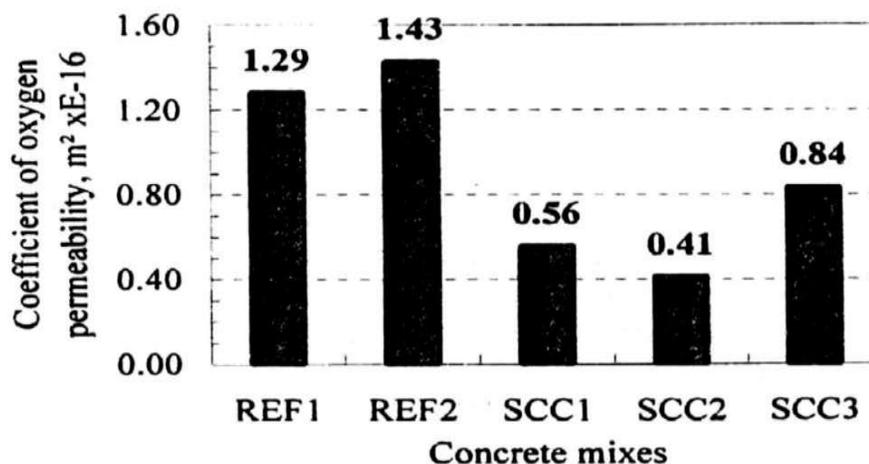
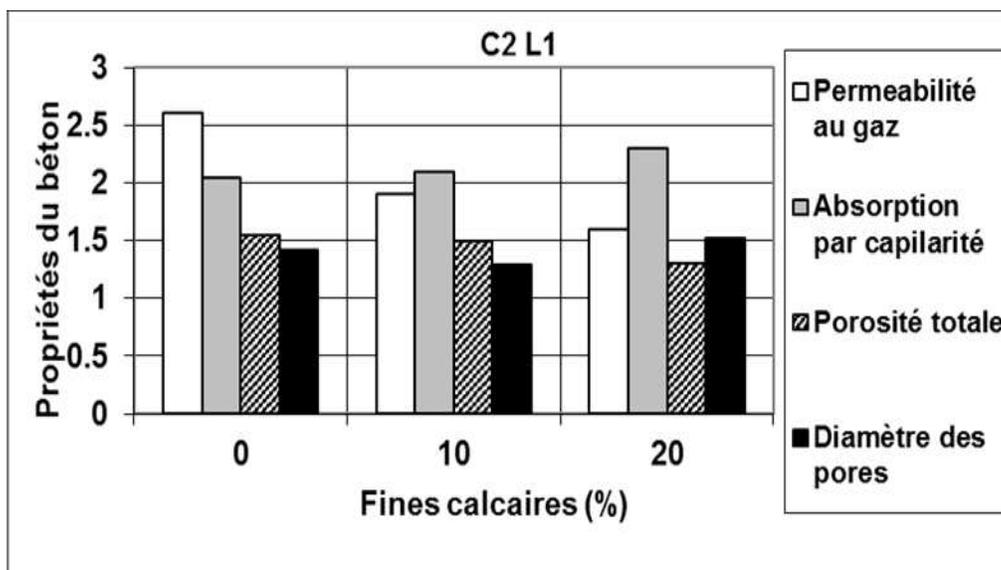


Figure II.6 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants (Zhu *et al.* 2001).

Une autre étude effectuée sur des BAP (Tragardh 1999) a montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. Il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité de ces bétons.

Selon les travaux de recherche par (Tsivilis *et al.* 2003) sur la perméabilité au gaz, les bétons confectionnés avec des ciments au calcaire, présentent des valeurs élevées de perméabilité au gaz, comparées à celles confectionnées avec seulement des ciments purs tandis qu'une réduction sur la valeur du coefficient de perméabilité au gaz est remarquée pour l'échantillon de béton contenant 35% d'ajout calcaire.

D'autres résultats obtenus par le même auteur (Tsivilis *et al.* 1999) relatifs à la perméabilité au gaz des bétons montrent que, la qualité du ciment affecte de manière significative la perméabilité au gaz, et l'addition des fines calcaire peut réduire la perméabilité du béton et particulièrement pour les ciments contenant un pourcentage de C_3A élevé. De façon générale, selon la qualité du clinker et la finesse du ciment, le béton à base du ciment au calcaire avec une teneur optimale réduit sa perméabilité au gaz (Figure II.7).



C 2 L1 : Ciment type 2, Filler calcaire type 1

Figure II.7 : Effet de la quantité d'ajout calcaire sur les propriétés du béton (Tsivilis *et al.* 1999).

II.4.4. Diffusion des ions chlore

Les ions chlore peuvent provenir de diverses sources extérieures par exemple ; sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles. La durabilité du béton armé dépend principalement de sa résistance et de sa perméabilité à la pénétration de ces agents agressifs. La microfissuration et les pores ouverts sont les chemins préférés pour la migration des ions chlores. Pour un béton peu perméable, et avec une compacité élevée, les réactions chimiques entre les ions chlores et la pâte de ciment sont négligeables cité par (Ghrici *et al.* 2007).

La présence des fillers calcaires dans le mélange peut influencer sur le coefficient de diffusion des ions chlores dans le béton.(Bonavetti *et al.* 2000) ont montré que la profondeur de la pénétration des ions chlore dans le béton ordinaire augmente avec l'augmentation du pourcentage de calcaire (0%, 10% et 20%) dans le cas de la cure humide tel qu'illustre aussi la (Figure II.8). Cette augmentation est due à l'effet de dilution sur l'accélération d'hydratation due à la présence des fillers calcaires. Par ailleurs, pour les bétons conservés à l'air, la pénétration des ions chlorure est supérieure elle est de 7 et 30 mm pour les bétons sans addition et de 10 à 15 mm et 17 à 20mm pour 10% et 20% de fines calcaires respectivement. Ces résultats montrent que la pénétration des ions chlorure est affectée aussi par le mode de cure.

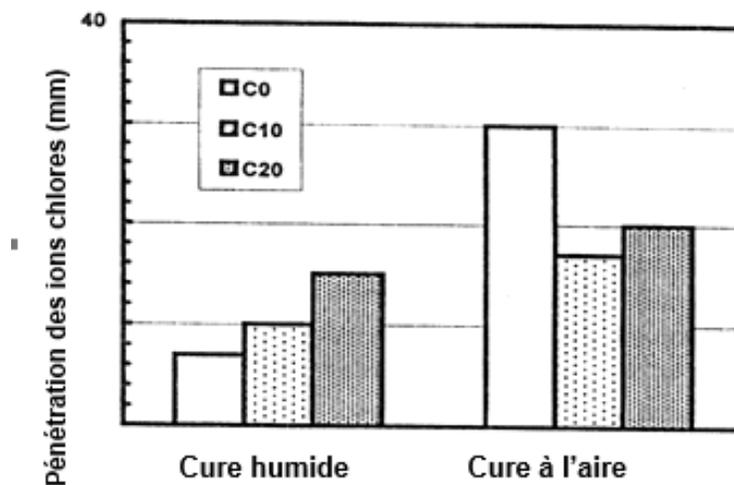


Figure II.8 : Pénétration des ions chlore des bétons après 45 jours d'immersion dans une solution avec 3% de NaCl (Bonavetti *et al.* 2000).

(Menadi *et al.* 2009) ont rapporté que tous les bétons confectionnés avec les différents types de ciments avec et sans fines calcaires substituées au sable de concassage, donnent des valeurs élevées des charges passées au-dessus de 4000 coulomb, ce qui indique la faible résistance à la pénétration des ions chlorure. Cela pourrait attribuer au rapport élevé de E/C (0,65). Ils ont conclu que l'utilisation des bétons à base de sable concassé contenant 15% de fines pour les ouvrages exposés dans des environnements marins devrait être limitée.

D'autre part, la perméabilité aux ions chlorure diminue considérablement lorsque des additions minérales sont utilisées dans la production des BAP. Le béton contenant 10% de fines calcaires présente une diminution de la diffusion des ions chlorure par rapport au béton de référence. L'addition de laitier et la cendre volante ont montré de meilleures performances que les autres fillers. Les mélanges de BAP ont été évalués en tant que bétons « à faible perméabilité aux chlorures » selon les critères d'évaluation ASTM C 1202-94, avec moins de 2000 coulombs de charge totale passant. Les résultats des tests de perméabilité aux ions chlorure étaient compris entre 116 et 1467 coulombs (Figure II.9)(Uysal *et al.* 2012).

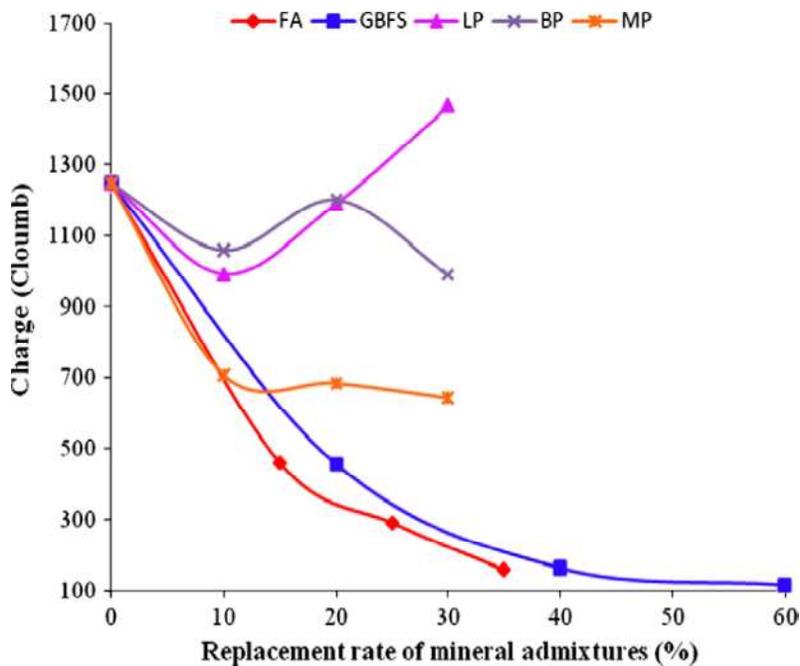


Figure II.9 : Perméabilité aux ions chlorure des BAP des différents types d'additions minérales à différents taux de remplacement (Uysal *et al.* 2012).

II.4.5. L'absorption d'eau

Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celle des bétons vibrés.

D'après (Boel *et al.* 2002), l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés. Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C par suite de l'augmentation du nombre des pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion.

Cependant, d'autres résultats (Zhu *et al.* 2001) démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes (Figure II.10).

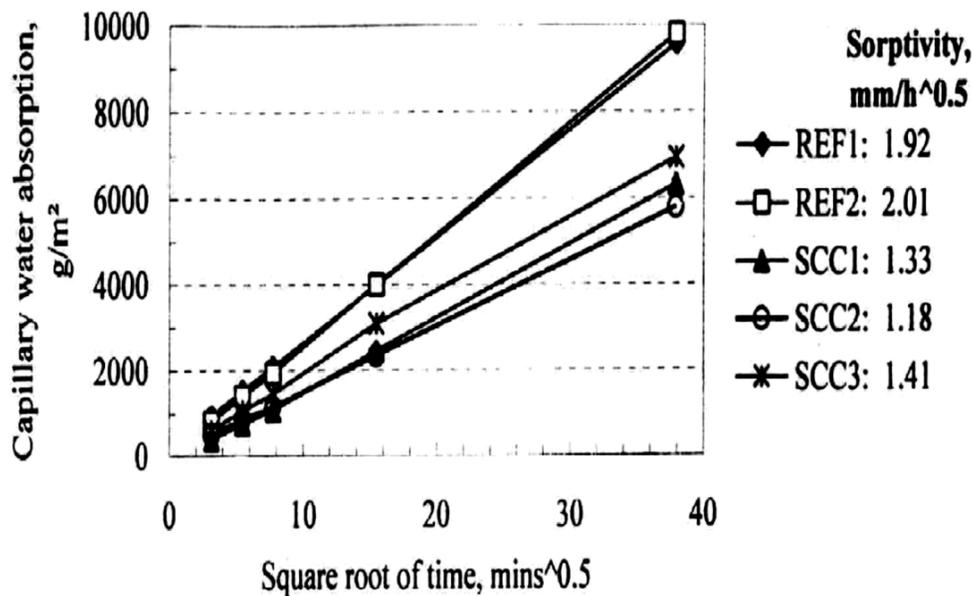


Figure II.10 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP et deux bétons vibrés (Zhu *et al.* 2001).

Le même résultat a été remarqué par (Tsivilis *et al.* 2003). Ils ont montré que l'absorption d'eau par capillarité des bétons ordinaires fabriqués avec des ciments contenant des fines calcaires est légèrement inférieure en comparaison avec celle des bétons sans fines calcaires. Ils ont conclu que l'ajout calcaire a un effet positif sur la sorptivité.

II.4.6. Résistance aux sulfates

L'attaque aux sulfates se produit généralement dans les structures exposées à des environnements riches en solution de sulfates comme l'eau de mer, l'eau de rivière et les eaux souterraines. Ces ions de sulfates pénètrent dans le mortier ou béton et réagissent avec certains produits hydratés du ciment. Le cristal de calcium monosulfoaluminate présent dans la pâte de ciment se convertit en gypse ou étringite. Ces changements volumétriques provoquent l'expansion et des contraintes internes, qui affaiblissent et détruisent les liens ou la cohésion de la pâte de ciment et par conséquent abiment le béton. Les couches de surface sont affectées en particulier et sont soumises à un niveau d'effritement important qui augmente les conditions d'exposition du béton intérieur.

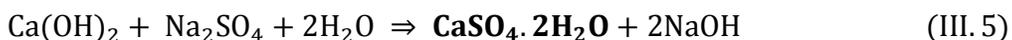
La réaction des sulfates est généralement connue sous deux formes :

- Les ions de sulfates réagissent avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 pour former le gypse.
- Les ions de sulfates réagissent avec le C_3A pour former le calcium sulfoaluminate (étringites).

Les modes d'action des sulfates dans les bétons sont complexes et nombreux, et n'ont pas encore tous été identifiés. Cependant, la chimie minérale et certaines techniques d'investigation récentes ont permis de reconnaître certains composés, d'expliquer leur formation, et de proposer des scénarios cohérents avec les modes de dégradation observés. Outre les constituants du béton, dont les produits d'hydratation (C-S-H et portlandite), trois composés, qui se forment en présence de sulfates, jouent un rôle important dans les attaques sulfatiques externes : le gypse, l'étringite, et dans certains cas, la thaumasite. Cela peut entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton. Si le premier des trois phénomènes est le plus connu et caractéristique, les deux autres ne sont pas à négliger dans la pratique ; Il existe donc déjà dans le béton sain. Celui qui se forme en présence d'une solution riche en sulfates résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la portlandite Ca(OH)_2 , selon la réaction suivante :

- Formation de gypse secondaire

La formation de gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution ionique entre la portlandite et les sulfates. Elle s'établit dans le cas du sulfate de sodium (Na_2SO_4).



NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des C-S-H.

CaSO₄.2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

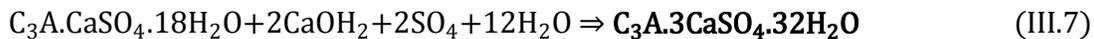
- Formation d'étringite secondaire

- Soit à partir du C₃A résiduel :



- Soit à partir des aluminates hydratés:

(Monosulfoaluminates)



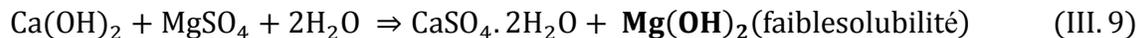
(C₄AH_x)



La précipitation rapide de l'étringite conduit à la formation de cristaux très fins (étringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de trois à huit fois supérieur (suivant qu'il s'agit du C₃A ou du C₄AH₁₃) au volume du solide initial.

Le sulfate de magnésium est très fortement agressif car il donne double action, déformation d'étringite et de substitution des ions Ca²⁺ en Mg²⁺.

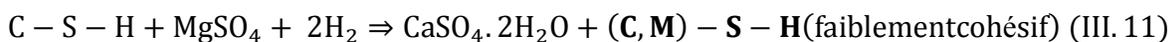
- Formation de produit expansif



Mg(OH)₂ est caractérisé par une faible solubilité et un faible pH.



Substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺ dans les C-S-H :



Des différentes tendances ont été remarquées dans des résultats de la littérature, sur l'effet de l'addition calcaire dans le ciment ou béton vis-à-vis la résistance au sulfates.

(Zelić *et al.* 1999) ont conclu que l'ajout calcaire semble augmenter la résistance aux sulfates du ciment. (Gonzalez & Irassar 1998) ont étudié l'effet de variation du type du ciment et en particulier la composition chimique du clinker (C_3S et C_3A) ainsi que le pourcentage de l'ajout calcaire sur l'expansion et la résistance mécanique des éprouvettes de mortier immergé dans une solution de 5% de Na_2SO_4 . Ces résultats montrent que l'ajout de 10% de calcaire conduit à une amélioration de la performance des ciments à l'attaque des sulfates. Tandis que 20% d'ajout calcaire causent des effets néfastes sur la résistance aux sulfates. Ce comportement peut être expliqué par les changements du degré d'hydratation, de la porosité capillaire, et du type des produits d'hydratation produits en présence du calcaire.

Pendant,(Hartshorn *et al.* 1999) ont trouvé une baisse de la résistance aux sulfates des ciments, selon le taux de substitution du clinker par les fillers calcaires. Plusieurs paramètres tels que la solution utilisée, la concentration, la durée d'immersion et la dimension d'éprouvette peuvent influencer sur les résultats obtenus.

Selon des travaux de recherches récents en 2016 effectués par (Mostofinejad *et al.* 2016) ont montré, que l'utilisation des fines calcaires substituées au ciment à un taux de 15%, augmente la durabilité des bétons immergés, dans la solution de sulfates de magnésium pendant 280 jours, tandis qu'un taux de substitution de 30% induit une diminution de la durabilité des bétons.

II.4.7. Carbonatation

Toutes les considérations sur le comportement du béton, sont généralement basées sur l'hypothèse que l'air constitue le milieu ambiant, et qu'il ne réagit pas avec la pâte de ciment hydraté. Mais dans la réalité, l'air contient du CO_2 qui est en présence de l'humidité ; l'action de CO_2 se manifeste même à faibles concentrations telles celles que l'on retrouve l'air du milieu rural, ou la teneur en CO_2 est d'environ 0,03% en volume.

Le phénomène de carbonatation se produit, lorsque le dioxyde de carbone diffuse à l'intérieur du béton, en présence d'eau, il réagit en premier lieu avec la portlandite (ou chaux hydratée, $Ca(OH)_2$) pour former du carbonate de calcium (ou calcite, $CaCO_3$) selon la réaction suivante :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait que, par suite de ces transformations, le pH de la solution interstitielle passe d'une valeur de l'ordre de 13 à une valeur d'environ 9. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) est dissoute et la corrosion des armatures peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents (Neville *et al.* 2000).

Des travaux de recherches ont été effectués sur l'effet des ajouts calcaires vis-à-vis du phénomène de carbonatation. (Tsilivilis *et al.* 2000) ont étudié cet effet sur le mortier avec des différents pourcentages de calcaire (0, 10, 15, 20 et 35%) substitué au ciment ayant un rapport E/C=0,5. Ils ont observé que la profondeur de carbonatation de tous les mortiers au calcaire est nulle pendant une durée d'exposition de 9 et 12 mois dans une solution de 3% de NaCl (Tableau II.2). Par ailleurs, les mortiers contenant uniquement du ciment sans ajout de calcaire, présentent une profondeur de carbonatation de 3 et 5 mm à 9 et 12 mois de durée d'exposition respectivement.

Tableau II.2 : Profondeur de carbonatation des mortiers au ciment au calcaire
(Tsilivilis *et al.* 2000) .

Echantillon	Taux de fines calcaires %	Profondeur de carbonatation en (mm)	
		9 mois	12 mois
LC1	0	3	5
LC2	10	0	0
LC3	15	0	0
LC4	20	0	0
LC5	35	0	0

(Valcuende & Parra 2010) ont étudié la profondeur de carbonatation dans des BAP et les bétons ordinaires à différents âges et analysé également leur microstructure poreuse. Huit différents bétons contenant différents taux de fines calcaires ont été utilisés ; quatre BAP et quatre bétons ordinaires. Ils ont remarqué que pour les quatre mélanges le taux de carbonatation (profondeur de carbonatation) est plus faible dans le BAP que dans le cas des

bétons ordinaires pour les deux âges 9 et 42,5 mois (Figure II.11). Selon les tests de Prosimètre à mercure, les fines calcaires produisent un meilleur tassement des particules, ce qui entraîne une porosité inférieure et une structure plus fine dans les BAP ; l'amélioration du remplissage des particules rend également le réseau de pores plus complexe. De plus, les vibrations produites dans les bétons ordinaires facilitent le ressuage et créent des canaux de ressuage ainsi qu'un réseau de pores capillaires interconnectés, permettant la diffusion de CO_2 dans le béton.

Les différences entre les deux types de bétons tendent à disparaître à mesure que leur teneur en fines devient similaire pour les deux séries de bétons : par exemple, les valeurs de coefficient de carbonatation K est en moyenne 0,46, 0,22, 0,24, 0,15 $\text{mm} / \text{mois}^{0,5}$ plus élevé dans la série les bétons ordinaires par rapport aux bétons autoplaçants pour les mélanges 1, 2, 3 et 4, respectivement contenant le même taux de substitution.

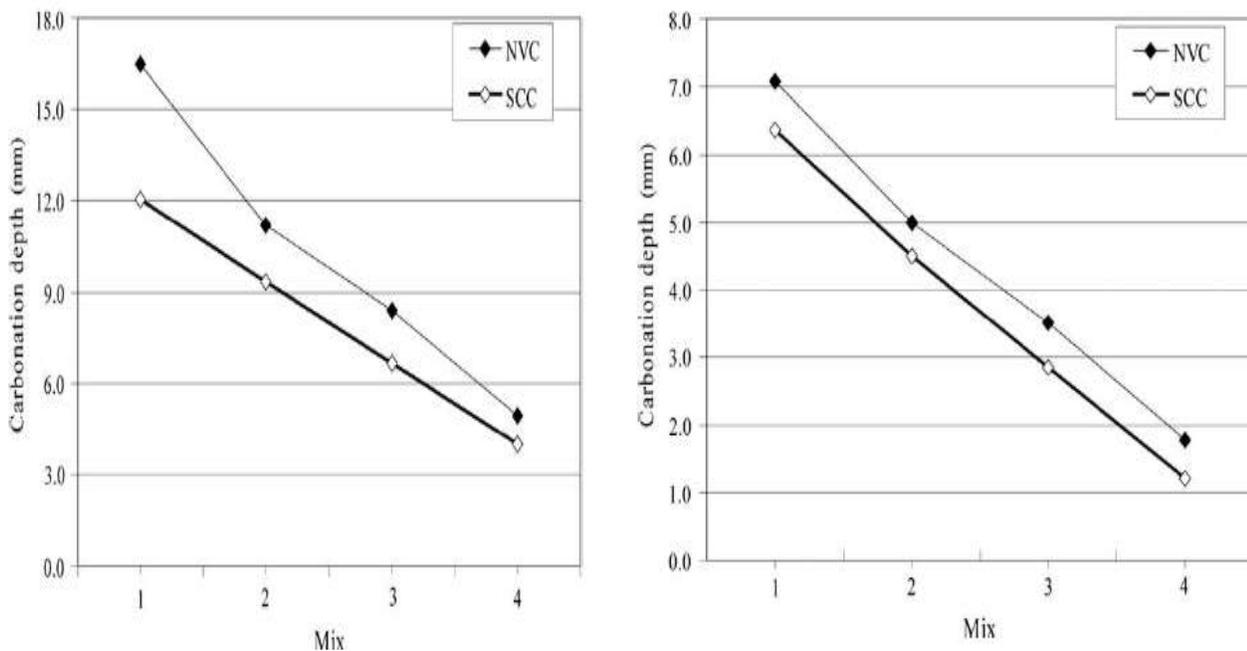


Figure II.11 : Comparaison de Profondeur de carbonatation des BAP et béton ordinaire a testés à 9 mois et 42,5 mois(Valcuende & Parra 2010) .

II.5. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux BAP, bétons de fabrication récente, par rapport à celle des bétons traditionnels, que l'on peut considérer être connues. L'étude bibliographique menée est consacrée à la présentation des propriétés physiques, mécaniques et la durabilité des bétons autoplacants ainsi que l'effet des fines calcaires sur les bétons et les BAP. On s'intéresse à la durabilité des BAP surtout vis-à-vis du phénomène de transport.

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Le béton autoplacant est apparu dans les années 90 au Japon. C'est un béton très fluide, dont la spécificité est de se mettre en place sans vibration, sous le seul effet de son poids propre. Son utilisation contribue à améliorer les conditions sur chantier. Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associé à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité. A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition.

Du point de vue mécanique, l'emploi d'additions minérales multiple le site de nucléation améliorant la résistance au jeune âge. A long terme, le comportement mécanique peut être comparé aux bétons vibrés. Mais, dans certains cas, le volume de pâte élevé peut avoir un effet réel mais limité sur le comportement mécanique entraînant soit une augmentation, soit une diminution de ses propriétés. L'ajout de l'addition minérale améliore également la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure.

**CHAPITRE III : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX
UTILISES ET FORMULATION DU BETON AUTOPLAÇANT**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse en première partie à la présentation des matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leur utilité ainsi que leurs caractéristiques et différentes propriétés. Dans la seconde partie, on présente la méthode de formulation adoptée pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.

III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CPA CEM I 42,5, avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa, une masse spécifique de 3,15 g/cm³ et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3227 cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau III.1. L'analyse chimique et minéralogique a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie d'AIN KEBIRA wilaya de SETIF.

Tableau III.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5.

Composition chimique (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
63,61	19,21	3,88	4,89	1,13	2,32	0,17	0,47	2,66
Composition minéralogique (%)								
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		
73,31		6,3		2,004		14,87		

III.2.2. Le filler

Le filler utilisé dans cette étude provient de la station de concassage d'El Hachimia wilaya de BOUIRA. Il a été récupéré au laboratoire par opération de tamisage du sable concassé (0/5) à l'aide d'une tamiseuse électrique en utilisant un tamis de 80 µm, nous avons augmenté la fréquence de la machine pour accélérer l'opération. Ce filler est d'origine calcaire et contient principalement de la calcite (CaCO₃). L'analyse chimique du filler a été effectuée

au sein du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie d'AIN KEBIRA wilaya de SETIF. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 : Composition chimique et propriétés physiques du filler.

Composition chimique (%)								
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF
44,81	10,28	3,20	2,33	1,48	0,27	0,20	0,556	36,86
Propriétés physiques								
SSB cm²/g				Masse spécifique g/cm³				
4340				2,67				

III.2.3. L'adjuvant

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés dans les bétons lors du malaxage à de faibles dosages par rapport au poids du ciment. Ils provoquent des modifications des propriétés ou du comportement des bétons, dont les superplastifiants qui permettent de donner une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaires à la fabrication d'un béton autoplaçant.

Un seul type d'adjuvant a été utilisé durant notre étude ; c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom de "MEDAFLOW 145". Selon la Notice technique, il est conçu à base de poly carboxylates d'éther, il est sous forme liquide, de couleur Brai claire et de 30% d'extrait sec. Sa densité est de 1,065±0,015, son pH est de 5 à 6 et une teneur en chlore inférieure à 1 g/l. La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW 145 est de 0,3 à 2 % du poids de ciment.

Ce type de superplastifiant permet de diminuer le rapport Eau/Ciment (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il augmente également les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme.

III.2.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est définie comme la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec du béton ou mortier, pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton. L'eau de gâchage doit être propre et exempte de toutes impuretés.

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau. Introduite dans le béton lors de sa fabrication, elle va remplir deux fonctions essentielles: une fonction physique qui confère aux bétons frais les propriétés rhéologiques d'un pseudo-liquide permettant l'écoulement et le moulage; une fonction chimique d'hydratation du ciment qui apporte la résistance mécanique. Dans cette étude et pour la préparation de différents mélanges, l'eau potable de robinet a été utilisée.

III.2.5. Les granulats

a) Sable

Pour mener cette étude, deux types de sable ont été utilisés. Le premier est un sable concassé provenant de la station de concassage d'El HACHIMIA wilaya de BOUIRA ayant un module de finesse de 3,27, et le second est un sable naturel roulé fin provenant de la sablière de BAHBAH wilaya de DJELFA ayant un module de finesse de 1,04. D'après les résultats de l'analyse granulométrique des granulats (Figure III.1) ces sables présentent une granulométrie continue. Les propriétés principales des sables utilisés sont représentées dans le tableau III.3.

b) Gravier

Le gravier utilisé est un gravier composé de deux classes granulaires. La première classe est 3/8 et la deuxième classe est 8/16, elles proviennent de la même station de concassage des roches calcaires de la région de Kaf El Assal (commune de BENI SLIMANE) wilaya de MEDEA.

Les propriétés physiques des granulats et les courbes granulométriques sont présentées dans le Tableau III.3 et la Figure III.1 respectivement.

Tableau III.3 : Propriétés physiques des granulats.

Granulats	Sable fin	Sable (0/5) concassé	Gravier (3/8) concassé	Gravier (8/16) concassé
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2700	2670	2662	2662
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1642	1546	1320	1349
Coefficient d'absorption (%)	1,5	1,7	1,6	1,6
Module de finesse	1,04	3,27	/	/
Equivalent de sable	82	78	/	/

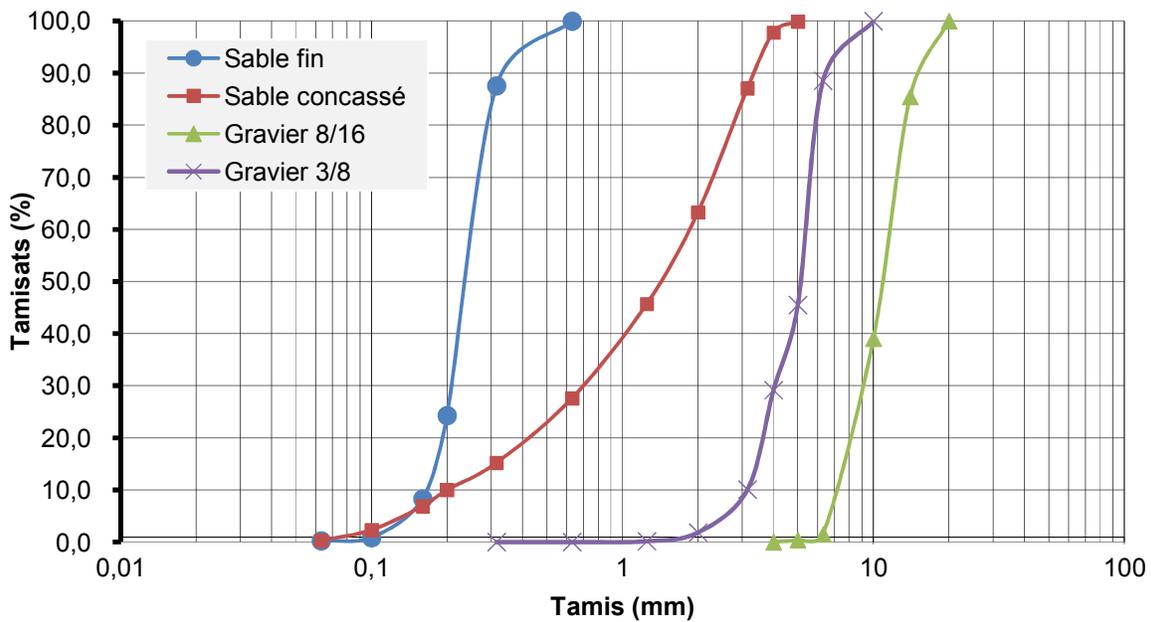


Figure III.1 : Courbes granulométriques des sables et des graviers.

Les résultats d'essais de caractérisation des granulats utilisés permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'analyse granulométrique montre que le sable concassé présente une granulométrie continue étalée. Par contre, le sable naturel roulé est caractérisé par une granulométrie serrée.

- Les valeurs de l'équivalent de sable montrent que les sables utilisés sont des sables très propres, signe d'un manque presque total de fines argileuses. Donc, ce sont des sables qui conviennent parfaitement pour des bétons de haute qualité.
- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse M_f . Plus le module de finesse est faible plus le sable est riche en éléments fins. Dans le cas du sable roulé fin, le module de finesse ainsi obtenu ($M_f = 1,04$) est inférieur à 1,80; ce qui confirme qu'il est riche en éléments fins. Le sable de concassage présente un module de finesse de 3,27; ce qui confirme leur grosseur.

III.3. Formulations des bétons autoplaçants adoptées

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et durci. La formulation des bétons conventionnels dépend de deux caractéristiques qui sont choisies préalablement : la consistance souhaitée et la résistance caractéristique à 28 jours. Pour les bétons autoplaçants, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques à l'état frais : une grande déformabilité et fluidité, une importante capacité de passage et une forte résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être mises en balance pour obtenir un bon béton autoplaçant. (BOUHAMOU *et al.* 2004) indiquent que la formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports Eau/Ciment (E/C), le rapport addition/Ciment (F/C), le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons.

L'objectif de la formulation des bétons, est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant.

Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage.

Dans notre étude, nous nous sommes fixés comme but essentiel l'influence des fines calcaires sur les caractéristiques de béton autoplaçant à l'état frais (comportement rhéologique). Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans

le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant.

La formulation que nous avons adoptée est celle proposée par le japonais OKAMURA appelée méthode générale concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables.

III.3.1. Formulation du mortier

Dans le béton autoplaçant, la formulation du mortier est une phase très importante et essentielle 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 terme 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 (Jin & Domone 2002), des tests 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

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 pouvoir 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 $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ (Domone & Jin 1999).

III.3.1.1. Détermination du rapport Eau/Liant (E/L)

Les mortiers sont testés à travers l'essai d'étalement au Mini-Cône et l'essai d'écoulement au Mini-Entonnoir en V. Ces tests ont pour but de déterminer la teneur en eau (Eau/Liant), la teneur en sable (Sable/Mortier) et le dosage en superplastifiant (Superplastifiant/Liant) (Yamada 2001; Bethmont 2005).

Nous avons effectué de nombreux d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport Eau/liant (E/L). (Felekoğlu *et al.* 2007) ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Après de nombreux différents essais préliminaires effectués sur des mortiers, on est arrivé à un rapport de 0,40 qui permet d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants. A cet effet, nous avons maintenu le rapport Eau/Liant à 0,40 pour tous les essais effectués sur mortier.

III.3.1.2. Optimisation rapport Sable/Mortier (S/M)

Les auteurs de la méthode générale ont limité le volume du sable par rapport au mortier à 40% (Sable/Mortier= 0,4) pour obtenir un meilleur MAP à base de matériaux locaux japonais (Petersson & Billberg 1999). Or, ceci est loin d'être toujours le cas, puisque l'utilisation du BAP à travers le monde a montré qu'il est nécessaire de modifier ce volume, pour qu'on puisse produire un MAP de grande déformabilité (Okamura & Ouchi 2003). (Petersson 1999) a analysé un béton autoplaçant pouvant être utilisé dans divers pays du monde. Cet auteur a rapporté que dans plus de 80% des cas étudiés, le volume du sable utilisé est compris entre 41 et 52%. En Algérie, (Boukendakdji 2010) a testé des BAP à base de matériaux locaux. Cet auteur a montré qu'un rapport S/M égal à 0,5 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

Pour s'adapter donc avec l'utilisation des matériaux locaux plusieurs rapports de (S/M) ont été essayés : 0,4; 0,42; 0,44; 0,45; 0,5 et 0,55 tout en faisant varier le dosage en Superplastifiant/Liant (Sp/L).

III.3.1.3. Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement du Mini-Cône et du temps d'écoulement au mini V-Funnel, en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L en faisant varier ce dosage de 0,8 % à 2% avec un pas de 0,2%. (En pourcentage volumique)

III.3.1.4. Confection des mortiers

Après avoir déterminé la teneur en eau, la teneur en sable et le dosage en superplastifiant, on peut dire qu'on a obtenu la composition optimale du mortier autoplaçant de référence. Pour la confection de ce mortier, la séquence de malaxage recommandée par (Domone & Jin 1999) a été utilisée.

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

Il est important de noter que cette étape n'est pas recommandée par la méthode générale, mais nous avons jugé utile de faire ces tâches dans le MAP avant le BAP pour minimiser les quantités des matériaux utilisés et la pénibilité du travail sur le BAP.

III.4. Formulation du BAP de référence

On remarquera que l'étape des essais sur mortier autoplaçant est une étape primordiale car elle permet de fixer les principaux paramètres du mélange tels que les rapports E/L (Eau/Liant), S/M (Sable/Mortier) ainsi que Sp/L (Superplastifiant/Liant).

Du moment que le mortier occupe un volume important dans le mélange du béton autoplaçant, les résultats des essais sur mortier obtenus ont été utilisés sur le béton de référence (sans aucun ajout), si nécessaire les rapports surtout E/L et Sp/L seront ajustés afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation et sans ressuage.

III.4.1. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M), Eau/Liant (E/L) et Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Une fois que la formulation du MAP de référence est obtenue, on ajoute des gravillons pour formuler le BAP de référence conformément à la méthode générale de formulation. Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixes les deux rapports S/M et E/L trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport Sp/L.

Au début, on a utilisé le résultat du rapport Sp/L des essais obtenus sur mortiers. Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement à l'Entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/L donnant un bon béton autoplaçant, qui ne doit présenter aucun signe visuel de ségrégation ou de ressuage. Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence à substituer partiellement le sable de concassage et/ou le ciment par des fines calcaires à des taux de (5% 10% 15% 20% et 25%) et on procèdera à tous les essais sur béton frais.

III.4.2. Procédure de malaxage

La différence majeure entre la composition du BAP et celle du béton ordinaire est la présence du superplastifiant dans le premier. L'objectif de l'utilisation de cet adjuvant est d'obtenir un BAP de grande fluidité (Lang & Geisler 1996). Cette dernière est cependant liée principalement au temps d'addition du superplastifiant durant le processus de malaxage, c'est-à-dire au début ou au cours de ce processus, et à la durée de malaxage du mélange.

Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 70% de l'eau de gâchage ajoutée au début de malaxage) (fiche Technique adjuvant).

Généralement, pour un faible rapport eau/liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé (Takada *et al.* 1998). Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. Dans le cas de mauvais malaxage, ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux (Takada & Walraven 2001).

Pour les bétons autoplaçants, la séquence de malaxage a 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 à béton d'une capacité de 50 litres. La procédure de malaxage adoptée est celle recommandée par (Domone & Jin 1999).

Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}}$$

Où :

E_{eff} : Eau efficace;

E_{totale} : Eau théorique;

$E_{\text{teneur en eau}}$: Eau adsorbée;

E_{adjuvant} : Eau dans l'adjuvant;

$E_{\text{absorbée par granulats}}$: Eau absorbée par les granulats.

- Malaxer le sable, ciment, fines calcaires et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($E_{\text{eau1}} = 70\% \text{ Eau}$) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le reste d'eau de gâchage ($E_{\text{eau2}} = 30\% \text{ Eau}$) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange reposer pendant 2 minutes ;
- En suite remalaxer le mélange pendant 30 secondes.

III.5. Conclusion

A la fin de ce chapitre, on peut dire que la décision du choix de la formulation n'était pas chose facile à prendre. Elle dépend particulièrement des propriétés des matériaux utilisés, essentiellement les sables. Comme essais préliminaires, nous avons varié plusieurs paramètres tels que les rapports (Sable/Mortier, Eau/Liant et Superplastifiant/Liant) avant d'arriver à la formulation adoptée. De plus, ce qui a été constaté est que la fabrication d'un béton autoplaçant avec seulement des sables concassés semble être difficile surtout pour ceux ayant un module de finesse grossier.

CHAPITRE IV : PROCEDURE EXPERIMENTALE

IV.1. Généralités :

Dans ce chapitre, nous allons exposer les procédures des expériences menées dans notre investigation de recherche en deux parties. Dans la première partie, nous présentons les procédures expérimentales des essais réalisés sur les mortiers à l'état frais qui nous ont permis de fixer le dosage en eau, en sable et en superplastifiant, rentrant dans la formulation de notre béton autoplaçant. La deuxième partie est consacrée aux procédures expérimentales des essais effectués sur les BAP afin d'évaluer leur propriété à l'état frais (ouvrabilité et capacité de passage), à l'état durci (résistance à la compression) et la durabilité avec des essais de perméabilité.

Une attention particulière à signaler, c'est que tous les essais mentionnés ci-dessous ont été réalisés au sein du laboratoire de matériaux en génie civil et environnement (LMGCE) de l'école nationale polytechnique d'ALGER, ainsi que le laboratoire béton de l'Université de MEDEA.

IV.2. Essais sur mortier à l'état frais

IV.2.1. Essai d'Étalement au Mini-Cône

L'essai d'Étalement pour mortier consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse. Une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires ; la moyenne est retenue. La Figure IV.1 montre le dispositif de l'essai d'étalement réalisé pour les mortiers.



Figure IV.1 : Essai d'Étalement pour mortier.

IV.2.2. Essai à Mini-Entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'Entonnoir en V (V-Funnel), l'entonnoir est rempli d'environ 1,1 litre de mortier; un temps d'écoulement est mesuré entre l'instant de l'ouverture de l'orifice inférieur de l'entonnoir, en faisant libérer le mortier et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure IV.2).

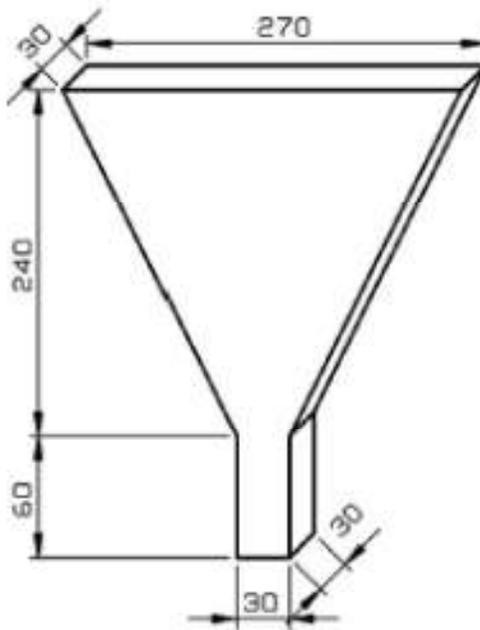


Figure IV.2 : Essai à l'Entonnoir en V pour mortier.

Selon les résultats obtenus sur les travaux de recherche réalisés sur des matériaux japonais par (Okamura & Ozawa 1996), l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 270 mm et 330 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. (Chai 1998), a travaillé sur des matériaux anglais, et a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10s.

IV.2.3. Essais sur BAP à l'état frais

Le béton autoplaçant est caractérisé par des propriétés à l'état frais déterminées par les essais spécifiques réalisés dans le cadre de ce travail et qui sont :

- L'essai d'Etalement.
- L'essai de T50 cm.

- L'essai de rapidité d'écoulement avec le V-Funnel.
- L'essai pour simuler la capacité d'écoulement en présence d'armatures avec le L-Box.
- L'essai de la stabilité au Tamis.

IV.2.4. Essais d'Étalement (Flow test)

L'essai d'Étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer la capacité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant (Sonebi & Bartos 2002).

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams utilisé habituellement pour caractériser les bétons conventionnels. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de la base inférieure est de 200 mm et le diamètre de base supérieure de 100 mm ; Il a une hauteur de 300 mm. Cet essai consiste à placer la base inférieure du cône sur une plaque métallique d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 900 par 900 mm). Il est maintenu fermement au centre de cette plaque, ensuite on remplit le cône de l'échantillon de béton à tester et on maintient fermement la base. On soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler librement sans aucune secousse ou vibration en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids en luttant contre les forces de friction avec la surface. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ après la stabilité. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (Figure IV.3).



Figure IV.3 : Mesure du diamètre d'étalement.

Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés perpendiculairement. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône (Sonebi & Bartos 2002) ; une inspection visuelle pour le contrôle de qualité du mélange sur le ressuage et la ségrégation est effectuée.

Selon les recommandations de l'EFNARC(De Schutter 2005), le diamètre d'étalement au cône d'Abrams doit être compris entre 550 mm et 850 mm, il est divisé en trois principales catégories SF1, SF2 et SF3 selon la destination d'utilisation du béton autoplaçant comme elles sont définies au Tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Catégories des BAP selon l'étalement et la destination d'utilisation.

Classe	Etalement (mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 - 650	<ul style="list-style-type: none"> • Structures non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les dalles) • Coulage par système de pompage du BAP (ex. les tunnels) • Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660 - 750	<ul style="list-style-type: none"> • La majorité des applications
SF3	760 - 850	<ul style="list-style-type: none"> • Applications verticales • Structures trop ferrillées • Coulage à partir du dessous du coffrage • Structures de forme complexe

IV.2.5. Essai de T_{50}

L'essai de temps d'écoulement T_{50} se fait en même instant que l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Il consiste à mesurer le temps nécessaire après le soulèvement du cône et le commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 50cm. Ce temps d'écoulement T_{50} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange EFNARC(De Schutter 2005).

Des observations complémentaires peuvent aider à corriger certaines propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette, (Figure IV.4).
- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement.
- Une forme bombée de la galette traduit un effet de voule, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives, mais elles aident dans la formulation expérimentée à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond le plus à nos attentes.



Figure IV.4 : Cas d'un mauvais béton autoplaçant.

IV.2.6. Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'Entonnoir en V (V-Funnel en anglais) a été mis en place par (Okamura & Ozawa 1996), il 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 seconde). La procédure d'essai est comme suite :

L'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure IV.5, est rempli complètement avec du béton environ 12 litres, puis on laisse reposer une période d'environ (10 ± 2) secondes selon les recommandations de la norme EFNARC (De Schutter 2005) la trappe de fermeture située à la base de l'entonnoir est ensuite ouverte, ce qui provoque l'écoulement libre du béton. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment d'ouverture de la trappe (commencement d'écoulement libre)

et le moment où on aperçoit la lumière du jour par l'orifice de base à travers le haut de l'entonnoir.

Dans la littérature, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible et vice-versa ; si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important (Sonebi & Bartos 2002). Selon EFNARC (De Schutter 2005), le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes, il est recommandé qu'il soit compris entre 5 et 12 secondes, pour obtenir un béton autoplaçant à viscosité suffisante. L'essai de V-Funnel nous renseigne aussi sur la stabilité du béton, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, on observe un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir.



Figure IV.5 : Dispositif de l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel).

IV.2.7. Essai de la boîte en L (L-Box test)

Pour caractériser la mobilité de béton autoplaçant dans une zone confinée, l'essai à la boîte en L, permet d'évaluer la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant à travers des ouvertures serrées, y compris des espaces entre les barres d'armature et d'autres obstructions sans ségrégation ou blocage. Il y a deux variantes ; le test à deux barres et le test à trois barres. Le test à trois barres simule un renforcement plus congestionné (Figure IV.6).

Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton autoplaçant dans une boîte en L. On maintient le dispositif sur une base horizontale, après fermeture de la trappe entre les compartiments vertical et horizontal. Ensuite, la partie verticale du L (hauteur de 600 mm) est remplie entièrement de béton (soit environ un volume de 12,7 litres). On peut éventuellement laisser le béton au repos environ (60 ± 10) secondes pour voir s'il y a de la ségrégation EFNARC (De Schutter 2005). Puis on soulève la trappe de sorte que le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers un ferrailage standard, (41 mm entre 3 barres lisses de $\varnothing 12$) simulant des armatures d'un coffrage qui nous renseigne sur la capacité de remplissage du mélange qui correspond à des ouvrages fortement ferrailés.

Après la stabilisation du béton, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (Figure IV.6) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage par le rapport des hauteurs (H_2/H_1). Pour que le BAP soit accepté, ce taux de remplissage doit être supérieur à 0,8 selon les recommandations de EFNARC(De Schutter 2005) et(AFGC 2008). De plus, des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour caractériser la viscosité du BAP.

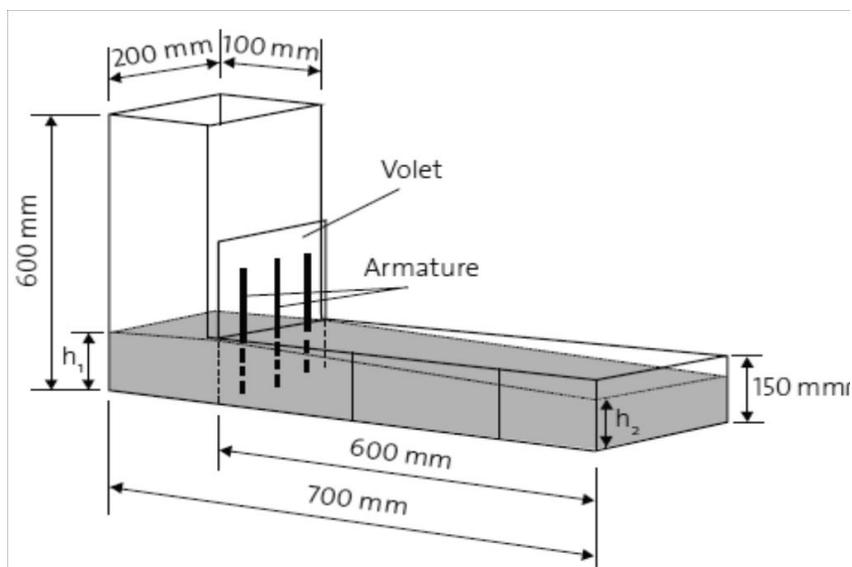


Figure IV.6 : Dispositif de l'essai L-Box.

IV.2.8. Essai de stabilité au Tamis (résistance à la ségrégation)

L'essai de stabilité au Tamis, appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité ; il est proposé dans les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC 2008) Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) passant à travers un tamis de 5mm. La quantité de béton autoplaçant frais ($4,8 \pm 0,2$ kg) est prélevée d'un échantillon de 10 litres, mis au repos pendant 15 min et déversé d'une hauteur de 50 cm sur le tamis (Figure IV.7). Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance passée au travers du tamis est calculé selon l'expression suivante :

$$\text{Plaitance} = \frac{\text{Poids de laitance}}{\text{Poids de l'échantillon}} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$



Figure IV.7 : Essai de stabilité au tamis.

D'où les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

$0 \leq \% \text{ Plaitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante

$15 \leq \% \text{ Plaitance} \leq 30\%$: stabilité critique.

$\% \text{ Plaitance} > 30\%$: stabilité très mauvaises (béton inutilisable).

Lorsque $0 \leq \% \text{ Plaitance} \leq 5\%$, 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 superplastifiant ou en eau.

IV.2.9. Confection des éprouvettes et conditionnement

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en bétons sont de forme cubique (100x100x100) mm³ pour l'essai de résistance à la compression, et prismatique de (70x70x280) mm³ pour l'essai de carbonatation accélérée, des moules des essais de perméabilité à l'eau et aux gaz sont cylindrique de diamètre 150 mm avec une hauteur 150 mm, la perméabilité aux ions chlorure a été réalisée sur des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre avec une hauteur de 200mm.

Après l'opération de coulage, les éprouvettes ont été couvertes par un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stockées dans les conditions ambiantes du laboratoire environ 24 heures. Afin d'assurer un bon mûrissement du béton, on doit maintenir une humidité satisfaisante et une température favorable durant la période d'hydratation du ciment. Les éprouvettes ont été démoulées puis, immergées dans un réservoir d'eau contenant de la chaux à (20±2)°C jusqu'à l'âge de l'essai, conformément aux normes EN 12390-1 (STANDARD 2009; Institution 2012) et EN 12390-2(LST 2009; Institution 2011).

IV.2.10. Variables étudiées des bétons autoplaçants

Après avoir fixé les paramètres principaux du béton autoplaçant « les rapports (E/L) eau sur liant, (S/M) sable sur mortier ainsi que (Sp/L) superplastifiant sur le liant », deux séries de Béton ont été confectionnées. La première série de mélange avec la substitution dans le sable, et la seconde avec la substitution dans le ciment. Un total de 11 échantillons de mélanges a été produits, chacun avec un taux de fines calcaires (substitution volumique) de (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25%). Les différentes proportions des mélanges sont représentées sur le Tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Proportions des différents mélanges.

Mélanges	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Liant(kg/ m ³)	E/L	Sable concassé (kg/m ³)	Sable fin (kg/m ³)	Fines calcaires (kg/m ³)	Fines calcaires (%)	Superplas tifiant (kg/m ³)	Gravier (kg/m ³)
BAP1	196	490	490	0.4	600	323	0	0	6.86	750
BAP 2	196	490	490	0.4	570	323	30	5	6.86	750
BAP 3	196	490	490	0.4	540	323	60	10	6.86	750
BAP 4	196	490	490	0.4	510	323	90	15	6.86	750
BAP 5	196	490	490	0.4	480	323	120	20	6.86	750
BAP 6	196	490	490	0.4	450	323	150	25	6.86	750
BAP 7	195	467	488	0.4	600	323	21	5	6.83	750
BAP 8	195	444	486	0.4	600	323	42	10	6.81	750
BAP 9	194	422	485	0.4	600	323	63	15	6.79	750
BAP 10	193	399	484	0.4	600	323	85	20	6.77	750
BAP 11	193	375	481	0.4	600	323	106	25	6.74	750

IV.3. Essais sur béton à l'état durci

A l'état durci, nous avons évalué la résistance à la compression aux différents âges (7,28, 90 et 180jours). En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous avons réalisé les essais suivants :

- La perméabilité à l'eau.
- La perméabilité au gaz.
- La diffusion des ions chlorures.
- L'absorption d'eau par capillarité.
- La porosité accessible à l'eau.
- La carbonatation accélérée.

IV.3.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués selon la norme(EN 2009) sur des éprouvettes cubiques ($100\times 100\times 100$) mm³, à 7, 28, 90 et 180 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 2000 kN équipée d'un affichage digital qui permet d'introduire des données de surface de l'éprouvette et la lecture de la contrainte. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis la charge est progressivement appliquée à un taux de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture(Figure IV.8).



Figure IV.8 : Dispositif pour l'essai de compression.

IV.3.2. Essai de carbonatation accélérée

L'objectif de l'essai est de caractériser le comportement d'échantillons de BAP vis-à-vis de la Carbonatation. L'essai consiste à suivre l'évolution de la profondeur carbonatée des échantillons de BAP conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone. Les échantillons testés sont des éprouvettes de BAP de forme prismatique (70x70x280 mm³) moulées mais peut aussi être appliqué à des échantillons carottés de bétons, ainsi qu'à des mortiers et pâtes de ciment durcis. La dimension des éprouvettes choisie respecte celle qui est donnée par les recommandations françaises (AFREM 1997). Pour chaque composition de BAP, trois échantillons subissent l'essai de carbonatation accélérée.

La procédure de pré-conditionnement est la suivante :

- Les éprouvettes sont conservées après démoulage dans une ambiance humide (humidité relative supérieure à 95±5%) pendant 180 jours pour toutes les compositions de BAP étudiées.

- Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ (pour favoriser la carbonatation). Les échantillons sont alors pesés puis placés ensuite dans l'enceinte de carbonatation (espacés de 2 cm), régulée en humidité relative (65±5%) et en dioxyde de carbone (50% volumique) (Figure IV.9).

L'essai de carbonatation accélérée a été effectué au sein du laboratoire de recherche de génie civil de l'université de LAGHOUAT.

Les échéances de mesure de l'épaisseur de BAP carbonaté sont de 7, 14, et 28 jours, chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de BAP carbonaté sont mesurées. Un morceau de béton (épaisseur 7 ± 1 cm) est prélevé sur chaque éprouvette par découpage à l'aide d'une scie électrique. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte de carbonatation.

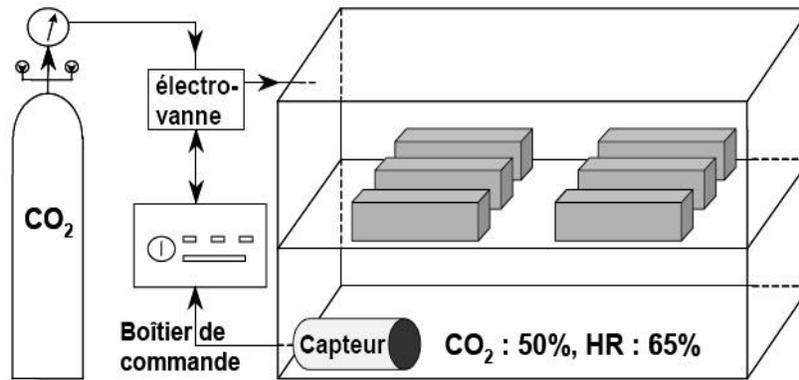


Figure IV.10 : Schéma de l'enceinte de carbonatation accélérée.

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte-granulat) (Figure IV.10). (AFREM 1997), (Arliגיע & Hornain 2007).

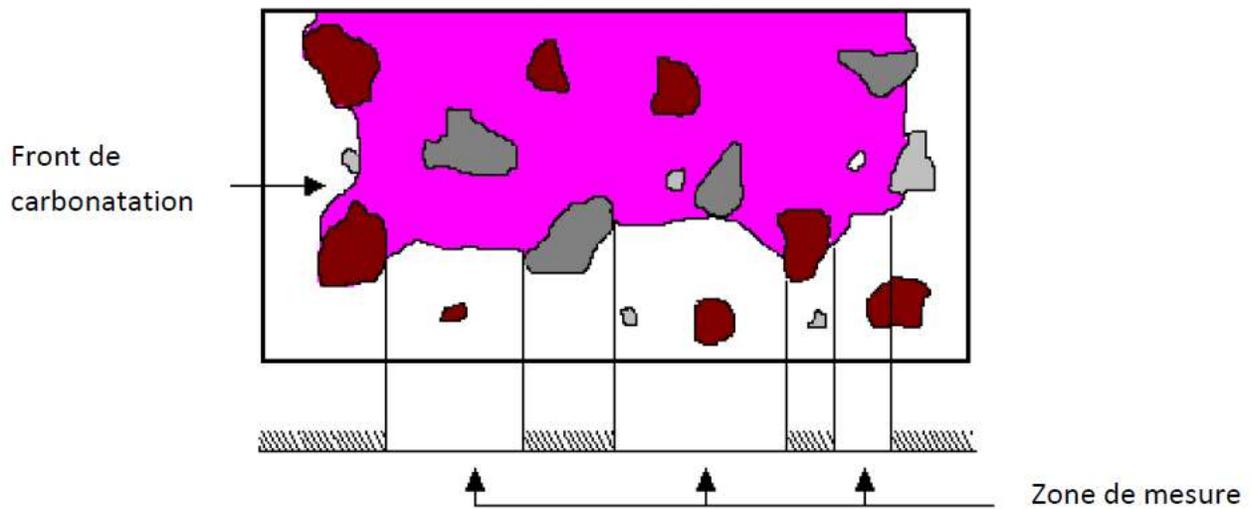


Figure IV.9 : Schéma illustrant le principe de mesure.

IV.3.3. Essai de perméabilité à l'eau

L'essai de la perméabilité du béton autoplaçant à l'eau a été effectué sur des bétons durcis plus de 90 jours. La profondeur de pénétration d'eau a été déterminée à l'aide d'un perméamètre à eau représenté sur la figure IV.11. Cet appareil permet de mesurer la

pénétration d'eau dans une éprouvette en béton de forme cubique ou cylindrique comme dans notre étude ($\phi 150 \times H300$ mm) coupée en deux.

A l'issue de la période de cure, les échantillons sont d'abord séchés dans une étuve ventilée pendant quelques jours à 80°C , jusqu'à atteindre une masse constante, qui correspond à un taux de saturation nul selon les recommandations de la norme DIN 1048 (von Beton 1991). Les éprouvettes sont placées et fixées ensuite dans un plateau d'essai du perméamètre; une pression d'eau de $(5\text{bars}\pm 0.5)$ est appliquée sur la partie inférieure des éprouvettes pendant une durée de soixante-douze heures ($72\text{h}\pm 2$) à l'aide d'un compresseur à air de capacité 10 bars. A la fin de l'essai les éprouvettes sont retirées rapidement de la cellule de test et placées ensuite dans une presse hydraulique, pour les diviser axialement en deux parties par l'essai de traction par fendage (essai brésilien). Ensuite, on mesure rapidement la profondeur maximale de pénétration de l'eau au milieu des deux parties de l'éprouvette divisée.



Figure IV.11 : Dispositif pour l'essai de perméabilité de béton à l'eau.

Les valeurs limites de la profondeur de pénétration de l'eau en (mm) dans les échantillons de béton sont résumées sur le (Tableau IV.3).

Tableau IV.3 : Seuil pour l'essai de perméabilité à l'eau.(von Beton 1991).

Pénétration d'eau (mm)	Perméabilité à l'eau
< 30	Faible
30 – 60	Moyenne
> 60	Elevée

IV.3.4. Essai de perméabilité au gaz

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction de la pression constante de gaz appliquée et de la saturation du matériau, la perméabilité des matériaux cimentaires.

L'essai de perméabilité au gaz a été effectué sur béton durci de plus de 90 jours avec des échantillons moulés (il est également applicable à des corps d'épreuve carottés dans les limites dimensionnelles de l'appareillage). Les échantillons employés dans notre étude sont des disques de 150mm de diamètre et de (50±1) mm de hauteur obtenus par sciage et surfacage des éprouvettes cylindriques de (150mmx300mm); Ils sont soumis à une pression constante d'azote. La perméabilité du béton testé est déterminée à partir de la mesure du flux de gaz qui se dégage en régime permanent traversant le réseau poreux de l'échantillon.

A la fin de la cure humide à l'eau pendant 90 jours à $T = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (attendre une hydratation quasi-complète), les échantillons sont ensuite soumis à une opération de séchage pendant plusieurs jours à 80°C dans une étuve ventilée jusqu'à atteindre une masse constante finale, correspondant à un taux de saturation nul. Les échantillons sont alors sortis de l'étuve puis conservés et refroidis au laboratoire à une température ambiante de 20°C . Après la périphérie des disques est couverte par un ruban adhésif en aluminium. L'essai de perméabilité peut alors avoir lieu, les échantillons ainsi préparés sont placés un par un dans la cellule d'essais, puis soumis à une pression constante de gaz d'azote (généralement de 2 à 5 bars).

L'équipement choisi dans cette étude pour déterminer la perméabilité des bétons autoplaçants est le perméamètre CEMBUREAU, c'est l'un des appareils les plus utilisés pour les mesures de perméabilité. Il permet de mesurer la perméabilité aux gaz en régime permanent, et consiste à mesurer le temps de passage d'une bulle de savon liquide diluée dans l'eau à un pourcentage précis dans un tube en verre d'un volume connu; il est capable de

mesurer des perméabilités entre 10^{-19} à 10^{-14} m². La disposition générale du dispositif expérimental est représentée sur la (Figure IV.12).

Le perméabilimètre Cembureau est composé principalement :

- D'une cellule de mesure.
- D'une unité de commande.
- D'un détendeur.
- D'une bouteille à gaz (air, O₂, ou Azote).
- De tubes de mesure.

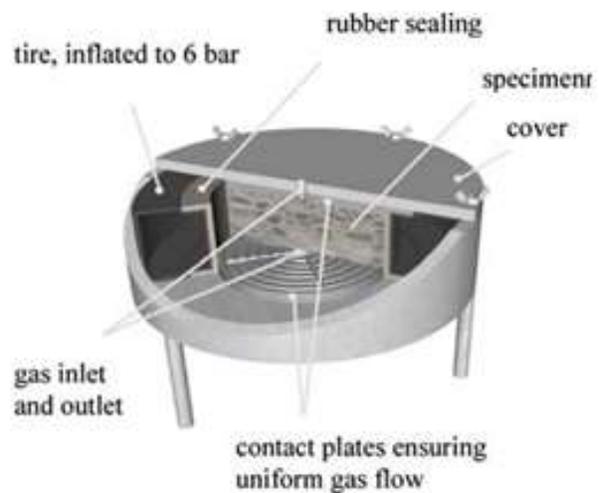
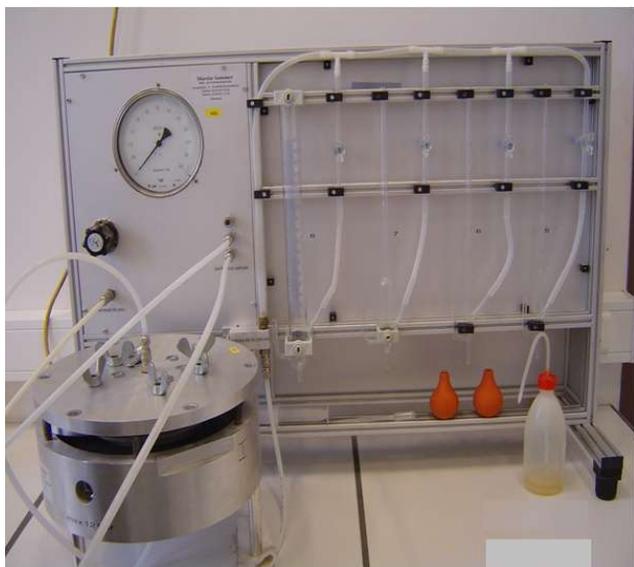


Figure IV.12 : Dispositif pour l'essai de perméabilité de béton à gaz.

Les valeurs de la perméabilité apparente (k_{app}) sont calculées en utilisant la formule de Hagen-Poiseuille suivante :

$$k_{app} = \eta \frac{2 \times Q \times P_0 \times H}{A \times (P^2 - P_a^2)} \quad (IV.2)$$

Avec :

k_{app} : Coefficient de perméabilité apparente (en m²).

A : Zone en coupe du spécimen de test (en m²).

Q : Débit du gaz de test (en m³/s).

H : Hauteur du spécimen dans le sens de flux (en m).

η : Viscosité dynamique du gaz de test (Azote = $1,76 \times 10^{-5}$).

P : Pression d'entrée (absolue) (en N/m^2).

P_a : Pression de sortie (pour ce test, celle correspond à la pression atmosphérique) (en N/m^2).

P_0 : Pression à la quelle le débit est mesuré (ici, elle équivaut à la pression atmosphérique P_a) (en N/m^2)

IV.3.5. Essai de diffusion des ions chlorure

Le coefficient de diffusion effectif des ions chlorures est établi à l'aide d'un essai de migration en milieu saturé en régime permanent. La perméabilité rapide aux ions chlorures en terme de courant électrique en Coulomb passant à travers un échantillon de béton durci a été déterminée selon les recommandations de la norme (ASTM 1997) C-1202. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendré par une différence de potentiels en volts (60 Volts) maintenue constante pendant quelques heures au moyen d'électrodes en métal inoxydable entre les deux cellules à deux compartiments. L'une des faces de l'éprouvette est au contact d'une solution de NaCl (compartiment amont : cathode), et l'autre face est au contact d'une solution de NaOH (compartiment aval : anode). (Figure IV.13)

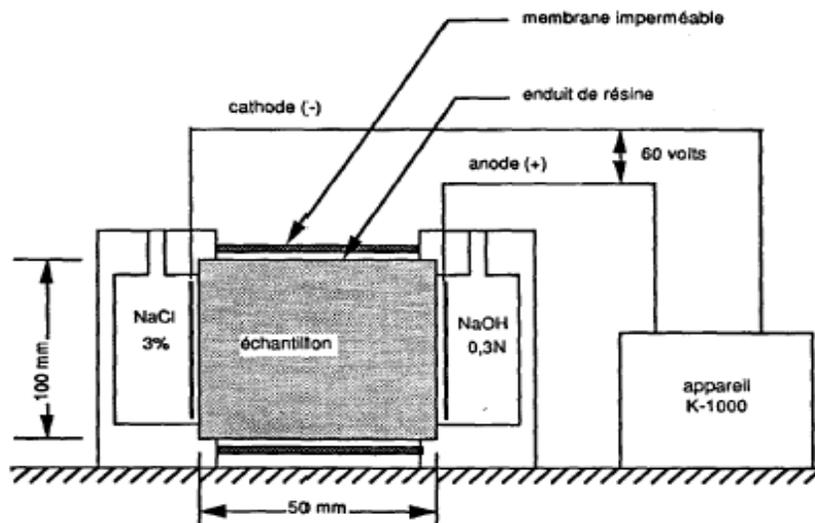


Figure IV.13 : Schéma représentatif du principe de fonctionnement de l'essai de perméabilité aux ions chlorures.

Les étapes de préparation des éprouvettes avant essai sont comme suite :

Après 90 jours de cure des éprouvettes cylindriques, normalisées de béton autoplaçant de 100mm de diamètre et 200mm de hauteur dans un environnement humide ($95\pm 5\%$ d'humidité relative et $20\pm 2^{\circ}\text{C}$), trois échantillons de 100 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur ont été obtenus par sciage des éprouvettes ci-dessus, après les avoir séchées à 80°C dans une étuve ventilée jusqu'à une masse constante, Les périmètres extérieurs des échantillons sont couverts par une couche de résine d'époxy afin d'assurer une bonne étanchéité; après durcissement total de la résine on a procédé à l'opération de saturation. Les spécimens sont ensuite introduits dans un dessiccateur afin d'évacuer l'air qui existe à l'intérieur du béton en utilisant une pompe à vide pendant une durée de 3 heures avant son arrêt complet. Le béton demeure ensuite sous vide est saturé avec de l'eau distillée dans le dessiccateur maintenu sous pression réduite dans l'eau pendant (18 ± 2) heures, avant le début d'essai de perméabilité (Figure IV.14).



Figure IV.14 : Dispositif de saturation des éprouvettes.

À la fin de cette opération de saturation, l'essai de la diffusion des ions chlorures peut maintenant avoir lieu. Les échantillons ainsi préparés sont ensuite placés et bien fixés dans la cellule d'essai entre les deux compartiments. L'une des faces de l'éprouvette est au contact

avec la solution de NaCl avec une concentration de 30 g/l (connectée avec l'électrode négative : cathode), et l'autre face est au contact avec une solution de NaOH à 0,3N (connectée avec l'électrode positive : anode). Les électrodes connectées dans chaque compartiment sont constituées par un grillage de cuivre pour assurer la bonne conductivité électrique. Ensuite un champ électrique de 60Volts est appliqué entre les deux électrodes et parcourt les spécimens. (Figure IV.15). La charge électrique totale passée en Coulombs est enregistrée automatiquement par le dispositif d'essai chaque 30min pendant la durée des 6 heures d'essai ; elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (IV.3)$$

Avec:

Q : Charge totale traversant l'échantillon en coulombs.

I_0 : Courant (ampères) immédiatement après l'application du champ électrique.

I_t : Courant (ampères) à t min après l'application du champ électrique

Les valeurs limites de la charge passée en (coulombs) sont résumées sur le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Echelle de Whiting pour l'essai de perméabilité aux ions chlores
[AASHTO T277-831 (ASTM 1202)].

Charge totale passée (Coulomb)	Perméabilité aux ions chlore	Type de béton
>4000	Elevée	Eau/ciment >0,60
2000 – 4000	Modérée	Eau/ciment >0,45 et 0,50
1000 – 2000	Faible	Eau/ciment <0,40
100 – 1000	Très faible	Béton au latex
<100	Négligeable	Béton polymère

IV.3.6. Essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

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

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cubiques de (70x70x70) mm³ obtenues par sciage des éprouvettes prismatiques normalisées de (70x70x280) mm³. Le protocole de cet

essai consiste à sécher des éprouvettes prismatiques à l'étuve ventilée à 105°C pendant 72 heures jusqu'à masse constante. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une résine étanche, et ce pour assurer la remontée unidirectionnelle d'eau par capillarité, et aussi pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai. Après le durcissement de la résine, l'essai de l'absorption capillaire est commencé, il consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes partiellement immergées (environ 5 mm) dans un récipient contenant de l'eau potable, soit M_0 la masse de l'échantillon à l'état sec. Les éprouvettes sont retirées et pesées régulièrement à l'aide d'une balance de précision de 0,01g, suivant les échéances de mesure suivantes : 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 6h, 8h et 24h selon les recommandations de la norme (EN 2002)(Figure IV.15).

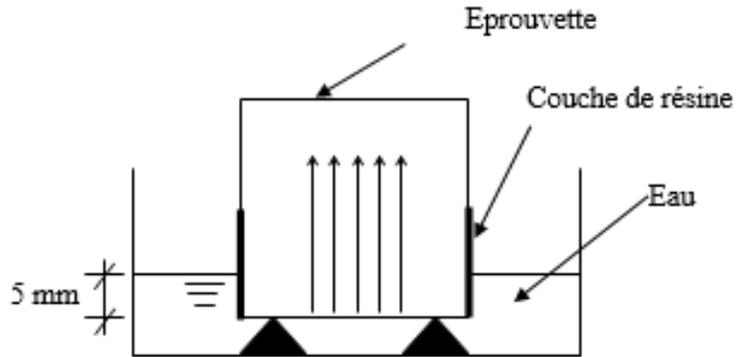


Figure IV.15 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient de sorptivité (S), est obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A} = S \cdot \sqrt{t} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

Q : Quantité d'eau adsorbée en (cm^3).

A : Surface du spécimen en contact avec l'eau (cm^2).

t : Temps (s).

S : Coefficient de sorptivité du spécimen ($\text{cm/s}^{1/2}$).

D'où, le coefficient de sorptivité, Q/A tracé en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} , S a été calculée à partir de la pente de la relation linéaire entre Q/A et \sqrt{t} (Figure IV.16).

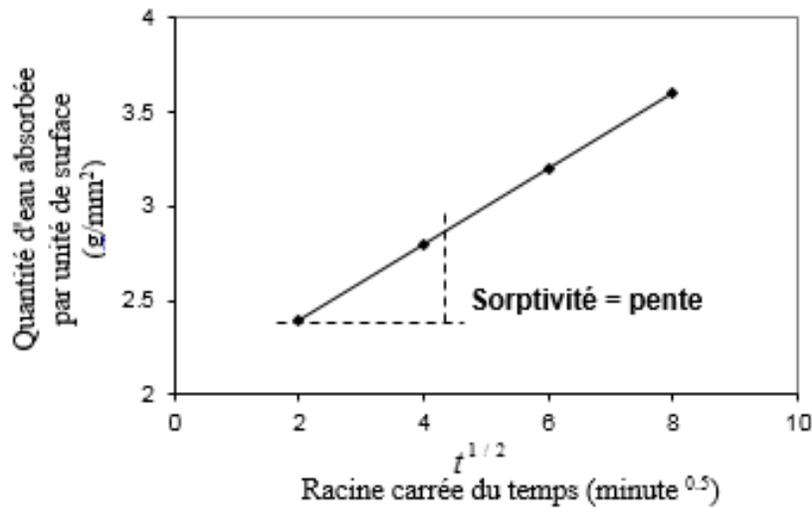


Figure IV.16 : Détermination de la sorptivité.

IV.3.7. Essais de porosité accessible à l'eau (porosité totale)

L'essai de porosité accessible à l'eau a été réalisé selon la norme AFC-AFREM (Ollivier 1997). Les éprouvettes sont sous forme de disques de 100mm de diamètre et de 50mm d'épaisseur obtenues par opérations de sciage des éprouvettes cylindriques normalisées de (100mm diamètre et de 200mm de hauteur). La porosité ε est définie comme le rapport du volume total des pores ouverts dans un solide poreux à son volume apparent. Elle est exprimée en pourcentage du volume apparent en utilisant l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad (\text{IV.5})$$

L'essai consiste à déterminer par pesées les trois masses suivantes (M_{sec} , M_{air} et M_{eau}). L'essai a été réalisé sur des échantillons qui ont été préalablement séchés dans une étuve ventilée à 105°C jusqu'à atteindre une masse constante (M_{sec}). Ensuite, ils ont été introduits dans un dessiccateur à vide pendant 3 heures, saturés avec de l'eau du robinet pendant 1 heure et finalement maintenus trempés pendant (18±2) heures. Selon les recommandations de l'AFC-AFREM (Ollivier 1997), la masse (M_{eau}) est la masse des spécimens immergés dans l'eau et suspendus avec un fil, alors que (M_{air}) est la masse du spécimen dans l'air immédiatement retiré de l'eau et toujours maintenu mouillé.

IV.4. Récapitulatif du programme des essais réalisés

IV.4.1. Essais sur mortier

Un nombre important d'essais préliminaires réalisés sur mortier a été effectué afin d'arriver à la formulation finale. Le diagramme suivant résume les essais réalisés sur mortier (Figure IV.17).

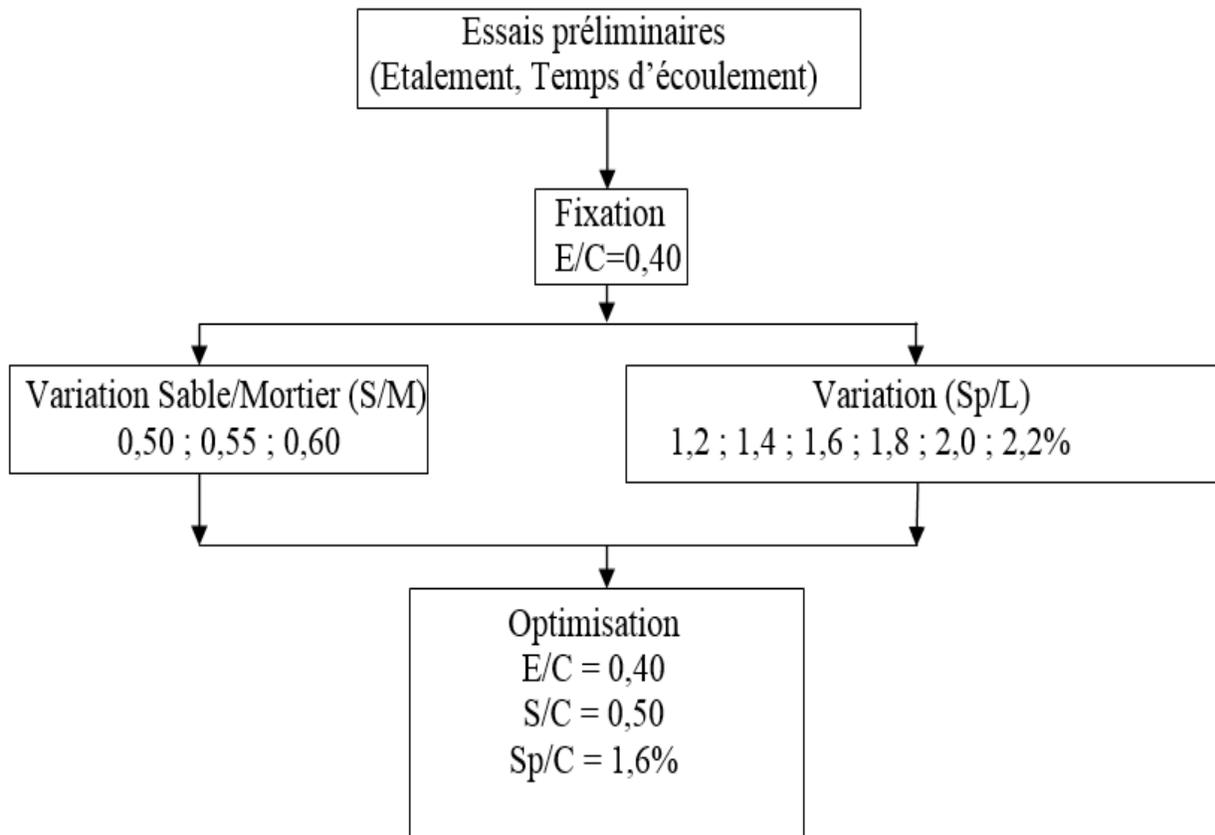


Figure IV.17 : Diagramme des essais réalisés sur mortier.

IV.4.2. Essais sur le béton

IV.4.2.1. Essais sur le béton à l'état frais

Le diagramme suivant figure IV.19 résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

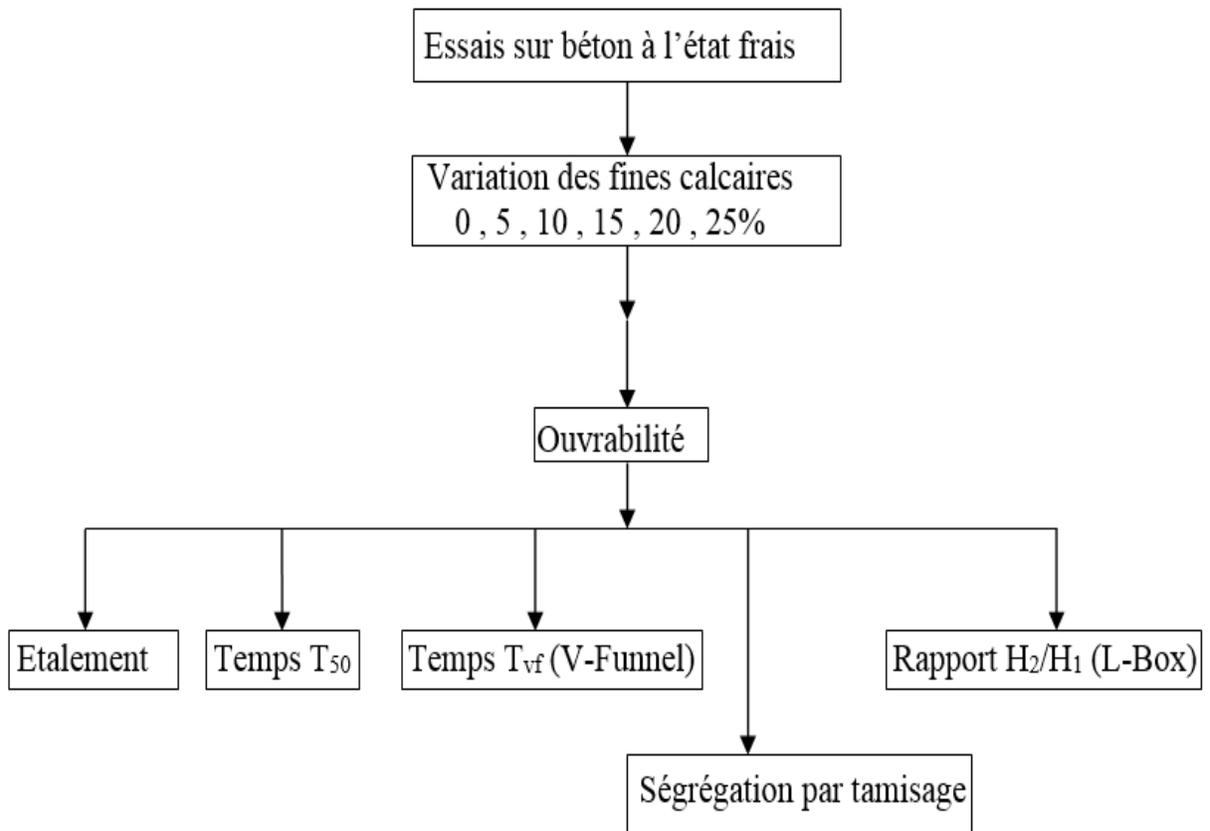


Figure IV.18 : diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.

IV.4.2.2. Essais sur le béton à l'état durci

Le diagramme représenté sur la Figure IV.19 résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

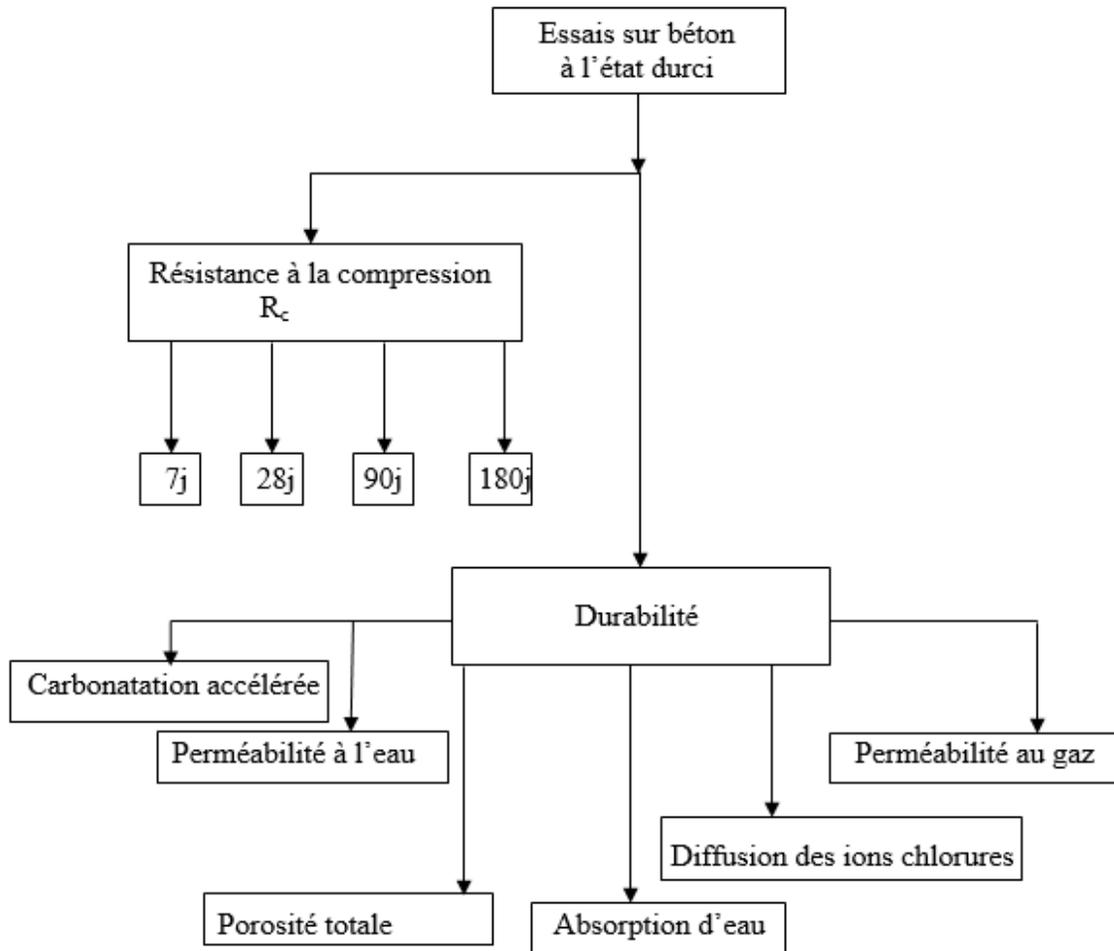


Figure IV.19 : Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci.

IV.5. Conclusion

A la fin de ce chapitre, on peut dire que le nombre d'essais effectué dans le cadre de cette thèse est important et il n'était pas évident que tous les résultats allaient entrer dans les fourchettes préconisées par la littérature.

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

**CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
INTERPRETATIONS**

V.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposerons et analyserons les résultats de l'étude expérimentale des différents essais effectués. Dans un premier temps, la discussion portera sur l'effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur les propriétés des bétons autoplaçants, le comportement physique et mécanique (maniabilité, fluidité, capacité de passage, et résistances mécaniques). Dans un second temps, on étudiera l'effet des fines calcaires sur les propriétés de durabilité des bétons autoplaçants.

V.2. Effet des fines calcaires sur les propriétés des BAP à l'Etat frais

V.2.1. Etalement au cône d'Abrams (Flow test)

Les résultats de test de l'effet des fines calcaires sur l'étalement des bétons autoplaçant sont résumés à la Figure V.1. D'après cette figure, on remarque que globalement, pour tous les mélanges, l'étalement est compris entre 650 et 850 mm, ce qui indique une bonne fluidité selon les recommandations de (Chemicals & Systems 2002) (EFNARC, 2002). Cependant, L'augmentation du pourcentage de fines dans les mélanges provoque une chute sur l'étalement du béton frais. De plus, on peut noter que cette diminution de la fluidité pour les mélanges avec 10 à 25% de fines calcaires substituées au sable, est plus importante que celle de la substitution de ciment ; ces derniers ont un volume inférieur de pâte (ciment-calcaire). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus et rapportés par (Benabed *et al.* 2012) et (Safiddine *et al.* 2017), qui ont remarqué néanmoins, une diminution sur l'étalement du mortier auto-compactant tout en augmentant le contenu des fines calcaires. De manière générale, l'incorporation des fines calcaires affecte la maniabilité des bétons autoplaçants ; cette diminution serait due à l'augmentation de la surface spécifique des agrégats fins, ce qui nécessite par conséquent davantage plus d'eau pour mouiller la surface des particules (Bosiljkov 2003). Il a été rapporté que le remplacement d'un matériau par un autre présentant des surfaces spécifiques différentes peut modifier la surface humide, ce qui entraîne une modification de la quantité d'eau adsorbée (Nehdi *et al.* 1998).

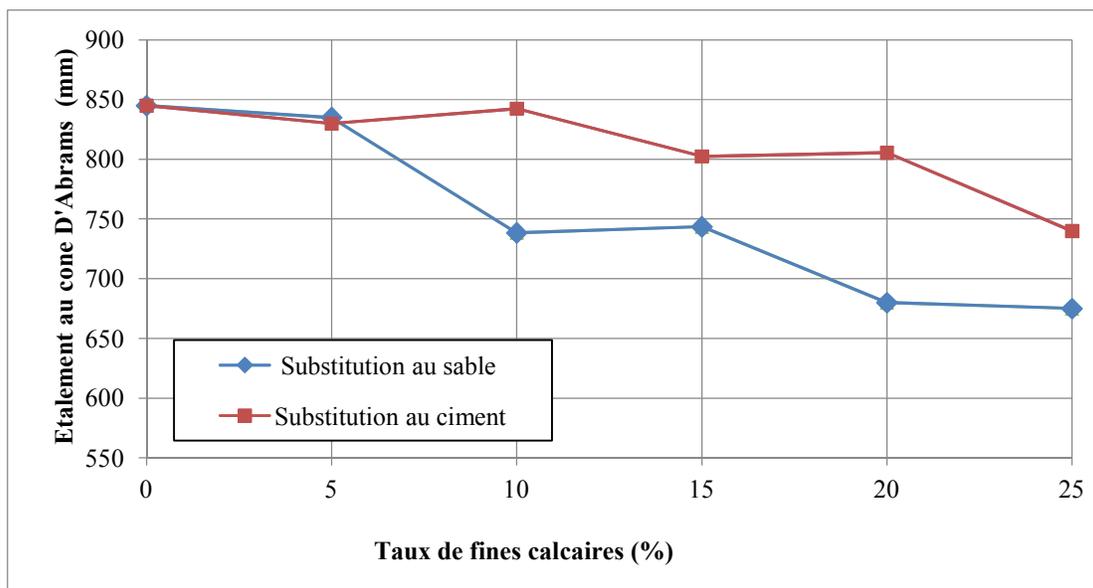
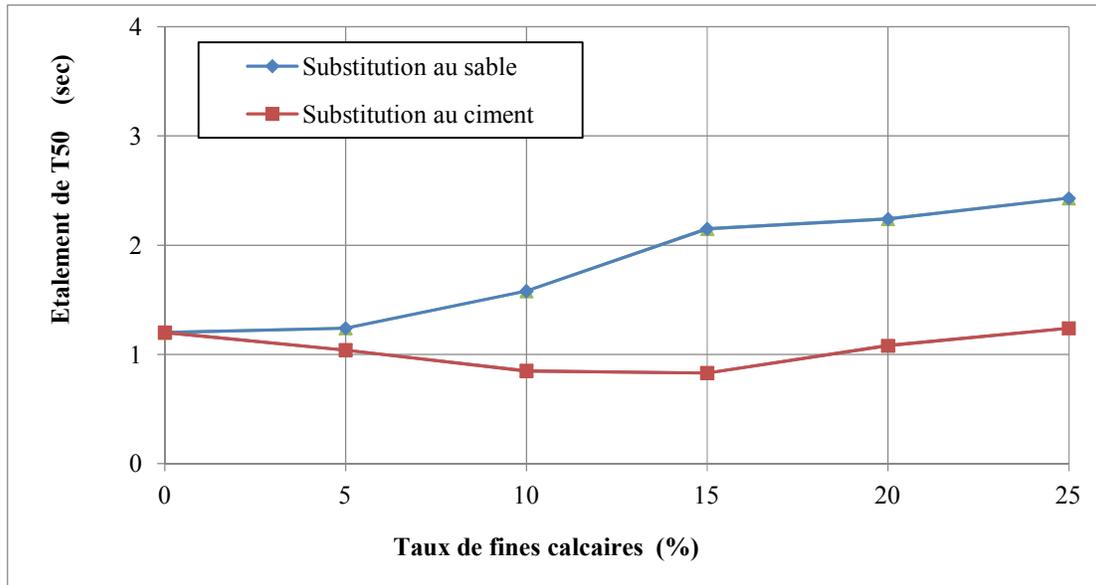


Figure V.1 : Effet des fines calcaires sur l'étalement au cône d'Abrams

V.2.2. Temps T_{50} au cône d'Abrams

L'effet de la teneur en fines calcaires des mélanges de béton autoplaçant sur le temps d'écoulement du T_{50} est illustré sur la figure V.2. En analysant cette Figure, une bonne fluidité est observée pour tous les échantillons et le temps d'écoulement du T_{50} est inférieur à 4 secondes, ce qui indique une fluidité acceptable. En effet, dans les recommandations de (Aarre & Domone 2003), les auteurs ont suggéré qu'un temps d'écoulement T_{50} d'un bon béton autoplaçant doit être compris entre 2 et 4 secondes. Une légère variation de T_{50} est enregistrée en augmentant une substitution partielle du ciment par des fines de calcaire, et les mélanges ayant 15% présentent la plus faible valeur de T_{50} . Cette diminution peut être attribuée principalement à la finesse de la fine calcaire; ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Gesoglu *et al.* 2012). De plus, la figure V.2 indique également que les valeurs T_{50} obtenues pour les mélanges dans lesquels le sable a été remplacé par des fines calcaires sont supérieures à celles obtenues pour les mélanges avec substitution au ciment, où la valeur la plus élevée mesurée est de 2,43 secondes avec 25 % de fines de calcaire ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par (Aarre & Domone 2003).

Figure V.2 : Effet des fines calcaires sur le T₅₀

V.2.3. Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel)

L'effet des fines calcaires dans tous les mélanges du béton autoplaçant sur le temps d'écoulement de l'entonnoir en V est présenté à la Figure V.3. On peut remarquer d'après cette figure que les courbes ont presque la même tendance que celle du temps d'écoulement T₅₀ et que le temps d'écoulement en V-entonnoir est inférieur à 8 s, ce qui indique effectivement une bonne fluidité (EFNARC, 2002). On peut également noter qu'une augmentation de la teneur en fines calcaires dans les bétons telle que la substitution du sable et / ou la substitution de ciment entraîne une augmentation du temps d'écoulement dans l'entonnoir en V, tandis qu'une légère augmentation du débit est observé sur le temps pour les mélanges de substitution partielle du ciment en particulier. La valeur la plus élevée de 7,56 s a été enregistrée avec des mélanges contenant 25% de substitution du sable par des fines calcaires. Dans le même contexte, des résultats similaires ont été rapportés par (Benabed *et al.* 2012), qui ont signalé une augmentation du temps d'écoulement tout en augmentant la teneur en fines calcaires substituées au sable concassé. Ceci est dû à l'augmentation de la viscosité des bétons autoplaçant. (Felekoğlu *et al.* 2006) ont rapporté que la viscosité augmente avec l'augmentation du pourcentage de fillers.

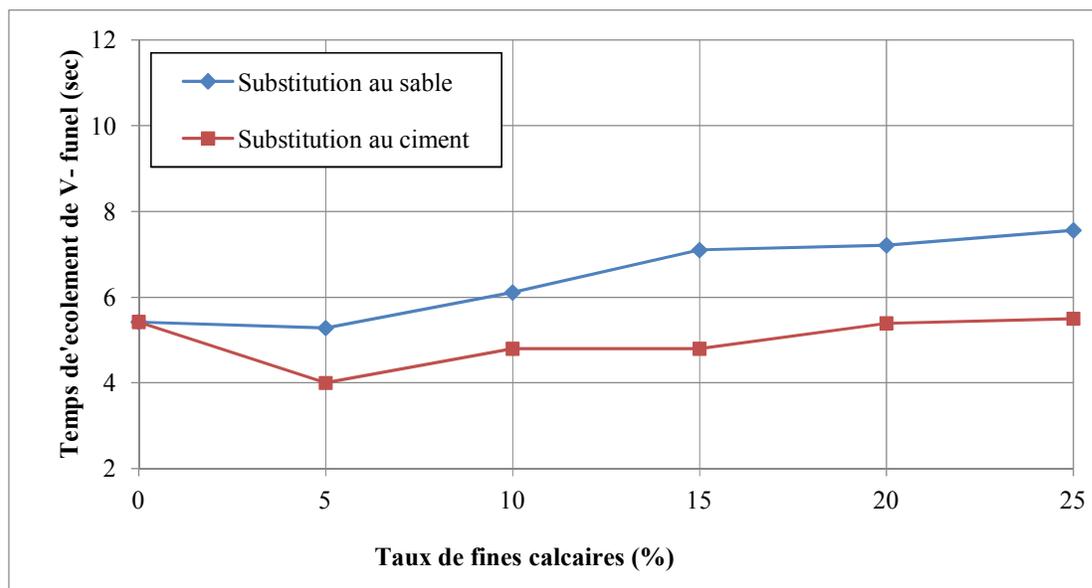


Figure V.3 : Effet des fines calcaires sur le temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V

V.2.4. Rapport H_2/H_1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. la Figure V.4 résume l'effet de la teneur en fines calcaires de tous les mélanges de bétons autoplaçants sur le rapport des hauteurs (H_2 / H_1) de l'essai de la boîte en L. L'analyse des courbes tracées montre que l'ajout de fines calcaires en substitution partielle au sable ou au ciment semble avoir même effet sur les résultats de la boîte en L, où une relation de proportionnalité est constatée entre le rapport (H_2 / H_1) et le pourcentage des fines calcaires dans tous les mélanges.

De plus, les résultats des tests obtenus montrent que l'incorporation de fines calcaires jusqu'à un taux de 20% entraîne de légères variations des rapports des hauteurs allant de 0,80 à 0,98 ; ces rapport sont acceptables selon (EFNARC, 2002). Néanmoins, seuls les mélanges de béton contenant un taux de fines de 25% présentaient un rapport de hauteurs inférieur à 0,8 qui ne sont donc pas conforme aux recommandations des normes EFNARC (EFNARC, 2002). Par conséquent, on peut déduire de ces résultats que l'ajout des fines calcaires satisfait et permet la capacité de passage avec succès et améliore les propriétés rhéologiques des BAP.

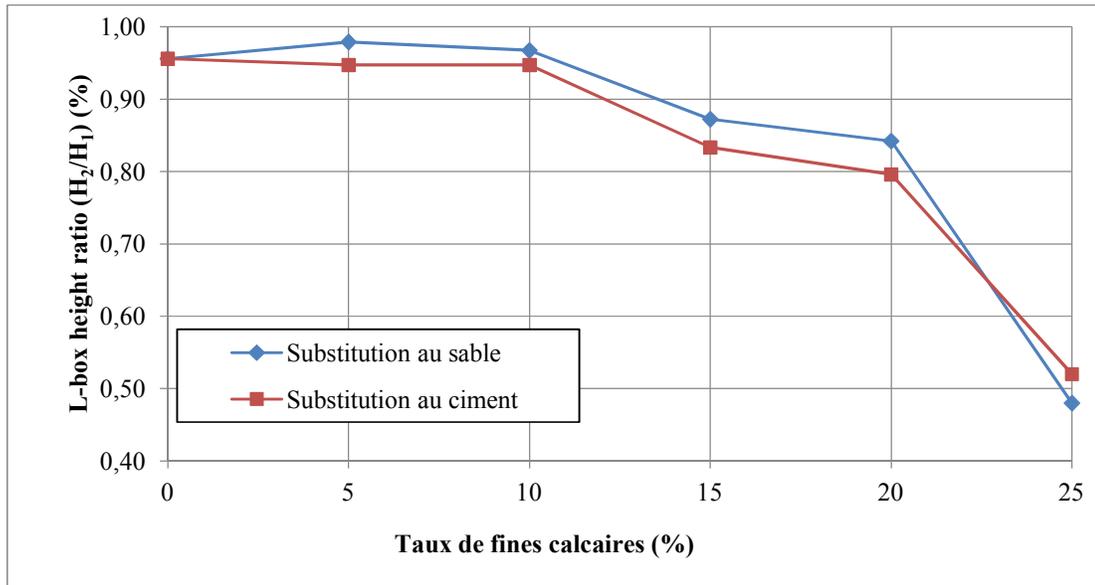


Figure V.4 : Effet des fines calcaires sur le rapport (H_2/H_1) de l'essai de la Boîte en L

V.2.5. Stabilité au Tamis

Les résultats de stabilité au tamis sont traduits en histogrammes sur la (Figure V.5) On constate que les pourcentages de laitance passant à travers le tamis sont compris entre (2 à 5 %) pour les deux séries de BAP, la substitution partiel de sable de concassage par des fines calcaires présente une faible diminution des valeurs de pourcentage de laitance, ce résultat pourrait être attribué à la surface spécifique des fines calcaires, ce qui nécessite une quantité d'eau supplémentaire pour les mouiller.

Généralement, on peut dire que les résultats obtenus montrent que tous les BAP confectionnés présentent une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage. En outre l'examen visuel des BAP révèle que ces derniers sont homogènes et stables. L'utilisation des fines calcaires permet d'augmenter le volume de pâte. De ce fait, le mortier est suffisamment visqueux pour maintenir les gros granulats et par conséquent améliorer la stabilité du béton vis-à-vis de la ségrégation.

(Safawi *et al.* 2005) ont montré que le temps d'écoulement au V-Funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi pour de très faibles temps d'écoulement (inférieures à 2 secondes) la tendance au béton à ségréguer est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués.

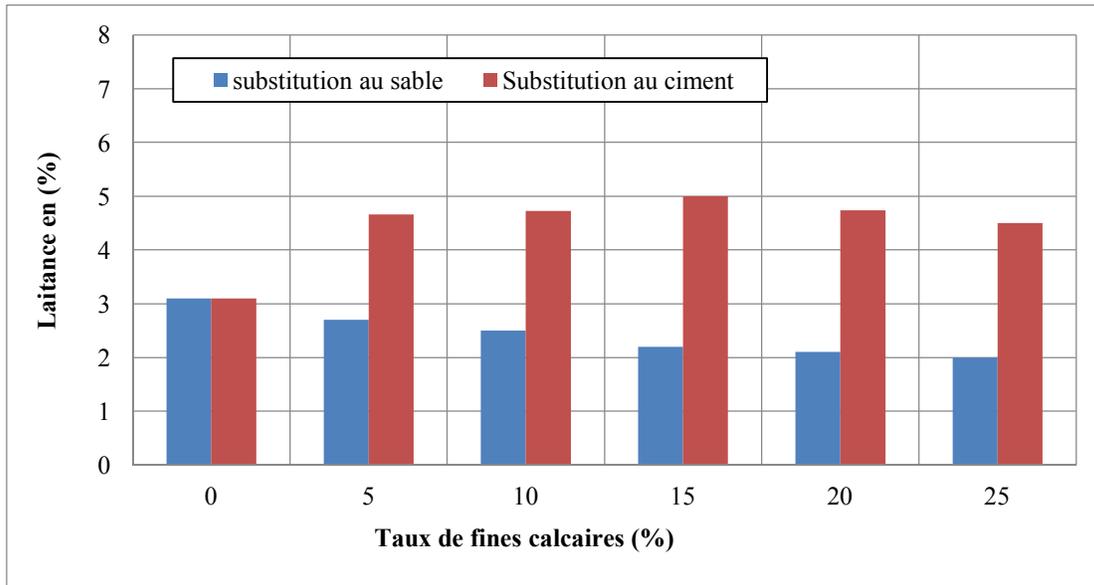


Figure V.5 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la ségrégation au tamis

V.3. Effet des fines calcaires sur les propriétés des BAP à l'Etat durci

V.3.1. Résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression des mélanges de BAP à l'âge de 7, 28, 90 et 180 jours, pour les substitutions de sable et de ciment par les fines calcaires sont illustrés aux Figures V.6 et V.7, respectivement. On peut voir que l'influence des fines calcaires sur le BAP semble avoir des effets négatifs à jeune âge pour les deux séries d'échantillons. En augmentant le pourcentage de fines dans le béton, on constate une diminution de la résistance à la compression à 7 jours jusqu'à atteindre les valeurs les plus basses de 48,51 et 42,77 MPa obtenues pour les BAP6 et BAP11 avec 25% de fines (substituées au sable et au ciment), respectivement. Cependant, au-delà de 28 jours, une augmentation de la résistance à la compression est enregistrée pour les échantillons contenant 5%, 10% et 15% de la teneur en fines comme substitution partielle au sable, et les valeurs de résistance les plus élevées à 180 jours sont enregistrées pour les BAP2, BAP3 et BAP4 avec 5%, 10% et 15% de substitution ; elles sont de 87,48, 87,41 et 86,75 MPa, respectivement. Il convient de noter qu'environ 12% d'amélioration de la performance du béton a été obtenue en comparaison avec le béton de référence. Ces résultats corroborent ceux rapportés par (Benabed *et al.* 2012). Ces auteurs ont toutefois remarqué que la résistance à la compression à tous les âges, atteint une valeur maximale avec des teneurs en fines calcaires allant de 10% à 15%, et qu'au-delà de ce pourcentage, une diminution a

été constatée. Ceci pourrait être expliqué par l'insuffisance de la pâte de ciment pour couvrir toutes les fines particules d'agrégats dans la matrice cimentaire (Celik & Marar 1996). Dans le même contexte, (Benachour *et al.* 2008) ont atteint une amélioration des performances mécaniques (résistances à la compression et à la flexion) pour les additions de fines calcaires, et la valeur maximale pour la résistance à la compression a été obtenue avec 15% de fines substituées au sable. Ils ont attribué ce résultat à l'effet de remplissage de vide et au renforcement de la pâte de ciment (et / ou renforcement de la liaison ciment / agrégats de sable) en raison de la présence de fines.

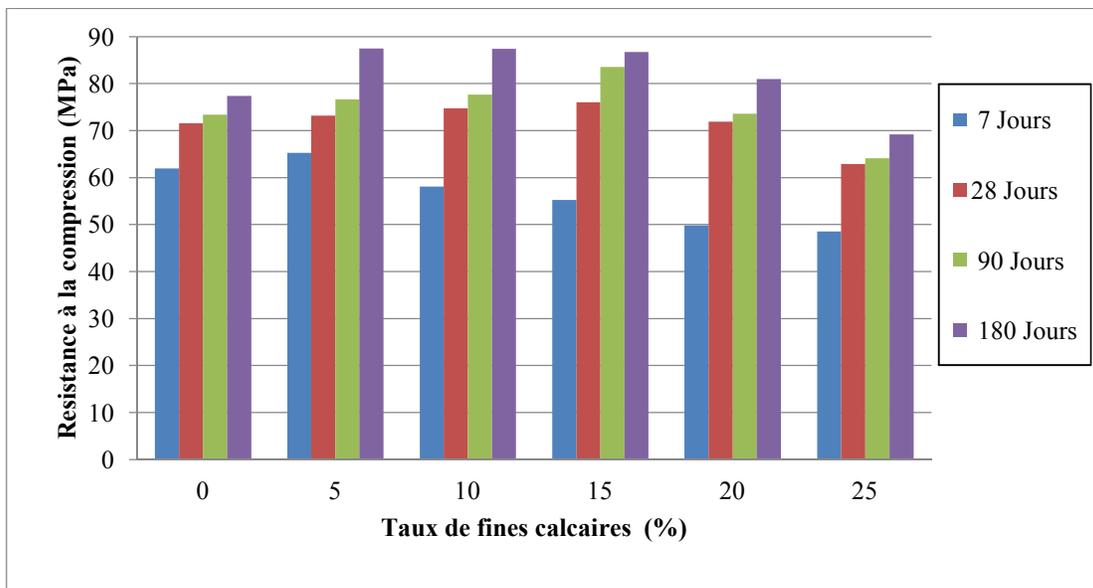


Figure V.6 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression en substitution au sable

La substitution partielle du ciment par de fines calcaires a conduit à des valeurs inférieures de résistances à la compression par rapport à celles obtenues avec une substitution partielle du sable dans tous les mélanges des bétons autoplaçants à jeune âge et à long terme. Une légère diminution a été observée pour tous les échantillons de BAP, à l'exception de l'échantillon BAP7 avec une substitution partielle de 5% de fines à 28, 90 et 180 jours. Ainsi, les résultats expérimentaux obtenus étaient respectivement de 73,86, 80,49 et 83,10 MPa, ce qui a permis de conclure que pour une teneur en fines plus élevée, la résistance à la compression semblait avoir une tendance à la diminution, et cela pourrait être attribué à deux effets.

1/ Le premier effet concerne la teneur en silice (SiO_2) dans les fines utilisées, qui représente dans notre cas environ 10%. Toutefois, comme le signalent (Nazari & Riahi 2011), seule une quantité de nano-particules de SiO_2 allant jusqu'à 4% en poids pourrait améliorer les propriétés

mécaniques et physiques des échantillons, entraînant ainsi une augmentation de la résistance à la compression.

2/ Le deuxième effet est dû à la surface spécifique élevée ($434 \text{ m}^2 / \text{kg}$) de finesse Blaine des fines calcaires utilisées dans le BAP par rapport au ciment ($322.7 \text{ m}^2/\text{kg}$). Le même argument a été avancé et rapporté par (Moon *et al.* 2017), qui ont précisé que l'hydratation du ciment était accélérée par l'ajout de fines à surface spécifique élevée.

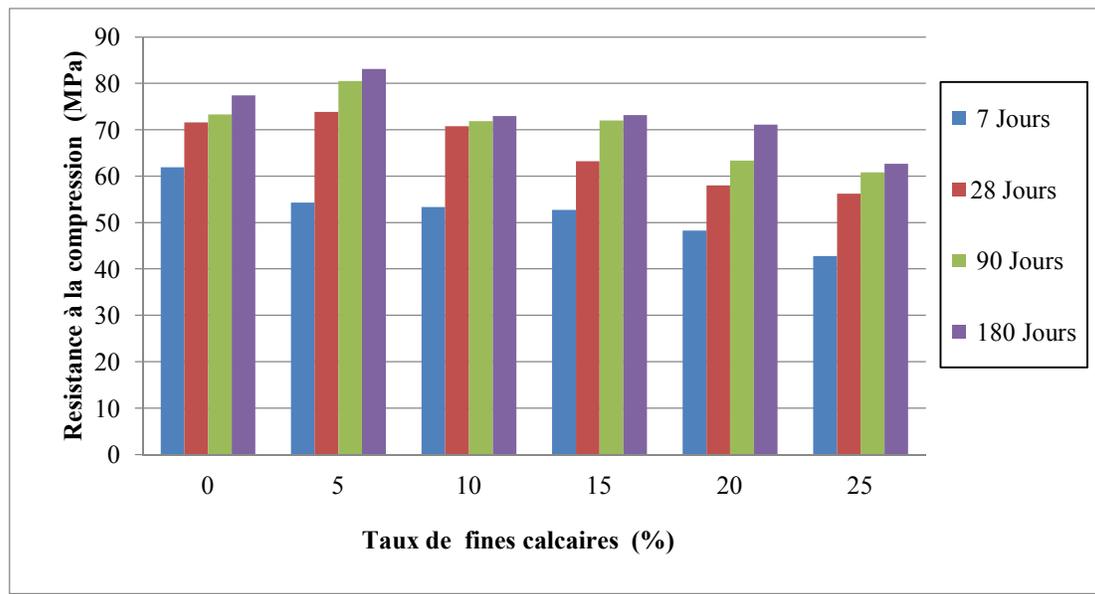


Figure V.7 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression en substitution au ciment

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par (Felekoglu 2007), qui a montré que pour un taux de substitution plus élevé de fines calcaires, une légère diminution de la résistance à la compression a été donc observée. Cependant, la substitution de 10% de ciment par des fines calcaires de carrière améliore effectivement la résistance à la compression des pâtes de ciment, alors que ce résultat semblerait fournir un avantage et une avancée positive pour l'utilisation des fines issues de carrière dans les applications de pâtes auto-compactantes.

Ce résultat a également été mentionné par (Gesoglu *et al.* 2012). Ils ont montré que les bétons contenant 5% de fines calcaires sous forme de substitution partielle du ciment pouvaient atteindre, en termes de résistance à la compression, une valeur maximale de 63 MPa à 28 jours et, le même résultat a été aussi mentionné par (Ramezani pour *et al.* 2009), des mélanges contenant

jusqu'à 10% de fines calcaires avec un rapport eau/ liant de 0,37 ont donné une résistance à la compression compétitive par rapport au béton de référence.

(Bosiljkov 2003) a remarqué les mêmes résultats dans ces travaux. L'auteur a argumenté qu'en ajoutant des fines, une amélioration de la résistance à la compression des mélanges de béton a été obtenue à 28 jours. Cette amélioration était liée à la finesse et à la taille des particules et à la distribution des fines calcaires utilisées, induisant ainsi la formation d'une matrice de ciment plus dense, d'où une amélioration de la zone de transition inter faciale (ITZ) dans les bétons autoplaçants.

V.3.2. Perméabilité à l'eau

La Figure V.8 illustre l'effet des fines calcaires sur la perméabilité des BAP en terme de profondeur de pénétration d'eau sous pression constante, pour tous les mélanges de BAP à 180 jours. Cependant, on peut déduire de l'analyse de cette figure qu'une relation inversement proportionnelle entre la profondeur de pénétration de l'eau et le pourcentage de teneur en fines calcaires dans les spécimens allant jusqu'à 15% a été observée. Pour les échantillons dont le taux est supérieur à 15%, la pénétration de l'eau devient plus profonde, en outre, les profondeurs de pénétration de l'eau sont comprises entre 32 et 42 mm pour les deux séries de substitution.

Pour la première série de BAP avec la substitution au sable, une diminution de la pénétration a été observée jusqu'à atteindre une valeur minimale de 37 mm avec 15% de substitution de fines calcaires. En outre, il a été noté que la même profondeur de 40 mm a été enregistrée avec 20% de substitution de sable pour l'échantillon BAP5 (que pour les échantillons de référence). Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par (Menadi *et al.* 2009), qui ont remarqué que l'incorporation partielle de fines calcaires jusqu'à 15% substituées au sable concassé améliore la structure des pores dans la zone de transition, réduisant ainsi la perméabilité à l'eau dans le béton conventionnel.

Cependant dans la deuxième série (substitution au ciment), la profondeur de pénétration d'eau était moins importante que celle de la substitution au sable, et la valeur la plus basse (32 mm) enregistrée avec un taux de substitution de 15% de fines calcaires est inférieure à celle de béton de référence (sans fine), ces résultats sont semblables à ceux rapportés par (Kenai *et al.* 2004), où les auteurs ont constaté une réduction de la profondeur de pénétration de l'eau dans les bétons contenant 15% de fines calcaires substituées au ciment. D'autres auteurs tels que (Ramezianpour *et al.* 2009) ont également signalé une diminution de la profondeur de

pénétration de l'eau, en incorporant dans le BAP jusqu'à 10% de fines calcaires comme substituant de ciment, entraînant ainsi un effet positif sur la perméabilité à l'eau du béton. (Tsivilis *et al.* 2003).

La profondeur de pénétration de l'eau sous pression est généralement très faible dans tous les mélanges des bétons autoplaçants; l'échantillon contenant 30% de fines présente une valeur de la profondeur de pénétration inférieure à 5mm à 91 jours, conduisant alors à une densité élevée de la matrice de la pâte et un système de pores mal interconnectés (Da Silva & De Brito 2015). D'autre part, (Valcuende *et al.* 2012) et (Leemann *et al.* 2006) ont remarqué qu'un BAP contenant des fines calcaires a présenté une profondeur de pénétration de l'eau inférieure à celle de béton conventionnel. Ils ont attribué cette diminution dans le béton autoplaçant à plusieurs aspects, tels que la morphologie des capillaires à travers lesquelles circule l'eau, qui sont plus longues, plus étroites et plus tortueuses que celles du béton ordinaire, entraînant donc une perte de pression d'eau dans les réseaux capillaires, et par conséquent une diminution de la pénétration de l'eau. De plus, la zone inter faciale de transition (ITZ) autour des agrégats grossiers dans les BAP est plus dense et uniforme par rapport au béton vibré conventionnel.

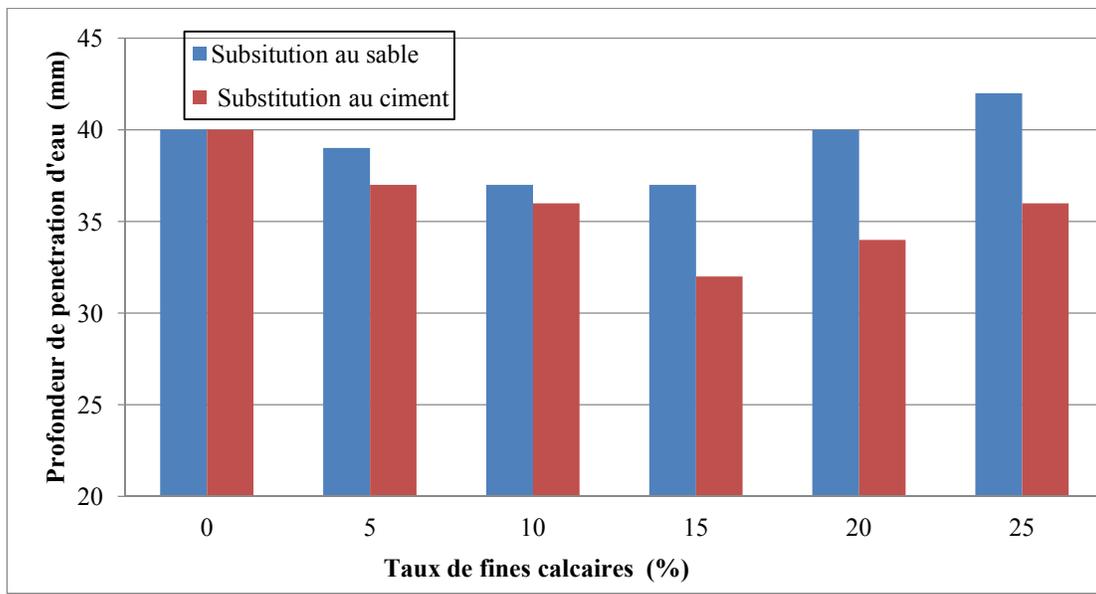


Figure V.8 : Effet des fines calcaires sur la perméabilité à l'eau

De façon générale, l'allure de la variation de la perméabilité à l'eau en fonction des pourcentages des fines rajoutés montre l'existence d'un minimum aux alentours de 15%, ce qui pourrait être expliqué par le fait que l'ajout de fines à faible taux présentera un obstacle à

l'écoulement de l'eau à travers le matériau. L'augmentation constatée au-delà, laisse supposer un réarrangement de la structure, et la création de chemin préférentiel.

Les résultats obtenus sont un indicateur révélant que la répartition des fines ne se fait pas de la même manière qu'on soit à des taux inférieurs ou supérieurs à 15%, alors que ce mécanisme est la conséquence de plusieurs paramètres physico-chimiques tels que la composition chimique des fines calcaires, et leur nature, la tension interfaciale et la viscosité de l'eau.

On peut noter que l'influence des fines calcaire sur le BAP, dans la présente recherche semble présenter de nombreux avantages et bénéfiques, pour les deux séries de substitution.(Neville *et al.* 2000), la profondeur de pénétration de l'eau inférieure à 50 mm sous pression correspond à un béton imperméable, tandis que les valeurs inférieures à 30 mm s'appliquent principalement au béton imperméable exposé à des conditions environnementales agressives.

V.3.3. Perméabilité aux Gaz

La Figure V.9 résume l'influence des fines calcaires à différents taux sur le coefficient de perméabilité au gaz de BAP à 180 jours. Les résultats obtenus ont clairement montré que le pourcentage de substitution du sable par un faible pourcentage de fines calcaires à un taux de 15%, se comporte différemment par rapport à celui du ciment. Les valeurs du coefficient de perméabilité aux gaz se situent dans la plage de 4.91×10^{-17} à 6.19×10^{-17} m² pour les deux séries de BAP.

Pour la première série d'échantillons (substitution de sable), le coefficient de perméabilité a diminué jusqu'à atteindre une valeur minimale de $4,91 \times 10^{-17}$ m² à 5% de substitution partielle, ce qui représente une réduction de la perméabilité aux gaz de 12,7%. Par la suite, une légère augmentation pouvant atteindre $5,95 \times 10^{-17}$ m² a été enregistrée avec un échantillon contenant 25% de fines calcaires ; cette valeur était légèrement supérieure à celle du béton de référence.

Un résultat similaire a été remarqué par (Menadi *et al.* 2009), qui ont signalé que l'ajout de 15% de fines calcaires substituées au sable de concassage, présentait une légère augmentation du coefficient de perméabilité aux gaz par rapport au béton sans addition de fines, alors que la perméabilité intrinsèque aux gaz reste inférieure ou égale à celle des échantillons sans incorporation de fines, ainsi que pour un taux de fines allant jusqu'à 35% de substitution au sable (Benachour *et al.* 2008).

Cependant, dans la deuxième série d'échantillons, pour le béton contenant 5% de fines substituées au ciment, une augmentation de 10% sur le coefficient de perméabilité au gaz, a été enregistrée par rapport au béton de référence. Contrairement à 25% de fines calcaires, cette perméabilité a diminué jusqu'à atteindre une valeur minimale de $5.38 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, qui était presque égale à la valeur du béton de référence de $5.63 \times 10^{-17} \text{ m}^2$.

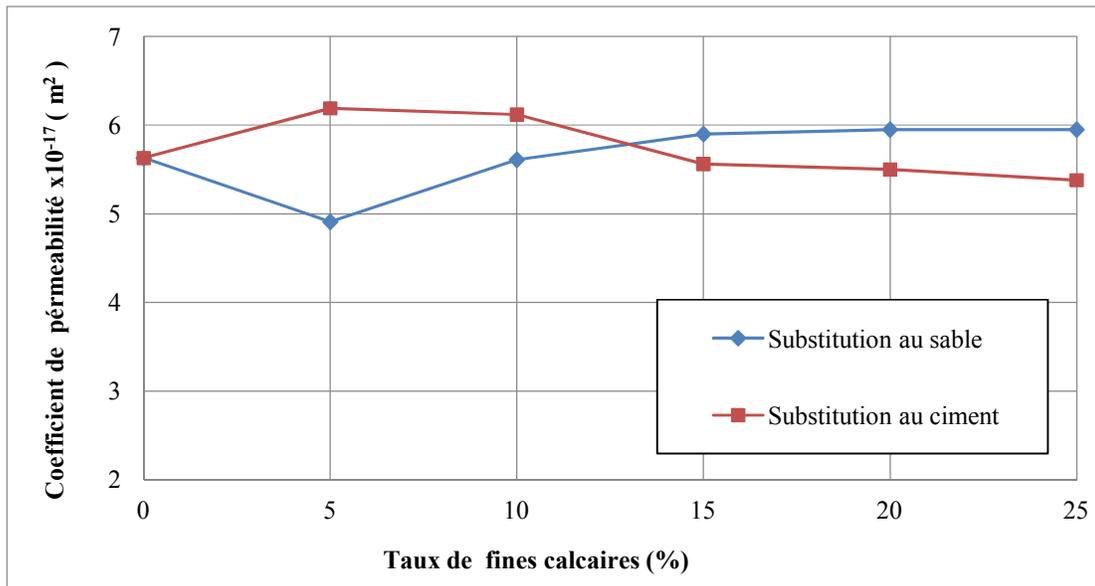


Figure V.9 : Effet des fines calcaires sur la perméabilité aux Gaz

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Tsvivilis *et al.* 2003), qui ont déclaré dans des travaux antérieurs, que les mélanges de béton contenant des fines calcaires comme une partielle substitution dans le ciment, présentent une valeur plus élevée de perméabilité aux gaz par rapport aux bétons sans additif, à l'exception des spécimens fabriqués avec un taux de fines de 35% qui ont présenté une faible valeur de perméabilité aux Gaz.

En outre, (Boel *et al.* 2008) ont argumenté, que l'utilisation du calcaire plus fin induit une microstructure plus dense, entraînant donc une diminution du coefficient de perméabilité aux gaz ; ils ont attribué cet effet à la teneur en eau et à la teneur en poudre.

D'autre part, (Tragardh 1999) a rapporté, d'après ses conclusions concernant ses études sur la microstructure de la zone inter-faciale de transition (ITZ), et de la masse de pâte dans les bétons auto-compactants et les bétons conventionnels, que ce dernier présente une porosité significative et que l'addition des fines calcaires pourrait affecter le mode d'hydratation du BAP.

De façon générale, nous remarquons qu'à partir de 15% de fines des perméabilités sensiblement constantes, ce qui laisse supposer que le pourcentage des fines n'affecte pas cette propriété, néanmoins pour de faibles taux de fines, des variations sont remarquées. Ceci pourrait s'expliquer par différents phénomènes, à savoir le changement de surface spécifique affectant des phénomènes de surface et la rétention de fluide ce qui agit sur la perméabilité de milieux et de changement des circuits d'écoulements des fluides par l'ajout des fines.

V.3.4. Diffusion des ions chlorure

La variation de pénétration des ions chlorure pour les deux séries de substitution (sable et ciment) a été effectuée, selon la norme (ASTM 1994) C1202. Les résultats en terme de charge électrique totale (en Coulombs) passée à travers les éprouvettes cylindriques de béton à l'âge de 180 jours, sont représentés sur la Figure V.10. A partir de cette Figure, on remarque que pour tous les échantillons de BAP, les valeurs enregistrées se situent entre 2565 et 3636 C pour les deux séries de substitution, qui pourraient être classées dans la zone modérée selon la norme (ASTM 1994) C1202.

Dans le cas de la première série de bétons, la substitution de sable par 15% de fines calcaires réduit nettement la pénétration des ions chlorure, et la valeur minimale obtenue est de 2565 C pour l'échantillon BAP6 contenant 25%, de fines calcaires, ce qui correspond donc à un taux de réduction de 16% de pénétration des ions chlorure, par rapport au béton de référence. Cependant, comme avait été rapporté précédemment par (Menadi *et al.* 2009), pour une teneur de 15% en fines calcaires substituées dans le sable concassé, un léger effet sur la pénétration des ions chlorure a été mentionné; où cette étude a été réalisée sur deux types de ciments Portland au calcaires (C et D) ayant 15% de fines calcaires en poids, et avec une finesse de Blaine de 308 et 330 kg/m², respectivement. A travers ces résultats, on peut dire que le remplacement partiel du sable concassé par des fines calcaires semble affecter légèrement la pénétration des ions chlorure dans le BAP.

En ce qui concerne la deuxième série de remplacement, une légère diminution a été obtenue dans l'échantillon fabriqué avec 5% de fines calcaires, tandis qu'une augmentation progressive a été constatée en augmentant la substitution des fines dans le ciment. La valeur la plus élevée de charge passée (3636 C) a été obtenue pour BAP11 à 25% de substitution de fines, avec une augmentation de 20% de la pénétration des ions chlorure obtenue par rapport au béton sans

addition. Ce résultat pourrait être attribué au faible rapport eau/liant de 0,40 utilisé dans cette étude.

La même tendance de ce résultat a été enregistrée par (Ramezani pour *et al.* 2009), qui ont affirmé que le rapport eau/ liant passant de 0,55 à 0,45, puis à 0,37, a entraîné une réduction significative sur la pénétration des ions chlorures dans les bétons autoplacants, et le remplacement partiel de ciment par des fines calcaires a relativement augmenté cette pénétration ; ils ont conclu que la substitution optimale de ciment par des fines calcaires est de 15%.

(Ghrici *et al.* 2007) ont rapporté que pour les spécimens fabriqués avec un rapport eau/liant de l'ordre de 0,6, la pénétration des ions chlorure dans le béton ayant 15% de fines calcaires substituées au ciment a cependant augmenté de 67 et 135% pour 28 et 90 jours respectivement. Ce rapport réduit de 0,6 à 0,4, semble avoir un effet considérable, où une diminution de la pénétration des ions chlorure a été obtenue. Un résultat similaire a également été rapporté de (Bonavetti *et al.* 2000), qui ont remarqué que la pénétration des ions chlorures a augmenté de 43% à 114% pour les bétons contenant 10% et 20% de fines calcaires, respectivement, qui est également rapporté par (Gesoglu *et al.* 2012).

Un autre résultat a été obtenu par (Mohammed *et al.* 2014), qui ont mentionné que l'utilisation de fines calcaires à un taux de remplacement relativement élevé au ciment augmente la vitesse de pénétration du chlorure dans le béton autoplacant par rapport aux échantillons composés uniquement avec de ciment. Ils ont conclu que les fines calcaires agglomérées près de l'interface agrégat-pâte pourrait en contribuer à augmenter l'épaisseur de la zone inter faciale de transition (ITZ) et conduire à une augmentation de la diffusion des ions chlorure.

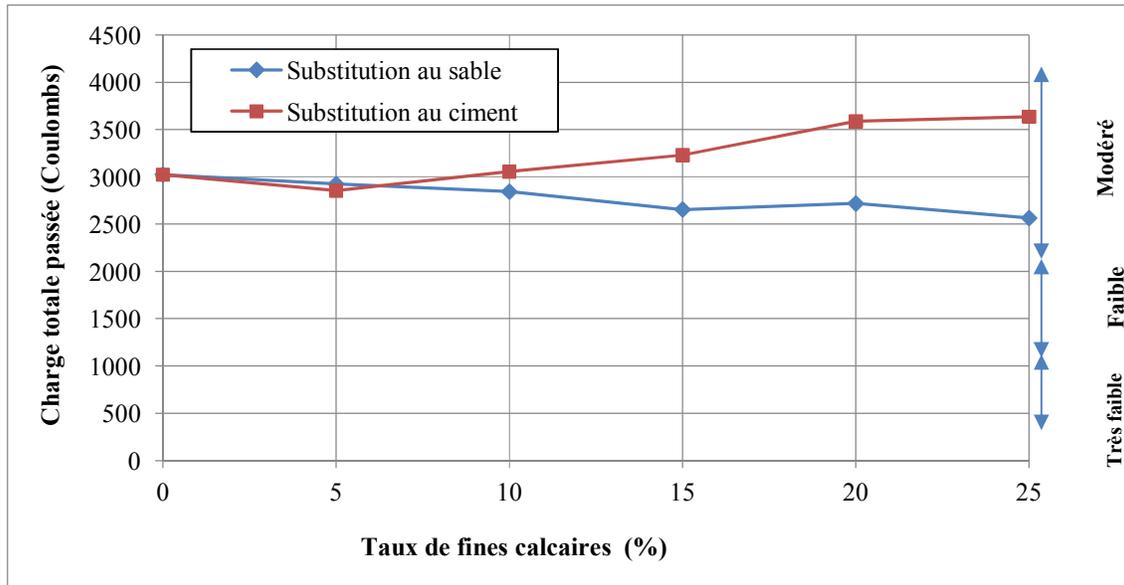


Figure V.10 : Effet des fines calcaires sur la diffusion des ions chlorure

V.3.5. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

Les résultats des coefficients d'absorption d'eau et de sorptivité des échantillons de béton autoplaçant pour les substitutions partielles de sable et de ciment sont présentés aux Figures V.11, à V.14. Ces résultats montrent clairement une légère augmentation du coefficient de sorptivité avec celle du pourcentage de fines calcaires pour les deux séries de substitution. Cependant, il convient de noter que le taux d'augmentation des échantillons substitués au sable est inférieur à celui de substitution au ciment en terme d'absorption d'eau. Le coefficient de sorptivité varie entre 20×10^{-3} et 101×10^{-3} ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$). A partir de la Figure V.14, on remarque aussi que pour un taux de substitution de fines de 25% de remplacement du ciment, la plus grande valeur de sorptivité est obtenue. Ainsi, les résultats illustrés sur les Figures V.11 et V.12, montrent que la substitution de sable concassé ou bien le ciment jusqu'à 15% par des fines calcaires a un effet négligeable sur l'absorption d'eau pour les bétons autoplaçants. Ces résultats sont similaires de ceux trouvés par d'autres chercheurs, tels que (Menadi *et al.* 2009), qui ont confirmé qu'avec l'ajout de 15% de fines calcaires substituées au sable concassé, un effet négligeable a été constaté sur l'absorption capillaire de l'eau pour tous les échantillons de béton ordinaire.

D'autres auteurs (Benachour *et al.* 2008) ont clarifié une évolution comparable de l'absorption capillaire d'eau dans des mortiers contenant des proportions de substitution en masse

de sable allant jusqu'à 25%, alors que (Tsvilis *et al.* 2003) ont affirmé que le remplacement du ciment par 15% de fines calcaires diminuait légèrement l'absorption capillaire du béton par rapport aux bétons sans fines calcaires et ceux ayant un rapport eau / liant constant égal à 0,7.(Da Silva & De Brito 2015) ont signalé qu'aucune différence significative n'a été observée sur les bétons autoplaçants fabriqués en intégrant 30% de fines calcaires ou des cendres volantes par rapport aux échantillons sans ajouts.

De plus, l'ajout de fines calcaires semble affecter de manière positive, l'absorption d'eau par capillarité dans tous les spécimens de béton autoplaçant. Aussi le coefficient de sorptivité est diminué avec la période de cure et avec la réduction du rapport eau/ liant. Néanmoins, l'augmentation de la teneur en fines calcaires dans la substitution de ciment conduit à une augmentation progressive du coefficient de sorptivité (Ramezani pour *et al.* 2009).

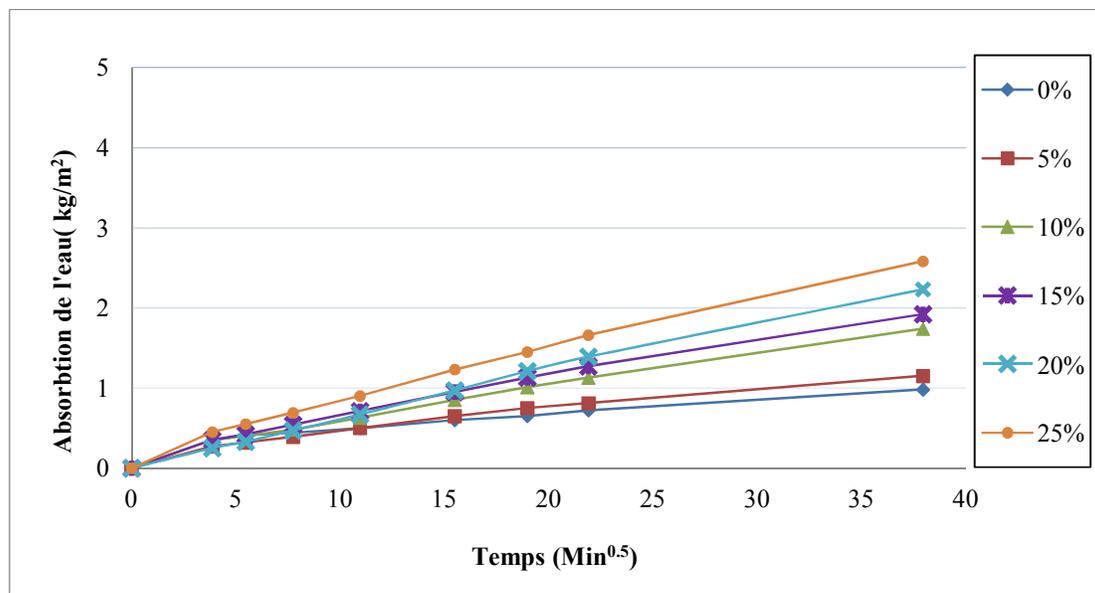


Figure V.11 : Effet des fines calcaires sur l'absorption d'eau par capillarité (substitution au sable)

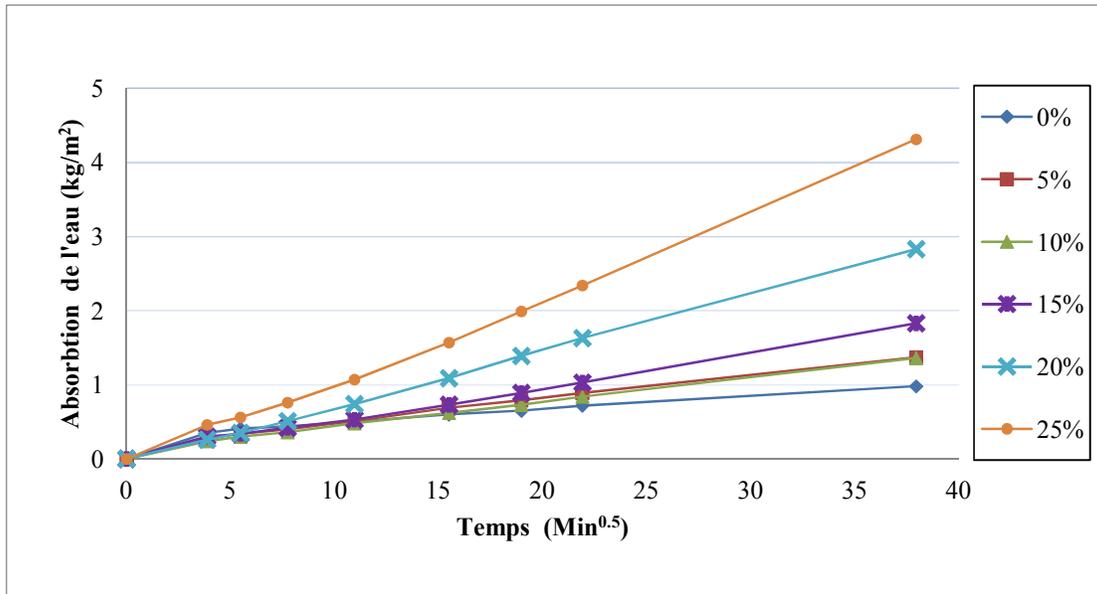


Figure V.12 : Effet des fines calcaires sur l'absorption d'eau par capillarité (substitution au ciment)

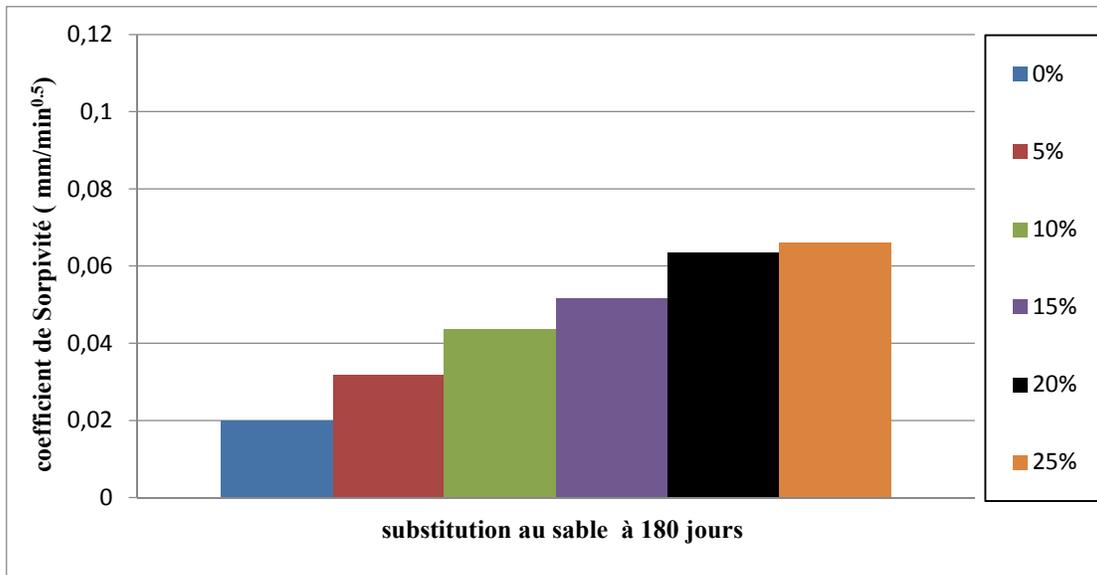


Figure V.13 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorpivité (substitution au sable)

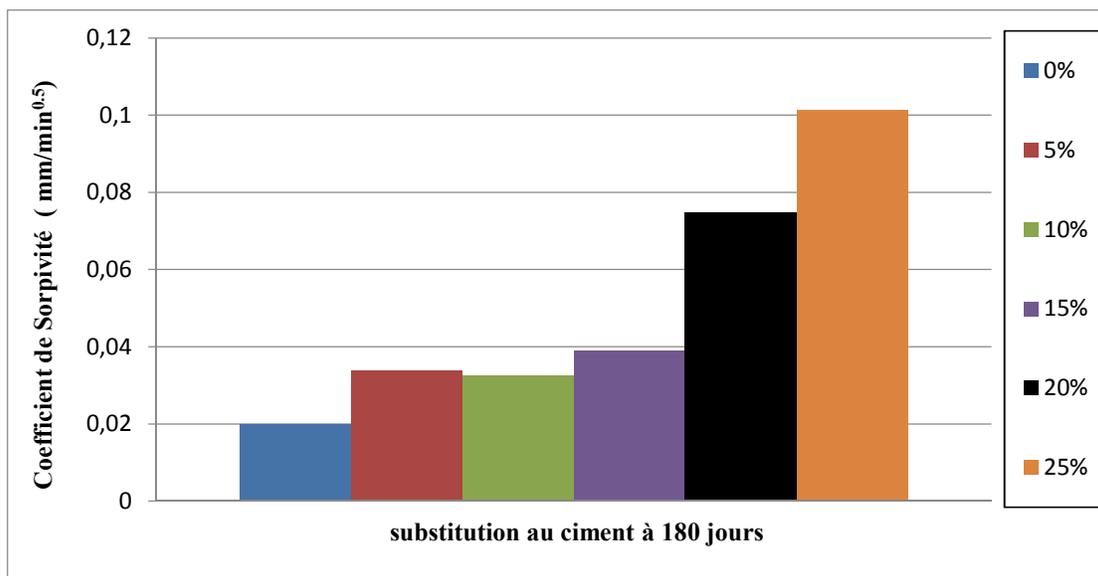


Figure V.14 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorptivité (substitution au ciment)

V.3.6. Porosité totale

Les résultats de la porosité à l'eau pour les différents mélanges de BAP à 180 jours sont résumés à la Figure V.15. Ils montrent que, pour tous les mélanges, l'effet du calcaire dans le béton semble suivre la même tendance que la perméabilité aux gaz.

La substitution de sable par des fines calcaires présente une porosité inférieure à celle au ciment de tous les bétons. D'après cette figure, on remarque que la porosité des BAP pour la première série (la substitution du sable) varie de 12,26% à 13,70%, où le mélange BAP4 avec 15% de fines calcaires présente la même valeur de porosité à l'eau que le béton de référence.

La substitution de ciment par 5% et 10% de fines calcaires, présente les valeurs de porosité les plus élevées, enregistrées respectivement 14,43% et 14,59%. On peut donc en conclure que l'augmentation de la teneur en fines calcaires dans les deux séries de substitution génère une augmentation de la porosité d'eau des bétons autoplaçant. Des résultats similaires ont été rapportés par (Menadi *et al.* 2009), qui ont noté une légère diminution de la porosité totale de béton conventionnel, fabriqué avec deux types de ciments contenant 15% de fines calcaires substituées au sable concassé.

(Tsilivilis *et al.* 2003) ont également indiqué que, pour les bétons contenant jusqu'à 15% de fines calcaires substituées au ciment, présentaient la même porosité que le béton de référence.

Selon des travaux de recherches effectués par (Valcuende & Parra 2010), ont remarqué que le volume total des pores dans les bétons autoplaçants est inférieur d'une moyenne de 10,8% par rapport au béton ordinaire vibré, ils ont conclu que l'addition des fines calcaires produit un meilleur tassement des particules, entraînant ainsi une porosité plus faible et une structure poreuse plus fine dans les BAP, produisant également un réseau de pores plus complexe.

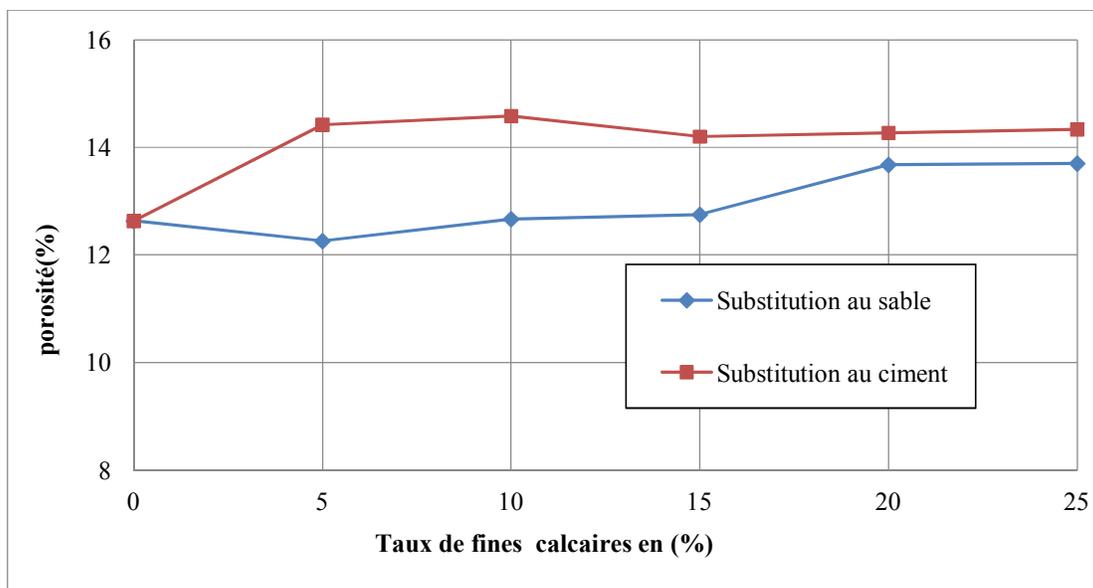


Figure V.15 : Effet des fines calcaires sur la porosité totale

V.3.7. Carbonatation accélérée

Les Figures V.16 et V.17 illustrent les résultats de la profondeur de carbonatation accélérée des échantillons de béton autoplaçant, pour les substitutions partielles de sable et de ciment. Les mesures des profondeurs de carbonatation ont été réalisées périodiquement par pulvérisation de la phénolphthaléine à des échéances de 7, 14 et 28 jours. Sur l'ensemble des mélanges de BAP testés.

La profondeur de carbonatation est négligeable ; seuls deux bétons ont présenté des signes de carbonatation avec une faible profondeur de l'ordre de 2.5 et 3.5 mm pour les bétons contenant 20 et 25 % de fines calcaires substituées au ciment. Ces résultats sont semblables à ceux rapportés par (Tsilivilis *et al.* 2000); ils ont remarqué que les spécimens de mortiers fabriqués seulement avec de ciment ont présenté une profondeur de carbonatation de 3 à 5 mm pendant la période d'exposition de 9 et 12 mois respectivement, tandis que les échantillons de mortiers fabriqués avec du ciment contenant des fines calcaires n'ont pas été carbonatés. Le spécimen contenant 20% de fines calcaires offre une protection optimale contre la corrosion des barres

d'armatures. Ils ont conclu que, les ajouts de fines calcaires diminuent la porosité totale et la profondeur de carbonatation des mortiers. (Lollini *et al.* 2014) ont remarqué une diminution de la résistance à la carbonatation, pour les échantillons contenant 30% de fines calcaires substituées au ciment, tandis que les échantillons fabriqués avec un taux de substitution de 15% ne présentaient aucun effet remarquable.

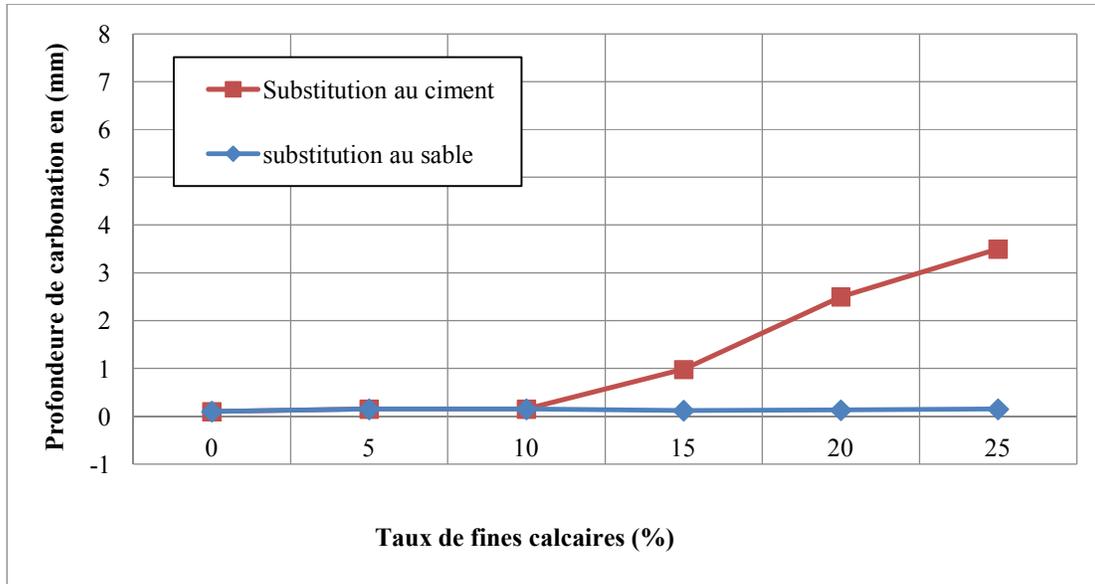


Figure V.16 : Effet des fines calcaires sur la profondeur de carbonatation à 28 jours

a) Examen visuel

Un examen visuel des BAP après 28 jours d'essais de carbonatation accélérée est représenté sur la Figure V.17. On observe que la zone non carbonatée (saine) prend une couleur mauve claire ; par contre la zone carbonatée reste incolore. La phénolphthaléine offre donc une lecture assez simple de la profondeur de carbonatation du fait que le front est net et génère de bons contrastes de couleur. Nous observons que tous les échantillons de béton sont entièrement colorés, ce qui explique aucun signe de carbonatation à l'exception de seuls ceux contenant 20 et 25% de fines calcaires substituées au ciment qui présentent un début de carbonatation de la partie extérieure

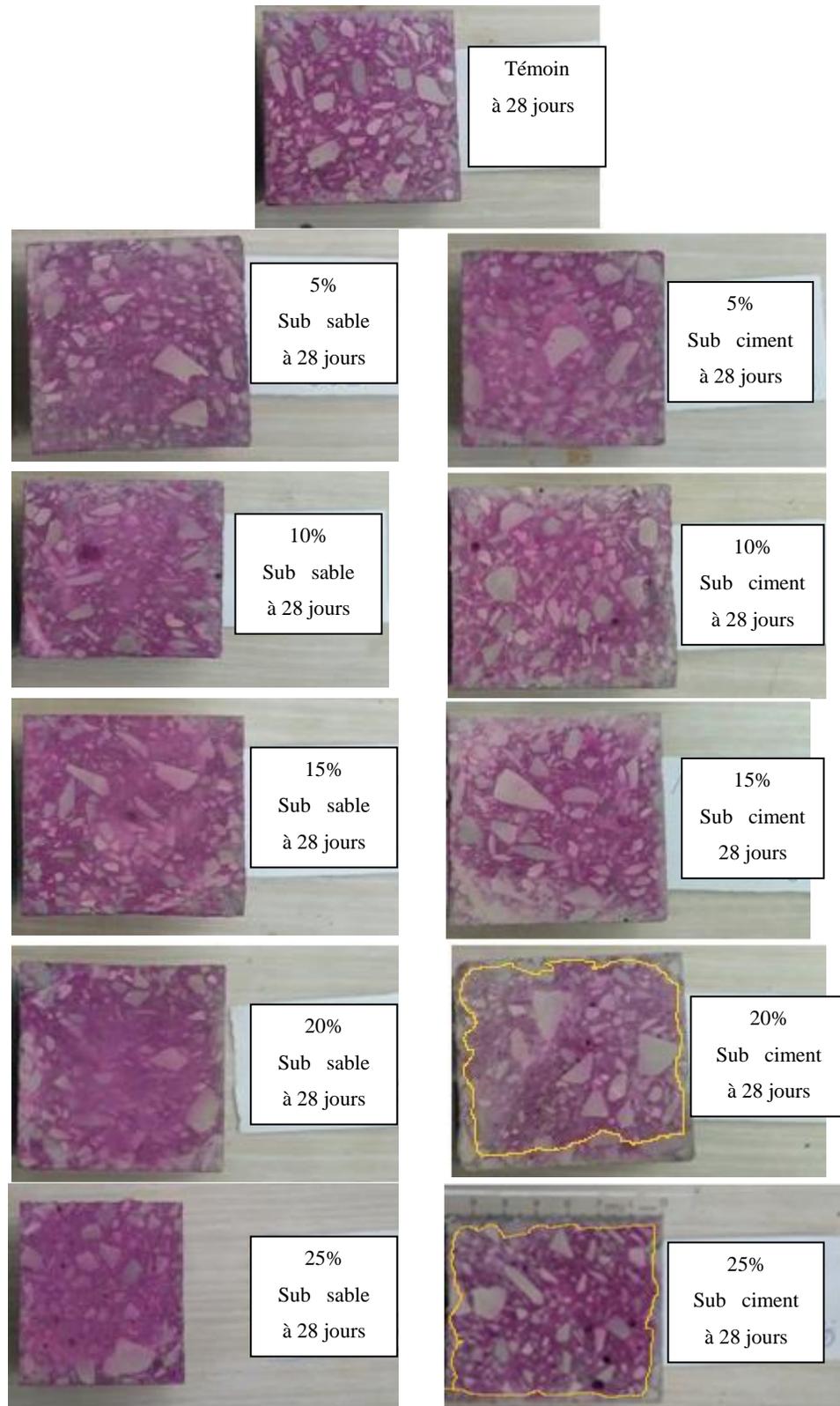


Figure V.17 : Examen visuel des échantillons de BAP et la mesure de profondeur de carbonatation à 28 jours

b) Suivi de masse

Parallèlement aux mesures des profondeurs carbonatées, un suivi de masse en fonction de l'âge d'exposition des spécimens dans l'enceinte a été réalisé sur tous les échantillons de BAP. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figures V.18. et V.19 pour la substitution au sable et au ciment respectivement. De façon générale, on remarque une très faible augmentation des masses à 28 jours de test sur l'ensemble des échantillons de bétons à l'exception des échantillons BAP10 et BAP11 contenant 20 et 25 % de fines calcaires substituées au ciment ; ils présentent des valeurs relativement importantes de l'ordre de 11.4 et 11 grammes respectivement par rapport aux masses initiales. Ceci a été observé sur la profondeur de carbonatation de ces deux échantillons sur la figure V.17

Cette augmentation de masse constatée pourrait être attribuée à la réaction du phénomène de carbonatation de béton qui se produit comme suit :
La présence de dioxyde de carbone (CO_2) réagit avec la portlandite (CaOH_2) de la pâte de ciment durci, en présence de l'humidité (H_2O) produisant ainsi le carbonate de calcium (CaCO_3) qui présente une masse molaire plus importante que celle de la portlandite.

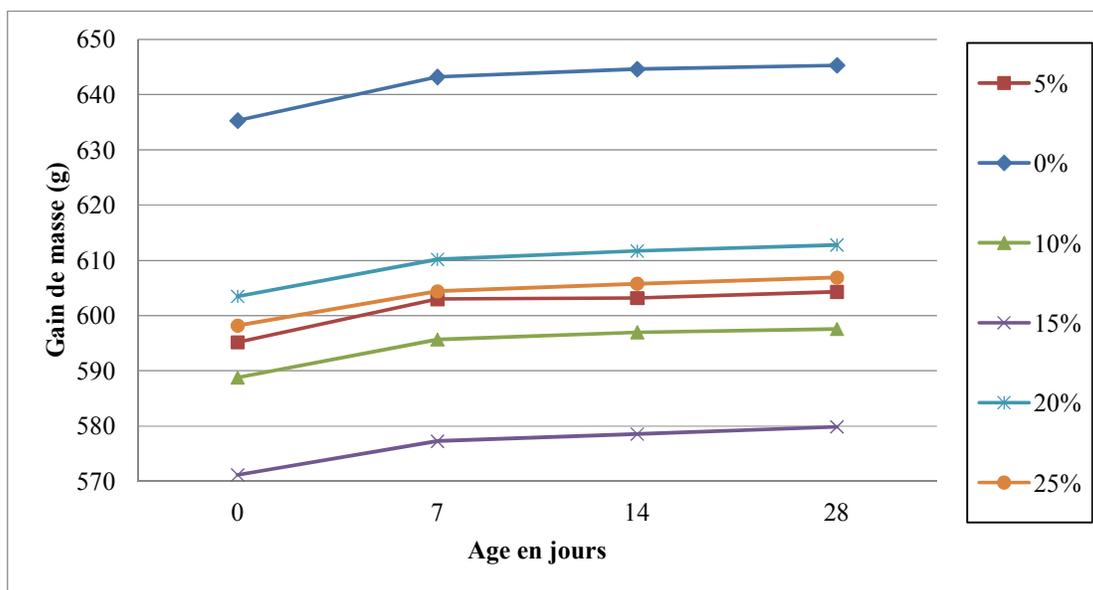


Figure V.18 : Variation de masse due à la carbonatation des BAP
(Substitution au sable)

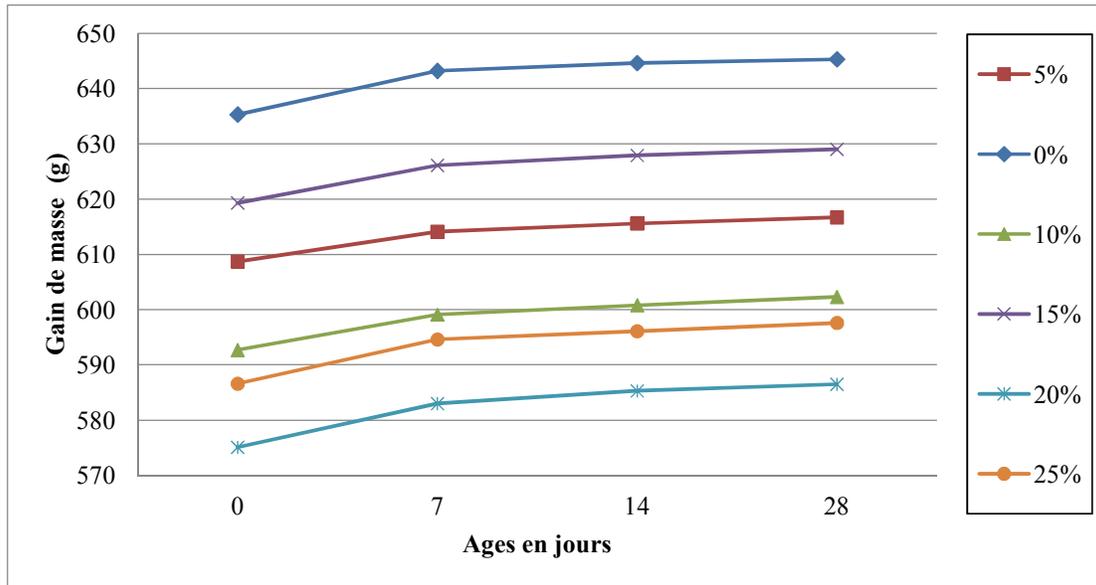


Figure V.19 : Variation de masse due à la carbonatation des BAP
(Substitution au ciment)

D'après (Neville *et al.* 2000), la carbonatation peut avoir quelque effet positifs, du moment que le (CaCO_3) occupe un volume plus important que le (CaOH_2), la porosité du béton carbonaté est réduite. De plus, l'eau libérée par la portlandite lors de la carbonatation, peut contribuer à l'hydratation du ciment anhydre, ces changements sont bénéfiques et conduisent à une augmentation de la dureté de surface, une augmentation de la résistance de la surface, une diminution de la perméabilité superficielle, une réduction des mouvements d'humidité et une résistance accrue aux formes d'attaque dépendantes de la perméabilité.

V.3.8. Corrélations entre les propriétés de durabilité du Béton autoplaçant

Les principaux éléments conduisant à la diffusion de fluides à travers le béton sont les volumes respectifs des fractions de pâte, matrice et agrégat, la texture de la structure de pores de la matrice (la distribution de la taille des pores, la forme des pores, la tortuosité et la continuité des pores dans le béton) et la zone interfaciale de transition (ITZ) à proximité des particules d'agrégats. (Gesoglu *et al.* 2012).

a) Corrélation entre Résistance à la Compression et Profondeur de Pénétration D'eau

La Figure V.20 montre la relation entre la profondeur de pénétration de l'eau et la résistance à la compression de tous les échantillons de BAP substitution de sable, à l'âge de 180 jours. Une augmentation de la résistance à la compression est associée à une diminution de la profondeur de pénétration de l'eau ; une bonne corrélation ($R^2 = 0,81$) est observée. Cependant, malgré que les corrélations expérimentales entre la pénétration de la profondeur de l'eau et la résistance à la compression sont rares dans la littérature, (Menadi *et al.* 2009) ont noté une tendance à la diminution de la profondeur de pénétration de l'eau avec l'augmentation de la résistance, mais la corrélation était faible ($R^2 = 0,26$ pour une relation linéaire). Ils en ont déduit que la profondeur de pénétration de l'eau ne dépend pas seulement de la résistance à la compression, mais également de la structure des pores de la matrice de béton.

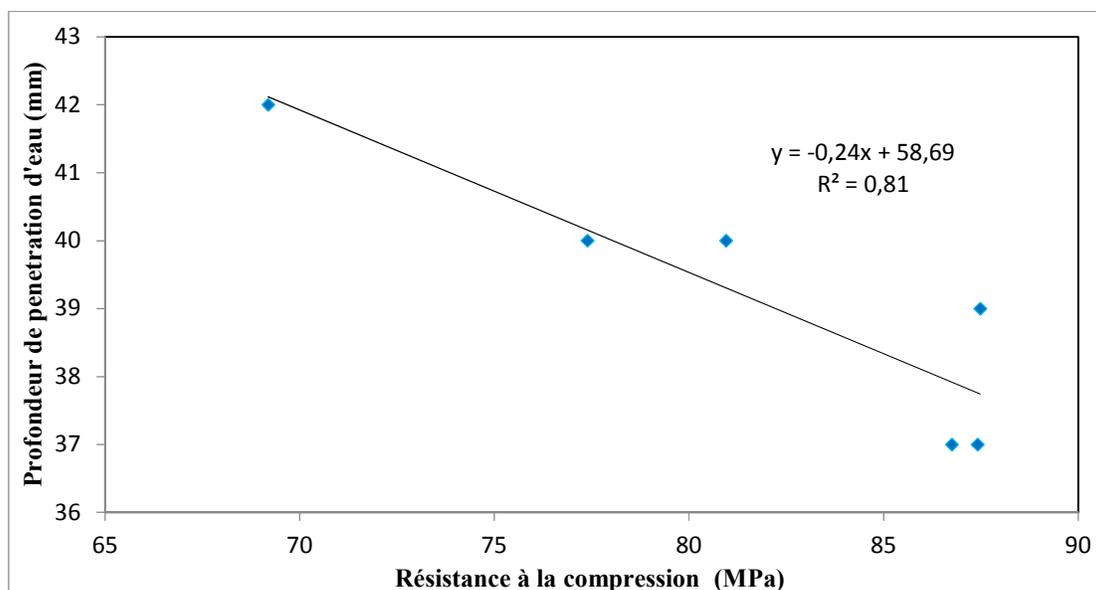


Figure V.20 : corrélation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau (substitution dans le sable)

b) Corrélation entre la Porosité Totale et la Charge Totale Passée et le Coefficient de Perméabilité aux Gaz

La porosité totale en fonction de la charge totale passée et le coefficient de perméabilité aux gaz des mélanges de béton autoplaçant contenant des fines calcaires substituées au sable sont illustrés aux Figures 21 (a) et (b), respectivement. D'après ces figures, on remarque de faibles relations qui sont : $Y = -210.61X + 5515.56$ avec $R^2 = 0,53$ pour la porosité totale et la charge totale passée et $Y = 0.51X - 1.00$ avec $R^2 = 0,60$ pour la porosité totale et le coefficient de perméabilité au gaz pour une fonction linéaire. Cependant, la charge totale passée absorbée a tendance à diminuer avec l'augmentation de la porosité totale et le coefficient de perméabilité aux gaz a tendance à augmenter avec l'augmentation de la porosité totale. Ceci pourrait s'expliquer.

En réalité, la diffusion des ions gaz et chlorures ne dépend pas seulement de la porosité totale, mais également de la tortuosité, de la surface spécifique, de la connectivité des pores et de leur distribution granulométrique à l'intérieur de la matrice.

(Benachour *et al.* 2008), ont remarqué que la taille moyenne des pores diminue de manière significative avec une teneur en fines calcaires allant de 15% à 45%, malgré qu'une augmentation de la porosité totale a été enregistrée. L'incorporation des quantités élevées de fines calcaires induit une population de taille de pore notamment plus fine. La taille des molécules des ions chlorure est de (36.6 nm), est plus grande que la taille des molécule d'azote (N_2) qui est de (0.364 nm) (Sun & Bai 2017), ce qui permet au gaz de passer facilement à travers les structures des pores, alors que les ions chlorure ne peuvent pas les traverser facilement, notamment en raison du phénomène d'absorption et les réactions chimiques (Zhang *et al.* 2018).

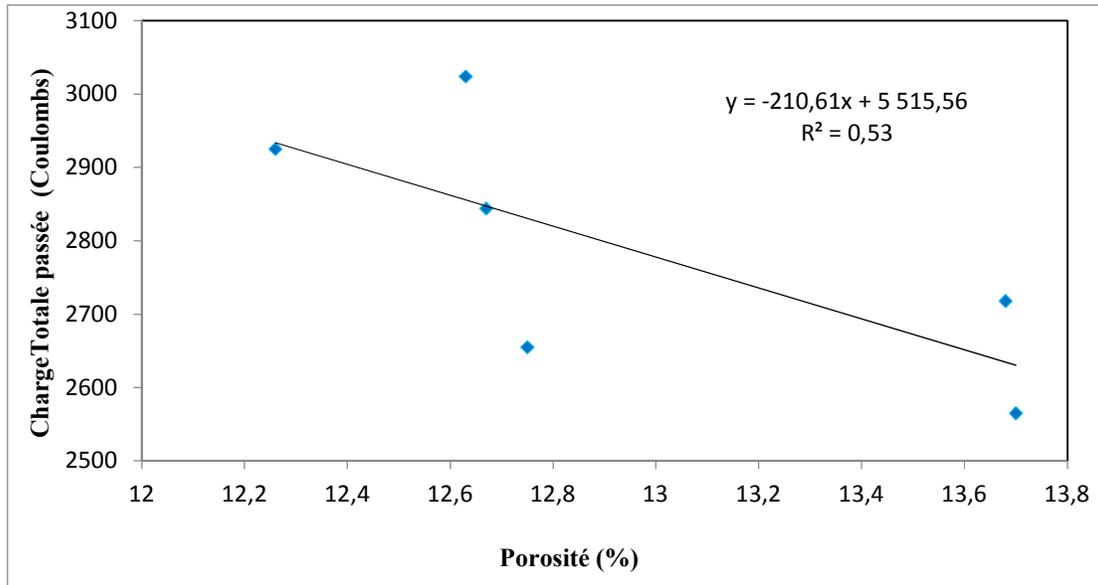


Figure V.21. a : corrélation entre la porosité totale et la charge total passé
(substitution dans le sable)

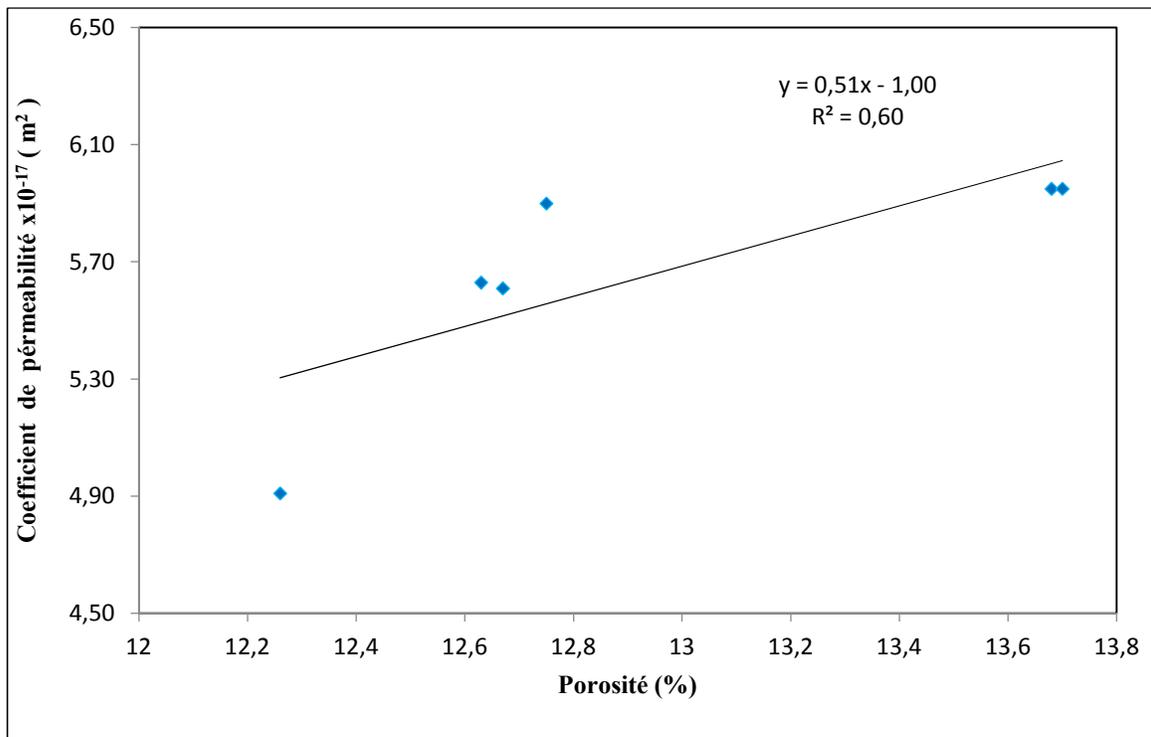


Figure V.21. b : corrélation entre la porosité total et le coefficient de perméabilité à gaz
(substitution dans le sable)

c) Corrélation entre la Porosité Totale et la Sorptivité

La Figure V.22 illustre la corrélation entre la sorptivité et la porosité totale pour tous les mélanges de bétons autoplaçants contenant des fines calcaires substituées dans le sable. D'après cette figure, on remarque une augmentation de la porosité totale associée à une augmentation de la sorptivité. Une bonne corrélation linéaire ($R^2 = 0,71$) est observée entre les deux propriétés. Des tendances similaires ont été observées par (Kanellopoulos *et al.* 2012). Ils ont expliqué cette relation à ce que plus la porosité est grande, plus le matériau peut absorber de liquide.

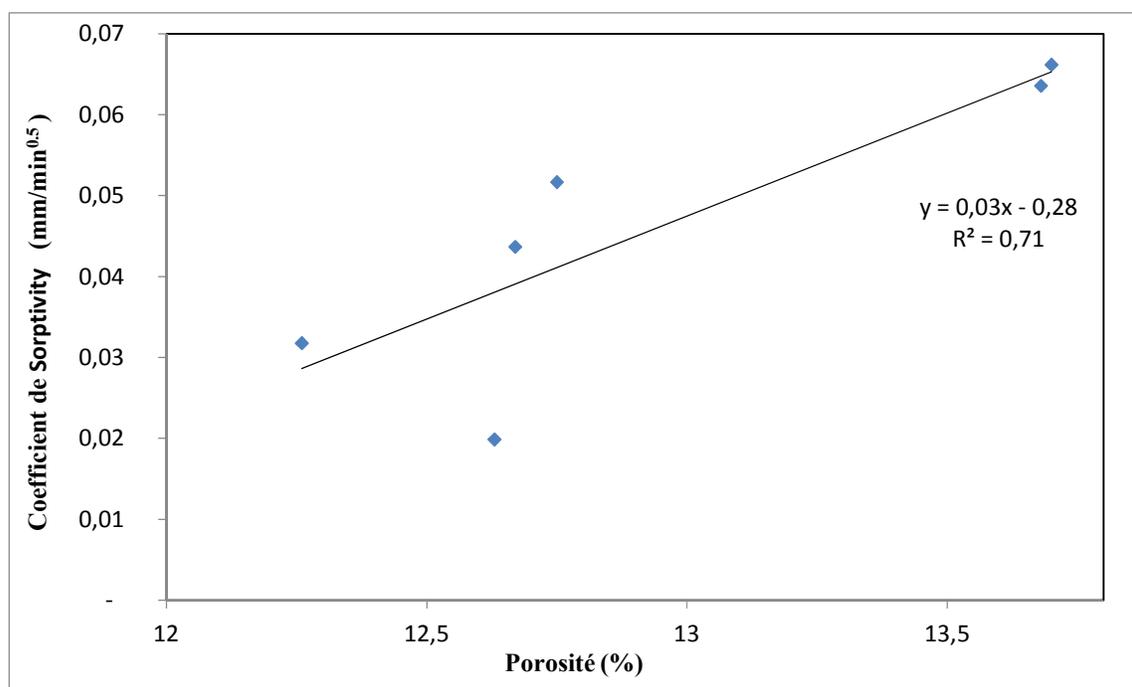


Figure V.22 : Corrélation entre la Résistance à la Compression et la Charge Totale Passée (Substituées dans le sable).

La Figure V.23 illustre la relation entre la résistance à la compression et la charge totale passée à travers l'échantillon de tous les mélanges de BAP fabriqués avec des fines partiellement remplacées au ciment à l'âge de 180 jours. Une diminution de la résistance à la compression est associée à une augmentation de la charge totale passée ; une bonne corrélation linéaire est donc observée ($R^2=0,78$). Ce résultat est en bonne concordance avec celui obtenu par (Ramezianpour *et al.* 2009); les auteurs ont rapporté que la résistance à la compression et la charge totale passée à 180 jours diminuaient tout en augmentant le taux de fines calcaires dans le ciment.

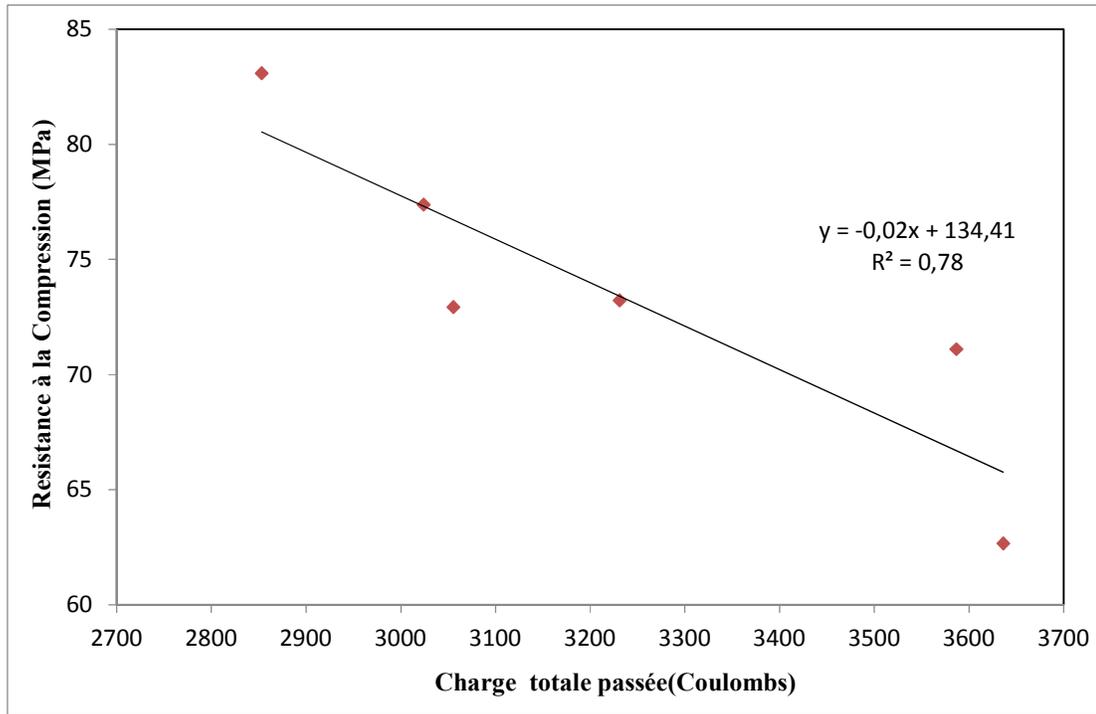


Figure V.23 : corrélation entre la résistance à la compression et la charge totale passée (substitution dans le ciment)

d) Corrélation entre la Charge Totale Passée et la Sorptivité

La figure V.24 montre la relation entre la sorptivité et la charge totale passée pour tous les mélanges de bétons autoplaçants contenant des fines calcaires substituées dans le ciment. D'après cette figure, on peut remarquer qu'il ya une bonne corrélation linéaire entre les deux propriétés ($R^2 = 0.83$) relation proportionnelle entre l'augmentation de la sorptivité avec l'augmentation de la charge totale passée. Une tendance similaire a été observée sur la corrélation dans l'étude effectuée par (Gesoglu *et al.* 2012).

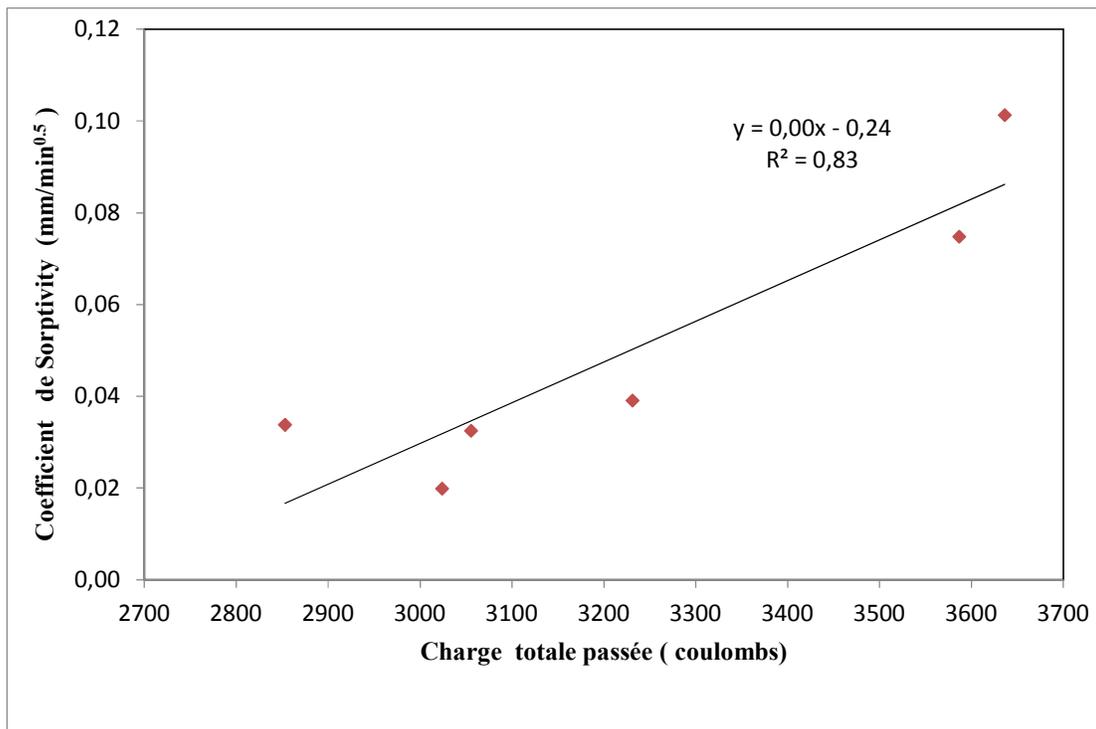


Figure V.24 : corrélation entre la charge totale passée et la sorptivité
(Substitution dans le ciment)

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de la présente thèse est la valorisation de sable de concassage issu des roches calcaires, il constitue un matériau très économique, représentant ainsi une richesse naturelle qui n'est pas exploitée à sa juste valeur. Le deuxième objectif est l'étude et l'analyse de l'influence des fines existant dans ce type de sable sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci ainsi que sur la durabilité. Cette étude vise également, l'évaluation du pourcentage optimal des fines calcaires partiellement substitué au sable et au ciment.

A cet effet, deux séries de BAP ont été confectionnées, où le sable et le ciment Portland Ordinaire (CPA) ont été partiellement remplacés par différents pourcentages de fines (de 5 à 25%). Les différents essais rhéologiques réalisés tels que l'essai d'étalement, l'essai de temps d'écoulement de V-Funnel, la Boîte en L et l'essai de stabilité au tamis, ont permis d'une part de mettre en évidence le comportement à l'état frais des mortiers et bétons autoplaçants et d'autre part de confirmer les possibilités d'élaborer des BAP à base de matériaux locaux en particulier le sable de concassage.

Suite à cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions relatives au comportement physico-mécanique et à la durabilité des bétons autoplaçants.

Le béton autoplaçant constitue une nouvelle génération de béton ; il offre plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux. L'absence de vibration qui caractérise sa mise en place permet de construire des éléments à géométrie complexe et fortement ferrailés. Cependant, sa confection nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité de ce type de béton. Toutefois, sa formulation à base de matériaux locaux nécessite pour la concrétiser une étude particulière et précise. A cet effet, le choix de la méthode de formulation n'était pas assez évident et dépendait de la disponibilité ou non des matériaux adéquats surtout en termes de superplastifiants et agent de viscosité. La méthode OKAMURA semblait être la mieux appropriée pour la simple raison qu'elle est la méthode de base, et ne nécessitait pas la présence d'un agent de viscosité, elle pouvait être utilisée pour la formulation de béton autoplaçant en utilisant des matériaux locaux, avec quelques modifications et améliorations au niveau de la teneur en sable, des rapports eau / liant (E/L) et superplastifiant /liant (Sp/L).

Nous avons mis en valeur l'utilisation du sable de concassage pour la fabrication des BAP avec une grande déformabilité et une grande stabilité. Ces deux propriétés opposées doivent être balancées pour avoir un bon béton autoplaçant.

Les résultats obtenus sur les propriétés rhéologiques des Bétons autoplaçants, en fonction de la teneur en fines, montrent que l'augmentation de pourcentage de fines dans les mélanges (sable et/ou ciment) nécessite une augmentation de la quantité d'eau, selon les essais spécifiques effectués sur bétons autoplaçants tels que (L'étalement, T_{50} , V funel, et L Box), une chute d'ouvrabilité et de fluidité des BAP est obtenue avec l'augmentation de la quantité de fines calcaires. Cependant, l'ajout des fines calcaires satisfait la capacité de passage ; Un taux de substitution allant jusqu'à 25% présente un bon béton autoplaçant sans ressuage et sans ségrégation. Il présente également un faible temps d'écoulement dans le milieu confiné ce qui indique effectivement une viscosité suffisante.

En général, l'incorporation de fines calcaires pour les deux séries de substitution a conduit à une diminution remarquable, de la résistance à la compression à jeune âge. Cependant, au-delà de 28 jours, l'augmentation du taux de substitution de sable par des fines calcaires jusqu'à 20% a conduit à une amélioration considérable de la résistance à la compression. Il convient de noter que le comportement des bétons avec substitution de sable, est différent de celui avec substitution au ciment, la résistance maximale à la compression pour cette série était obtenue avec seulement 5% de substitution de fines calcaires.

La durabilité d'une structure en béton est liée à sa perméabilité. A cet effet, l'étude a aussi révélé que, l'utilisation des fines calcaires influe sur la perméabilité. Des résultats expérimentaux montrent que, le remplacement partiel des ciments ou des sables par 15% de fines calcaires, améliore la perméabilité des bétons à l'eau, tandis qu'à 25% de fines la perméabilité était comparable à celle du béton témoin.

Par ailleurs, l'incorporation des fines calcaires dans les bétons autoplaçant a un effet positif sur l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité aux gaz ainsi que la résistance à la carbonatation ; un taux de 25% de substitution partielle de ciment par des fines présente une profondeur de carbonatation de 3.5mm seulement. La présence des fines calcaires a également affecté la diffusion des ions chlorure des bétons autoplaçants ; la substitution partielles de sable par des fines calcaires allant jusqu'à un taux de 25%, diminue au maximum la diffusion des ions chlorure. De plus, l'addition des fines calcaires produit un meilleur tassement des particules, entraînant ainsi une porosité plus faible et une structure poreuse plus fine dans les Bétons autoplaçants,

En revanche, de bonnes corrélations entre les différentes propriétés de durabilité ont été obtenues, malgré certaines valeurs qui restent faibles. La charge totale passée a tendance à diminuer avec l'augmentation de la porosité totale et le coefficient de perméabilité aux gaz a tendance à croître avec l'augmentation de la porosité totale, ce qui permet de conclure que le phénomène de transport des fluides dans la structure du béton est une fonction très complexe, il ne dépend pas seulement de la porosité, mais également de la taille, la distribution, la forme, la tortuosité, et la continuité des pores à l'intérieur de la micro-structure du solide.

PERSPECTIVES

Les travaux dans le cadre de cette Thèse ont été limités à l'étude de l'effet des fines calcaires issues de sables de concassage sur quelques propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du Béton autoplaçant ; l'utilisation des sables de concassage est recommandée. Elle peut être plus efficace en étudiant les points suivants.

1. Une étude de la rhéologie en utilisant un rhéomètre pour béton, sera intéressante afin de déterminer les caractéristiques rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité), ce qui permet de bien comprendre l'effet des fines calcaires et le sable concassé sur le comportement rhéologique des BAP.
2. Elargir l'étude du BAP par des essais de durabilité (résistance au feu, résistance aux agents agressifs tels que sulfates et acides) à long terme.
3. Etudier l'effet de l'environnement (climat chaud au sud Algérien) sur les propriétés et la durabilité des bétons autoplaçants à base de sable de concassage.
4. Déterminer d'autres propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, le retrait et le fluage des BAP en utilisant des variétés de sable concassage Algériens.
5. Etudier d'autres paramètres tels que la finesse et la composition chimique des fines calcaires sur la durabilité de BAP.
6. Il est recommandé de continuer la recherche, pour l'élaboration et le développement d'un modèle mathématique permettant la formulation des bétons autoplaçants avec des caractéristiques souhaitées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. 13057, B.E. (2002). Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance of capillary absorption. British Standards Institution London.
2. Aarre, T. & Domone, P. (2003). Reference concretes for evaluation of test methods for SCC. In: *Proceedings of 3rd RILEM international symposium on self compacting concrete, Reykjavik, Iceland*, pp. 495-505.
3. Achour, T., Lecomte, A., Ouezdou, M.B., Mensi, R. & Joudi, I. (2008). Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat. Exemples tunisiens. *Materials and Structures*, 41, 815-830.
4. AFGC (2008). Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants. Documents scientifiques et techniques AFGC.
5. AFPC-AFREM (1997). Durabilité des bétons 'Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité'[Durability of concrete—'recommended methods for the measurement of durability indicators']. LMDC Toulouse, France.
6. AFREM, A. (1997). Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. *Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons*.
7. Akrouf, K., Mounanga, P., Ltifi, M. & Jamaa, N.B. (2010). Rheological, mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4, 97-104.
8. Algin, H.M. & Turgut, P. (2008). Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Construction and Building Materials*, 22, 1074-1080.
9. AMURA, H.O. & Ouchi, M. (1999). Self-compacting concrete. Development, present use and future. In: *PRO 7: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. RILEM Publications, p. 3.
10. Andriamanantsilavo, N.R., Amziane, S. & Baudeau, P. (2003). Étude expérimentale sur l'évolution de la pression exercée par une pâte de ciment contre un coffrage pendant la prise. *Rhéologie*, 3, 12-21.
11. Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M. & Okamoto, T. (2010). The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24, 2363-2368.

12. Arliguie, G. & Hornain, H. (2007). Grandeurs associées à la durabilité des bétons GranDuBé. *Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées*.
13. Assaad, J. & Khayat, K.H. (2005). Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete. *ACI materials journal*, 102, 145.
14. Assaad, J.J. & Khayat, K.H. (2006). Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete. *Materials and structures*, 39, 333-341.
15. Assié, S. (2004). Durabilité des bétons auto-plaçants. Toulouse, INSA.
16. Assié, S., Escadeillas, G., Marchese, G. & Waller, V. (2006). Durability properties of low-resistance self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58, 1-7.
17. ASTM, C. (1994). 1202-94. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, American Society for Testing and Materials, 620-625.
18. ASTM, C. (1997). 1202. *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. American Society for Testing Materials.
19. Bala, P.S., Ravikumar, M. & Vaisakh, G. (2018). Mechanical Properties of Self Compacting Concrete Containing Crushed Sand and Sisal Fiber. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 13, 71-81.
20. Barluenga, G., Palomar, I. & Puentes, J. (2015). Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions. *Construction and Building Materials*, 94, 728-736.
21. Baron, J. (1999). JP ollivier et JC Weiss, « *Les bétons, bases et données pour leur formulation*», Edition Eyrolles, Troisième tirage, 3-12.
22. Benabed, B., Kadri, E.-H., Azzouz, L. & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, 34, 1167-1173.
23. Benabed, B., Soualhi, H., Belaidi, A.S.E., Azzouz, L. & Kenai, S. (2016). Effect of limestone powder as a partial replacement of crushed quarry sand on properties of self-compacting repair mortars. *Journal of Building Materials and Structures*, 3, 15-30.

24. Benabed B.,(2014) Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, Université de Laghouat.
25. Benachour, Y., Davy, C.A., Skoczylas, F. & Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cement and concrete research*, 38, 727-736.
26. Bentz, D.P., Ferraris, C.F., Jones, S.Z., Lootens, D. & Zunino, F. (2017). Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance. *Cement and Concrete Composites*, 78, 43-56.
27. Bethmont, S. (2005). Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP): Etude expérimentale des interactions granulaires. *THESE DE DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, SPECIALITE: STRUCTURES ET MATERIAUX*.
28. Bétons, G.H. (2004). Le béton autocompactant. *Recommandations éditées par Holcim (Suisse) SA*.
29. Billberg, P. (1999). *Self-compacting concrete for civil engineering structures.: The Swedish experience*. Cement och Betong Institutet.
30. Billberg, P. (2003). Form pressure generated by self-compacting concrete. In: *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland*, pp. 271-280.
31. Boel, V., Audenaert, K. & De Schutter, G. (2002). Pore structure of self-compacting concrete. In: *First North American Conference on the Design and Use of self-Consolidating Concrete. Evanston, 12-13 November 2002*, pp. 15-20.
32. Boel, V., Audenaert, K. & De Schutter, G. (2008). Gas permeability and capillary porosity of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 41, 1283-1290.
33. .
34. Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V. & Irassar, E. (2000). Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 703-708.
35. Boukendakdji O (2010)., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un BAP: Optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat, Université de Blida,.
36. Bours R (2011) Rheologie des pâtes cimentaires pour bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, Université de Tizi ouzou.

37. Bosiljkov, V.B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33, 1279-1286.
38. BOUHAMOU, N., BELAS, N., MEBROUKI, A., MESBAH, H. & AMMAR, Y. (2004). Étude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux. *Doctorat d'État, Université de Mostaganem, Algérie*.
39. British Standard, E. (2009). EN 12390-2: Testing hardened concrete. *Making and curing specimens for strength tests*.
40. Bui, V.K. & Montgomery, D. (1999). Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. In: *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 13-14.
41. Bury, M.A. & Christensen, B.J. (2002). The role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete. In: *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 137-140.
42. CARLES-GIBERGUES, A. & HORNAIN, H. (2008). La durabilité des bétons. *Chapitre 11: La durabilité des bétons face aux réactions de gonflement endogènes, ATILH Association Technique de l'Industrie des liants hydrauliques et fondation école française du béton*.
43. Celik, T. & Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete research*, 26, 1121-1130.
44. Chai, H.-W. (1998). Design and testing of self-compacting concrete. University of London.
45. 41.
46. Chemicals, E.F.f.S.C. & Systems, C. (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete. *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC)*, 32.
47. Chen, J., Kwan, A. & Jiang, Y. (2014). Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 56, 87-93.
48. Chopin, D., de Larrard, F. & Cazacliu, B. (2004). Why do HPC and SCC require a longer mixing time? *Cement and Concrete Research*, 34, 2237-2243.
49. Commitee, A. (2003). C09. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International.

50. Committe, R.T. (2006). Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self compacting concrete'. *Materials and Structures*, 39, 937-954.
51. Coussot, P. (2012). *Comprendre la rhéologie: de la circulation du sang à la prise du béton*. EDP Sciences.
52. ČSN, E. (2002). 12390-3 Testing of hardened concrete–Part 3: Compressive strength. *Czech Standardization Institute, Prague*.
53. Cussigh, F., Sonebi, M. & De Schutter, G. (2003). Project testing SCC-segregation test methods. In: *Proceedings of the third international, RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande*, pp. 311-322.
54. Cyr, M. & Mouret, M. (2003). Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design. *Special Publication*, 217, 241-256.
55. Da Silva, P. & De Brito, J. (2015). Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, 86, 101-112.
56. de Génie-civil, F.F.F. (2003). recommandations de mise en œuvre des BAP et BAN. *Vol. B*, 52, 152.
57. De Larrard, F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire central des ponts et chaussées.
58. De Schutter, G. (2005). Guidelines for testing fresh self-compacting concrete. *European Research Project*.
59. De Schutter, G., Audenaert, K., Boel, V., Vandewalle, L., Heirman, G., Vantomme, J. *et al.*(2003). Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability-overview of a Belgian research project (keynote paper). In: *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete (SCC2003)*. RILEM Publications SARL; Bagneux, pp. 799-807.
60. Domone, P. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, 29, 1-12.
61. Domone, P. & Jin, J. (1999). Properties of mortar for self-compacting concrete. In: *Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*, pp. 109-120.

62. Donza, H., Cabrera, O. & Irassar, E. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32, 1755-1761.
63. El Barrak, M. (2003). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des Bétons Auto-Plaçants (BAP) à l'état frais. *Revue Française de Génie Civil*, 7, 115-115.
64. El Hilali, A. (2009). Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): influence des fines calcaires et des fibres végétales. Cergy-Pontoise.
65. El Mir, A. & Nehme, S. (2015). Porosity of Self-compacting Concrete, *Procedia Engineering*, Vol. 123.
66. En, B. (2000). 197-1 (2000) Cement: composition, specifications and conformity criteria for common cements. *British Standards Institution, London*.
67. EN, B. (2002a). 13057: 2002, Determination of resistance of capillary absorption. *British Standards Institution*, 20, 685.
68. EN, B. (2009). 12390-3: 2009. *Testing hardened concrete. Part, 3*.
69. EN, N. 12390-1, "Essais pour béton durci. Partie.
70. EN, T. (2002b). 13057: Products and systems for the protection and repair of concrete structures-Test methods-Determination of resistance of capillary absorption, Turkish Standards Institution, Ankara. TR.
71. Felekoglu, B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resources, Conservation and Recycling*, 51, 770-791.
72. Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A. & Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and concrete research*, 36, 1719-1726.
73. Felekoğlu, B., Türkel, S. & Baradan, B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42, 1795-1802.
74. Ferraris, C.F., Obla, K.H. & Hill, R. (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and concrete research*, 31, 245-255.

75. Flatt, R. (2001). *Polymeric Dispersants in Concrete, Polymers in Particulate Systems: Properties and Applications*, (Hackley VA, Somasundaran P., Lewis JA, Eds). Marcel Dekker, New York.
76. Gagné, R. (2008). GCI 714-Durabilité et réparations du béton. *Cours de l'Université de Sherbrooke (Québec, Canada)*.
77. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Kocabağ, M.E., Bayram, V. & Mermerdaş, K. (2012). Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*, 37, 160-170.
78. Ghrici, M., Kenai, S. & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29, 542-549.
79. Gibbs, J. & Zhu, W. (1999). Strength of hardened self-compacting concrete. In: *Proceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Suede, pp. 199-209.
80. Gonzalez, M. & Irassar, E. (1998). Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low C3A Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 28, 1655-1667.
81. Guemmadi, Z.h., Resheidat, M., Houari, H. & Toumi, B. (2008). Optimal criteria of Algerian blended cement using limestone fines. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14, 269-275.
82. Hallal, A., Kadri, E., Ezziane, K., Kadri, A. & Khelafi, H. (2010). Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 24, 1418-1423.
83. Hartshorn, S., Sharp, J. & Swamy, R. (1999). Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29, 1331-1340.
84. Heikal, M., El-Didamony, H. & Morsy, M. (2000). Limestone-filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1827-1834.
85. Holschemacher, K. (2004). Hardened material properties of self-compacting concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 10, 261-266.
86. Hornain, H., Marchand, J., Duhot, V. & Moranville-Regourd, M. (1995). Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 25, 1667-1678.

87. Imen, J., André, L. & Mongi, B.O. Influence des sables de concassage à différents taux de filler sur les performances mécaniques des bétons.
88. Institution, B.S. (2011). *Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens*. BSI.
89. Institution, B.S. (2012). *Testing Hardened Concrete: Shape, Dimensions and Other Requirements for Specimens and Moulds*. BSI.
90. Jiang, S., Kim, B. & PETROV, N. (2001). L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*.
91. Jin, J. & Domone, P. (2002). Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component. North Western University.
92. Joudi-Bahri, I. (2012). Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien. Université de Lorraine.
93. Joudi-Bahri, I., Lecomte, A., Ouezdou, M.B. & Achour, T. (2012). Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 34, 771-780.
94. Joudi, I. (2012). Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien.
95. Journées Techniques, A.-A. (1997). Durabilité des bétons Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. *Toulouse, France*.
96. Kanellopoulos, A., Petrou, M.F. & Ioannou, I. (2012). Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 37, 320-325.
97. Kenai, S., Benna, Y. & Menadi, B. (1999). The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete. In: *Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction. International conference*, pp. 253-261.
98. Kenai, S., Soboyejo, W. & Soboyejo, A. (2004). Some engineering properties of limestone concrete. *Materials and Manufacturing processes*, 19, 949-961.
99. Khayat, K. (1996). Colloques sur les bétons autonivelants. *Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) Université de Sherbrooke, Université de Québec, Québec*.

100. Khayat, K. & Ghezal, A. (2003). Effect of viscosity-modifying admixture-superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar. In: *3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 369-385.
101. Kim, M.H., Koh, Y., Kamata, E., Kim G.Y.(1997). An experimental study on the fluidity and evaluation of high fluidity concrete according to the kinds of fine aggregate. in *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 19, pp. 67 – 72
102. Klug, Y. & Holschemacher, K. (2003). Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. In: *3rd RILEM symposium on self compacting concrete, Reykjavik*. RILEM Bagneux, France, pp. 596-605.
103. Kollek, J. (1989). The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method—a recommendation. *Materials and structures*, 22, 225-230.
104. Kumar, D.P. & Sashidhar, C. (2018). Effect of fineness modulus of manufactured sand on fresh properties of self-compacting concrete. *Indian Concrete Journal*, 77.
105. Lachemi, M., Hossain, K., Lambros, V., Nkinamubanzi, P.-C. & Bouzoubaâ, N. (2004). Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures. *Cement and Concrete Research*, 34, 917-926.
106. Lang, E. & Geisler, J. (1996). Use of Blast Furnace Slag Cement With High Slag Content for High-Performance Concrete. *Concrete in the Service of Mankind—Radical Concrete Technology*, 67-76.
107. Lange, F., Mörtel, H. & Rudert, V. (1997). Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. *Cement and concrete research*, 27, 1481-1488.
108. Leemann, A. & Hoffmann, C. (2003). Pressure of self-compacting concrete on the formwork. In: *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 288-295.
109. Leemann, A., Münch, B., Gasser, P. & Holzer, L. (2006). Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 1425-1433.
110. Lollini, F., Redaelli, E. & Bertolini, L. (2014). Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. *Cement and Concrete Composites*, 46, 32-40.
111. LST, E. (2009). 12390-2 Testing hardened concrete-Part 2: Making and curing specimens for strength tests. *Czech standards institute, Prague*.

112. Maeda, M. (1999). Evaluation on the practicability of SCC. In: *The Proceedings of the RTLEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 617-628.
113. Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J. & Aït-Mokhtar, A. (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials*, 23, 625-633.
114. Mohammed, M.K., Dawson, A.R. & Thom, N.H. (2014). Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. *Construction and Building Materials*, 72, 83-93.
115. Moon, G.D., Oh, S., Jung, S.H. & Choi, Y.C. (2017). Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 129-136.
116. Mostofinejad, D., Nosouhian, F. & Nazari-Monfared, H. (2016). Influence of magnesium sulphate concentration on durability of concrete containing micro-silica, slag and limestone powder using durability index. *Construction and Building Materials*, 117, 107-120.
117. Muciaccia, G., Cattaneo, S., Rosati, G. & Cangiano, S. (2015). Properties of limestone self-compacting concrete at fresh and hardened state. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19, 598-613.
118. NAKAMURA, H. & OGAWA, S. (2000). Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 21, 15-20.
119. Nazari, A. & Riahi, S. (2011). The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites Part B: Engineering*, 42, 570-578.
120. Nehdi, M. Microfiller effect on rheology, microstructure and mechanical properties of high-performance concrete, Ph. D. Thesis, The University of British Columbia, 1998.
121. Nehdi, M., Mindess, S. & Aïtcin, P.-C. (1998). Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. *Cement and Concrete Research*, 28, 687-697.
122. Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. Longman London.
123. Neville, A.M., Neville, A.M., Neville, A.M. & Neville, A.M. (2000). *Propriétés des bétons*. Eyrolles.

124. Okamura, H. & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete—Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1.
125. Okamura, H. & Ozawa, K. (1996). Self-compactable high-performance concrete in Japan. *Special publication*, 159, 31-44.
126. Ollivier, J.-P. & Vichot, A. (2008). *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
127. Ollivier, J. (1997). AFC-AFREM: Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau. *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte rendu des Journées Techniques Durabilité des bétons, LMDC-INSA Toulouse, France*, 121-124.
128. Omar, O.M., Abd Elhameed, G.D., Sherif, M.A. & Mohamadien, H.A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8, 193-203.
129. Ovarlez, G. & Roussel, N. (2006). A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. *Materials and Structures*, 39, 269-279.
130. Ozawa, K. (1989). High-performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: *Proc. of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 1989*.
131. Pentti, G.H.-E.P. (1999). Properties of SCC-especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. In: *Proceedings of the 1 st International Rilem Symposium on Self-compacting Concrete*, pp. 211-225.
132. Péra, J., Husson, S. & Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and concrete composites*, 21, 99-105.
133. Persson, B. (2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and concrete Research*, 31, 193-198.
134. Petersson, O. (1999). Final Report of Task 2: Workability. *Brite-EuRam Project BRPR-CT96-0366*. http://www.cege.ucl.ac.uk/__data/assets/pdf_file/0003/3594/task2.pdf.(accessed June 12, 2008).

135. Petersson, O. (2001). Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance and compressive strength. In: *Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan*, pp. 277-284.
136. Petersson, O. & Billberg, P. (1999). Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler. In: *Proceedings of the 1st international RILEM symposium on SCC*, pp. 333-344.
137. Petersson, O. & Skarendahl, A. (2000). *Self-compacting Concrete: State-of-the-art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete*. RILEM publications.
138. R'mili, A. & Ouezdou, M.B. (2012). Valorisation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 01001.
139. Rahhal, V. & Talero, R. (2005). Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions. *Cement and Concrete Research*, 35, 1285-1291.
140. Ramachandran, V.S. & Zhang, C.-M. (1986). Dependence of fineness of calcium carbonate on the hydration behaviour of tricalcium silicate. *Durability of building materials*, 4, 45-66.
141. Ramezani pour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M. & Moodi, F. (2009). Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31, 715-720.
142. Reddy, T.S.S. & Dadapeer, A. (2018). An Experimental Analysis on the Effects of Manufactured Sand on the Compressive Strength of Concrete.
143. Revani, M. & Proske, T. (2017). Influence of chemical-mineralogical properties of limestone on the shrinkage behaviour of cement paste and concrete made of limestone-rich cements. *Construction and Building Materials*, 157, 818-828.
144. Rols, S., Ambroise, J. & Pera, J. (1999). Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 261-266.
145. Sadhouari, F., Goufi, N. & Guezzouli, A. (2009). Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons. In: *SBEIDCO-1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)-October*, pp. 12-14.
146. Safawi, M.I., Iwaki, I. & Miura, T. (2005). A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete. *Cement and concrete research*, 35, 1834-1845.

147. Safiddine, S., Debieb, F., Kadri, E.-H., Menadi, B. & Soualhi, H. (2017). Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar. *APPLIED RHEOLOGY*, 27.
148. Sedran, T. (1995). LES BETONS AUTONIVELANTS (BAN)-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*.
149. Sedran, T. & De Larrard, F. (1999). Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In: *Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7*, pp. 321-332.
150. Shafigh, P., Nomeli, M.A., Alengaram, U.J., Mahmud, H.B. & Jumaat, M.Z. (2016). Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash. *Journal of cleaner production*, 135, 148-157.
151. Shi, H.-s., Xu, B.-w. & Zhou, X.-c. (2009). Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 1980-1985.
152. Shindoh, T. & Matsuoka, Y. (2003). Development of combination-type self-compacting concrete and evaluation test methods. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 26-36.
153. Silva, P. & De Brito, J. (2017). Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21, 430-453.
154. Skarendahl, A. (2003). The present - The future. In : The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik O.H., Nielsson I., editors, *RILEM Publications S.A.R.L., Bagnex, France*, 6 – 14.
155. Sonebi, M. & Bartos, P. (1999). Hardened SCC and its bond with reinforcement. In: *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, Sweden 13-14 September 1999*, pp. 275-289.
156. Sonebi, M. & Bartos, P. (2002). Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete. *Materials and structures*, 35, 462-469.
157. Standard, A. (1997). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *C39-86*, 20-24.
158. STANDARD, B. (2009). Testing hardened concrete.

159. Sun, C. & Bai, B. (2017). Diffusion of gas molecules on multilayer graphene surfaces: Dependence on the number of graphene layers. *Applied Thermal Engineering*, 116, 724-730.
160. Sun, J. & Chen, Z. (2018). Influences of limestone powder on the resistance of concretes to the chloride ion penetration and sulfate attack. *Powder Technology*, 338, 725-733.
161. Takada, K., Pelova, G. & Walraven, J. (1998). Influence of mixing efficiency on the fresh properties of self-compacting concrete. In: *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, pp. 368-383.
162. Takada, K. & Walraven, J. (2001). Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 545-554.
163. Tangtermsirikul, S. & Bui, V. (1995). Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete. In: *Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil thailand engineering*, pp. 58-69.
164. Tangtermsirikul, S., Sakamoto, J., Shindoh, T. & Matsuoka, Y. (1991). Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and the role of a new type of viscosity agent. *Reports of the Technical Research Institution*, 24, 369-376.
165. Testing, T.C.S.-C.C.I.U.o., Materials, R.L.f. & Structures (2000). *Self-compacting concrete: state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete*. RILEM Publ.
166. Tragardh, J. (1999a). Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. In: *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm*, pp. 175-186.
167. Tragardh, J. (1999b). Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. In: *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, Sweden 13-14 September 1999*, pp. 175-186.
168. Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, G. & Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30, 1679-1683.
169. Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Batis, G., Meletiou, C., Kasselouri, V., Kakali, G. *et al.*(1999). The effect of clinker and limestone quality on the gas permeability, water

absorption and pore structure of limestone cement concrete. *Cement and concrete composites*, 21, 139-146.

170. Tsivilis, S., Tsantilas, J., Kakali, G., Chaniotakis, E. & Sakellariou, A. (2003). The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 1465-1471.

171. Tu, T. (2005). The application of recycled aggregates in self-consolidating concrete. In: *SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*. RILEM Publications SARL, pp. 145-152.

172. Turcry, P. (2003). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation. Nantes.

173. Uysal, M., Yilmaz, K. & Ipek, M. (2012). The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 27, 263-270.

174. Valcuende, M. & Parra, C. (2010). Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 24, 848-853.

175. Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E. & Cánoves, J. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 122-128.

176. von Beton, P. (1991). Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin*.

177. Walraven, J. (2003). Structural aspects of self compacting concrete. In: *Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on SCC*, pp. 15-22.

178. Westerholm, M., Lagerblad, B. & Forssberg, E. (2007). Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates. *Materials and structures*, 40, 615-625.

179. Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. & Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30, 274-282.

180. Yahia, A., Tanimura, M. & Shimoyama, Y. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cement and concrete Research*, 35, 532-539.

181. Yamada, K. (2001). Improvement of the compatibility between cement and superplasticizer by optimizing the chemical structure of the polycarboxylate-type superplasticizer. In: *Proc. 2nd Int. Symp. on Sel-Compacting Concrete*, pp. 159-167.
182. Yammine, J. (2007). Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques.
183. Zelić, J., Krstulović, R., Tkalčec, E. & Krolo, P. (1999). Durability of the hydrated limestone-silica fume Portland cement mortars under sulphate attack. *Cement and concrete research*, 29, 819-826.
184. Zhang, J., Bian, F., Zhang, Y., Fang, Z., Fu, C. & Guo, J. (2018). Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 402-413.
185. Zhu, W. & Bartos, P.J. (2005). Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC. In: *Proceedings of First International Symposium on Design Performance and use of Self Consolidating Concrete*, RILEM Publications SARL, Changsha, pp. 319-327.
186. Zhu, W., Quinn, J. & Bartos, P. (2001). Transport properties and durability of self-compacting concrete. In: *2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, pp. 451-458.

ANNEXE

ANNEXE

Fiche technique d'adjuvant utilisé

NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant–Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- FormeLiquide
- Couleurbrun clair
- pH 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec..... 30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,33 à 1,8 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardateur de prise **MEDARETARD GR**.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg, et cubitainer 1100 kg

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



86

Composition du Mélange de Mortier

Essais sur Mortier					entrer data dans cellules en rouge		
					valeurs calculées dans cellules en noir		
Référence du mélange	Essai 1	CEM II 42,5 sans ajout		Date	31/10/2013		
volume de mortier (litres)	0,5						
sable/mortier vol	0,4						
E/P par vol.	1,2573	poudre vol (%)	26,58	Eau volume (%)	33,42		
composition Poudre(vol %)		type					
ciment portland	100						
Laitier	0						
Fumée de Silice	0						
Pouzolane	0						
superplast - MEDAFLOW145	0,8	% (Sp/P)					
humidité sable							
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)			
poids humide (gms)	200	0,0	1,7	0,0			
poids sec (gms)	200						
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange	
	litres	kg/m ³	kg	%	kg	kg	
ciment	0,133	3143				0,418	
Laitier	0,000	2950				0,000	
Fumée de silice	0,000	2900				0,000	
Pouzolane	0,000	2680				0,000	
calcaire	0,000	2650					
Eau	0,167	1000	0,167			0,165	W1 0,099
			total				W2 0,066
superplast - MEDAFLOW145		1065	0,003	70	0,002	0,0033	
			ssd				0/3 0,320
Sable	0,200	2670	0,534	0	0,000	0,534	concassé 0,214
Total	0,500					1,120	
		w/p bt wt =	0,4000				

Composition du Mélange de BAP Substitution au Sable

Composition et Résultat des Tests				entrée des data cellules en rouge				valeurs calculées cellules en noir			
référence:				Date 31/10/2013				mesures d'humidité			
Densités relatives	Gravier	2,62		Absorptions (%)		Pds Hum	Pds sec	% Humid			
	Sable	2,67		Gravier	1,56	8/15	200	200	0,00		
	Ciment	3,14			1,75	3/8	200	200	0,00		
	Fines	0		Sable	1,7	Sable	200	200	0,00		
gravier											
Densité	1340	kg/m ³		% gravier	28,6	vol % de béton					
percent	56			Gravier	750,40	kg/m3					
8/15:3/8	0,67			8/15	300,16	kg/m3					
				3/8	450,24	kg/m3					
air											
	1	vol % de béton									
Sable											
volume mortier	70,4	vol % de béton		% Sable	35,2	vol % de béton					
Sable	50	vol % de mortier		Sable	939	kg/m3					
				G/S	0,80						
pate											
volume	35,2	vol % de béton		% Eau	19,6	vol % de béton					
E/P volume	1,256			Eau	196	kg/m3					
Poudre	15,6	vol % de béton									
Ciment	100	vol % de poudre		Ciment	15,6	vol % de béton					
Fines	0	vol % de poudre		Ciment	490	kg/m3					
Densité relative poudre	3,143										
				% Fines	0,0	vol % de béton					
E/P Poids	0,400			Fines	0	kg/m3					
superplastifiant: MEDAFLOW145											
dosage	1,4	% liquid de poudre		superplast	6,86	kg/m3					
Mélange vol (litres)											
Mélange vol (litres)	1000	litres									
Densité Béton	2383	kg/m3		Poids Mélange	2382,52	kg					
Poids Mélange											
		prop.mél	Pds mél	absorption	humidité	extra eau	Poids				
		kg/m3	kg	%	%	kg	kg				
Gravier 8/15		300	300,160	1,56	0,00	-4,68	295,48				
Gravier 3/8		450	450,240	1,56	0,00	-7,02	443,22				
Sable		939	939,290	1,7	0,00	-15,97	923,32	0/3	553,993	600,16	s1
Ciment (CEM II) 42,5		490	490,110				490,11	Roulé	369,329	323,16	s2
Fines calcaire		0	0,000				0,00				
Eau		196	195,857								
Superplast MEDAFLOW145		6,86	6,8615		70	4,80	6,86154				
composition eau							218,73	eau 1	131,24		
								eau 2	87,49		
total		2383	2382,52			-22,87	2377,72				

Composition du Mélange de BAP Substitution au Ciment

Composition et Résultat des Tests				entrée des data cellules en rouge							
				valeurs calculées cellules en noir							
référéncé:				Date 31/10/2013							
				mesures d'humidité							
Densités relatives	Gravier	2,62		Absorptions (%)		Pds Hum	Pds sec	% Humid			
	Sable	2,67		Gravier	1,56	8/15	200	200	0,00		
	Ciment	3,14			1,75	3/8	200	200	0,00		
	Fines	2,67		Sable	1,7	Sable	200	200	0,00		
gravier											
Densité	1340	kg/m ³		% gravier	28,6	vol % de béton					
percent	56			Gravier	750,40	kg/m3					
8/15:3/8	0,67			8/15	300,16	kg/m3					
				3/8	450,24	kg/m3					
air											
	1	vol % de béton									
Sable											
volume mortier	70,4	vol % de béton		% Sable	35,2	vol % de béton					
Sable	50	vol % de mortier		Sable	939	kg/m3					
				G/S	0,80						
pate											
volume	35,2	vol % de béton		% Eau	19,5	vol % de béton					
E/P volume	1,249			Eau	195	kg/m3					
Poudre	15,6	vol % de béton									
Ciment	95	vol % de poudre		Ciment	14,9	vol % de béton					
Fines	5	vol % de poudre		Ciment	467	kg/m3					
Densité relative poudre	3,11935										
				% Fines	0,8	vol % de béton					
E/P Poids	0,400			Fines	21	kg/m3					
superplastifiant: MEDAFLOW145											
dosage	1,4	% liquid de poudre		superplast	6,83	kg/m3					
Mélange vol (litres)	1000	litres									
Densité Béton	2380	kg/m3		Poids Mélange	2379,83	kg					
Poids Mélange											
	prop.mél	Pds mél	absorption	humidité	extra eau	Poids					
	kg/m3	kg	%	%	kg	kg					
Gravier 8/15	300	300,160	1,56	0,00	-4,68	295,48					
Gravier 3/8	450	450,240	1,56	0,00	-7,02	443,22					
Sable	939	939,290	1,7	0,00	-15,97	923,32	0/3	553,993	600,16	s1	
Ciment	(CEM II) 42,5	467	467,054			467,05	Roulé	369,329	323,16	s2	
Fines	calcaire	21	20,882			20,88					
Eau		195	195,372								
Superplast	MEDAFLOW	6,83	6,8311	70	4,78	6,83111					
composition eau						218,26	eau 1	130,96			
							eau 2	87,31			
total	2380	2379,83			-22,89	2375,05					