



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ des frères Mentouri
CONSTANTINE

Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie civil

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre :

N° de série :

Thèse

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat en sciences
Spécialité : Génie Civil

Option

Matériaux

Thème

ELABORATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT POUR LE RENFORCEMENT ET LA REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME

Présentée Par :

NAWEL CHIBANI

Membres du Jury de Soutenance :

Président :	Mr A.G. BELOUAR	Professeur	Université Constantine 1, Algérie
Rapporteur :	Mr A. BEROUAL	Professeur	Université Constantine 1, Algérie
Examineurs :	Mr A. BENOUIS	Professeur	Université de Guelma, Algérie
	Mr Z. BOUDAUD	Professeur	Université d'Oum El-Bouaghi, Algérie
	Mr C. BELEBCHOUCHE	M.C	Université Constantine 1, Algérie

2022

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance M^r BEROUAL AHMED, Professeur au Département de Génie Civil à l'université Constantine 1 d'avoir accepté l'encadrement de ce travail, de l'attention qu'il a portée à mon travail et des moments de discussion précieuse qu'il m'a réservés. Je le remercie infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie.

Je tiens également à remercier M^r Belouar Abdelghani, professeur au Département de Génie Civil à l'université Constantine 1 de me faire honneur d'être le président de jury.

Je remercie tous les membres de mon jury de thèse :

Merci à M^r Boudaoud Zine eddine, Professeur au Département de Génie Civil à l'université d'Oum El-Bouaghi, pour l'honneur qu'il me fait de bien vouloir siéger dans le jury de cette thèse.

Merci à M^r Benouis Abdelhalim, Professeur au Département de Génie Civil à l'université de Guelma, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Merci à M^r Belbchouche Cherif, Maître de Conférences « A » au Département de Génie Civil à l'université Constantine 1, pour avoir bien voulu accepter de participer au jury de cette thèse.

Résumé

Pour développer des méthodologies permettant d'améliorer la qualité des réparations, qui conduit à une réparation durable, il est nécessaire que tous les composants du système réparé soient pris en compte. Le choix du matériau de réparation doit être compatible avec le béton à réparer, en particulier, les critères de compatibilité dimensionnelle qui sont essentiels pour éviter d'une part le décollement de la couche réparatrice et assurer d'autre part la qualité d'adhérence entre le matériau de réparation et son support (substrat). Les principales pathologies des réparations à base cimentaire résultent des fissurations dues à des variations dimensionnelles. En outre la rugosité et l'état d'humidité de la surface des substrats affectent de manière significative l'adhérence lors de la réparation.

L'objectif de cette étude, consiste en l'application d'une réparation sur un substrat en béton ordinaire(BO) en utilisant comme matériau de réparation trois types de bétons : deux bétons auto plaçants (BAP) de résistance différente (30 et 40 MPa), à savoir (BAP30) et (BAP40), et un béton vibré (BOV) de résistance (30Mpa) est pris comme béton témoin de référence.

Le test d'évaluation de l'adhérence est basé sur le protocole d'un essai de traction par fendage (traction indirecte) afin de déterminer l'adhérence et la qualité de liaison, ainsi que le mode de rupture pour chaque composite (Réparation/Substrat).

Les résultats obtenus montrent en générale que, les (BAPs) confectionnés peuvent être utilisés comme matériaux de réparation.

L'utilisation des (BAPs) améliore les performances du système réparé. Une excellente qualité d'adhérence est obtenue par le (BAP40) et le (BAP30), par rapport au béton ordinaire vibré (BOV).

La réparation par le (BAP30) et le (BAP40) a développé une capacité d'adaptation par retrait favorable au système réparé. Le (BAP30) présente des variations dimensionnelles plus proches alors que le (BAP40) présente des variations légèrement faibles par rapport à celles du (BO), par conséquent une compatibilité déformationnelle adéquate, par l'utilisation de béton autoplaçant pour la réparation à base cimentaire. Ces résultats contribuent à obtenir une réparation durable.

Mots clés : Béton auto plaçant ; Substrat ; Réparation à base cimentaire ; L'état de surface ; Compatibilité déformationnelle ; Résistance d'adhérence.

Abstract

To develop methodologies to improve the quality of repairs, which leads to durable repair, it is necessary all components of repaired system must be considered. The choice of repair material must be compatible with the concrete to be repaired, in particular, the dimensional compatibility criteria are essential to avoid debonding of the repair layer on the one hand and on the other hand the quality of adhesion between the repair material and its support (substrate). Taking into account that the main pathologies of cement-based adherent repairs result from cracking due to dimensional variations. Also, the roughness and wetness of the surface of the substrates significantly affect the adhesion with the repair.

To answer the objective of this study, a simulation by the repair technique applied to an ordinary concrete substrate (BO) and using as repair material three types of concretes: two self-compacting concretes of different resistance (30 and 40MPa), namely (BAP30) and (BAP40), and a vibrated concrete (BOV) of resistance (30Mpa) is taken as reference concrete.

The bond evaluation test is based on the splitting tensile test protocol (indirect tensile). To determine the adhesion and bond quality, as well as the mode of rupture for each composite (Repair/Substrate).

Overall, the results obtained show that, the fabricated self-compacting (BAPs) give advantages for use as repair materials.

The use of self-compacting (BAP) improves the performance of the repaired system. Excellent adhesion quality obtained by (BAP40) and (BAP30), compared to ordinary vibrated concrete (BOV).

Repair by (BAP30) and (BAP40) developed an adaptation capacity by shrinkage favorable to the repaired system. The (BAP30) presents dimensional variations nearest and the (BAP40) slightly less to those of (BO), and Therefore Adequate deformational compatibility, by the use of self-compacting concrete for the cement-based repair.

These results contribute to obtaining a durable repair.

Keywords : Self-compacting concrete; Substrate; Cement based repair; Surface texture; deformational compatibility, Bond strength.

المخلص

لتطوير منهجيات لتحسين جودة الإصلاحات ، الذي يؤدي إلى إصلاح مستدام ، من الضروري مراعاة جميع مكونات النظام الذي تم إصلاحه. يجب أن يكون اختيار مواد الإصلاح متوافقاً مع الخرسانة المراد إصلاحها ، على وجه الخصوص ، تعد معايير توافق الأبعاد ضرورية لتجنب إزالة طبقة الإصلاح من جهة. ومن ناحية أخرى جودة الالتصاق بين مادة الإصلاح ودعمها (الركيزة) . مع الأخذ بعين الاعتبار أن الأمراض الرئيسية للإصلاحات الأسمنتية اللاصقة ناتجة عن التصدع بسبب تغيرات الأبعاد . كما أن خشونة ورطوبة سطح الركائز تؤثر بشكل كبير على الالتصاق بالإصلاح .

لتحقيق هدف هذه الدراسة ، تم إجراء محاكاة بتقنية الإصلاح المطبقة على طبقة خرسانية عادية (OB). وباستخدام ثلاثة أنواع من الخرسانة كمادة إصلاح : نوعان من الخرسانة ذاتية القوية (PAB) بمقاومة مختلفة (30 و 40 ميغاباسكال)، وهما (PAB30) و (PAB40) على التوالي ، والخرسانة المهتزة (VOB) ذات المقاومة (30 ميغاباسكال) تؤخذ كخرسانة مرجع. يعتمد اختبار تقييم السندات على بروتوكول اختبار الشد الانشقاقي (الشد غير المباشر). لتحديد جودة الالتصاق والترابط ، وكذلك وضع الفشل لكل مركب (إصلاح / الركيزة).

بشكل عام ، توضح النتائج التي تم الحصول عليها أن الخرسانة ذاتية القوية (PAB) المصنعة تعطي مزايا لاستخدامها كمادة إصلاح. يحسن استخدام الخرسانة ذاتية القوية (PAB) أداء النظام الذي تم إصلاحه جودة التصاق ممتازة حصل عليها (PAB30) و (PAB40) مقارنة بالخرسانة الاهتزازية العادية (VOB) . قام الإصلاح بواسطة (PAB30) و (PAB40) بتطوير قدرة التكيف عن طريق الانكماش لصالح النظام الذي تم إصلاحه. يعرض (PAB30) اختلافات في الأبعاد أقرب و (PAB40) ضعيفة قليلاً لتلك الخاصة بـ (OB) ، ولذلك التوافق التشوهي المناسب ، من خلال استخدام الخرسانة ذاتية القوية للإصلاح القائم على الأسمنت. تساهم هذه النتائج في الحصول على إصلاح دائم.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة ذاتية القوية، الركيزة، إصلاح قائم على الأسمنت ، حالة السطح، توافق التشوه، رابطة قوية.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
ملخص	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XVI
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES NOTATIONS	XVIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	
Contexte de l'étude et problématique	2
Objectifs de la thèse	4
Structuration de la thèse	4
PARTIE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1 Introduction	8
I.2 Pathologie des ouvrages en béton	8
I.2.1 Les catégories de dégradations du béton	9
I.2.1.1 Fissuration du béton	10
1) Fissures continues	10
2) Fissures individuelles	11
I.2.1.2 Désintégration du béton	11
I.2.1.3 Eclatement et délamination du béton	12
I.2.1.4 Erosion de la surface du béton	13
1) Cavitation	13
2) Abrasion	13
I.2.1.5 Dépôts et infiltration	14
1) Efflorescence	14
2) Incrustation	14
3) Salissure	14
4) Mousse	15
5) Moisissure	15
6) Encrassement	15
I.2.1.6 Déplacement et distorsion des éléments	16
I.2.2 Les origines des dégradations	16
I.2.2.1 Dégradations d'origine physique	17
I.2.2.2 Dégradations d'origine mécanique	17

I.2.2.3 Dégradations d'origine chimique	17
I.3 Etat des structures en béton dans le monde	18
I.4 Concept d'une réparation en béton	18
I.5 Travaux antérieurs	19
I.6 Conclusion	21

CHAPITRE II : MECANISME D'ADHERENCE ET COMPATIBILITE DANS LE SYSTEME REPARE

II.1 Introduction	23
II.2 Procédure d'une réparation	23
II.3 Système de réparation	24
II.4 Durabilité d'un système de réparation	25
II.5 Notion d'adhérence	25
II.5.1 Mécanismes d'adhérence	26
II.5.1.1 Théorie du blocage mécanique (Adhérence mécanique)	26
II.5.1.2 Théorie d'interaction physico-chimique (Adhérence spécifique)	27
II.5.2 Mode de rupture d'adhérence d'une réparation	28
II.5.3 Influence de la préparation de surface sur l'adhérence	29
II.5.3.1 Rugosité de la surface du support	30
II.5.3.2 Humidité de la surface du support	32
II.6 Notion de compatibilité dans les réparations	33
II.6.1 Compatibilité chimique	34
II.6.2 Compatibilité électrochimique	35
II.6.3 Compatibilité des perméabilités	35
II.6.4 Compatibilité déformationnelle (volumétrique)	35
II.6.5 Paramètre influençant la compatibilité déformationnelle	36
II.6.5.1 Changement volumétrique	36
1) Retrait	36
2) Déformation thermique	38
II.6.5.2 Déformations viscoélastique	39
1) Module d'élasticité	39
2) Fluage	40
II.7 Conclusion	41

CHAPITRE III : ETAT DE CONNAISSANCE DE BÉTON AUTOPLAÇANT

III.1 Introduction	43
--------------------	----

III.2 Concept de béton autoplaçant (BAP)	43
III.3 Les constituants du (BAP)	44
III.4 Méthodes de formulation de (BAP)	45
III.4.1 Méthode basée sur l'optimisation des mortiers	45
III.4.2 Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte	46
III.4.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire	46
III.5 Les déformations de (BAP) utilisé à la réparation	47
III.6 Les propriétés des (BAPs)	48
III.6.1 Propriétés à l'état frais	48
III.6.1.1 Fluidite	48
III.6.1.2 Homogénéité	49
III.6.2 Propriétés à l'état durci	49
III.6.2.1 Propriétés mécanique	49
III.6.2.1.1 Résistance de compression	49
III.6.2.1.2 Module d'élasticité	50
III.6.2.1.3 Résistance de traction	51
III.6.2.2 Propriétés physique	51
III.6.2.2.1 Retrait	51
1) Retrait endogène	51
2) Retrait de séchage	52
III.6.2.2.2 Perte de masse	52
III.6.2.2.3 Fluage	53
1) Fluage propre	53
2) Fluage de séchage	53
III.7 Conclusion	54

PARTIE II : MISE EN EVIDENCE D'APPROCHE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : CHOIX DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS UTILISES

IV.1 Introduction	57
IV.2 Matériaux de base utilisée	57
IV.2.1 Granulats	57
IV.2.2 Ciment	60
IV.2.3 Filler calcaire	61

IV.2.4 Adjuvant	61
IV.2.5 Eau de gâchage	62
IV.3 Déterminations des formulations des bétons utilisés	63
IV.3.1 Béton du substrat	63
IV.3.2 Béton de réparation	63
IV.3.2.1 Méthode adoptée pour la formulation des (BAPs)	65
IV.4 Procédures de malaxage des bétons, mise en place et conservation	68
IV.5 Conclusion	69

CHAPITRE V : TECHNIQUES ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

V.1 Introduction	71
V.2 Confection des substrats en béton ordinaire	71
V.3 Matériaux de réparation	72
V.4 Analyse paramétrique de surface des substrats	72
V.5 Procédure de réparation	74
V.6 Conservation des composites (Réparation/Substrat)	75
V.7 Description du Programme expérimental	75
V.8 Essai mécanique d'adhérence	77
V.8.1 Essai de traction par fendage	77
V.9 Essai de compatibilité déformationnelle	78
V.9.1 Essai de compression uniaxiale	78
V.10 Conclusion	79

CHAPITRE VI : CARACTERISATION DES BETONS DE REPARATION ET LE BETON DE SUBSTRAT

VI.1 Introduction	81
VI.2 Caractérisation des bétons utilisés	81
VI.2.1 Caractérisation de béton à l'état frais	81
VI.2.1.1 Essai d'étalement(BAP) ou d'affaissement BOV)	81
VI.2.1.2 Essai de la boîte en L	82
VI.2.1.3 Essai de stabilité au tamis	83
VI.2.1.4 Essai de V-funnel	84
VI.2.1.5 Airs occlus	84
VI.2.1.6 Masse volumique(Densité)	85
VI.2.1.7 Bilans	85

VI.2.2 Caractérisation mécanique à l'état durci	87
VI.2.2.1 Propriétés mécaniques	87
VI.2.2.1.1 Essai de compression simple	87
1) Résistance en compression	88
2) Module d'élasticité en compression	90
VI.2.2.1.2 Essai de la traction par flexion	93
VI.2.2.1.3 Essai de la traction par fendage	94
VI.2.2.2 Propriétés physiques	96
VI.2.2.2.1 Essai de retrait	96
1) Méthodologie d'essai	97
2) Retrait total	98
3) Retrait endogène	99
4) Retrait de séchage	100
5) Bilan	101
6) Confrontation avec les travaux antérieurs	101
VI.2.2.2.2 Relation entre retrait de séchage et perte de masse	103
VI.3 Conclusion	104

PARTIE III : RESULTATS ET ENSEIGNEMENTS

CHAPITRE VII : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

VII.1 Introduction	108
VII.2 Etude de l'adhérence et de la liaison de réparation	109
VII.2.1 Mode de rupture des composites	109
VII.2.2 Evaluation de la résistance d'adhérence par fendage	110
VII.2.3 La résistance d'adhérence de la variante A (Interface Longitudinale)	111
VII.2.3.1 Effet de la rugosité de la surface du substrat sur l'adhérence	111
VII.2.3.2 Effet de l'état d'humidité de la surface du substrat sur l'adhérence	114
VII.2.4 La résistance d'adhérence de la variante B (Interface Transversale)	115
VII.2.4.1 Effet de la rugosité de la surface du substrat sur l'adhérence	116
VII.2.4.2 Effet de l'état d'humidité de la surface du substrat sur l'adhérence	118
VII.2.5 Influence de l'orientation d'interface sur l'adhérence	121
VII.2.6 Influence du type du béton de réparation sur l'adhérence	122
1) Composites (BOV/BO)	123

2) Composites (BAP30/BO)	123
3) Composites (BAP40/BO)	124
VII.2.7 Comparaison de l'adhérence d'interface des différents bétons de réparation	124
VII.2.7.1 Confrontation avec les travaux antérieurs	126
VII.3 Etude de la compatibilité déformationnelle	128
VII.3.1 Retrait	128
VII.3.1.1 Apparition de la fissuration due au retrait	129
1) Influence de la nature du matériau de réparation	129
2) Influence du retrait de séchage	130
VII.3.2 Module d'élasticité	131
VII.3.2.1 Le comportement déformationnelle des bétons de réparation	132
VII.3.2.1.1 Relation entre la force et le déplacement	132
1) Composites (BOV/BO)	133
2) Composites (BAP30/BO)	134
3) Composites (BAP40/BO)	135
VII.3.2.1.2 Comparaison de la variation dimensionnelle des bétons de réparation	136
VII.3.2.2 La force d'initiation de fissuration d'interface	137
VII.3.2.3 Comparaison de la capacité portante des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO)	138
VII.4 Conclusion	139
Conclusion générale et perspectives	143
Références bibliographiques	150

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

FigureI.1 : Fissures continues (Faïençage) et leurs causes	10
FigureI.2 : Types de fissures isolées	11
FigureI.3 : Désintégration de la peau de béton	12
FigureI.4 : Désintégration du béton par délamination et décollement	12
FigureI.5 : Eclatement et délamination du béton	13
FigureI.6 : Cavitation	13
FigureI.7 : Abrasion en pied de pile d'un pont franchissant une rivière	14
FigureI.8 : Dégradation par infiltration et dépôts	15
FigureI.9 : Exemple de différence de déplacement entre deux blocs voisins	16
FigureI.10 : Origines possibles de la dégradation des ouvrages	16

CHAPITRE II

FigureII.1 : Les trois principales étapes d'une réparation	24
FigureII.2 : Modèle d'un système de réparation de trois phases	24
FigureII.3 : Mécanismes d'adhérence à l'interface (réparation/support)	26
FigureII.4 : Interaction du type de liaison hydrogène dans les matériaux	28
FigureII.5 : Les trois modes de rupture observés durant l'essai de cisaillement	28
FigureII.6 : Les trois modes de ruptures observés durant l'essai de fendage	29
FigureII.7 : Modèle idéalisé d'une surface réparée	31
FigureII.8 : Influence de la rugosité	32
FigureII.9 : Influence de l'état d'humidité du substrat	33
FigureII.10 : Facteurs affectant la compatibilité des matériaux de réparation	34
FigureII.11 : Séchage d'un élément de béton dû à un gradient d'humidité entre le matériau et le milieu ambiant	37
FigureII.12 : Influence du retrait sur la phase de réparation	38

FigureII.13 : Les comportements mécaniques d'une réparation soumise au retrait 38

FigureII.14 : Influence de la rigidité relative du béton d'origine sur la répartition des contraintes normales de flexion 39

FigureII.15 : Effet d'atténuation du fluage sur le retrait 41

CHAPITRE III

FigureIII.1 : Concept de formulation des (BAPs) 44

FigureIII.2 : Notation d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2) 46

FigureIII.3 : Dispersion des granulats par excès de pâte 48

FigureIII.4 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant 50

FigureIII.5 : Perte de masse en fonction du temps 52

FigureIII.6 : Déformations différées de fluage et de retrait 53

CHAPITRE IV

FigureIV.1 : Analyse granulométrie de gravier et sable 58

FigureIV.2 : La courbe d'analyse granulométrique 58

FigureIV.3 : Temps de malaxage 68

FigureIV.4 : Les éprouvettes utilisées 69

CHAPITRE V

FigureV.1 : Paramètres de l'état de surface des substrats 73

FigureV.2 : Textures de surface des substrats 73

FigureV.3 : Les pièces de substrat avant de couler le béton de réparation 74

FigureV.4 : La mise en place des substrats dans les moules et application de la réparation 75

FigureV.5 : Les éprouvettes composites (Réparation/Substrat) 75

FigureV.6 : les phases du programme expérimental	76
FigureV.7 : Essai de traction par fendage	77
FigureV.8 : Eprouvettes soumises à l'Essai de traction par fendage.	78
FigureV.9 : Dispositif de mesure des variations dimensionnelles des composites.	79

CHAPITRE VI

FigureVI.1 : Essais de l'étalement	82
FigureVI.2 : Essai de boîte en L(L-Box)	83
FigureVI.3 : Essai au tamis	84
FigureVI.4 : Essai d'entonnoir	84
FigureVI.5 : Aéromètre pour la mesure de l'air occlus	85
FigureVI.6 : La presse de compression simple utilisée	88
FigureVI.7 : Essai de résistance en compression	88
FigureVI.8 : Résistance en compression des bétons utilisés	89
FigureVI.9 : Essai de module d'élasticité en compression	90
FigureVI.10 : Module d'élasticité en compression des bétons utilisés	91
FigureVI.11 : Essai de résistance en traction par flexion	93
FigureVI.12 : Résistance en traction par flexion des bétons utilisés	94
FigureVI.13 : Essai de résistance en traction par fendage	95
FigureVI.14 : Résistance en traction par fendage des bétons utilisés	96
FigureVI.15 : Essai de retrait (rétractomètre)	97
FigureVI.16 : Evolution des déformations de retrait total des bétons utilisés	98
FigureVI.17 : Evolution des déformations de retrait endogène des bétons utilisés	99
FigureVI.18 : Evolution des déformations de retrait séchage des bétons utilisés	100
FigureVI.19 : Balance de pesé la masse	103
FigureVI.20 : Retrait de séchage des bétons utilisés en fonction de la perte de masse	104

CHAPITRE VII

Figure VII.1 : Différents modes de rupture	110
FigureVII.2 : Les douze combinaisons de la préparation de la surface des substrats	111
FigureVII.3 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SS)	112
FigureVII.4 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSS)	112
FigureVII.5 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSH)	112
FigureVII.6 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat rugueuse	114
FigureVII.7 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat Lisse	114
FigureVII.8 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SS)	117
FigureVII.9 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSS)	117
FigureVII.10 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSH)	117
FigureVII.11 : Le contacte entre la réparation et le substrat	118
FigureVII.12 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat Rugueuse	119
FigureVII.13 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat Lisse	119
FigureVII.14 : Formation un écran d'eau à l'interface de la surface du substrat (SSH)	120
FigureVII.15 : Comparaison de l'orientation d'interface sur l'adhérence	121
FigureVII.16 : Modes de rupture des éprouvettes composites	121
FigureVII.17 : Résistance d'adhérence des BO, BOV et (BOV/BO)	123
FigureVII.18 : Résistance d'adhérence des BO, BAP30 et (BAP30/BO)	123
FigureVII.19 : Résistance d'adhérence des BO, BAP40 et (BAP40/BO)	124
FigureVII.20 : Résistance d'adhérence des (BOV/BO),(BAP30/BO)et (BAP40/BO)	125
Figure VII.21 : Modes de rupture des (BOV/BO),(BAP30/BO)et (BAP40/BO)	126
Figure VII.22 : Une Observation de l'interface des composites	129
FigureVII.23 : Nombres des fissurations des bétons de réparation	130

FigureVII.24 : Courbes force de compression – déplacement du composite (BOV/BO)	133
FigureVII.25 : Courbes force de compression– déplacement du composite (BAP30/BO)	134
FigureVII.26 : Courbes force de compression– déplacement du composite (BAP40/BO)	135
FigureVII.27 : Les variations dimensionnelles des différents bétons au niveau du pic de (BO)	136
FigureVII.28 : Les forces d'initiation de fissuration d'interface des composites (BOV/BO),(BAP30/BO)et(BAP40/BO)	137
FigureVII.29 : Capacité portante des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et(BAP40/BO)	138

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

TableauI.1 : Les catégories de dégradations du béton	9
--	---

CHAPITRE IV

TableauIV.1 : Caractéristiques physiques et mécanique des granulats utilisés	59
TableauIV.2 : Caractéristiques chimiques des granulats utilisés	60
TableauIV.3 : Composition chimique du clinker	60
TableauIV.4 : Composition minéralogique du clinker	60
TableauIV.5 : Propriétés physiques du ciment	61
TableauIV.6 : Résistances mécaniques du ciment (bars)	61
TableauIV.7 : Composition chimique des fillers calcaires	61
TableauIV.8 : Les caractéristiques de SP 40	62
Tableau IV.9 : L'analyse chimique de l'eau (mg/l)	62
TableauIV.10 : La composition de béton du substrat (BO)	63
TableauIV.11 : Notations des différents bétons utilisés	64
TableauIV.12 : La composition des bétons de réparation	67

CHAPITRE V

TableauV.1 : Représentation des formes des substrats confectionnées et les essais correspondants	72
--	----

CHAPITRE VI

TableauVI.1 : Les caractéristiques à l'état frais des bétons utilisés	86
TableauVI.2 : Résistance en compression des bétons utilisés	89
TableauVI.3 : Module d'élasticité en compression des bétons utilisés	91

TableauVI.4 : Comparaison des modules d'élasticités expérimentales et théoriques des bétons utilisés	93
TableauVI.5 : Résistance en traction par flexion des bétons utilisés	94
TableauVI.6 : Résistance en traction par fendage des bétons utilisés	95

CHAPITRE VII

TableauVII.1 : Résistance d'adhérence par fendage de la variante A	111
TableauVII.2 : Résistance d'adhérence par fendage de la variante B	116
TableauVII.3 : Evaluation de la qualité d'adhérence selon Sprinkel et Ozyildirim	127
TableauVII.4 : Récapitulation retrait de séchage des bétons de réparation utilisés	131

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS

BAP : Béton autoplaçant

BO : Béton ordinaire

BOV : Béton ordinaire vibré

BAP30 : Béton autoplaçant de résistance 30Mpa

BAP40 : Béton autoplaçant de résistance 40Mpa

CEM II/A 42.5 : Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5

C-S-H : Silicate de calcium hydraté

E/C : Le rapport eau- ciment

E/L : Le rapport eau- liant

FC : Le filler calcaire

C : Dosage en ciment

D : Le diamètre d'étalement

PF : Facteur de compacité

S/G : Volume de rapport de sable sur le volume total des granulats

G/S : Rapport Granulaire

BHP : Béton à haute performance

SS : Surface sèche

SSH : Surface saturée humide

SSS : Surface saturée en eau superficiellement sèche

DIN : Le cône normalise (ou un cône d'Abrams)

Ec : Le module d'élasticité

Rc : La résistance en compression

Lis : Surface lisse

Rug : surface rugueuse

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de l'étude et problématique

Au fil des années le patrimoine bâti est devenu de plus en plus important et considérable. Dans le passé la maintenance des ouvrages n'a été qu'une activité de second ordre, indispensable certes à la conservation du patrimoine et au bon fonctionnement de l'équipement technique, mais délaissée au profit de la conception et de l'ingénierie de la construction. Il existe un nombre important de pathologie dans les ouvrages dont les origines peuvent être liées à des phénomènes mécaniques, physico-chimiques, accidentels ou encore liés aux erreurs de calcul et de conception.

Concevoir et réaliser une réparation, réhabilitation ou un renforcement sur une structure en béton est un problème complexe, qui ne relève pas seulement d'un savoir-faire technique. C'est aussi un réel problème d'ingénierie des structures et des matériaux. Lorsque l'on conçoit une réparation, le principal objectif, outre celui de redonner à la structure ses qualités initiales, est de garantir la durabilité de l'intervention [Laurence 2001]. On constate souvent que les réparations effectuées nécessitent, après quelques années seulement, un entretien très important des défauts sérieux et il faut parfois réparer la réparation. Le coût économique engendré est ainsi gigantesque.

Afin de s'assurer une fiabilité de réparation, il est important de bien connaître les principaux phénomènes impliqués dans la déformation du béton de réparation [Poston 2001 et al]. Une mauvaise adhérence de la réparation avec le vieux béton peut également empêcher un comportement monolithique et provoquer le décollement de la réparation. Une durabilité d'une réparation se traduit essentiellement par l'obtention d'une adhérence au support qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps. Par ailleurs la mise en place d'un béton jeune sur un support (substrat) de béton plus ancien provoque différents types de problèmes tant physico-chimiques que mécaniques, liés à la capacité d'adaptation entre les deux matériaux (Substrat- Réparation). Il est nécessaire que le matériau de réparation et le

support (substrat) soient compatibles en termes de déformation [Morgan 1996 ; Hassan et al 2001], notamment en ce qui concerne la variation dimensionnelle (volumique) d'ue au retrait du matériau de réparation qui va être empêché par le substrat. La compatibilité déformationnelle est un paramètre important pour la durabilité de la réparation.

Il existe en général plusieurs paramètres qui peuvent anéantir le système formé (Substrat- matériau de réparation). Parmi ces paramètres, on cite les conditions du milieu extérieur, la qualité de la surface de l'ancien béton et les propriétés du matériau de réparation. En effet, les recherches conduites dans cet objectif permettront d'élaborer des règles de conception et par la suite de développer des matériaux spécifiquement adaptés au problème des réparations.

Actuellement, plusieurs recherches sont consacrées à la confection des matériaux de réparation de bonne qualité, et au développement de nouvelles méthodes d'évaluation [Tayeh et al 2013 ; Mohammadi et al 2014]. Il existe de nombreux matériaux pour la réparation, classés en trois catégories, à savoir les matériaux polymères ou résineux, les matériaux cimentaires modifiés aux polymères (PMC) et les matériaux cimentaires. Ces derniers, qui font l'objet de notre recherche, sont largement utilisés, en raison de leurs propriétés mécaniques proches de celles de la plupart des bétons de substrat, à leur disponibilité sur le marché des matériaux de construction, et aussi à leurs prix bas [Lukovic et al 2012 ; Qian et al 2014].

Les résultats expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs ont indiqué que les matériaux cimentaires présentent une résistance de liaison plus élevée avec le substrat en béton par rapport aux matériaux en résine.

C'est dans ce cadre général de recherche que s'inscrit le travail présenté dans cette thèse.

L'objectif des recherches qui ont menées de penser, à une meilleure « adaptabilité » du (BAP) tant que matériau de réparation, vu les avantages qu'il présente à l'état frais : stabilité, homogénéité et déformabilité du fait qu'il suit parfaitement les formes des surfaces à réparer.

Objectifs de la thèse

Le système réparé est constitué, par des éprouvettes composites (Réparation/Substrat). Cette thèse comporte deux volets principaux :

- ❖ -Evaluer et quantifier la résistance d'adhérence entre la réparation appliquée et le substrat à réparer.
-Constater le mode de rupture produit.

- ❖ -Evaluer la capacité déformationnelle des bétons de réparation utilisés avec le substrat (BO), pour mieux comprendre la capacité d'adaptation entre les deux matériaux (Substrat-Réparation).
-Constater la réponse des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) sous l'effet hydrique.

Structuration de la thèse

La thèse est structurée en trois parties qui correspondent aux principales étapes de la recherche :

1) La première partie bibliographique contient trois chapitres I, II et III,

Le premier chapitre est consacré à une présentation des phénomènes qui peuvent être à l'origine des pathologies dans les ouvrages en béton, à un aperçu sur un état des structures en béton dans le monde et enfin aux différents travaux dans la littérature relative à la réparation.

Le second chapitre est dédié à la durabilité du système de réparation à travers les principaux mécanismes d'adhérence et à la compatibilité d'un matériau cimentaire sur un support représentant un ancien béton.

Le troisième chapitre est voué à une présentation du matériau de réparation choisi : le (BAP) ainsi qu'à quelques résultats repérés dans la bibliographie sur les caractéristiques mécaniques et physiques du BAP.

2) La deuxième partie comporte trois chapitres IV, V et VI.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des propriétés des matériaux choisis pour la formulation des bétons de réparation et celle du substrat, qui composent le système de réparation.

Le cinquième chapitre est offert aux protocoles expérimentaux, aux techniques de réparation, particulièrement la procédure de préparation des surfaces des supports et aux étapes suivies pour la fabrication des composites (Réparation/Substrat).

Le sixième chapitre est destiné aux interprétations des résultats expérimentaux des essais de caractérisation des différentes propriétés des bétons de réparation utilisés et du substrat. Il s'agit des résistances mécaniques (compression et traction) et du module d'élasticité, ainsi que les propriétés physiques l'occurrence le retrait.

3) La dernière partie est consacrée à la présentation des différents résultats obtenus par essai d'adhérence, à la discussion de ces résultats ainsi qu'à l'évaluation de la capacité déformationnelle des bétons de réparation avec le substrat (BO).

Enfin, la thèse est clôturée par une conclusion générale proposant une synthèse des résultats obtenus dans notre travail ainsi que des perspectives de recherche.

I.1 Introduction

La dégradation d'un ouvrage en béton est la traduction d'une évolution lente et irréversible de ses variables d'état, conduisant à la diminution des marges nécessaires de sûreté pour assurer son bon fonctionnement.

L'objet particulier de ce chapitre est d'exposer un panorama des phénomènes qui peuvent être à l'origine des pathologies les plus couramment observées dans les ouvrages en béton. Cette problématique représente un enjeu technologique et économique important et pousse les maîtres d'ouvrages à chercher des solutions rapides et efficaces pour prolonger la durée de vie de leurs ouvrages, assurer la sécurité des usagers et optimiser les coûts de maintenance et de réparation.

Actuellement, le nombre de structures ou ouvrages de génie civil nécessitant de l'entretien, des réparations ou des reconstructions partielles croît sans cesse. Face à l'importance grandissante des travaux de réparation, plusieurs auteurs ont développé des méthodologies permettant d'améliorer la qualité des réparations réalisées sur les ouvrages en béton.

I.2 Pathologie des ouvrages en béton

Les principaux désordres rencontrés sur les ouvrages de génie civil peuvent être attribués au vieillissement de la structure soumise à de nombreuses contraintes environnementales, à des causes accidentelles (chocs, surcharges, incendies...) ou à des erreurs de conception ou de construction [Wang et al 2021].

Dans un ouvrage en béton, les dégradations peuvent être initialement constatées par un examen visuel. Afin d'évaluer l'étendue et les causes de la dégradation d'une structure en béton armé et pour établir une réparation efficace, il est utile d'effectuer une campagne d'évaluation efficace. La campagne d'évaluation peut être effectuée par un examen visuel. L'évaluation peut être aussi effectuée par une investigation approfondie par des essais non destructifs, sur site pour évaluer la qualité du béton, et par une analyse en laboratoire, où des essais pétrographiques, physiques et chimiques seront effectués sur des échantillons prélevés.

I.2.1 Les catégories de dégradations du béton

D'après la littérature, on peut répertorier six grandes familles de dégradations qui sont illustrées dans le Tableau I.1. Chaque famille de ces dégradations peut être liée à différents facteurs [Pacheco 2021].

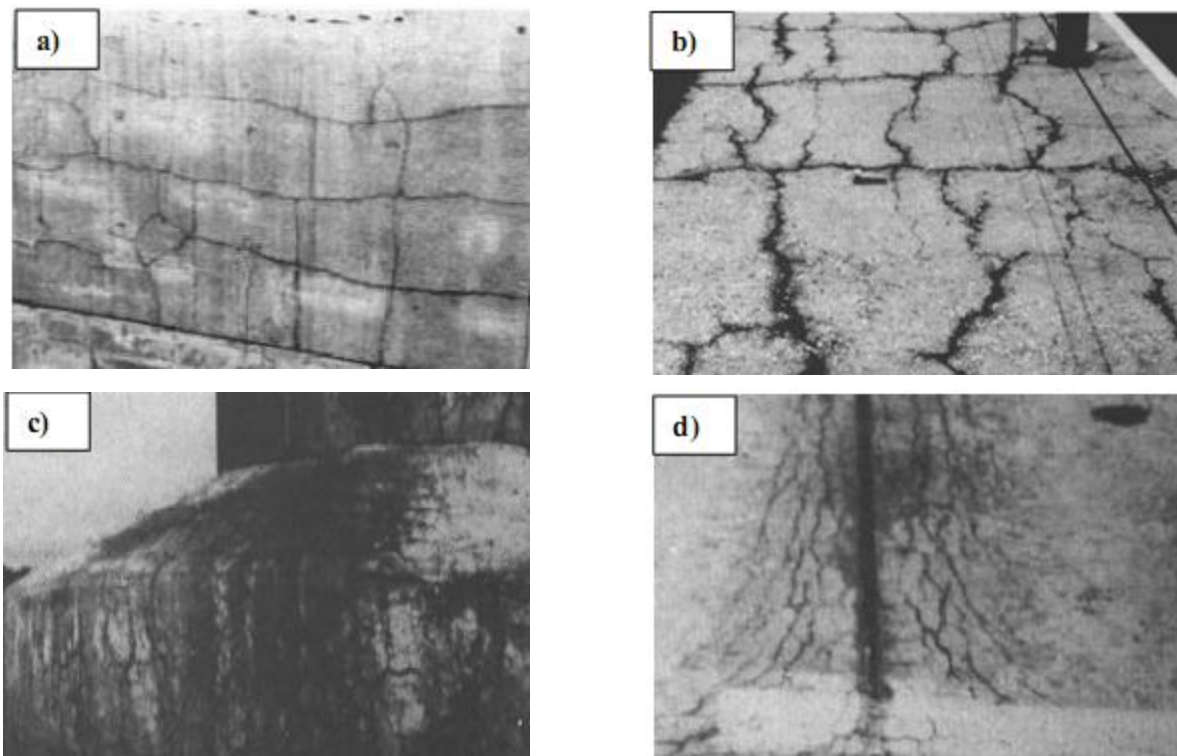
Tableau I.1 : Les catégories de dégradations du béton [Pacheco 2021].

Catégorie de Dégradation	Désordres constatés	
Fissuration	Fissure continue	Faïençage, Craquelage Fissuration en série à proximité d'un joint
	Fissure individuelle (Isolée)	Longitudinale, Transversale, Verticale, Horizontale, Fissure capillaire, Oblique, Irrégulière
Désintégration	Ecaillage, Cloquage, Pelade, Délamination, Décollement, Vieillessement Farinage, Poudrage	
Eclatement ou Perte de masse	Eclat, Craquage Epaufrure Cratère	
Erosion	Abrasion Cavitation	
Infiltration et Dépôts	Infiltration	Infiltration dans les joints ou joints d'étanchéité Infiltration dans les fissures Infiltration à travers la masse de béton
	dépôts	Décoloration Exsudation, Efflorescence, Incrustation, Corrosion
Distorsion	Flambement, Roulage/voilement Formation de failles Tassement, Inclinaison	
Défaut de construction	Joint froid Nids d'abeilles Bullage, Surface irrégulière	

I.2.1.1 Fissuration du béton

Une fissure est une ouverture linéaire au tracé plus ou moins régulier, sur la surface d'un élément en béton. Généralement, la fissuration représente le premier type d'endommagement qui se développe suite à des contraintes de traction ou de cisaillement qui dépassent la capacité en traction du béton. Dans le cas de la dégradation par fissuration l'examen visuel permet de tirer deux types de fissures :

- 1) Fissures continues** : sont en forme de faïençage (FigureI.1a à I.1c). Elles forment un réseau de microfissures courtes et uniformément distribuées sur la surface de la structure endommagée. Ces fissures peuvent résulter d'une restriction du changement de volume de la couche superficielle (FigureI.1a) ou à une attaque par réaction alcali-granulats (FigureI.1b et FigureI.1c). Les fissures continues peuvent être aussi en série à proximité d'un joint à cause d'une accumulation d'humidité ou d'agents agressifs (FigureI.1d).

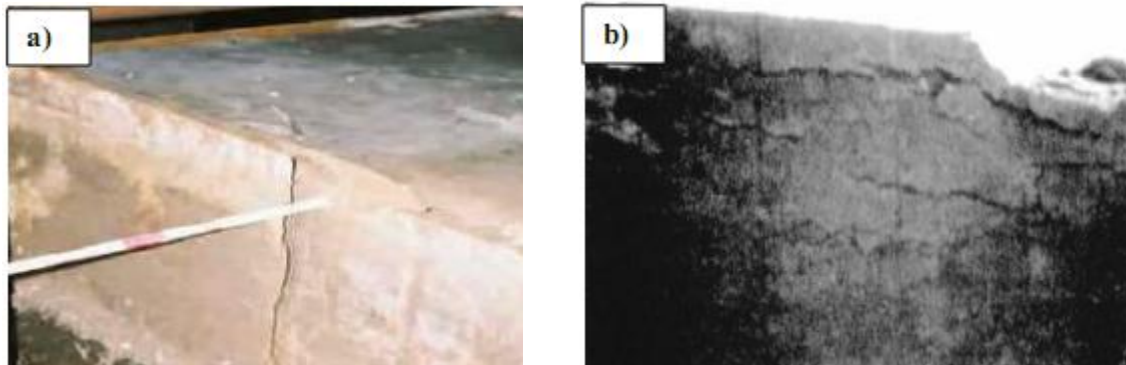


FigureI.1 : Fissures continues (Faïençage) et leurs causes [Department Of The Army 2002].

a : Fissures continues par changement de volume
c : Fissures continues par réaction alcali-carbonate

b : Fissures continues par alcali-granulat
d : Fissures continues à proximité d'un joint

2) Fissures individuelles : peuvent être formées d'une seule fissure isolée (FigureI.2a) ou par un ensemble de fissures parallèles entre elles (FigureI.2b). Les fissures individuelles possèdent une direction unique qui indique le sens de la sollicitation appliquée. Selon sa direction, la fissure sera alors longitudinale, transversale, verticale, horizontale, oblique ou irrégulière.



a : Fissure isolée verticale

b : Fissure individuelle parallèle par gel-dégel

FigureI.2 : Types de fissures isolées [Department Of The Army 2002].

I.2.1.2 Désintégration du béton

La désintégration est une détérioration superficielle, en petites particules de la peau du béton. La désintégration est causée principalement par les cycles de gel-dégel, qui provoquent l'écaillage de la peau du béton (FigureI.3a). L'exposition d'un ouvrage en béton dans des milieux sulfatique, peut entraîner la désintégration de sa surface (FigureI.3b). Aussi, les eaux agressives ou acides peuvent être la cause de la désintégration du béton (FigureI.3c et I.3d).

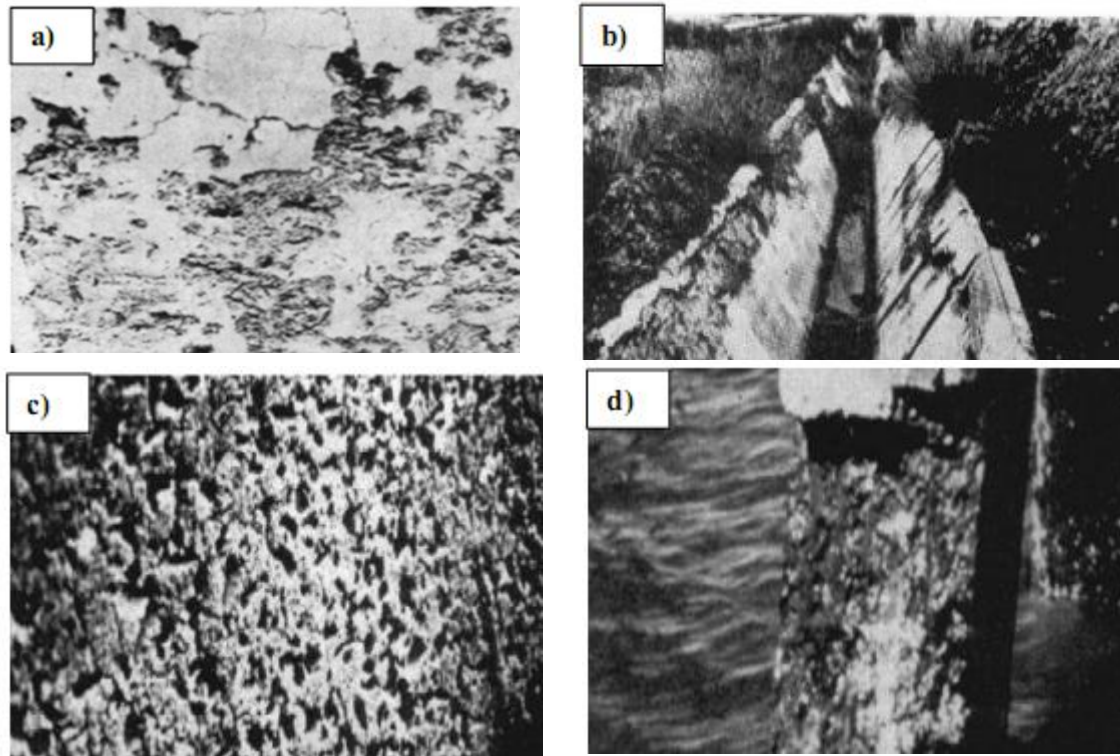


Figure I.3 : Désintégration de la peau de béton [Department Of The Army 2002].

a : Ecaillage du béton,

c : Désintégration par eaux agressives

b : Désintégration par attaque des sulfates

d : Désintégration par eaux acides

I.2.1.3 Eclatement et délamination du béton

La délamination est une fissuration interne entre la couche de surface et la couche en profondeur. La délamination peut provoquer ou non le détachement de la couche de surface du béton (Figure I.4b et I.4c).

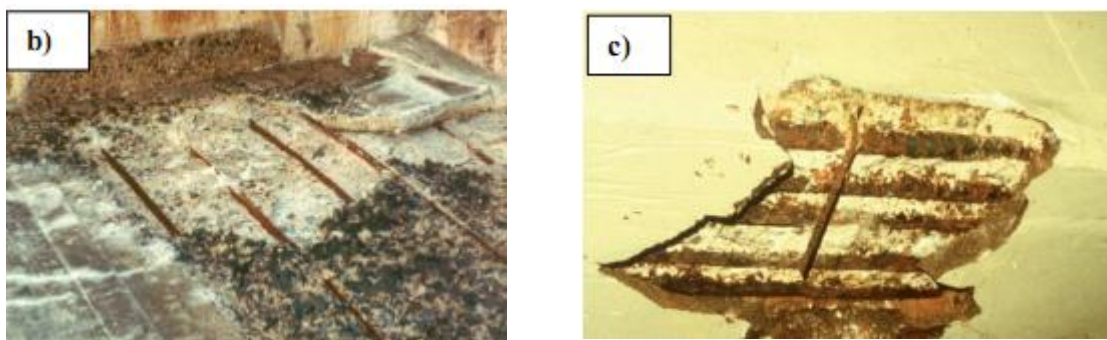


Figure I.4 : Désintégration du béton par délamination et décollement [Department Of The Army 2002].

b : Délamination du béton avec corrosion

c : Délamination du béton sans corrosion

L'éclatement résulte d'un détachement de fragments en surface du béton. L'éclatement peut être sur une faible zone ou sur une large zone. Il

peut être aussi sous forme d'épaufrure, lorsqu'il y a un éclatement d'un bord d'une dalle en béton(FigureI.5).



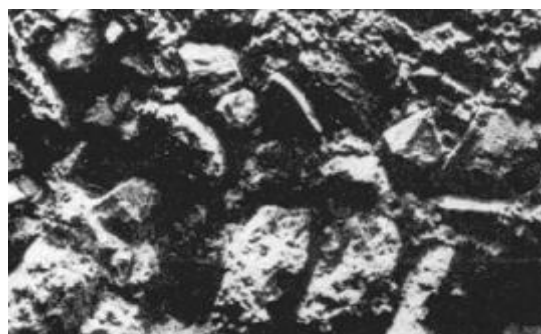
FigureI.5 : Eclatement et délamination du béton [Mosser 2004].

I.2.1.4 Erosion de la surface du béton

L'érosion est une détérioration sous forme d'arrachement de granulats ou de la pâte de la surface. Elle se manifeste par l'apparition des cavités sur les surfaces des éléments d'ouvrages en béton exposées à une abrasion.

L'érosion de la surface peut être une cavitation ou une abrasion :

- 1) Cavitation** : c'est une détérioration sous forme de piqures en surface, de trous ou crevasses très profondes (FigureI.6). L'agression mécanique est provoquée par l'écoulement d'un fluide sur la surface du béton.



FigureI.6 : Cavitation [Mosser 2004].

- 2) Abrasion** : l'abrasion est caractérisée par une usure des granulats et de la pâte de ciment et par la présence d'écorchures qui forment des cavités sur la surface des ouvrages. L'agression mécanique est provoquée par des

particules solides, transportées par les courants d'eau telle que les eaux de rivières, des barrages ou des vagues d'eau de mer (FigureI.7).



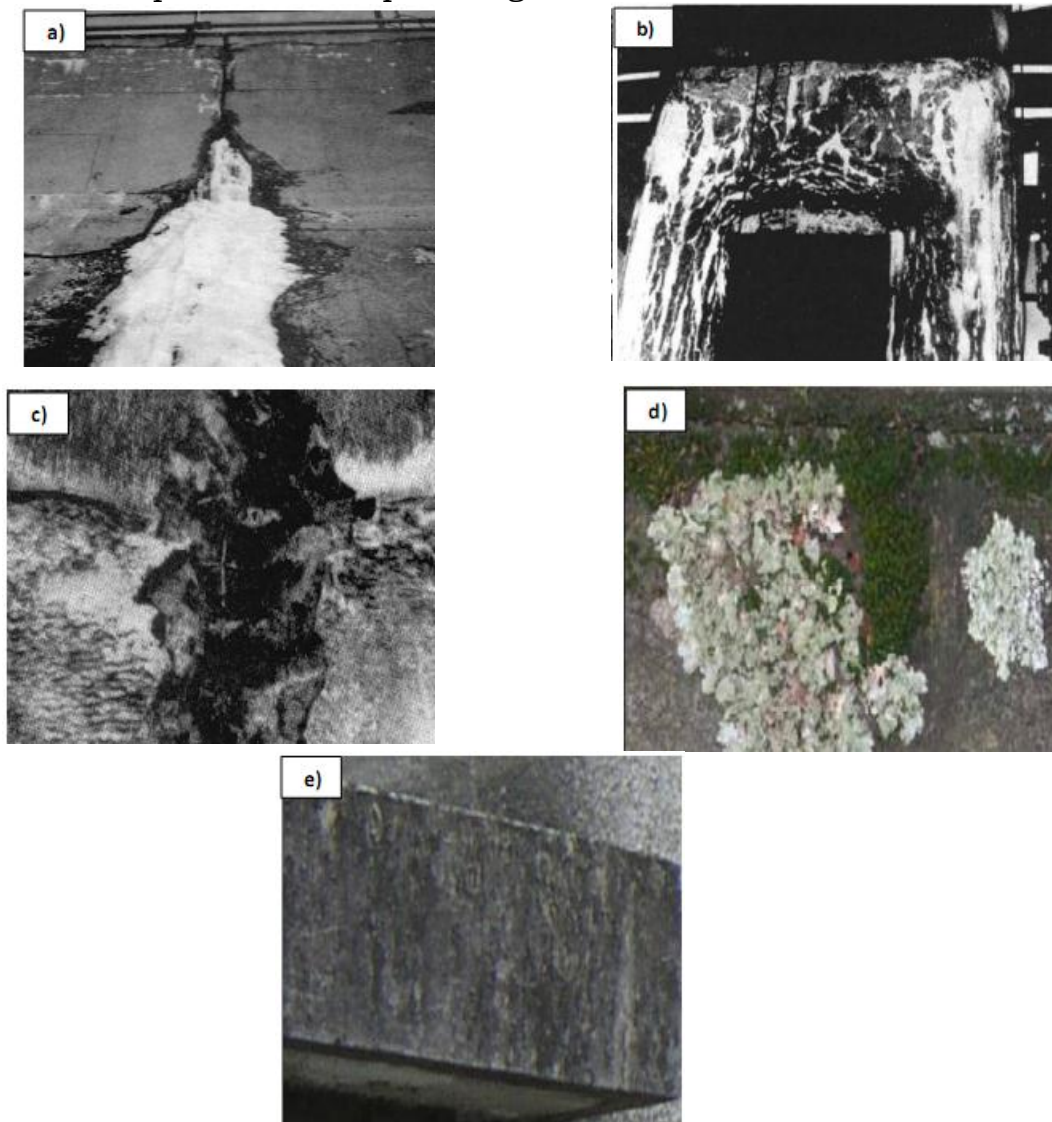
FigureI.7 : Abrasion en pied de pile d'un pont franchissant une rivière [Mosser 2004].

I.2.1.5 Dépôts et infiltration

L'infiltration est due à une pénétration d'un fluide à travers les fissures ou à travers les joints (FigureI.8a) d'une structure en béton. Cependant, les dépôts sont les résultats de la présence des taches et des couleurs sur la surface du béton. Les dépôts sont des taches et des couleurs qui apparaissent à la surface du béton suite à un excès d'humidité, d'un manque d'aération et d'ensoleillement ou à une pollution du milieu ambiant. Parmi, les dépôts et les taches observées, on peut distinguer les désordres suivants :

- 1) Efflorescence** : est un dépôt de cristaux de couleur claire blanchâtre, à base de carbonate de calcium ou de couleurs jaunâtre à base de nitrate de sodium, qui apparaît à la surface du béton (FigureI.8b). Généralement, l'efflorescence est le résultat de l'évaporation d'une eau saturée en sels solubles ou à une imbibition de la surface l'eau de condensation atmosphérique ou de pluie.
- 2) Incrustation** : est un dépôt plus ou moins dur que laisse une eau calcaire sur la surface du béton (FigureI.8c).
- 3) Salissure** : ce sont des taches et des couleurs qui apparaissent sur la peau du béton.

- 4) Mousse** : Pollutions résultant du développement de microorganismes à la surface du support, pouvant donner naissance à des colorations verdâtres, noirâtres, rougeâtres suivant les types rencontrés, voire à des formations de dépôts plus épais (FigureI.8d).
- 5) Moisissure** : Champignon noir, gris ou brun pouvant pousser à la surface d'une peinture ou d'un matériau d'étanchéité (FigureI.8e).
- 6) Encrassement** : Une accumulation de saletés, sur les éléments des ouvrages, peut diminuer leurs luminances et leurs couleurs deviennent plus sombres qu'à l'origine.



FigureI.8 : Dégradation par infiltration et dépôts [Department Of The Army 2002].
a : Infiltration d'eau à travers un joint **b** : Efflorescence, **c** : Incrustation
d : Mousse **e** : Moisissure

I.2.1.6 Déplacement et distorsion des éléments

Un changement dans l'alignement des éléments d'une structure peut provoquer un mouvement différentiel entre un bloc monolithe adjacent ou à un déplacement des éléments par rapport à leurs supports ou appuis fixes.



Figure I.9 : Exemple de différence de déplacement entre deux blocs voisins [Bouksani 2013]

I.2.2 Les origines des dégradations

Les mécanismes de dégradation sont fonction de l'exposition de l'ouvrage par rapport à son environnement. Par conséquent, le béton peut néanmoins subir des altérations internes ou externes (Figure I.10). Ces altérations sont classées en fonction de leur origine physique, chimique et mécanique.

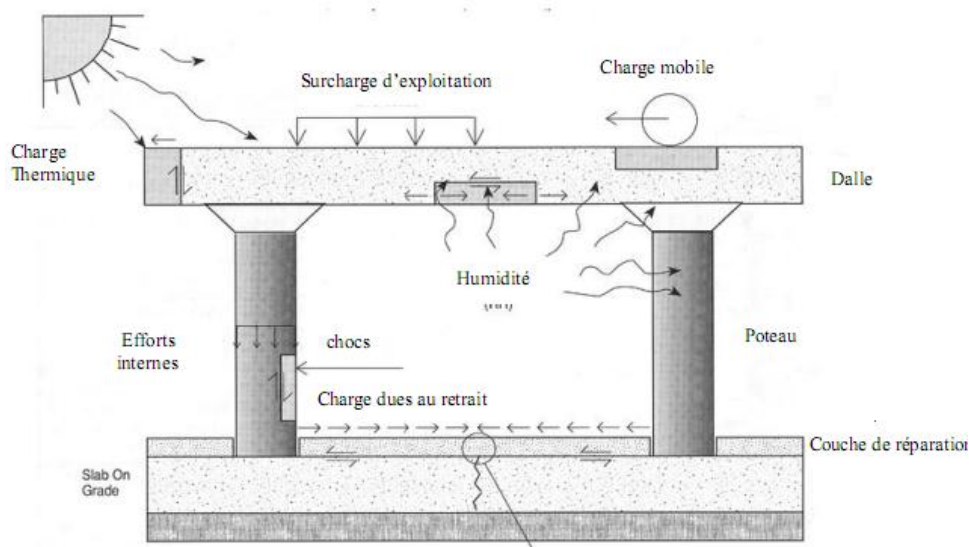


Figure I.10 : Origines possibles de la dégradation des ouvrages [Emmons 1993].

I.2.2.1 Dégradations d'origine physique

D'un point de vue physique, il est important de noter que le béton est un matériau hydraulique et poreux et qu'à ce titre, les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives, aux frottements, aux chocs thermiques, aux gonflements, aux retraits. Tous ces phénomènes sont basés sur le comportement de l'eau en son sein et sur les échanges d'eau avec le milieu extérieur, comme le retrait, le tassement et le gel-dégel [Calgaro et al 1994 ; Hornain 2007].

I.2.2.2 Dégradations d'origine mécanique

Il s'agit le plus souvent d'une attaque de type mécanique qui se concrétise par des chocs de l'abrasion et l'érosion. Les désordres de ce genre concernent beaucoup plus les ponts. Les chocs les plus fréquents proviennent des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue. Ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton. Voir même des ruptures d'acier. Les phénomènes d'abrasion et d'érosion, on les rencontre essentiellement dans des structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau. Comme les barrages ou les galeries d'amenées d'eau.....etc. [Calgaro et al 1994].

I.2.2.3 Dégradations d'origine chimique

Le béton est connu pour être un matériau basique. Pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides. La cause principale de toutes les dégradations d'origine chimique est la possibilité de pénétration ou d'écoulement des fluides dans le béton qui dépend de la perméabilité et par la suite de la porosité du béton. La porosité interne du béton et de la pâte du ciment hydraté gouverne la durabilité des ouvrages en béton [Calgaro et al 1994].

Dans les phénomènes qui peuvent être à l'origine d'une dégradation chimique, sont : la carbonatation connue par le vieillissement naturel, la

corrosion des aciers, l'alcali-réaction et la réaction sulfurique, ainsi que l'attaque des eaux de mer et les eaux pures.

I.3 Etat des structures en béton dans le monde

La seconde moitié du vingtième siècle est marquée par une intense activité de construction d'infrastructure en béton et par un développement sans cesse croissant du parc immobilier. Ces ouvrages ont une durée de vie limitée et plusieurs d'entre eux nécessitent aujourd'hui des réparations, voire une reconstruction partielle. Ainsi le domaine des réparations en béton connaît, depuis une dizaine d'années, un essor important dans le secteur du bâtiment et des travaux publics. L'entretien et la réhabilitation des ouvrages ont pris une part grandissante dans le secteur de la construction. Au Canada, selon la Fédération Canadienne des Municipalités plus de 200 000 structures et ponts affichent des déficiences importantes dont les coûts des réparations sont estimés à 44 milliards de dollars [Rizkalla et al 1996].

L'estimation approximative de l'opération des réparations des bâtiments, qui pourrait s'étendre sur un demi-siècle en se référant aux expériences de certains pays européens (Espagne, France, Italie...), est de l'ordre de 35 milliards de dollars. A titre indicatif, l'état Algérien a alloué près de 36 milliards de dinars pour la réhabilitation d'une vingtaine de villes seulement [patrimoine immobilier 2012]. [Abdessemed et al 2011 ; Skokandić et al 2022] rapportent en Algérie aussi, il y a plus de 4850 ponts et 40% de ces derniers ont besoin d'une réparation.

I.4 Concept d'une réparation en béton

Nous avons vu qu'un grand nombre d'ouvrages en béton sont en mauvais état et nécessitent un entretien. La nature et l'origine des défauts sont multiples. Ainsi des erreurs peuvent être commises dès la conception ou la construction de l'ouvrage. D'autres dommages peuvent apparaître lors de chargement accidentel (tremblement de terre, surcharge accidentelle...). Il reste enfin l'endommagement « normal » du béton au cours de la vie de la structure dû aux charges d'utilisation, aux conditions climatiques, à l'environnement industriel et chimique. Des «maladies» du béton peuvent

être aussi à l'origine de graves détériorations (réaction alcali-granulats, attaque au sulfate...).

Sur les structures à réparer, on pourra alors relever un endommagement allant du défaut local (fissures, épaufrures...), à des délaminages importants et des attaques chimiques en profondeur. La structure peut alors ne plus jouer son rôle : étanchéité, capacité portante, esthétique... Il faut donc intervenir pour restaurer et/ou améliorer la fonction initiale de l'ouvrage.

Face à l'importance grandissante des travaux de réparation, de nombreux matériaux et techniques de réparation ont été développés par les industriels. Malheureusement, le manque de connaissances scientifiques spécifiques au problème des réparations en béton, ou l'absence d'expertise dans les techniques et les matériaux pour les réparations, conduit souvent à une conception basée sur les recommandations du manufacturier ou sur l'expérience personnelle. Nous comprenons alors aisément les enjeux économiques et scientifiques des recherches entamées dans ce domaine afin de rationaliser les techniques et les matériaux et de réduire les coûts engendrés.

I.5 Travaux antérieurs

La problématique des réparations par des matériaux cimentaires en béton a déjà fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. Nous citerons tout d'abord les travaux de :

[GHEZAL A F 2014] : s'est intéressé au développement des bétons de réparation qui auront une tendance à la fissuration significativement réduite par l'approche de la compatibilité volumétrique.

[Inès Leana Tchetchnia Ngassam 2013] : a étudié l'influence de la présence de polymère sur la durabilité des réparations des ouvrages en béton. (Plusieurs produits de réparation commerciaux ont été analysés).

[Thanh Song Phan 2013] : s'est porté sur la Modélisation numérique de l'interface acier-béton et son application au comportement des structures en béton renforcées.

[Francois Modjabi 2010] : s'est intéressé au comportement des bétons de réparation en situation de mouvement empêché. Ce qui nécessite l'identification des relations et paramètres fondamentaux gouvernant la compatibilité volumétrique des réparations.

[Trung Nguyen 2010] : s'est penché sur un sujet visant de trouver une voie pour empêcher ou retarder la fissuration dans la réparation par une analyse de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation.

[Tran 2006] : s'est focalisé sur le comportement de l'interface du support et son rechargement en cours de décollement puis son évolution dans le cas de sollicitation de fatigue.

[Laurent Molez 2003] : s'est intéressé au comportement à court terme et à long terme des réparations structurales en béton (couplage des effets du chargement mécanique, du retrait de séchage et du fluage en traction).

[Olivier Laurence 2001] : s'est lancé dans le problème des fissurations dues au retrait restreint dans les réparations minces en béton soumises à un chargement hygrothermique.

[Benoît Bissonnette 1996] : a examiné le comportement viscoélastique en traction du béton de réparation.

[Granju 1994] : a considéré les mécanismes de décollement.

[Grandhaie 1993] : a analysé l'efficacité de la réparation par le béton fibré.

[François Saucier 1990] : a étudié la durabilité de l'interface entre deux bétons.

Par ailleurs, plusieurs autres travaux se sont concentrés sur la compatibilité, entre le matériau de réparation et l'ancien béton [Emmons 1993 ; Morgan 1996] et sur la liaison d'interface entre les deux matériaux [Grandhaie 1993 ; Farhat 1999], c'est dans cet axe de recherche que s'intègrent les travaux de la présente thèse.

I.6 Conclusion

Il ressort de ce chapitre que les dégradations que connaissent les ouvrages en béton armé sont principalement d'origine : physique, chimique ou mécanique. Ces dégradations conduisent la structure à perdre certaines de ses caractéristiques telles que : étanchéité, capacité portante.

De ce fait, une intervention visant à restaurer, réparer et/ou améliorer la fonction de l'ouvrage s'impose.

Le problème de la durabilité et l'efficacité de réparation en béton constitue l'objet du chapitre suivant.

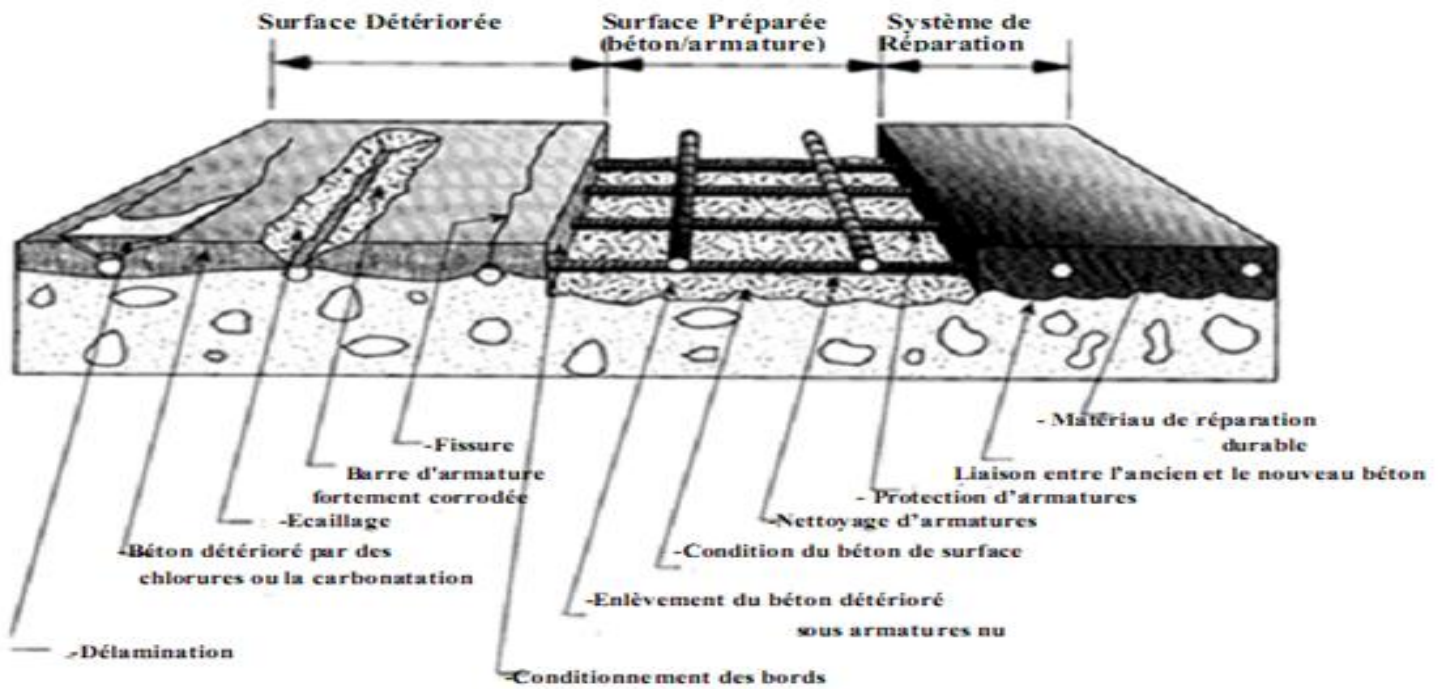
II.1 Introduction

Une réparation par un matériau donné exige la maîtrise des conditions de son application. En effet, le concepteur ne possède pas des règles bien fixes pour entamer sa stratégie de réparation, puisqu'il existe plusieurs paramètres qui peuvent anéantir la réparation. La mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes tant physico-chimiques que mécaniques.

Le présent chapitre donne un aperçu détaillé sur la problématique de la durabilité du système de réparation, à partir d'une synthèse de deux concepts nécessaires à la durabilité des réparations en béton. Le premier est plus rencontré et consiste en l'adhérence entre le matériau de réparation et le matériau du substrat. Le second est lié à la compatibilité des deux matériaux en contact (Réparation –Substrat).

II.2 Procédure d'une réparation

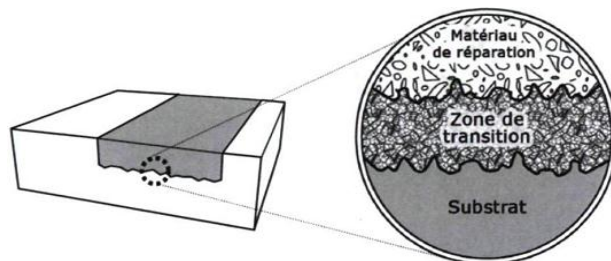
La stratégie d'une réparation doit faire apparaître trois étapes principales indissociables, comme il est illustré par la Figure II.1. D'abord, un diagnostic profond des causes de la détérioration qui précède nécessairement les étapes suivantes. Il faut bien comprendre l'origine des dégradations afin d'éviter qu'elles ne réapparaissent une fois l'ouvrage réparé. Ensuite une préparation de la zone à réparer qui doit être soigneusement effectuée : enlèvement du béton détérioré avec une précaution particulière, nettoyage et protection du ferrailage ou un ajout supplémentaire est nécessaire par des armatures de renforcement et enfin une application adéquate du produit de réparation. En effet, le système de réparation rassemble deux matériaux différents : le béton jeune, celui de réparation et l'ancien béton, celui du support (le substrat) [Gadri 2018]



FigureII.1 : Les trois principales étapes d'une bonne réparation [Emmons et al 1996]

II.3 Système de réparation

Une réparation constitue donc un système dont les différents composants sont : le matériau d'origine (substrat), le matériau de réparation et la zone de transition qui constitue l'interface entre les deux matériaux, interagissent de sorte que le comportement de l'un dépend de celui de l'autre. Pour étudier un système de réparation, il est important de considérer tous les composants comme éléments interconnectés et non pas isolés. La FigureII.2 illustre les trois composants d'un système de réparation et leur configuration à l'interface.



FigureII.2 : Modél d'un système de réparation de trois phases [Emmons et al 1996]

Selon [Emmons et al 1996], quel que soit le type de réparation effectuée, son système est composé de trois phases : matériau d'origine (le substrat), le matériau de réparation et la zone de transition qui constitue l'interface entre les deux matériaux tel que schématisé sur la système composite [Emmons et al 1996; Benzerzour 2003 ; Vaysburd 2001 ; Garbacz 2013]. En effet ce

Le système composite est en face de divers phénomènes (fissurations, écaillage, délamination.....) qui amènent à un problème de durabilité d'un système de réparation.

II.4 Durabilité d'un système de réparation

La durabilité d'un système de réparation est liée à la durabilité de l'élément réparé et à celle du matériau de réparation. Elle est gouvernée aussi par les propriétés de la zone d'interface qui relie les deux matériaux [Bissonnette 1996]. La durabilité de la zone de transition (interface) joue un rôle essentiel dans la durabilité de l'ensemble du système. L'interface, assurant la liaison des deux matériaux, est susceptible d'être soumise à des efforts importants principalement sous l'action des charges externes (statiques et dynamiques) et des variations dimensionnelles. Les auteurs [Chanvillard et al 1989 ; Farhat 1999] rapportent que la durabilité des réparations dépend essentiellement de la durabilité de leur adhérence au support.

D'après [Saucier 1990] une réparation durable est une réparation dont l'adhérence à son support atteint une résistance mécanique suffisamment élevée et surtout qui est stable dans le temps. C'est également une réparation qui développe un minimum de fissuration. Par ailleurs les mécanismes de fissuration et de décollement ainsi que la compatibilité des différentes propriétés des deux matériaux comptent parmi les paramètres les plus importants de la durabilité d'une réparation selon [Emmons et al 1996] et selon [Laurance 2001], une réparation durable suivant le changement auquel doit faire face la réparation (mécanique, chimique, gel,...).

II.5 Notion d'adhérence

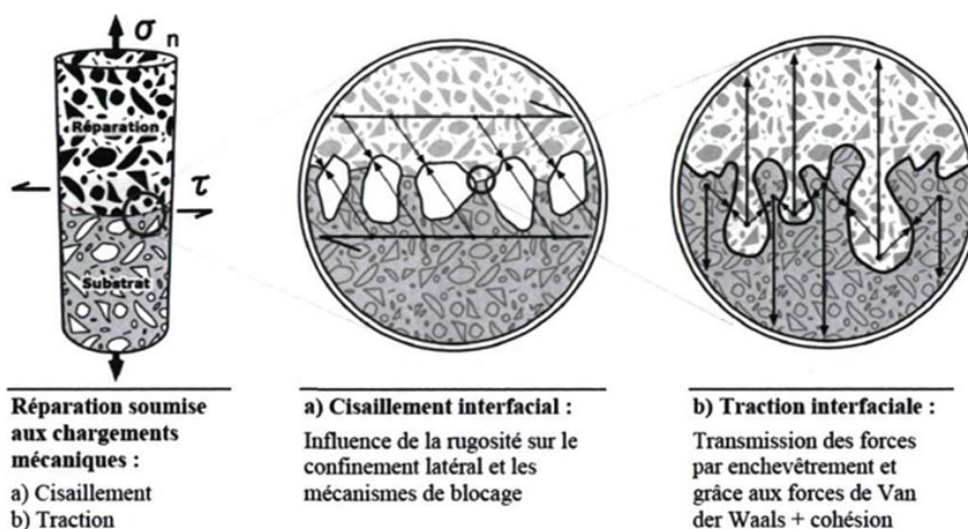
L'adhérence entre la réparation et le béton existant est le résultat du contact entre deux solides, l'un formé à partir d'un matériau fluide durcissant (béton de réparation) mis en place sur le second : un matériau à l'état solide (béton du substrat). Une réparation de qualité nécessite donc, une compréhension des phénomènes à l'origine de l'adhérence entre la réparation et le substrat. La résistance de cette interface résulte de l'adhérence mécanique et des mécanismes d'adhésion pure [Bissonnette 1996 ; Ray et al 2002].

II.5.1 Mécanismes d'adhérence

Le mécanisme d'adhérence peut être expliqué par une combinaison de deux théories principales : une théorie de blocage mécanique et une théorie d'interaction physique et chimique (adsorption thermodynamique).

II.5.1.1 Théorie du blocage mécanique (Adhérence mécanique)

La théorie du blocage mécanique explique les efforts de cisaillement et de traction, qui se développent au niveau de l'interface d'une réparation par ajout d'une couche en béton. Selon [Emmons et al 1994], [Barquins et al 1999], [Trende et al 1998] et [Perenchio 1994] une pénétration de la pâte du nouveau matériau dans les aspérités de la surface du support de l'ancien béton, forme un système de blocage, ce qui favorise un ancrage mécanique du matériau de réparation dans l'ancien béton. Et d'après [Silfwerbrand 1985], l'adhérence au niveau de l'interface dépend de la topographie et de la taille des aspérités qui se trouvent sur la surface de l'ancien béton. (FigureII.3).



FigureII.3 : Mécanismes d'adhérence à l'interface (réparation/support) [Emmons 1994].

A l'échelle macroscopique, [Trende et al 1998] et [Perenchio 1994] ont trouvé que les aspérités importantes (macro-rugosité), naturelles ou produites par un traitement de surface, favorisent l'adhérence entre le matériau de réparation et le support d'ancien béton.

Au niveau microscopique, la porosité superficielle du support assimilable à une microrugosité facilite l'enchevêtrement des hydrates, et assure une résistance en traction directe de l'interface [Perez 2005].

II.5.1.2 Théorie d'interaction physico-chimique (Adhérence spécifique)

Cette théorie connue dans la littérature par la théorie de l'adsorption thermodynamique explique l'existence des liaisons physico-chimiques qui augmentent considérablement la surface spécifique (surfaces de contact individuelles) et donc l'adhérence du matériau de réparation à l'état frais sur la surface du support [Fathy et al 2022]. Cependant, Perez [Perez 2005] a constaté que la présence des vides d'air, d'impuretés ou d'un corps hétérogène dans l'interface, réduit significativement l'intensité de ces liaisons. Selon [Pye et al 1992] et [Couvrat 1992], la théorie de l'adsorption thermodynamique est due principalement à l'intensification des forces intermoléculaires de type Van der Waals et des liaisons hydrogènes et à des forces interatomiques qui regroupent les liaisons ioniques et covalentes.

Dans le cas d'une réparation par un matériau cimentaire, ce sont les liaisons hydrogènes qui augmentent considérablement l'adhérence du matériau de réparation avec la surface du support. D'après [Sierra 1980], ces liaisons créent des ponts hydrogènes, qui peuvent se réaliser par l'intermédiaire des molécules d'eau contenues dans les pores et celles liées aux gels C-S-H (Figure II.4).

Ces ponts hydrogènes se mettent en place entre l'eau inter feuillet et les groupes hydroxyles (liés aux atomes de calcium ou de silicium des C-S-H), ou encore entre l'eau inter feuillet et l'eau hydroxylique (qui est une eau liée aux C-S-H de la pâte de ciment).

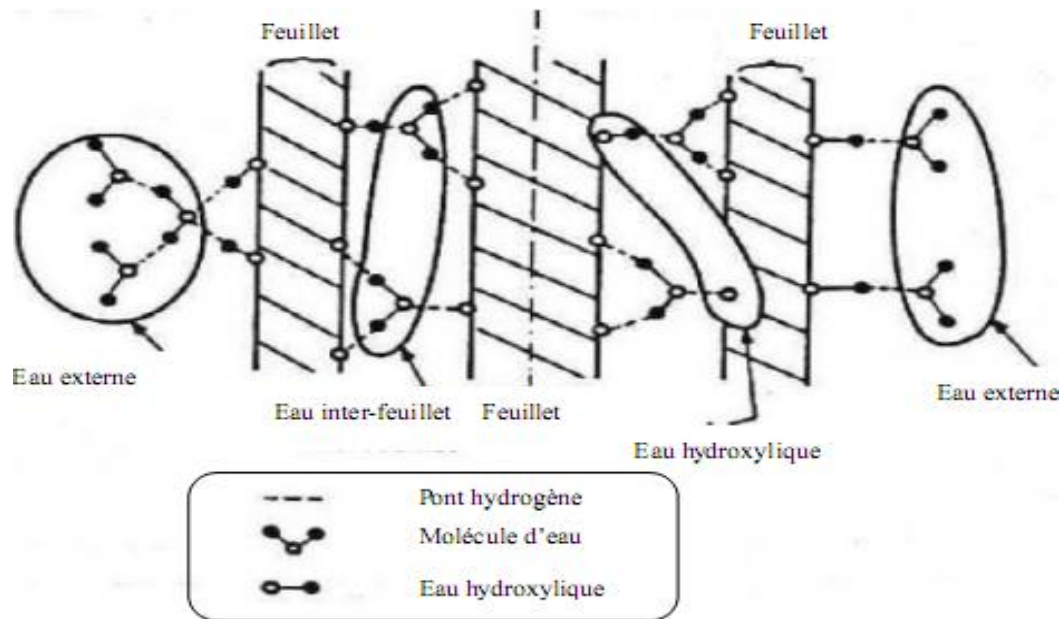


Figure II.4 : Interaction du type de liaison hydrogène dans les matériaux cimentaires [Sierra 1980].

II.5.2 Mode de rupture d'adhérence d'une réparation

[Saucier 1990] a constaté trois modes de rupture, lors d'essai d'adhérence (le cisaillement), tel qu'il est présenté sur la Figure II.5. Le premier mode de rupture consiste en un décollement du nouveau béton à son interface avec le béton du support. Le deuxième mode se manifeste par un plan de rupture établi à quelques millimètres au-dessus du plan de collage. Ce plan est conduit par les surfaces des granulats placés parallèlement sur support. Le troisième mode de rupture se distingue par l'absence de propagation préférentielle le long ou à proximité du plan de collage.

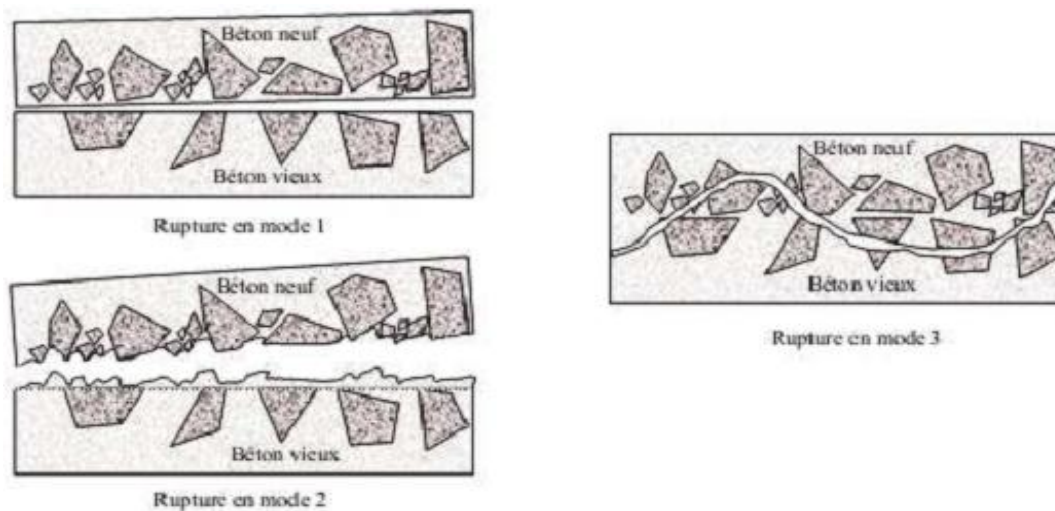


Figure II.5 : Les trois modes de rupture observés durant l'essai de cisaillement [Saucier, 1990].

Par ailleurs, [Espeche 2011] a remarqué trois autres modes de rupture, lors de l'essai de fendage, par rapport à ceux présentés par Saucier, comme illustré par la Figure II.6.

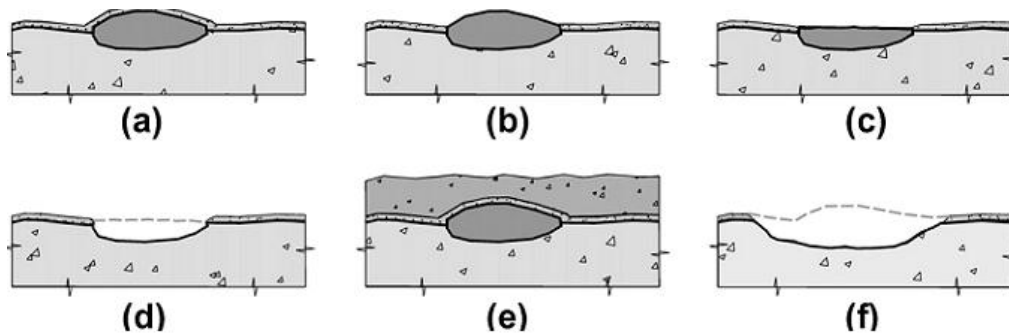


Figure II.6 : Les trois modes de ruptures observés durant l'essai de fendage [Espeche 2011].

Les différents modes de rupture sont les suivants :

- (a) Un mode de rupture global se situant à l'interface (nouveau et ancien béton) qui correspond à la rupture en mode 1 obtenu par l'essai de cisaillement.
- (b) Une rupture se distinguant par un décollement du nouveau béton, (notamment entre la matrice de mortier et les agrégats grossiers du béton de support) qui correspond à la rupture en mode 2 obtenu par l'essai de cisaillement.
- (c) Une rupture se manifestant le long du plan de collage avec une rupture par traction des agrégats qui correspond à la rupture en mode 3 obtenu par l'essai de cisaillement.
- (d) Un décollement des agrégats grossiers du béton du support.
- (e) Une rupture par traction dans le matériau du recouvrement.
- (f) Une rupture par traction dans le matériau du recouvrement et le support.

II.5.3 Influence de la préparation de surface sur l'adhérence

Afin d'obtenir une bonne adhérence, la plus part des auteurs admettent généralement que la réparation dépend fortement de l'état superficiel du

support. En ce qui concerne l'adhérence entre le matériau de réparation à base de béton, le support peut être largement amélioré par une préparation de la surface de support. Cette préparation est préalablement assurée par l'intégrité [Garbacz et al 2005 ; Reangsing et al 2021] et la propreté de l'interface du support. En effet, une présence de poussière, de débris, d'huile ou de graisse rend la réparation inefficace [Yazdi et al 2021]. Aussi, cette préparation peut se présenter sous forme d'une certaine rugosité et humidité à la surface du support, devant supporter la couche de réparation.

II.5.3.1 Rugosité de la surface du support

La rugosité intervient directement dans les mécanismes d'adhérence mentionnés auparavant. De plus elle est un facteur commun influençant à la fois l'adhérence spécifique et mécanique [Courard, 2000 , 2002].

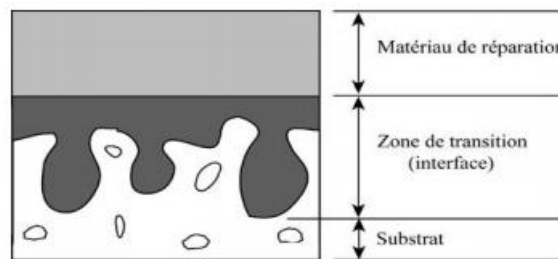
Généralement, la surface des supports peut posséder deux types de rugosité qui se différencient selon leurs échelles géométriques :

- ❖ La macrorugosité correspond aux irrégularités de la surface de quelques millimètres à quelques centimètres. Cette rugosité participe peu à la qualité de l'adhésion, mais favorise lorsqu'elle est importante le blocage mécanique qui offre une résistance aux efforts de cisaillement.
- ❖ La microrugosité correspond à une rugosité dont l'amplitude se situe entre quelques microns à un millimètre. Elle favorise l'enchevêtrement de la pâte et participe largement à l'adhésion des deux matériaux. Son amélioration conduit à une adhérence plus élevée de la réparation.

D'après les travaux de [Felt 1956], la rugosité de la surface n'influence pas l'adhérence d'une façon importante ni constante. Felt est l'un des premiers chercheurs à étudier l'influence de la préparation de la surface du support sur l'adhérence des réparations en béton, à partir ces essais d'adhérence en cisaillement. Il a constaté une légère influence de la rugosité de la surface du support. Inversement, les travaux de Silfwerbrand [Silfwerbrand 1990],

Talbot [Talbot et al 1994] et Saucier [Saucier 1990] s'accordent sur un état de surface non lisse. Dans le cas d'un matériau de réparation cimentaire, la surface du support doit avoir une certaine rugosité (cavité) afin d'assurer un blocage mécanique du matériau de réparation dans les cavités de surface [Delatte et al 2001 ; Abu et al 2000 ; Matana et al 2005 ; Beushausen et al 2006 ; Toutandji et al 2001].

D'après Vaysburd [Vaysburd 2001], les aspérités de la surface du support améliorent l'adhérence avec la couche de réparation. En effet, il a trouvé que les aspérités augmentent à la fois l'aire de contact et le nombre de site de nucléation ; ce qui favorise l'enchevêtrement du matériau de la réparation en phase fluide sur l'ancien béton (FigureII.7).



FigureII.7 : Modèle idéalisé d'une surface réparée [Lecompt et al 2001].

[Courad 1998] a trouvé que l'effet de la rugosité de surface sur l'adhérence n'est pas tout à fait clair, car la présence des fissures et des défaillances à l'interface affecte principalement la force de liaison entre le matériau de réparation et le béton du substrat [Courad 1998 ; Garbacz et al 2005]. Toutefois, une rugosité élevée permet d'augmenter la surface de contact et ainsi d'obtenir de meilleurs résultats [Cleland et al 1997] cité par [Molez 2003], ce qui a été aussi constaté par [Momayez 2005].

Les essais de [Yuan et al 1994] pour un béton modifié styrène-acrylique montrent une influence de la rugosité du support de même que les essais de [Cleland et al 1997] pour différents matériaux de réparation (FigureII.8)

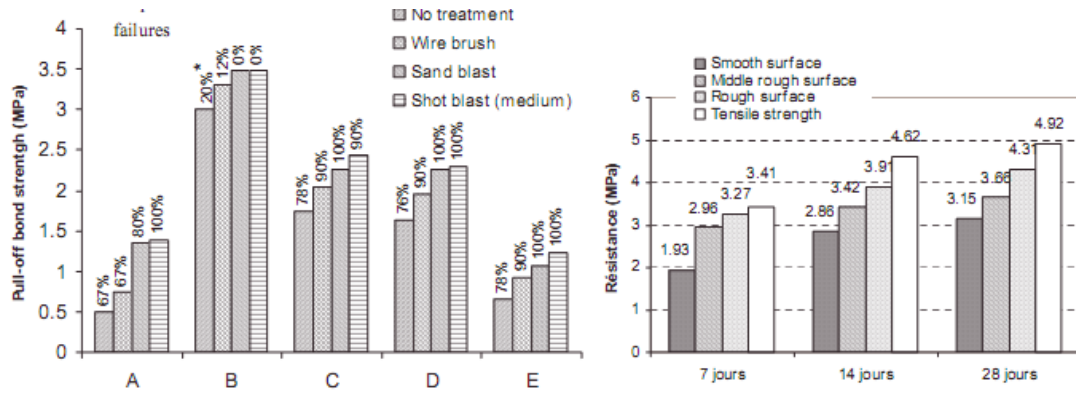
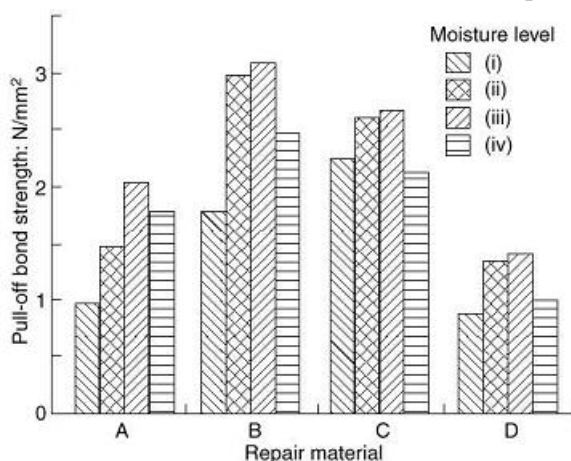


Figure II.8 : Influence de la rugosité. a) [Cleland et Long 1997] b) [Yuan et Marosszky 1994].

II.5.3.2 Humidité de la surface du support

L'état d'humidité du support est un paramètre important de la durabilité de l'adhérence entre le matériau de réparation et le substrat (Figure II.9). Il est toutefois difficile de fixer de façon absolue un état d'humidité donné pour obtenir une bonne et durable adhérence. De nombreux auteurs [Saucier 1990 ; Austin et al 1995 ; Cleland et al 1997] concluent tous qu'il faut un substrat ni trop sec, ni trop humide. Lorsque le substrat est trop sec, l'eau contenue dans le matériau de réparation est pompée vers le substrat avant que les composés solubles et réactifs du ciment n'aient réagi [Austin et al 1995], provoquant ainsi une zone hétérogène et poreuse à l'interface [Silfwerbrand et al 1998]. Si la surface est saturée, le rapport E/C à l'interface sera trop élevée et provoquera une réduction locale de la résistance du matériau de réparation, et une faible pénétration des hydrates dans la porosité du substrat [Venkatesh et al 2019].



FigureII.9 : Influence de l'état d'humidité du substrat [Cleland et al 1997].

- i** : Séchage à l'étude 105°C pendant 48h et refroidissement à la température du laboratoire
- ii** : Séchage dans les conditions du laboratoire pendant 2 à 3 mois
- iii** : Immersion dans l'eau pendant 48h et séchage pendant 4h dans les conditions du laboratoire
- iv** : Immersion dans l'eau pendant 48h et surface essayée

[Emmons et al 1996 ; Saucier 1990] ont trouvé que l'état hydrique de la surface du support doit respecter la nature du liant utilisé dans le matériau de réparation. Par exemple, dans le cas de réparation par un matériau cimentaire (liant minéraux), un état humide d'une interface, avec une surface superficiellement séché est plus efficace. Par contre, pour un matériau de réparation à base de liant organique (résine), une surface de support trop séché permet d'assurer une réparation plus performante.

II.6 Notion de compatibilité dans les réparations

Parmi les critères de durabilité et le bon comportement d'un système de réparation, la compatibilité entre les deux matériaux composants le système est une condition essentielle. Une compatibilité des propriétés physiques, chimiques entre le matériau de réparation et le support est nécessaire pour que la réparation se comporte d'une façon monolithique sous l'effet des contraintes induites par des chargements externes, des variations volumétriques, et/ou à des processus chimiques et électrochimiques. [Morgan 1996 ; Bissonnette 1996 ; Mailvaganam et al 2003] constatent que la compatibilité entre le matériau de réparation et le substrat se définit comme un équilibre entre l'ensemble des propriétés du matériau de réparation et du substrat. On peut distinguer trois types de compatibilité (FigureII.10) :

- ❖ Chimiques et électrochimiques.
- ❖ Perméabilités
- ❖ Déformationnelle

D'autre part d'après les auteurs [Bissonnette 1996 ; Morgan 1996], l'incompatibilité déformationnelle peut enclencher des problèmes majeurs dans les réparations en béton.

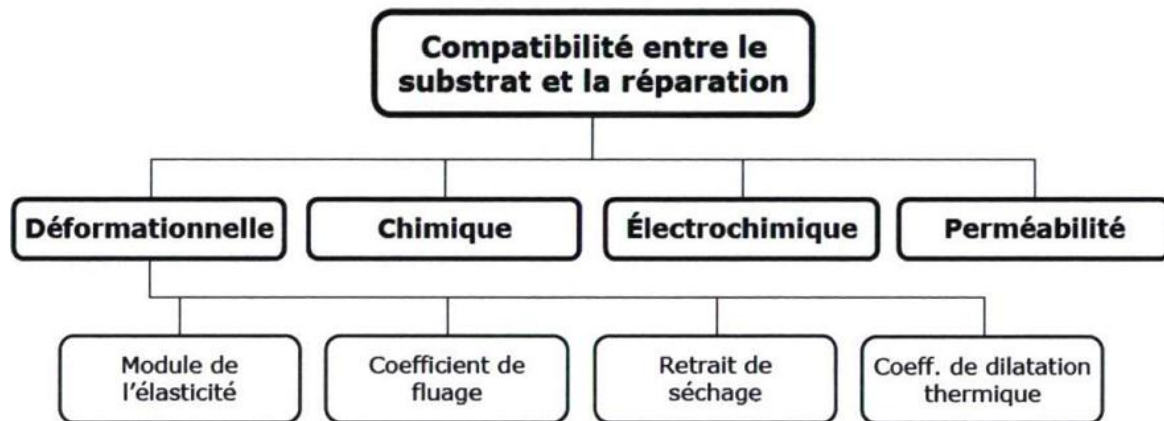


Figure II.10 : Facteurs affectant la compatibilité des matériaux de réparation [Emmons 1994].

II.6.1 Compatibilité chimique

Une sélection judicieuse des différents composants du matériau de réparation est nécessaire pour éviter toute incompatibilité chimique entre les deux matériaux d'un système de réparation. Certains paramètres ou propriétés comme la teneur en C3A, la teneur en alcalins, la teneur en chlorures, etc. peuvent favoriser la poursuite d'une réactivité chimique délétère dans le support ou son amorce dans le matériau de réparation. Les précautions à prendre lors de la conception du matériau de réparation dépendent principalement du type de désordre dans le béton d'origine. A titre d'exemple, lorsque le support est contaminé par les sulfates, la teneur en C3A doit être limitée afin d'éviter la détérioration de la réparation par l'expansion ettringitique. De même, la teneur en alcalins du matériau de réparation doit être soigneusement évaluée dans le cas où le support serait touché par la réaction alcalis-granulats.

L'incompatibilité chimique entre le béton de réparation et le béton d'origine est généralement causée par négligence dans le choix des paramètres de

composition et de propriétés lors de la conception du béton de réparation. Une bonne connaissance des caractéristiques des matériaux et leurs propriétés chimiques est donc nécessaire afin d'assurer la durabilité des réparations face aux problèmes de détérioration de nature chimique.

II.6.2 Compatibilité électrochimique

La compatibilité électrochimique surgit quand une pile de corrosion est créée au sein de la réparation, responsable de la corrosion des aciers dans la réparation. La fissuration de la couche réparée facilitant le transport d'eau et d'oxygène, le taux de corrosion peut être accéléré, et par conséquent entraîner la détérioration prématurée du matériau de réparation.

Pour y remédier, il est important de tenir compte de la résistivité électrique et du PH lors du choix du matériau de réparation. Un matériau ayant une forte résistivité tend à isoler la partie réparée du reste de l'ouvrage [Wang et al 2021].

II.6.3 Compatibilité des perméabilités

On pourrait croire que l'utilisation d'un matériau de réparation peu perméable est la meilleure solution pour protéger l'ouvrage contre la pénétration des espèces et agents agressifs. Cependant, dans diverses situations, le choix d'un matériau de réparation peu perméable n'est pas la meilleure solution. En effet, l'application d'une nouvelle couche de réparation à faible perméabilité peut bloquer les échanges hydriques en causant des pressions qui favorisent le décollement de la couche de réparation. C'est le cas notamment, des dalles sur sol et des murs de soutènement. Dans une telle situation, le choix d'un matériau de réparation très peu perméable ne garantit aucunement la pérennité de la réparation.

II.6.4 Compatibilité déformationnelle

Les matériaux composants un système de réparation peuvent subir dans leur environnement des sollicitations environnementales engendrant des changements volumétriques en absence de tout chargement externe. Les changements volumétriques sont causés par la réaction d'hydratation du

ciment (retrait endogène) et par le retrait de séchage. Étant donné que le substrat formé de l'ancien béton est dans un état stable, les deux matériaux qui composent la réparation ne répondent plus à ce moment de la même façon aux variations de leur milieu. En effet, la compatibilité déformationnelle entre une nouvelle couche de béton de réparation et un ancien béton, qui reste à l'origine de nombreux échecs dans le système de réparations, dépend principalement des propriétés du matériau de réparation. Parmi, les propriétés physico-mécaniques, on peut citer : le retrait, le fluage, le module d'élasticité, et les déformations thermiques.

Une partie de cette thèse vise la compatibilité déformationnelle entre la réparation et le substrat.

II.6.5 Paramètre influençant la compatibilité déformationnelle

II.6.5.1 Changement volumétrique

1) Retrait

Les variations dimensionnelles de retrait que subit la pâte de ciment (et donc le béton) sont relatives à la formation progressive des hydrates (hydratation du ciment) et à la dessiccation (mouvement d'eau à partir du matériau cimentaire vers le milieu ambiant dû à un gradient d'humidité).

Le retrait, en particulier le retrait de séchage, peut être considéré comme l'un des phénomènes les plus nuisibles dans un système de réparation à la détérioration. Le matériau de réparation, semi liquide et saturé au moment de sa mise en place, subit une contraction dès la manifestation du séchage (par auto dessiccation ou dessiccation). En contact avec le substrat rigide qui a un état hydrique et dimensionnel relativement stable, la couche de réparation ne peut pas se contracter librement. Les déformations gênées engendrent des contraintes de traction dans la couche de réparation. Si, localement, ces contraintes dépassent la résistance à la traction du matériau, elles entraînent la fissuration de la réparation.

De plus, la couche de réparation subit inévitablement du retrait. En effet, les déformations de retrait de séchage ne se manifestent pas uniformément dans la couche de réparation, étant donné que la perte d'eau n'est pas uniforme sur toute la profondeur de la section. Comme on peut voir dans la Figure II.11, pour un élément de béton séchant sur ses deux faces verticales, le profil d'humidité interne est non linéaire et évolutif. Sous l'effet du gradient d'humidité, les couches de surface (à proximité du milieu ambiant) tendent à rétrécir davantage par rapport aux plus profondes ; ce qui provoque des contraintes internes dans l'élément en béton. La fissuration survient au niveau des couches superficielles, une fois que la résistance à la traction du matériau est excédée.

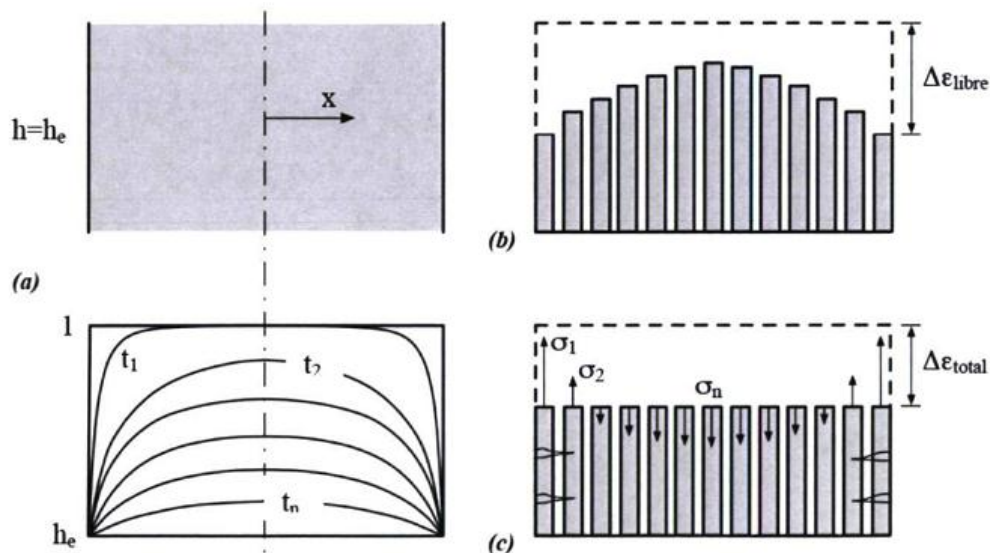


Figure II.11 : Séchage d'un élément de béton dû à un gradient d'humidité entre le matériau et le milieu ambiant [Bazant 1986].

a : Changement de profil d'humidité dans le temps à l'intérieur de l'élément

b : Retrait différentiel entre les différentes couches dû au profil variable d'humidité

c : Diagramme des contraintes induites provoquant la fissuration des couches superficielles

Selon [Emmons et al 1994], l'ancien béton, déjà durci, empêche le développement du retrait du nouveau matériau, et entraîne d'une part le décollement des extrémités au niveau de l'interface lorsque les contraintes de cisaillement dépassent l'adhérence entre les deux matériaux (Figure II.12), et provoque d'autre part la fissuration du nouveau matériau, si les contraintes de traction issues du retrait sont supérieures (Figure II.13).

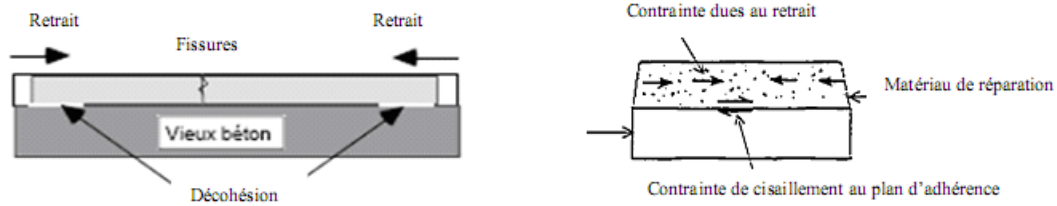


Figure II.12 : Influence du retrait sur la phase de réparation [Emmons et al 1994].



Figure II.13 : Les comportements mécaniques d'une réparation soumise au retrait [Saucier et al 1990].

- a** : Mauvaise adhérence (décollement)
- b** : Bonne adhérence mais béton de faible résistance (fissuration)
- c** : Bonne adhérence (gauchissement)
- d** : Très bonne adhérence (arrachement dans le support)

2) Déformation thermique

Les propriétés thermiques du matériau de réparation et celles du matériau à réparer jouent un rôle très important sur la compatibilité déformationnelle dans un système de réparation. La compatibilité thermique des deux matériaux (Réparation –Substrat) est une autre caractéristique qui influence la durabilité de la réparation. En effet, au même titre qu'un gradient hydrique, un gradient de température induit des contraintes internes dans le matériau et à l'interface entre (Réparation –Substrat) puisque la déformation de chaque couche ne peut se produire librement [Farhat 1999 ; Bissonnette 1996]. Selon ces auteurs, l'intensité des contraintes dépend de la variation de température et de l'importance de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux. Par ailleurs le coefficient de dilatation d'un béton dépend largement de la nature du granulat. Il est donc souhaitable lorsque la réparation est réalisée avec un béton ordinaire, d'utiliser un granulat de même nature que le granulat du béton à réparer ou tout au moins possédant des propriétés thermiques similaires

II.6.5.2 Déformations viscoélastique

1) Le module d'élasticité

Selon la documentation de spécialité, les chercheurs ne partagent pas tous le même avis sur l'influence de l'écart entre le module élastique du matériau de réparation et celui du béton d'origine sur l'interface du système de réparation.

D'après certains auteurs, la différence de module élastique engendre une concentration de contraintes ainsi qu'une hausse de cisaillement le long de l'interface lorsque le système est sollicité en flexion [Emberson 1996]. D'autres concluent que la concentration de contraintes à l'interface n'est qu'une mauvaise interprétation de la discontinuité du profil des contraintes normales dans la section et que le profil de la contrainte de cisaillement change légèrement mais non pas de façon à nuire à la durabilité de l'interface [Bissonnette 1996].

Ceci dit, la différence entre les modules élastiques du matériau de réparation et du substrat peut certainement modifier la distribution des contraintes de flexion sur la section en déplaçant la fibre neutre de la section vers le haut ou vers le bas [Delatte et al 2003 ; Nagakumar et al 2021]. La Figure II.14 montre l'influence de la rigidité relative des deux bétons sur le profil des contraintes normales de flexion.

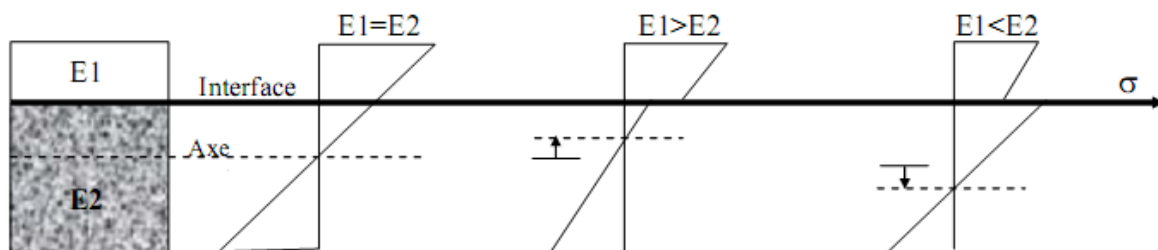


Figure II.14 : Influence de la rigidité relative du béton d'origine sur la répartition des contraintes normales de flexion [Nguyen 2010].

Il est donc évident qu'afin d'avoir des efforts moins élevés dans le matériau de réparation, il faudrait que ce dernier soit moins rigide que le matériau d'origine. Ce qui permet le transfert de la charge à travers l'interface vers le matériau à module plus élevé. Si la charge transférée excède la capacité de

charge du matériau ou la liaison à l'interface, la rupture se produit. Or, [Lukovic 2012] suggère des matériaux de réparation de faible rigidité par rapport au support pour les réparations non structurelles ; et des matériaux plus rigides pour les réparations structurelles.

Tandis que [Cusson 1996], et [Morgan 1996] préfèrent que le matériau de réparation soit caractérisé par un module d'élasticité semblable à celui du substrat afin d'éviter la formation de concentration de contraintes à l'interface. [Mangat 1999] recommande un matériau de réparation avec un module d'élasticité plus grand (supérieur à 30%) que le béton du substrat.

Généralement, l'intégrité mécanique d'une réparation ne sera pas compromise tant que le niveau des contraintes induites ne dépasse pas la résistance mécanique du matériau de réparation. Par ailleurs, l'amplitude du module élastique est généralement proportionnelle à celle de la résistance du matériau. Ces deux paramètres sont ainsi des facteurs importants à considérer afin que le matériau de réparation soit mécaniquement compatible avec le béton d'origine.

2) Fluage

Dans le cas d'applications structurels (constructions neuves ou réfectionnées), le fluage doit être bien contrôlé et minimisé, car il peut conduire à des désordres importants. Le fluage est par définition la déformation différée que subit le matériau au-delà de la déformation instantanée [Farhat 1999 ; Masuzyo et al 2019].

D'après [Emmons et al 1994], le fluage permet la relaxation des contraintes de traction due au retrait (Figure II.15). Il a constaté également que la fissuration a été éliminée, puisque la contrainte de traction nette (contrainte du retrait moins contrainte de fluage) du matériau de réparation est devenue inférieure à sa résistance à la traction [Weiss 1999].

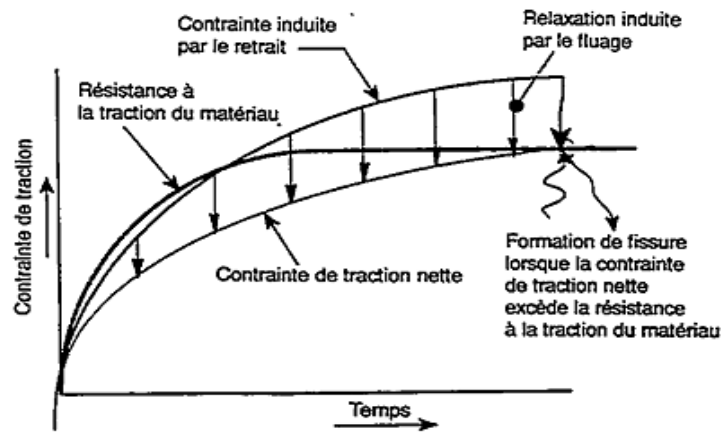


Figure II.15 : Effet d'atténuation du fluage sur le retrait [Emmons 1994 et al]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, il est montré les problématiques liées à la durabilité d'un système de réparation. Pour atteindre une bonne durabilité du système réparé, deux principes à considérer afin d'assurer une réparation performante : le premier principe consiste en la compréhension des deux théories qui expliquent l'adhérence entre un matériau cimentaire et un béton existant (théorie de blocage mécanique et théorie d'interaction physico-chimique), et une préparation adéquate de la surface de l'ancien béton qui assure une adhérence efficace entre un matériau durcissant (réparation) et un ancien béton (substrat).

-Le second principe est lié à une bonne compréhension du phénomène de la compatibilité du matériau de réparation avec le béton du substrat. Cette compatibilité est définie comme étant un équilibre des dimensions et des propriétés physiques, chimiques et électrochimiques entre le matériau de réparation et le substrat.

Donc, nous avons constaté que la performance d'une réparation dépend des propriétés du matériau de réparation et du lien entre ce dernier et le béton d'origine (le substrat).

Nous allons présenter au chapitre suivant une revue sur le béton autoplaçant (BAP), qui sera choisi comme un matériau de réparation dans cette étude.

III.1 Introduction

Il n'existe pas à l'heure actuelle des règles claires permettant d'orienter le choix du meilleur matériau de réparation, et qui seront applicables à l'ensemble des gammes de produits disponibles. Les résultats expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs [Qian et al 2014] ont indiqué que les matériaux cimentaires présentent une résistance de liaison plus élevée avec le substrat en béton par rapport aux matériaux en résine.

À ce propos, le béton autoplaçant est un matériau qui se caractérise par sa très grande maniabilité et l'automatisation de sa mise en place sans qu'aucune vibration ne soit appliquée. Le (BAP) est un béton très fluide ayant une viscosité modérée. Il est caractérisé par un faible seuil de cisaillement. Ces propriétés sont nécessaires pour assurer une bonne résistance à la ségrégation lors de la mise en place jusqu'au durcissement.

Ces critères nous ont conduits d'exploiter le (BAP) comme matériau de réparation.

Dans ce chapitre nous présentons les grandes familles de méthodes de formulation, les propriétés mécaniques et physiques du béton autoplaçant, qui sera proposé comme matériau de réparation, dans ce travail.

III.2 Concept de béton autoplaçant (BAP)

Le béton autoplaçant (BAP) est caractérisé par un faible seuil de cisaillement et une viscosité modérée permettant un étalement homogène sous son propre poids, même au travers des passages étroits sans provoquer de blocage ni même de ségrégation [Okamura et al 1992]. La formulation du BAP implique des spécificités particulières dont les principales sont le volume plus important d'éléments fins, l'utilisation des particules fines bien proportionnées, la réduction du volume des gros granulats et un dosage élevé en superplastifiants [Okamura et al 1992]. De plus, sa formulation est régie par deux caractéristiques tout à fait opposées (Figure III.1), à savoir une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation.

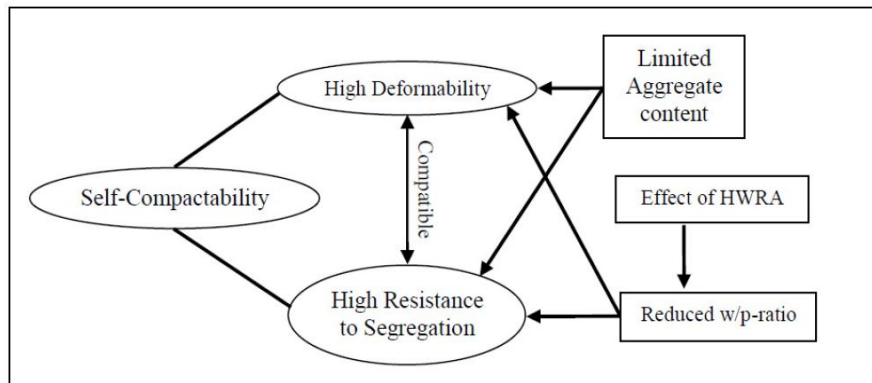


Figure III.1 : Concept de formulation des (BAPs) [Okamura et Ouchi 2003].

III.3 Les constituants du (BAP)

Les (BAPs) ont été fabriqués avec des additions de fluidifiants diminuant ainsi le rapport eau sur ciment (E/C) du béton. La grande fluidité est attribuée au béton par les plastifiants ou les superplastifiants, puisqu'ils s'adsorbent à la surface des particules de ciment et agissent par effets stérique et électrostatique pour disperser ces particules. Cette fonction diminue d'une part le phénomène de floculation du ciment au contact de l'eau, et augmente d'autre part la proportion d'eau libre dans la suspension [Baron et al 1996]. Cependant, les superplastifiants peuvent agrandir les risques de ségrégation et de sédimentation dans le béton. Le fait de leur joindre des agents de viscosité aide à garder les granulats en suspension et permet au béton de maintenir un squelette granulaire bien reparti dans tout le volume [El Barrak 2005].

Plusieurs matières sont de plus employées dans la fabrication des bétons autoplaçants, tel que les retardateurs ou accélérateurs de prise, les entraîneurs d'air, et les réducteurs d'eau. Actuellement, les procédés de préparation et les produits de béton exigés par l'industrie sont de plus en plus compliqués et variés. Pour avoir des résistances mécaniques égales, les différentes formulations et approches des bétons autoplaçants exigent un volume de pâte plus conséquent que celui des bétons ordinaires. En conséquence l'ouvrabilité et l'écoulement du béton sont améliorés par la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des additions minérales) qui remplit les vides et éloigne les granulats,

réduisant aussi les frictions et les frottements. Les (BAPs) sont constitués d'un volume conséquent de fines (particules inférieures à 80 microns) et d'une quantité moins importante de gravier. Les ajouts minéraux de type filler calcaire, cendre volante, fumée de maintenu leur fonction comme substituant partiel du ciment dans les (BAPs silice, laitier, etc. ont).

Les méthodes de formulation des (BAPs) consistent d'arranger un nombre plus grand des extensions. Elles sont réalisées par les mêmes chercheurs [De Larrard 2000] pour tenir compte de plus d'éléments tel que le comportement des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression). Cela rend la confection d'un (BAP) une opération plus compliquée que celle d'un béton ordinaire traditionnel.

III.4 Méthodes de formulation de (BAP)

Plusieurs approches de formulation des (BAPs) ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche chinoise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

[Turcry 2004] a regroupé ces méthodes en trois grandes familles qui sont :

III.4.1 Méthode basée sur l'optimisation des mortiers

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

A la suite d'une optimisation identique du mortier, [Ouchi et al 1999] cité par [Turcry 2004] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et

sans gravillons. La formulation d'un (BAP) par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications.

III.4.2 Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide (les granulats) et une phase liquide (la pâte). Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. [Oh et al 1999] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la Figure III.2. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

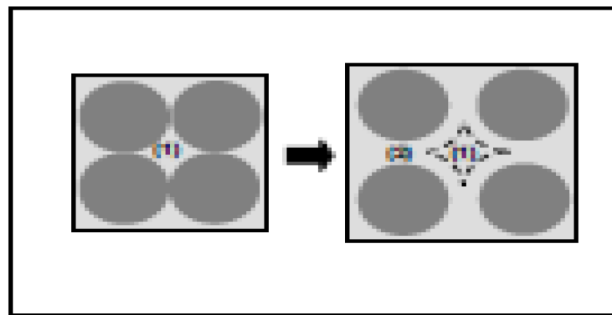


Figure III.2 : Notation d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2).

[Oh et al 1999] et [Turcry 2004] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

III.4.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la Figure III.2, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. [De Larrard et al 2002] cité par [Turcry 2004] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel [Bétonlab Pro2], qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

III.5 Les déformations de (BAP) utilisé à la réparation

Dans le cas réel d'une réparation où les déformations sont empêchées, tous les phénomènes chimiques et/ou physiques qui provoquent des déformations au sein du matériau auront une influence sur le comportement mécanique des réparations. Le béton d'origine a généralement atteint une relative stabilité hydrique, alors que la réparation, saturée au départ, subit progressivement des déformations chimiques (retrait endogène), et hydriques (retrait de séchage) qui engendrent des contraintes de traction dans le matériau lorsqu'elles sont entravées par le substrat [Bazant et al 1992]. La relaxation de ces contraintes de traction va dépendre des propriétés viscoélastiques du matériau [Bissonnette 1996].

De manière explicite, le retrait est le «moteur» des fissures dans les conditions de retrait restreint, tandis que le fluage est plutôt « l'amortisseur » de la propagation de ces fissures advenant une relaxation suffisante des contraintes induites en traction.

III.6 Les propriétés des (BAPs)

III.6.1 Propriétés à l'état frais

III.6.1.1 Fluidité

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant. L'essai le plus courant pour caractériser la fluidité des (BAPs) est l'essai au cône d'Abrams. Cet essai est couramment utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique [EN206-1 2004]. Pour les (BAPs), l'affaissement étant total, on mesure le diamètre de la galette obtenue après étalement. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

Les constituants du (BAP) ont une grande influence sur sa fluidité (dosage, quantité de la pâte, (dimensions des granulats).

La présence d'une quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité.

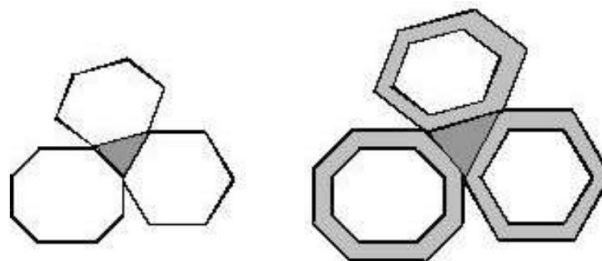


Figure III.3 : Dispersions des granulats par excès de pâte [Bethmont 2005].

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des (BAPs). Il permet donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Son utilisation n'est pas suffisante dans le cas des (BAPs). Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Il est donc nécessaire de les remplacer par des fines pour assurer une bonne fluidité.

III.6.1.2 Homogénéité

Lors de leur mise en œuvre, les (BAPs) sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières.

- ❖ ségrégation dynamique : Afin de vérifier la capacité de béton à s'écouler à travers des armatures, l'essai le plus répandu pour caractériser la ségrégation dynamique des (BAPs) est l'essai de la boîte en L.

Pour limiter le risque de blocage, et d'après l'AFGC, le diamètre maximal des gravillons doit être compris entre 10 et 20mm. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai [Bethmont 2005].

Pour limiter le risque du blocage, on doit réduire la quantité des gros granulats en prenant en considération que l'augmentation de la quantité du sable au détriment des gros granulats ne soit pas trop élevée parce que cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Par ailleurs, la viscosité doit être relativement faible pour que le (BAP) s'écoule avec un débit important. Mais nous avons vu qu'elle doit être suffisante pour résister au cisaillement généré par le déplacement des granulats lors de l'écoulement. L'intérêt d'utiliser une quantité de fines élevée apparaît donc de nouveau puisque la viscosité du matériau peut être augmentée (en augmentant la fraction volumique du fluide) tout en limitant le volume de sable [Boukni 2012].

III.6.2 Propriétés à l'état durci

III.6.2.1 Propriétés mécaniques

III.6.2.1.1 Résistance de compression

Les auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours.

Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

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 puis deviennent moins significatifs par la suite.

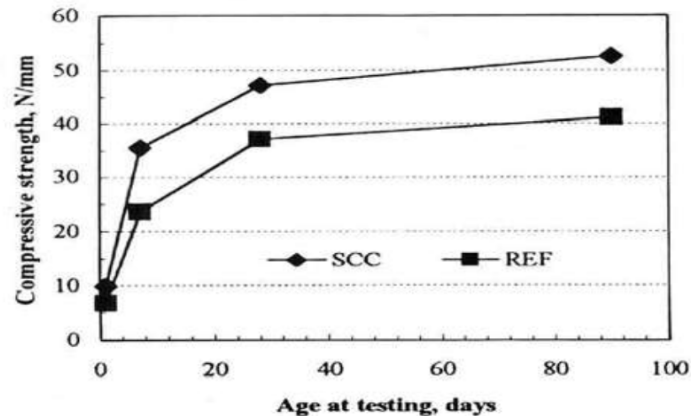


Figure III.4 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 1999].

III.6.2.1.2 Module d'élasticité

La formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cJ}^{1/3}$) ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique du (BAP) coïncide bien avec celui du béton vibré avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [Persson 2003]. Les mêmes résultats sont trouvés par [Erik et al 1999].

[Jacob et al 1999] ont trouvé qu'avec une résistance donnée le module élastique de (BAP) est inférieur à celui du béton vibré. Ce comportement est dû à la petite dimension des grains du (BAP) et la quantité élevée de pâte de ciment.

Ces données montrent qu'il n'existe pas de règle générale pour distinguer le module d'élasticité des (BAPs) de celui des bétons vibrés.

III.6.2.1.3 Résistance de traction

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

[Gibbs 1999] ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des (BAPs) et celle des bétons vibrés. Par contre, certains auteurs ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons vibrés.

III.6.2.2 Propriétés physiques

III.6.2.2.1 Retrait

1) Retrait endogène

Le retrait endogène est la déformation libre que présente le béton pendant son hydratation en conditions isothermes et en l'absence d'échange d'humidité avec le milieu extérieur. Il est provoqué par la contraction de Le Chatelier [Neville 2000]. Ce processus fait apparaître tout au long de la progression de l'hydratation des vides dans la pâte de ciment hydraté qui ont pour effet de diminuer le taux d'humidité interne et se traduit par un retrait de la pâte de ciment (autodessiccation). Les réactions d'hydratation qui ont lieu au sein du béton génèrent une certaine quantité de chaleur et sont accompagnées d'une réduction de volume communément appelée « la contraction de Le Chatelier ». Le Chatelier avait estimé que cette réduction de volume était de l'ordre de 8 à 12 % de l'espace original occupé par le liant anhydre et l'eau qui était destinée à se combiner dans la pâte de ciment hydraté [Neville 2000].

Cette autodessiccation de la pâte de ciment est un phénomène en principe homogène qui ne génère donc pas de gradient de déformation au sein du matériau. Il s'agit d'un phénomène intrinsèque au matériau qui est fortement dépendant de sa formulation (type de ciment, présence de fines, volume de pâte, rapport E/C). Les bétons autoplaçants de faible rapport E/C

et ainsi de microstructure très dense, présentent un retrait endogène de cinétique plus rapide et d'amplitude plus élevée que celui des bétons ordinaires.

2) Retrait de séchage

Le retrait de séchage est un phénomène simple correspondant à une contraction volumétrique observée quand le béton durcit [Neville 2000]. Lorsque l'humidité ambiante diminue, une partie de l'eau dans les pores s'évapore jusqu'à ce que soit atteint l'équilibre entre l'humidité interne du béton et l'humidité ambiante. En outre Le degré de saturation du béton diminue, les tensions capillaires augmentent. Ce processus se traduit au niveau macroscopique par une déformation qui constitue le retrait de séchage et qui est globalement corrélée de façon linéaire à la perte de masse de l'échantillon suivant des pentes différentes selon le domaine d'humidité.

III.6.2.2.2 Perte de masse

L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant au séchage de celui-ci. [Rozière et al 2007] a étudié l'évolution de la perte en poids en fonction du temps des bétons vibrés et des bétons autoplaçants. Les deux bétons suivent la même cinétique de séchage. Le (BAP) est plus susceptible à la perte de masse.

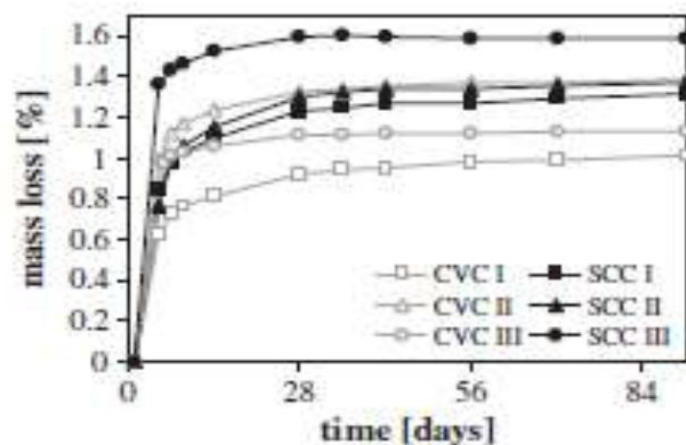


Figure III.5 : Perte de masse en fonction du temps [Rozière et al 2007].

III.6.2.2.3 Fluage

Les études sur le fluage sont encore peu nombreuses, en tout cas par rapport à celles sur le retrait. Cela explique peut-être pourquoi les résultats sont plus "homogènes". Le fluage des (BAPs) paraît comparable à celui des bétons ordinaires de même résistance, en mode endogène ou en mode de dessiccation [Persson et al 1999 ; Proust 2002].

Au cas où le fluage du béton aurait un rôle significatif sur le comportement de l'ouvrage, il est recommandé de déterminer sa valeur au moyen d'essais, car il est difficile à l'état actuel des connaissances, de donner des indications fiables sur la différence existant entre le (BAP) et le béton vibré. Les essais sont en effet peu nombreux, leurs résultats sont souvent contradictoires et font ressortir des différences, heureusement peu importantes. Les déformations différées de fluage se composent, tel que schématisé à la Figure III.6 de deux types de déformations de fluage à savoir : une déformation de fluage propre et une déformation de fluage de séchage.

- 1) **Fluage propre** : c'est la déformation mesurée sur une éprouvette chargée et protégée contre la dessiccation externe.
- 2) **Fluage de séchage** : c'est la différence entre le fluage mesuré dans des conditions de déséquilibre hygrométrique et le fluage propre qui aurait eu lieu si l'hygrométrie initiale avait été maintenue.

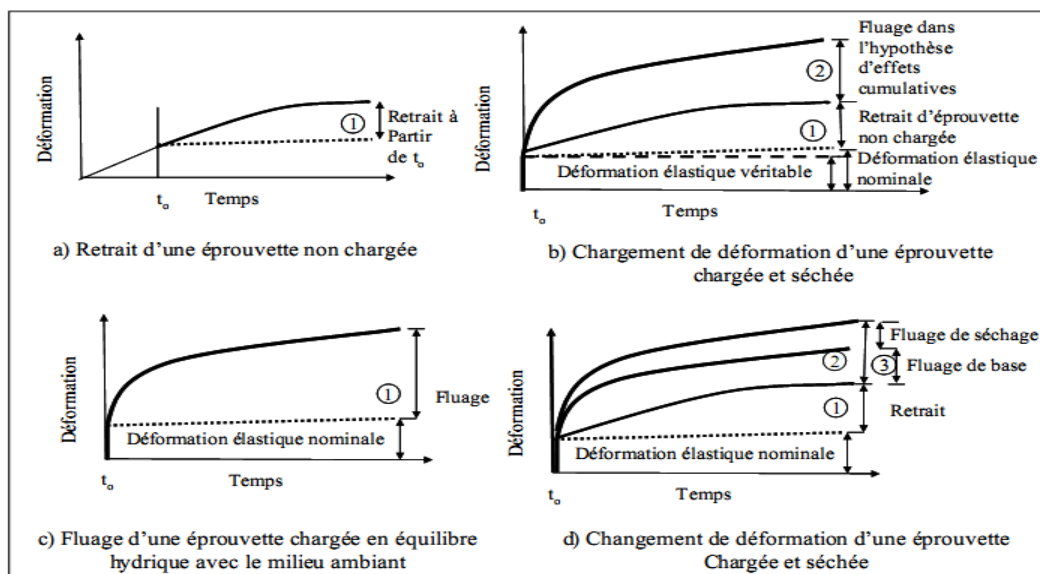


Figure III.6 : Déformations différées de fluage et de retrait [Neville 2000]

III.7 Conclusion

Une étape principale dans le processus de réhabilitation ou réparation est le choix du matériau de réparation. Une attention particulière doit être portée à ce choix.

Notre choix est orienté vers un nouveau béton à base cimentaire le (BAP). Le présent chapitre est mené pour faire le point sur l'état des connaissances de ce matériau. Nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de conception et de réalisation des bétons autoplaçants, ainsi que leur comportement mécanique, et leurs propriétés physiques. Une analyse en particulier des réactions d'hydratation nous a permis de comprendre l'évolution des déformations empêchées par le support (substrat).

Le chapitre subséquent sera consacré à la présentation des propriétés des matériaux de base choisis pour formuler les bétons de réparation ainsi qu'à celle du substrat.

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des propriétés des matériaux de base choisis pour formuler les bétons de réparation et celle du substrat, ainsi que la procédure de leur malaxage et conservation.

L'emploi judicieux de ces matériaux dans la construction exige une connaissance des diverses propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques qui permettent de répondre à leur fonctionnement. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène avec des propriétés uniformes.

IV.2 Matériaux de base utilisés

IV.2.1 Granulats

Les granulats sont d'origine un calcaire naturel concassé provenant de la carrière d'Ain Smara. Trois classes granulaires sont délivrées par cette carrière sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravillon 3/8 et 8/16.

➤ Caractéristiques géométriques des granulats

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns dans les autres et dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de variations de la tamiseuse. Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de Ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé .Soit R_2 la masse du refus deuxième refus.

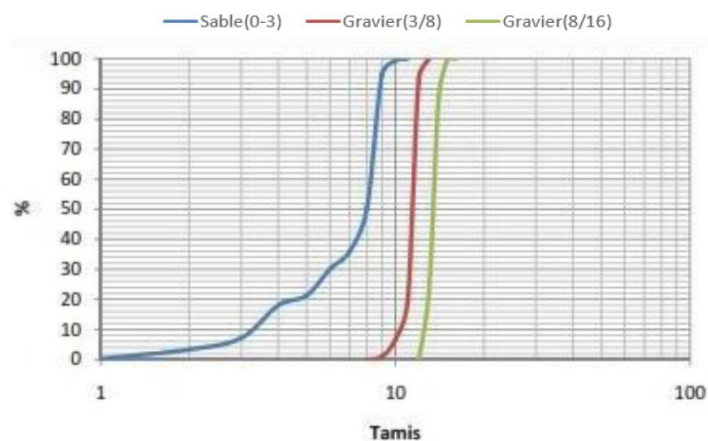
La somme R_1+R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamis présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.



FigureIV.1 : Analyse granulométrique de gravier et sable.

Les résultats de l'essai effectué pour les granulats utilisés sont représentés dans la FigureIV.2



FigureIV.2 : La courbe d'analyse granulométrique.

D'après les résultats obtenus sur les granulats, on peut dire qu'ils répondent aux exigences de la norme [EN933-1 2012] pour qu'ils soient utilisés dans les bétons.

➤ **Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats**

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés sont regroupées dans le TableauIV.1.

TableauIV.1 : Caractéristiques physiques et mécanique des granulats utilisés.

	Propriétés mesurées	Désignation			Norme de spécifications	Références
		0/3	3/8	8/16		
Caractéristiques physiques	Masse volumique absolue (kg/m ³)	2750	2560	2620	/	NF P 18-555
	Masse volumique apparentes (kg/m ³)	1460	1330	1370	/	NF P 18-554
	Equivalent de sable (%)	69	/	/	60 ≤ ES < 70	NF P 18-598
	Valeur au bleu de Méthylène	0,38	/	/	/	NF P 18-592
	Coefficient d'absorption (%)	1,1	2,28	1,77	V _s = 2,5	XP P 18-545
Caractéristiques Mécaniques	Essai Los Angles (%)	/	28	23	15 < LA < 100	NF P 18-573
	Essai Micro Deval (%)	/	25	17	12 < MD < 100	NF P 18-572

Les résultats, regroupés dans le TableauIV.1, sont conformes aux spécifications des normes [P18-598 1990].

➤ **Composition chimique des granulats**

Outre les propriétés physiques des granulats, diverses caractéristiques chimiques sont à considérer en vue de l'utilisation d'un granulat dans le béton. Les caractéristiques chimiques des granulats utilisées sont représentées dans le TableauIV.2.

TableauIV. 2 : Caractéristiques chimiques des granulats utilisés.

Propriétés mesurées (%)	Résultats	Références
Insoluble	1,9	NF EN 1744-1
Sulfates	Traces	
Carbonates	89	
Chlorure	0,29	

IV.2.2 Ciment

Les ciments utilisés pour notre étude expérimentale sont des ciments de type CEMII/A (CPJ42,5) provenant de l'usine d'El-Hamma, région de Constantine.

Les différentes caractéristiques que ce soient chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants :

TableauIV.3 : Composition chimique du clinker.

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	chlorure	CaO libre	Résidus insoluble	Perte au feu (P.A.F)
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

TableauIV.4 : Composition minéralogique du clinker.

Eléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri calcique	C ₃ S	56,60
Silicate bi calcique	C ₂ S	22,98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9,87
Alummino-ferrite tetracalcique	C ₄ AF	8,25

TableauIV.5 : Propriétés physiques du ciment.

Temps de prise		Expansion De Le Chatelier (mm)		Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	Consistance Normale (mm)
début	Fin	à chaud	à froid		
50min	4h 06min	2,9	1,65	3891	6,91

TableauIV.6 : Résistances mécaniques du ciment (bars).

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

IV.2.3 Filler Calcaire

Le filler calcaire (FC) utilisé pour la formulation des (BAPs), UF 20, est fabriqué et fourni par la carrière ENG de l'est Algérien. Il est conforme à la norme [P18-508 2012 Les principales Caractéristiques physiques et chimiques proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 3900cm²/g et 2,79g/cm³ respectivement. Le TableauIV.7 présente la composition chimique des fillers calcaires.

TableauIV.7 : Composition chimique des fillers calcaires.

Composant	CaCO ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.A.F
Teneur en %	99	55,88	0,01	0,01	0,14	0,01	0,01	0,01	43,9

IV.2.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids du ciment et permet d'améliorer certaines de ses propriétés.

Dans notre étude, on a utilisé le Super plastifiant MEDAPLAST SP 40 de Granitex: (Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme [EN934-2 1998], permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus

de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite. Les différentes caractéristiques du SP 40 sont présentées dans le TableauIV.8.

TableauIV.8 : Les caractéristiques de SP 40.

Forme	Couleur	pH	Densité	Teneur en chlore
Liquide	Marron	8,2	1,20 ± 0,01	< 1g/l

IV.2.5 Eau de Gâchage

L'eau utilisée pour la confection des différents mélanges est l'eau du robinet au niveau du laboratoire LMDC université Mentouri Constantine. Un échantillon de cette eau a été soumis à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés dans le TableauIV.9.

Tableau IV.9 : L'analyse chimique de l'eau (mg/l).

Echantillons	Concentrations	Echantillons	Concentrations
Matière en suspension	Traces	Calcium (Ca ⁺²)	36
Sels dissous	1470	Magnesium (Mg ⁺²)	60
Sulfates (SO ₄ ⁻²)	413,56	Bicarbonates (HCO ³⁻)	27
Chlorures (Cl ⁻)	298,2	Carbonates	3,5
pH	7,9	Temperature (°C)	19

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme [EN 1008 2003], relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous.

IV.3 Déterminations des formulations des bétons utilisés

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier de charges donné. Dans les cas courants le cahier de charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées comme par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

IV.3.1 Béton du substrat

Les substrats sont confectionnés en béton ordinaire (BO). La méthode la plus utilisée pour la formulation dans l'industrie est celle dite Dreux-Gorisse [Dreux 1995]. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables/gravillons sur une courbe de référence. Les compositions retenues sont indiquées dans le Tableau IV.10. La confection des mélanges est conforme à la norme [EN12390-2 2001].

Tableau IV.10 : La composition de béton du substrat (BO).

Composition (kg/m³)	Ciment	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Eau Total
Béton de Substrat(BO)	300	800	132	860	180

IV.3.2 Béton de réparation

Tous les bétons de réparations ont été fabriqués au niveau du laboratoire LMDC université Mentouri Constantine I. La formulation employée dans cette campagne se base sur deux approches : la première consiste à utiliser un béton ordinaire vibré (BOV) choisi comme béton témoin de référence dont la composition est déterminée à partir de la méthode de formulation de Dreux-

Gorisse [Dreux 1995] ; quant à la deuxième approche, elle utilise deux classes de béton auto plaçant (BAP) de résistance différentes (30 et 40 MPa). Le Tableau IV.11 présente un récapitulatif des notations des différents bétons utilisés dans cette recherche.

Tableau IV.11 : Notations des différents bétons utilisés.

Notation	Désignation
BO	Béton ordinaire des Substrats de résistance 25MPa.
BOV	Béton ordinaire vibré de réparation témoin de résistance 30MPa.
BAP30	Béton auto plaçant de réparation de résistance 30MPa.
BAP40	Béton auto plaçant de réparation de résistance 40MPa.

La mise au point d'une formule de (BAP) est beaucoup plus complexe, parce que les constituants sont d'abord au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite le cahier de charges d'un (BAP) comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais. Les propriétés des (BAPs) sont contradictoires. Un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

Pour l'instant il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le (BAP), cependant plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura et Ouchi [Okamura et al 2003] ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du (BAP) au Japon. La méthode développée par Petersson et al [Petersson et al 1999] vise à trouver la teneur maximale de granulats sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et Montgomery [Bui et al 1999] ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par Nan et al [Nan et al 2001], un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulats et de pâte. Sedran et De Larrard [Sedran et al 1999] ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du (BAP) à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire.

Récemment, en se basant sur le travail de Saak et al [Saak et al 2001], Ferraris et al [Ferraris et al 87] ont établi une zone autoplaçante pour la formulation du (BAP) fibré.

La littérature regroupe des méthodes de composition de (BAP) cependant, on remarque l'absence d'une démarche unifiée et d'un consensus général concernant une méthode de formulation reposant sur des concepts et des fondements théoriques comme cela est le cas pour les bétons classiques.

La méthode que nous utilisons dans ce travail est basée sur la norme Européen [EN206-1 2004], sur la méthode chinoise et la méthode proposée par Nan et al [Nan et al 2001] et améliorée par Shen et al [Shen et al 2008], tout en nous servant aussi des autres méthodes existantes. Elle a l'avantage d'être simple à utiliser. En effet, seulement deux types d'essais, à savoir : essai de compactage pour le granulat et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires.

Notre souhait est d'adapter une méthode robuste qui s'appuie sur les caractéristiques physico-chimiques des constituants et sur le cahier de charges en termes notamment de classe de consistance et de classe d'exposition.

IV.3.2.1 Méthode adoptée pour la formulation des (BAPs)

La notion essentielle de cette formulation consiste à effectuer le compactage maximal du granulat en calculant sa masse volumique avec rapports distincts du sable sur le granulat puis à mesurer le volume de ciment et ajout minérale (liants) en se fondant sur la résistance à la compression du (BAP) désirée. En outre, les pâtes constituant le liant de la composition doit avoir la même fluidité. Pour le reste, le dosage du superplastifiant du (BAP) est calculé en établissant une valeur visée d'étalement par le biais de mortier avec l'essai d'étalement au cône. Les essais de contrôle à l'état frais tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis : recommandations de l'AFGC [AFGC 2002], et l'écoulement à l'entonnoir : directives européennes [GUI 2005], sont accomplis après le malaxage pour examiner la composition du (BAP).

La formule présentée consiste en l'optimisation du compactage des granulats et garantir le volume indispensable de la pâte pour occuper les vides entre les granulats et avoir une bonne fluidité du (BAP) [Shen et al 2008].

➤ **Essai de compactage**

Pendant l'évolution du mélange, le granulat devient plus dense, car le rôle lubrifiant de la pâte réduit le frottement entre les grains et aide le tassement du granulat. La norme ASTM C29/C29M [ASTM 2003] admet de simuler cette évolution de tassement par la mesure de la masse volumique de granulat avant (shovel procedure) et après compactage (rodding procedure). Le rapport du sable au granulat est varié de 0 à 100 %.

On mentionne que les compositions retenues sont sélectionnées après l'établissement d'une série de plus de 10 compositions entre le béton autoplaçant et le béton ordinaire vibré, où les compositions de départ ont nécessité quelques ajustements ; soient que ces derniers remplissent correctement après des corrections, les spécifications requises à l'état frais comme première phase et en fonction des résultats obtenus pour les résistances à la compression, qui permettront de comparer les autres propriétés mesurées directement pour la deuxième phase de sélection.

Le TableauIV.12 présente la composition d'un mètre cube des bétons de réparation choisie :

TableauIV.12 : La composition des bétons de réparation.

Composition (kg/m³)	Bétons de Réparation		
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)
Ciment	350	350	400
Filler calcaire	/	130	80
Sable (0/3)	727	770	770
Gravier (3/8)	109	280	280
Gravier (8/16)	789	420	420
Superplastifiant	1	7,5	7,5
Eau Total	185	208	206

Pour les deux types de béton le rapport eau/liant équivalent a été retenu le plus voisin possible, en terminant dans le cas de certains (BAP), la prise en compte des fillers calcaires en suivant les directives des normes ([P18-305 1996] et [EN206-1 2004]). La majorité de nos bétons intègrent des matériaux locaux. Nous étions tributaires des matériaux de base les plus utilisés en Algérie, sur nos chantiers.

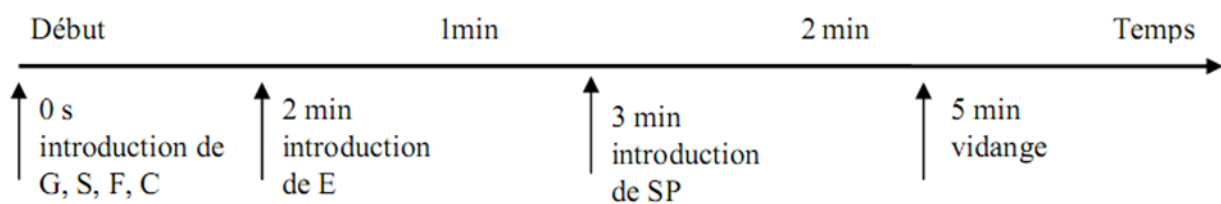
Le principe de choix de ces matériaux est leur disponibilité abondante et leur coût modéré. Les constituants utilisés dans les mélanges sont : un ciment de type CEMII/A 42,5 de la cimenterie Hamma Bouziane, un gravier 3/8 et 8/16, un sable 0/3 concassé de la carrière de Ain Smara, un filler UF20 de la carrière ENG Khoub, un superplastifiant MEDAPLAST SP 40 , et l'eau du robinet du laboratoire. Comme, il a été montré dans plusieurs études [Youjun 2002] [Naadia 2004], il est possible d'élaborer des bétons autoplaçants sans l'utilisation d'un agent de viscosité, et afin pour rester dans le contexte des matériaux locaux, il a été choisi de ne pas utiliser ce type d'adjuvant.

Le concept de liant équivalent fait référence à la norme [P18-305 1996] et tient en compte du rendement proportionnel des ajouts introduits. Le

volume de pâte correspond à la somme des volumes de ciment, d'additions, d'eau et de fines de sable (inférieur à 80 μm).

IV.4 Procédures de malaxage des bétons, mise en place et conservation

Les formulations utilisées pour la préparation des bétons (substrats, bétons de réparation) sont réalisées dans un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 180 litres de malaxage suivant la norme [P18-404 1981]. Le protocole de malaxage indiqué à la FigureIV.3, est le même pour toutes les formulations.



FigureIV.3 : Temps de malaxage.

- ❖ Introduction des éléments (graviers, sable, ciment, fillers calcaires) et malaxage pendant 2 minutes.
- ❖ Introduction de l'eau et de l'adjuvant et poursuite du malaxage pendant 5 minutes conformément à la procédure indiquée à la FigureIV.3.
- ❖ Vérification des propriétés d'ouvrabilité.
- ❖ Ajustement si nécessaire et malaxage pendant 5 minutes pour laisser 'agir' l'adjuvant.

La mise en place du béton est effectuée à l'aide d'une aiguille vibrante et une table vibrante selon la norme [P18-421 1981].

Le programme expérimental comprend des essais. Les types des éprouvettes utilisées dans ce programme sont :

- ❖ Eprouvettes cylindriques : $(10 \times 20) \text{ cm}^2$.
- ❖ Eprouvettes prismatiques : $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$.
- ❖ Eprouvettes cylindriques : $(16 \times 32) \text{ cm}^2$.



FigureIV.4 : Les éprouvettes utilisées (a) Cylindriques 10x20cm (b) prismatiques 7x7x28cm (c) Cylindriques 16x32cm.

Les conditions de conservation des éprouvettes répondent aux critères fournis par RILEM [RILEM 1998]. Toutes les éprouvettes doivent être conservées avant les essais :

- ❖ Dans leur moule, pendant 24 heures (± 4 heures).
- ❖ Démoulage et conservation des éprouvettes par un couvercle plastique et conservées à température ambiante aux différentes échéances d'âge jusqu'au moment des essais mécaniques.
- ❖ Concernant les mesures des variations dimensionnelles de retrait libre, les éprouvettes sont conservées dans la salle d'essai à une température $20\pm 2^\circ\text{C}$ et $55\pm 5\%$ d'humidité relative.
- ❖ Pour les mesures des variations dimensionnelles de retrait endogène, l'éprouvette est isolée de l'humidité ambiante (aluminium adhésif [Toutlemonde et al 1996] dès le démoulage. Bien que les éprouvettes ne soient pas sensibles aux conditions environnementales, elles sont stockées dans les conditions d'essai, à savoir une ambiance de $20\pm 2^\circ\text{C}$ et $55\pm 5\%$ d'humidité relative.

IV.5 Conclusion

Le choix de la formulation de chaque béton utilisé et sa composition (les propriétés des constituants choisis pour confectionner ces bétons (réparation et substrat) ainsi que la procédure du malaxage et conservation doivent être justifiés.

Le chapitre suivant fera l'objet des différents protocoles, qui ont servi à mener le programme expérimental de cette étude.

V.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de détailler les différents protocoles et les techniques de procédure de la réparation suivis dans cette étude. La confection des substrats et des bétons de réparation utilisés sont exposée, en plus de l'illustration de la combinaison des paramètres de la préparation de la surface d'interface des substrats.

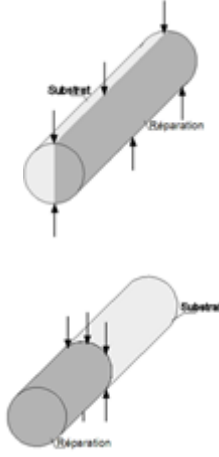

Par ailleurs, un exposé de la procédure d'application des différents essais sur des éprouvettes composites (Réparation /Substrat) est présentée. En fin une description du programme expérimental est effectuée.

V.2 Confection des substrats en béton ordinaire

En premier lieu, une série de support (substrats) en béton ordinaire est confectionnée, pour laquelle une résistance à la compression à 28 jours est de l'ordre de 25 MPa. Tous les spécimens de supports sont préparés six mois avant de simuler le béton de réparation et ils sont conservés dans une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $55\pm 5\%$ d'humidité relative.

Ces substrats sont réalisés en trois séries (TableauV.1). La première (variante A) est effectuée par des demi-cylindres, résultant du cisailage parallèlement à l'axe longitudinal des éprouvettes de $(10\times 20)\text{cm}^2$, et la deuxième (variante B) est réalisée par des demi-cylindres, résultant du cisailage parallèlement à l'axe transversal des éprouvettes de $(10\times 20)\text{cm}^2$. Les deux séries sont préparées pour l'essai d'adhérence. Tandis que la troisième série est le résultat d'un cisailage parallèlement à l'axe longitudinal des éprouvettes de $(16\times 32)\text{cm}^2$. Cette série est préparée pour étudier la compatibilité déformationnelle.

TableauV.1 : Représentation des formes des substrats confectionnées et les essais correspondants.

Essai	Approche
Essai d'adhérence	
Essai de compatibilité déformationnelle	

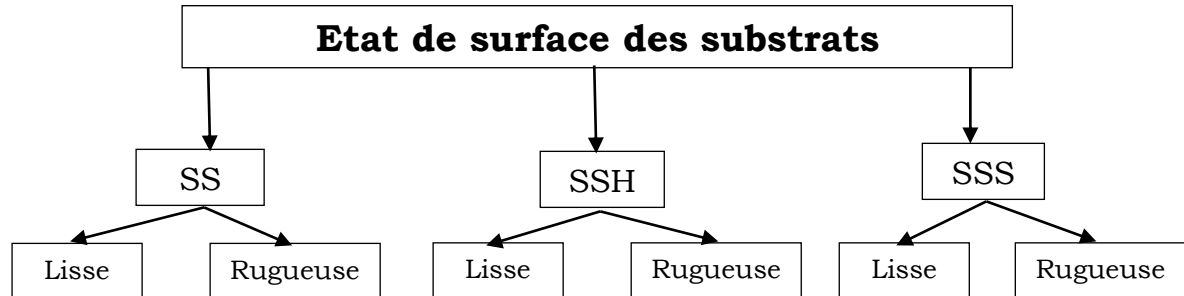
V.3 Matériaux de réparation

La réparation est effectuée par une simulation d'un matériau cimentaire sur les substrats. Dans ce travail, trois types de matériaux ont été utilisés : un béton auto plaçant (BAP) a deux classes de résistance différente (30 et 40 MPa) à savoir : (BAP30) et (BAP40) et un béton ordinaire vibré (BOV) de résistance (30MPa) pris comme béton témoin de référence (TableauIV.11).

V.4 Analyse paramétrique de surface des substrats

Après une période de six mois de la confection des substrats, la surface de ces derniers est préparée de façon à recevoir la réparation. Le choix du type de préparation de surface du substrat est un paramètre important qui contribue à l'adhérence de la réparation.

Dans cette étude, une combinaison des deux principaux paramètres, qui sont la rugosité et l'état d'humidité de surface du substrat est réalisée sur les demi-cylindres des éprouvettes (10x20)cm² (FigureV.1).



FigureV.1 : Paramètres de l'état de surface des substrats.

SSS : Surface Superficiellement Sèche

SSH : Surface Superficiellement Humide

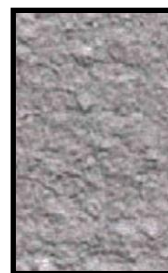
SS : Surface Sèche

Le premier paramètre, correspond à deux types de rugosité distincts qui sont appliqués sur la surface du substrat (FigureV.2) :

- ❖ Les demi-cylindres de substrat sont lisses, par traitement de la surface.
- ❖ Les autres demi-cylindres sont rendues rugueux par application d'une scarification à l'aide d'un marteau.



A) Lisse



B) Rugueuse

FigureV.2 : Textures de surface des substrats.

Le deuxième paramètre comporte trois types d'humidité des surfaces de substrat pour chaque texture, à savoir :

- ❖ Surface sèche (SS) : les substrats sont exposés et laissés dans une aire à une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- ❖ Surface saturée humide (SSH) : les substrats sont immergés dans un bac d'eau pour obtenir un substrat saturé avec une eau stagnée en surface, et ils ne sont retirés qu'à l'instant de réparation. Afin d'assurer une eau stagnante en surface, un arrosage permanent est effectué.
- ❖ Surface saturée en eau superficiellement sèche (SSS) : les substrats sont immergés dans un bac d'eau. Juste avant l'application du matériau de réparation. Une éponge pour enlever toute stagnation d'eau sur les surfaces des substrats est utilisée.

V.5 Procédure de réparation

Après les deux jours de préparation de surface des substrats, toutes les pièces des demi-cylindres de substrat, traitées aussi par un sablage sont nettoyés, avec une brosse en acier et souffler par un aspirateur, avant de couler le béton de réparation, (BOV) (BAP30) (BAP40) (FigureV.3).



FigureV.3 : Les pièces de substrat avant de couler le béton de réparation.

Les éprouvettes sont placées dans leurs moules respectives. Le béton de réparation est mis en place, en trois couches. Chaque couche est compactée par une tige puis soumis à des vibrations à l'aide d'une table vibrante pendant 30s, de façon à assurer le meilleur contact possible avec le substrat et de façon à éviter les vides de compaction. Cette opération est effectuée quel que soit le mélange de réparation (FigureV.4).



FigureV.4 : La mise en place des substrats dans les moules et application de la réparation.

V.6 Conservation des éprouvettes composites (Réparation/Substrat)

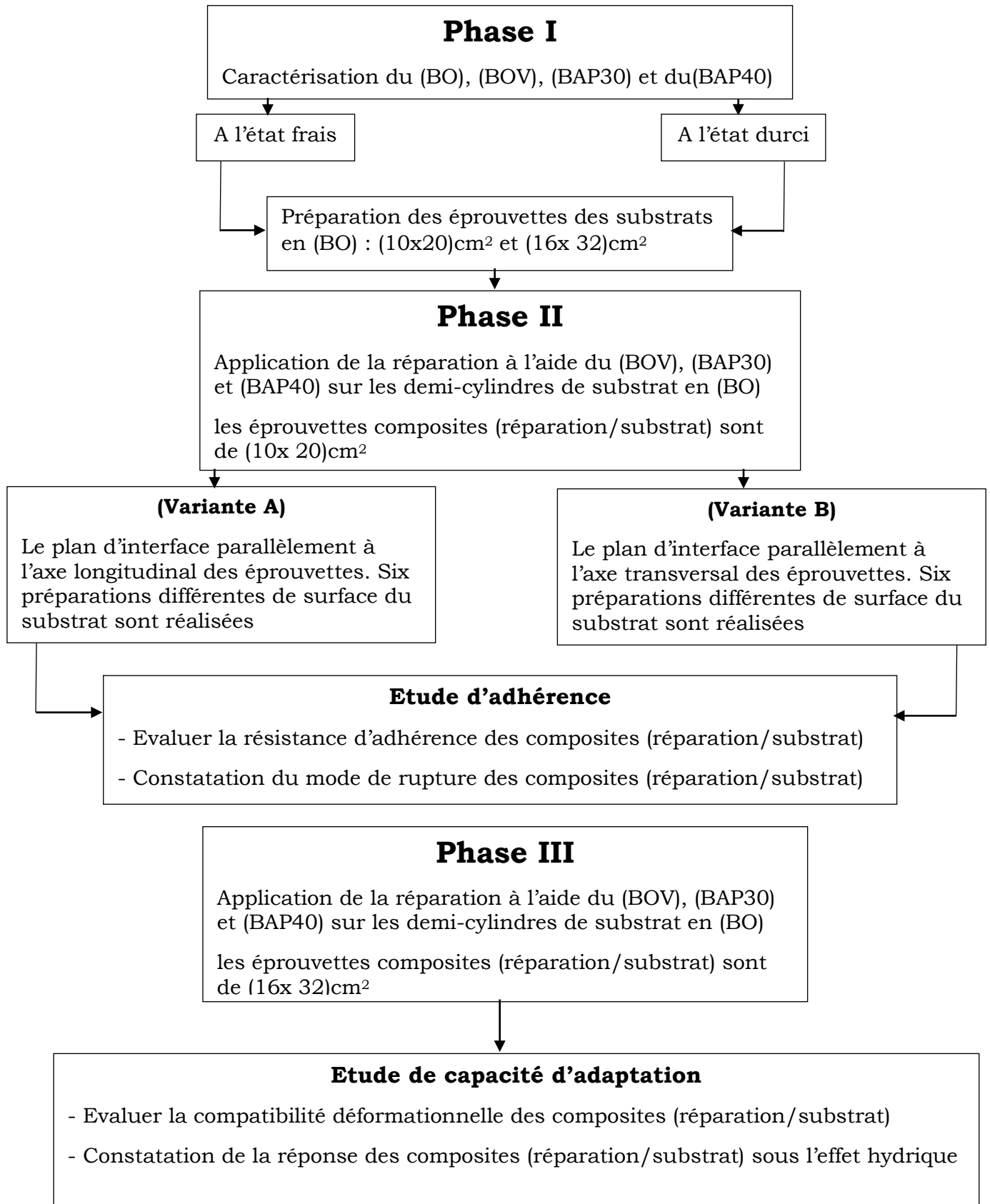
Les éprouvettes composites (Réparation/Substrat) sont démoulées 24 h après la mise en place du béton de réparation (FigureV.5). Elles sont recouvertes en moyen d'un tissu humide et d'un film plastique pendant 3 jours. Cette période de cure est une protection contre le séchage. Elles sont ensuite conservées dans une salle à une température de $20\pm 2^\circ\text{C}$ et $55\pm 5\%$ d'humidité relative. Après 120 jours, les éprouvettes (Réparation/Substrat) sont soumises à des essais mécaniques.



FigureV.5 : Les éprouvettes composites (Réparation/Substrat).

V.7 Description du programme expérimental

Le programme expérimental est divisé en trois phases et est schématisé dans la FigureV.6.



FigureV.6 : les phases du programme expérimental

V.8 Essai mécaniques d'adhérence

Un essai d'adhérence est effectué afin d'évaluer la résistance de liaison entre le béton de réparation et son substrat pour déterminer le type de rupture qui peut survenir, sous un chargement mécanique, afin d'évaluer la performance de l'adhérence, qui constitue un bon indicateur de la durabilité de la réparation, notamment dans le cas des problèmes de compatibilité dimensionnelle. En effet l'adhérence est une propriété qui varie beaucoup selon certains facteurs susceptibles d'influencer l'adhésion comme la préparation de surface, l'état humide du substrat au moment de la mise en place de la réparation.

Dans cette étude, l'essai d'adhérence est effectué par un essai de traction indirecte (Essai de fendage) sur des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) cylindriques (10x20)cm².

V.8.1 Essai de traction par fendage

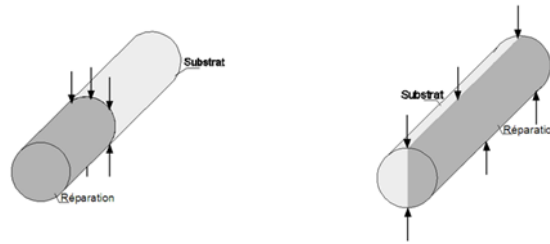
L'essai de traction par fendage est appliqué dans le but d'évaluer la résistance de liaison entre deux matériaux. Cet essai se base sur le protocole d'essai Brésilien et il est actuellement défini dans les normes [EN12390-6 2001] et [ASTMC496 2004], et permet aussi de déterminer les paramètres adéquats des surfaces des substrats pour une meilleure liaison (FigureV.7).



FigureV.7 : Essai de traction par fendage.

Deux types d'éprouvettes composites (Réparation/Substrat) de forme cylindrique sont adoptés pour cet essai, avec la même géométrie et les mêmes dimensions (10x20)cm², sauf que la localisation et l'orientation du plan d'interface sont différentes. Le premier type consiste à mettre la surface

d'interface parallèlement à l'axe longitudinal des éprouvettes, par contre, dans le deuxième la surface d'interface parallèlement à l'axe transversal des éprouvettes composites (FigureV.8).



FigureV.8 : Eprouvettes soumises à l'essai de traction par fendage.

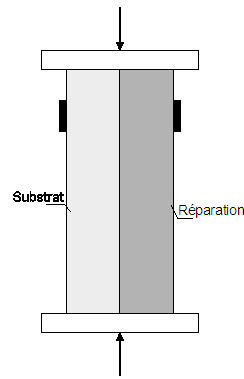
V.9 Essai de compatibilité déformationnelle

V.9.1 Essai de compression uniaxiale

Un essai de compatibilité déformationnelle est basé sur une hypothèse du comportement des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) cylindriques (16x32)cm² en compression uniaxiale.

Cet essai est appliqué dans le but d'évaluer la compatibilité déformationnelle entre les deux matériaux en contact, de façon à suivre les variations dimensionnelles longitudinales en même temps, du béton de réparation d'une part et celui du substrat d'autre part. Lors du chargement en compression, la force de compression est appliquée progressivement à une vitesse de chargement constante de 0,5MPa/s. A chaque étape du chargement, les valeurs de la force de compression ainsi que la déformation correspondante sont enregistrées, jusqu'à l'apparition de la première fissure, soit sur le matériau de réparation ou sur le substrat.

Le dispositif de cet essai comporte deux comparateurs digitaux avec deux supports magnétiques placés dans la machine de compression. Des repères en Aluminium sont attachés contre chaque face latérale supérieure d'éprouvette composite (Réparation/Substrat), dont l'un est placé en face du béton de réparation et l'autre en face du substrat (FigureV.9). Ces comparateurs permettent de mesurer toutes les variations dimensionnelles longitudinales. Les variations transversales sont négligeables devant les variations longitudinales dans cette étude.



FigureV.9 : Dispositif de mesure des variations dimensionnelles des composites.

V.10 Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu sur les techniques et procédures de réparation et les différents protocoles qui ont servi à mener le programme expérimental de cette étude. Une présentation des paramètres de la préparation de la surface des substrats est exposée. Enfin, une explication de la procédure d'application de l'essai d'adhérence et la démarche adoptée à l'essai de compatibilité dimensionnelle sont présentées.

Le chapitre suivant est dédié à une caractérisation substrat et des bétons utilisés comme matériau de réparation.

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents essais de caractérisation des bétons de réparation et du substrat utilisés dans notre étude, à l'état frais tels que : essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de la boîte en L , essai de stabilité au tamis et essai V-funnel et à l'état durci à savoir : essai de résistance en compression, essai de résistance en traction (par flexion et par fendage) et essai de module d'élasticité, ainsi que la détermination de certaines propriétés physiques : retrait total, retrait endogène, retrait de séchage et une présentation de la corrélation entre le retrait de séchage et la perte en masse.

VI.2 Caractérisation des bétons utilisés

Les essais de caractérisation ont été effectués sur toutes les compositions des bétons de réparation ainsi que le béton de substrat à l'état frais et à l'état durci. Ces essais mettent en évidence les propriétés des matériaux de réparation et substrat, qui permettent de donner une meilleure compréhension du comportement du système réparer (Réparation/ Substrat).

VI.2.1 Caractérisation des bétons à l'état frais

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un (BAP), il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais possèdent certains critères établis selon les recommandations. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC [AFGC 2008] : essai d'étalement (slump flow), essai de la boîte en L, essai d'entonnoir (V-Funnel), essai de stabilité au tamis, essai de l'air occlus et enfin mesurer la densité.

VI.2.1.1 Essai d'étalement (BAP) ou d'affaissement (BOV)

L'essai le plus simple à effectuer c'est le Slump Flow : l'essai d'étalement suivant la norme [EN12350-8 2010], signalé par «SF», caractérise l'ouvrabilité des bétons. Il consiste à démouler un cône normalisé DIN (ou un cône d'Abrams) de béton. L'ouvrabilité des bétons autoplaçants est

caractérisée par la moyenne de deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue.

Les valeurs d'étalement visées, recommandées pour un (BAP) [EN206-1 2004] se mettent entre 55 et 85cm. Ainsi trois classes d'étalement ont été déterminées :

- ❖ Un étalement allant de 55 à 65 cm, c'est la classe SF1.
- ❖ Un étalement allant de 66 à 75 cm, c'est la classe SF2.
- ❖ Un étalement allant de 76 à 85 cm, c'est la classe SF3.

Pour les compositions traditionnelles (BO) et (BOV), l'essai classique du cône d'Abrams selon la norme [P18-451 1999] est remplacé par celui de l'étalement.



FigureVI.1 : Essais de l'étalement.

VI.2.1.2 Essai de la boîte en L

Suivant la norme [EN12350-10 2010], ce test simule l'aptitude du béton à s'écouler entre le ferrailage. Il permet de calculer le temps d'écoulement du béton à travers un passage fermé par des barres d'aciers.

L'espace entre les barres d'acier peut changer pour comprendre surtout les distinctes densités de ferrailage. Il est facile d'assurer d'admettre que dès qu'il y a blocage des granulats au niveau des armatures, le béton ne possède pas les conditions d'écoulement réclamées.

La FigureVI.2 du montage expérimental présente le mode opératoire de l'essai. La partie verticale de la boîte en L en amont des armatures est bien remplie. Après stabilisation, le rapport des hauteurs H2 et H1 est mesuré (Le taux de remplissage H2/H1 doit au minimum être égal à 0,8) [AFGC 2008]. Toutes ces données permettent d'examiner la qualité autoplaçante.

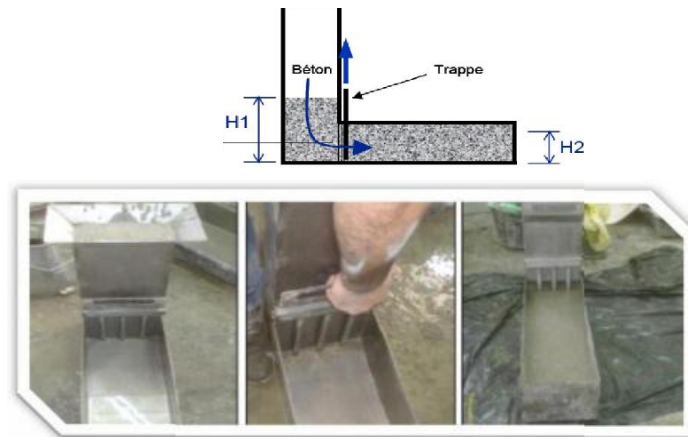


Figure VI.2 : Essai de boîte en L (L-Box).

VI.2.1.3 Essai de stabilité au tamis

Le (BAP) doit demeurer stable sous l'effet de la gravité et ne doit pas montrer des signes de ressuage. L'essai consiste à déterminer la capacité du (BAP) à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de la prise.

Suivant la norme [EN12350-11 2010], cet essai évalue le pourcentage en poids de laitance (P_{laitance}). Il détermine le risque de ségrégation. Pour l'exécution de cet essai, il faut verser 10 litres de (BAP) dans un sceau et le fermer pour le protéger de la dessiccation pendant 15 minutes. Après 15 minutes, il faut verser $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$ de béton sur le tamis (de maille 5 mm) d'une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ et relever la masse de béton traversant le tamis.

Le pourcentage en poids de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20 %, le béton présente un risque de ségrégation.



FigureVI.3 : Essai au tamis.

VI.2.1.4 Essai d'entonnoir V-funnel

Suivant la norme [EN12350-9 2010], ce test admet d'estimer la mobilité d'un (BAP) en milieu non confiné [Ozawa et al 1995 ; Syyed Adnan et al 20021].

Il fournit un signe sur la viscosité du béton en calculant le temps d'écoulement de 12 litres de béton à travers un entonnoir de section carrée. Plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux. Le temps d'écoulement mesuré dans l'entonnoir est compris entre 9 et 25 s selon la recommandation [AFGC 2008].



FigureVI.4 : Essai d'entonnoir.

VI.2.1.5 Air occlus

Avec un appareillage spécifique à savoir l'aéromètre, on peut déterminer la teneur en air des bétons selon la norme [P18-353 2007]. Le principe est de

remplir un volume déterminé de béton. On met en pression le récipient hermétiquement clos situé au-dessus. Ensuite, on met en contact les deux récipients. On accède en fin directement à la valeur de la teneur en air occlus. La mesure de l'air occlus s'effectue juste après la fin du malaxage.



FigureVI.5 : Aéromètre pour la mesure de l'air occlus.

VI.2.1.6 Masse volumique (Densité)

Le béton frais est mis dans le moule qui sert à l'air occlus (chambre inférieure). Ce moule à une capacité de 7 litres. On pèse le moule vide de valeur P_0 , ensuite on remplit ce même moule avec du béton frais et on le pèse pour avoir la valeur P dont la densité réelle est mesurée suivant la formule :

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Avec : P le poids du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle).

P_0 le poids du récipient vide.

ρ la densité du béton frais et V le volume du récipient (7 litres).

VI.2.1.7 Bilans

Finalement, les résultats de la caractérisation à l'état frais des bétons utilisés engendre plusieurs informations correctement riches pour admettre de joindre la formulation des bétons avec leurs performances.

Le résultat d'un essai est la moyenne au moins de trois valeurs sur trois échantillons (ou gâchées) issues d'un même prélèvement [P18 305 1996].

Ce nombre est suffisant car les tests sont exécutés suivant les normes avec la plus grande attention (répétabilité et reproductibilité). Le TableauVI.1 récapitule Les caractéristiques à l'état frais des différents bétons utilisés dans cette recherche.

TableauVI.1 : Les caractéristiques à l'état frais des bétons utilisés.

Notations	Bétons de Réparation			Béton de Substrat
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
Étalement (Affaissement)	8	70	78	6
Boite en L	/	0,85	0,95	/
Stabilité au tamis (%)	/	8,70	14,30	/
Temps d'écoulement	/	17,91	18,02	/
Air occlus (%)	2,2	1,94	2	2
Densité (Kg/m3)	2390	2395	2384	2371

De nombreuses constatations peuvent être faites sur les compositions du béton de réparation (BAP30), (BAP40) et (BOV) :

L'étalement spécifié était respectivement de 70cm classe «SF2» pour (BAP30) , de 78cm classe «SF3» concernant le (BAP40). Pour les deux (BAP) les gros granulats ne se sont pas accumulés au centre des galettes de béton, et se sont mélangés à la pâte de ciment.

Donc Les bétons autoplaçants destinés à la réparation (BAP30), (BAP40) fabriqués au laboratoire sont capables d'être des bétons utilisables du point de vue industriel, car ils vérifient le critère d'étalement.

Les bulles d'air prisonniers pourraient aider l'écoulement. Ceci s'observe bien lors de la confrontation entre les deux bétons autoplaçants. Donc l'étalement est relatif au pourcentage d'air occlus : un accroissement de cette teneur en air occlus dégagerait une élévation de la valeur de l'étalement. L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du

matériau. L'essai au V-Funnel est relié à la viscosité. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

Pour que le (BAP) soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1), doit être supérieur à 0,8. Aussi le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler.

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer un taux de ségrégation permettant au béton testé de présenter une stabilité admissible ou non. Tous les (BAPs) ont une résistance à la ségrégation suffisante (un taux de ségrégation inférieur à 15%) [AFGC 2008].

Aucune exigence n'avait été établie à propos de la consistance des bétons vibrés. Les classes d'affaissement calculées vont du béton plastique de (5 à 9 cm), classe S2 d'après la norme [EN206-1 2004]. Pour avoir les caractéristiques cibles d'un (BAP) à l'état frais, il est essentiel de donner une importance toute spécifique à la quantité de l'adjuvant utilisé pour le (BOV).

Ces résultats ont conduit à ce que l'on peut souhaiter d'un béton autoplaçant destiné à la réparation.

VI.2.2 Caractérisation des bétons à l'état durci

Dans cette partie, nous étudions les propriétés mécaniques (résistance en compression, en traction, et module d'élasticité) et les propriétés physiques (évolution de retrait, et les pertes de masse) des différents bétons utilisés. Tous les résultats présentés sont la moyenne de trois mesures.

VI.2.2.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des bétons utilisés ont été déterminées pour les différents essais réalisés aux échéances de 7 jours, 28 jours et 90 jours après la confection des mélanges.

VI.2.2.1.1 Essai de compression simple

Ce test consiste à déterminer le module d'élasticité (E_c) et la résistance en compression (R_c) des bétons utilisés. Cet essai est effectué à partir d'une

presse hydraulique de type CONTROLS et d'une capacité maximale de 3000 kN, avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (FigureVI.6).



FigureVI.6 : La presse de compression simple utilisée.

1) Résistance en compression

La résistance en compression a été évaluée à partir d'écrasement des éprouvettes de béton cylindriques (10×20)cm², conformément à la norme [EN 12390-3 2003] (FigureVI.7).

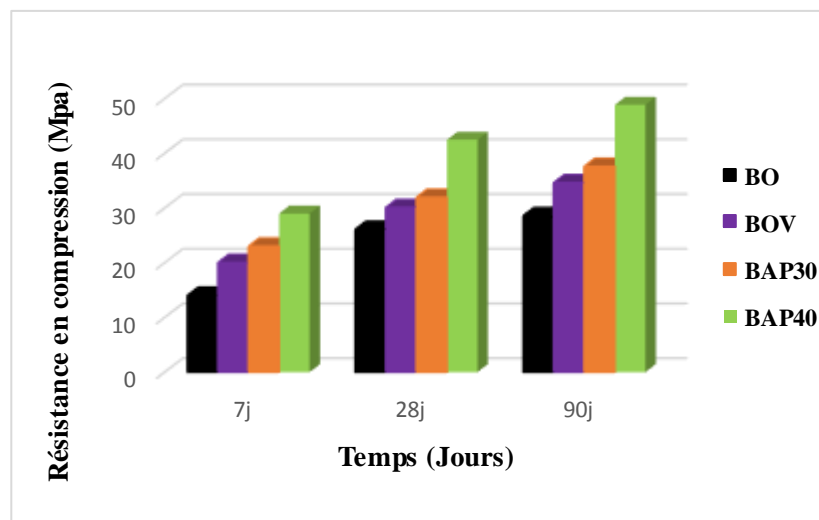


FigureVI.7 : Essai de résistance en compression.

La résistance en compression (R_c) de chaque béton est regroupée dans le TableauVI.2 et illustrée sur la FigureVI.8. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais par échéance.

TableauVI.2 : Résistance en compression des bétons utilisés.

Age du béton (Jours)	Bétons de Réparation Rc (MPa)			Béton de Substrat Rc (MPa)
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
7	20	23	28,97	14,02
28	30,07	31,94	42,47	26,10
90	34,60	37,60	48,87	28,56

**FigureVI.8** : Résistance en compression des bétons utilisés.

D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que les données des résistances en compression à 28 jours sont proches des classes de résistance désirées. Ce résultat atteste la crédibilité de l'approche de la composition employée.

[Ramanathan et al 2013 ; Yahia et al 2005] révèlent que les additions minérales ont la capacité d'assurer un bon remplissage des vides entre les particules de ciment de grande taille, et l'augmentation de la production d'hydrates secondaires par des réactions pouzzolaniques avec la chaux résultant de l'hydratation primaire; ce qui améliore la résistance à la compression. Dans notre cas, le filler de calcaire (FC) est utilisé comme une addition minérale pour confectionner les bétons autoplaçants destinés à la réparation.

2) Module d'élasticité en compression

Cet essai consiste à déterminer le module d'élasticité (E_c), pour mesurer la déformation longitudinale et transversale. L'essai est réalisé au moyen de la même presse à une vitesse de 0,5MPa/s, et effectué à l'aide d'un extensomètre mécanique qui permet de faire des mesures de déformations sur des cylindres pendant cinq cycles de mise en charge. Deux éprouvettes cylindriques (16x32)cm² ont été testées pour chaque béton étudié.

Nous nous sommes intéressés qu'à la détermination de la déformation longitudinale. La norme sur la mesure du module d'élasticité [RILEM CPC8 1972] propose de mesurer la pente entre 5% et 30% de la charge de rupture. La résistance à la rupture correspond à la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai. La déformation du matériau est obtenue par le déplacement du comparateur et en divisant ce déplacement par la hauteur de mesure qui est de 320mm.

Les valeurs de (E_c) ont été obtenues en déterminant la pente de la tangente de la courbe contrainte/déformation à l'origine.

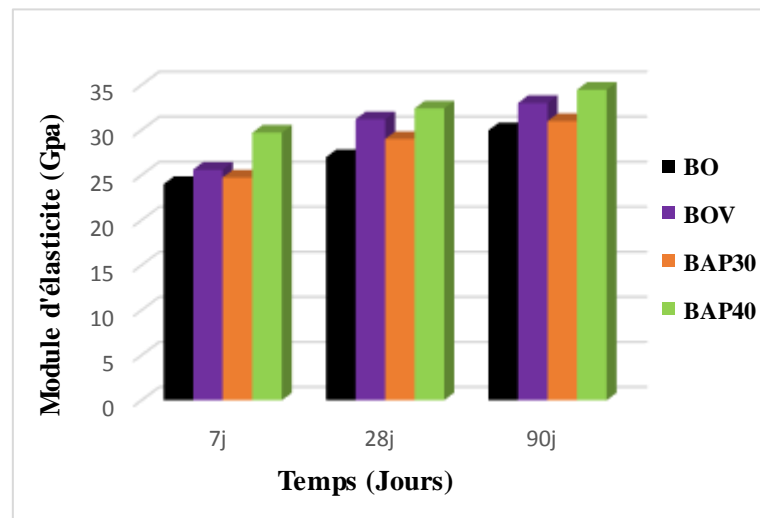


FigureVI.9 : Essai de module d'élasticité en compression.

Les résultats du module d'élasticité en compression (E_c) des compositions étudiées sont répertoriés dans le TableauVI.3 et représenté sur la FigureVI.10. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais par échéance.

TableauVI.3 : Module d'élasticité en compression des bétons utilisés.

Age du béton (Jours)	Bétons de Réparation Ec (GPa)			Béton de Substrat Ec (GPa)
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
7	25,60	24,73	29,71	24,01
28	31,21	29	32,40	27
90	33	31	34,47	29,96

**FigureVI.10** : Module d'élasticité en compression des bétons utilisés.

Le développement des modules d'élasticité des bétons étudiés est semblable au développement de leurs résistances à la compression. La rigidité évolue rapidement puis a tendance à se stabiliser. Ces résultats sont dus à une décroissance totale des réactions d'hydratation, et donc à une consolidation des bétons.

De la FigureVI.10, le module d'élasticité à (7 ; 28 ; 90) jours du (BOV) est supérieur à celui du (BAP30), ce qui s'explique par la différence dans le rapport granulaire G/S . Le rapport G/S est plus important pour le béton vibré (1,23) que pour le (BAP30) (0,9). Les mêmes constatations sont relevées par [Vieira 2003].

Le béton autoplaçant (BAP40) a développé une rigidité plus élevée que le béton vibré(BOV). Ce résultat s'explique par la rigidité supplémentaire apportée au matériau par les granulats qui sont couplés à une matrice cimentaire, car le (BAP40) comporte un volume de pâte plus important que

celui du (BOV). Selon [Spengler 2001], les (BAPs) de résistance mécanique supérieure à celles des bétons vibrés possèdent des modules d'élasticité supérieurs à ceux de ces bétons vibrés.

Les différences de module d'élasticité mesuré sur les bétons de réparation indiquent à l'avance les différences du comportement mécanique entre les réparations réalisées avec chaque béton.

En terme de comparaison, les résultats expérimentaux du module d'élasticité par rapport à l'estimation théorique en appliquant les codes (Eurocode2, règles BAEL), sont illustrés dans le TableauVI.4.

L'Eurocode2 [Eurocode2 2001] préconise la formule suivante pour l'estimation du module d'élasticité :

$22(f_{cm}/10)^{0,3}$ Avec f_{cm} : résistance moyenne en compression.

Les règles BAEL [BAEL 1999], définissent l'estimation du module d'élasticité égal à :

$11000(f_c)^{1/3}$

Dans cette formule, f_c indique la résistance en compression. Nous la prendrons forfaitairement égale à $f_{cm}/1,15$.

TableauVI.4 : Comparaison des modules d'élasticités expérimentales et théoriques des bétons utilisés.

Module d'élasticité(GPa)		Bétons de Réparation			Béton de Substrat
		(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
Expérimental	7j	25,60	24,73	29,71	24,01
	28j	31,20	29	32,40	27
	90j	33	31	34,47	29,96
Théorique $11000(f_c)^{1/3}$ [BAEL 91]	7j	30,94	30,58	32,51	30,28
	28j	33,05	32,25	33,47	31,49
	90j	33,67	32,98	34,16	32,60
Théorique $22(f_{cm}/10)^{0,3}$ [Eurocode 2]	7j	29,16	28,86	30,49	28,61
	28j	30,95	30,27	31,30	29,63
	90j	31,47	30,89	31,89	30,57

Les résultats montrent que les valeurs théoriques estimées sont assez proches des valeurs déterminées au laboratoire à l'aide de l'extensomètre.

Les valeurs théoriques ont la même variation que celles des résultats expérimentaux. Ce qui montre une bonne estimation des résultats du module d'élasticité.

VI.2.2.1.2 Essai de traction par flexion

Pour estimer la résistance en traction par flexion, l'essai est réalisé sur des éprouvettes de béton prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{cm}^3$, conformément à la norme [EN12390-5 2012] (FigureVI.11).

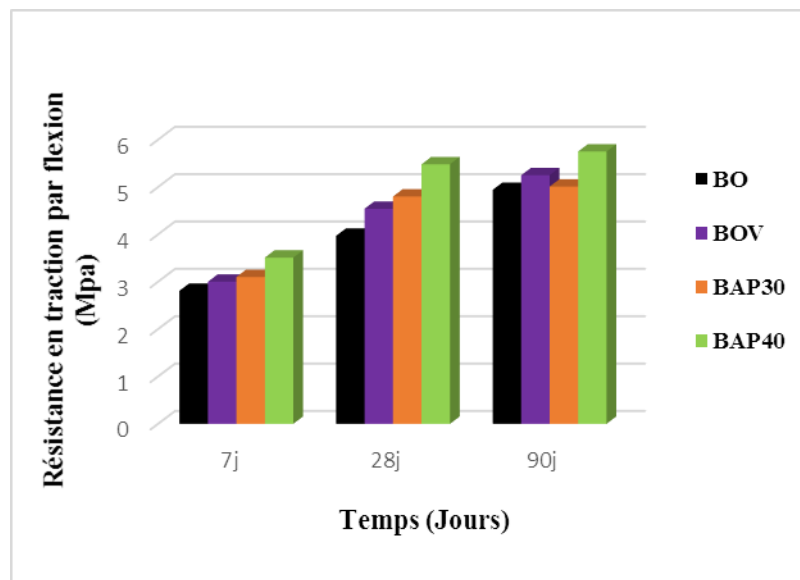


FigureVI.11 : Essai de résistance en traction par flexion.

La résistance en traction par flexion de chaque béton est regroupée dans le TableauVI.5 et illustrée sur la FigureVI.12. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais par échéance.

TableauVI.5 : Résistance en traction par flexion des bétons utilisés.

Age du béton (Jours)	Bétons de Réparation R_T (MPa)			Béton de Substrat R_T (MPa)
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
7	3	3,10	3,51	2,81
28	4,54	4,80	5,48	3,97
90	5,25	5,01	5,75	4,94



FigureVI.12 : Résistance en traction par flexion des bétons utilisés.

VI.2.2.1.3 Essai de traction par fendage

La résistance en traction par fendage a été déterminée à partir d'écrasement des éprouvettes de béton cylindriques (10×20)cm², conformément à la norme [EN 12390-6 2012] (FigureVI.13).



FigureVI.13 : Essai de résistance en traction par fendage.

La résistance en traction par fendage de chaque béton est regroupée dans le TableauVI.6 et illustrée sur FigureVI.14. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais par échéance.

TableauVI.6 : Résistance en traction par fendage des bétons utilisés.

Age du béton (Jours)	Bétons de Réparation R_T (MPa)			Béton de Substrat R_T (MPa)
	(BOV)	(BAP30)	(BAP40)	(BO)
7	1,87	2,09	2,31	1,76
28	2,86	3,47	3,82	2,70
90	3,01	3,82	4,29	2,80

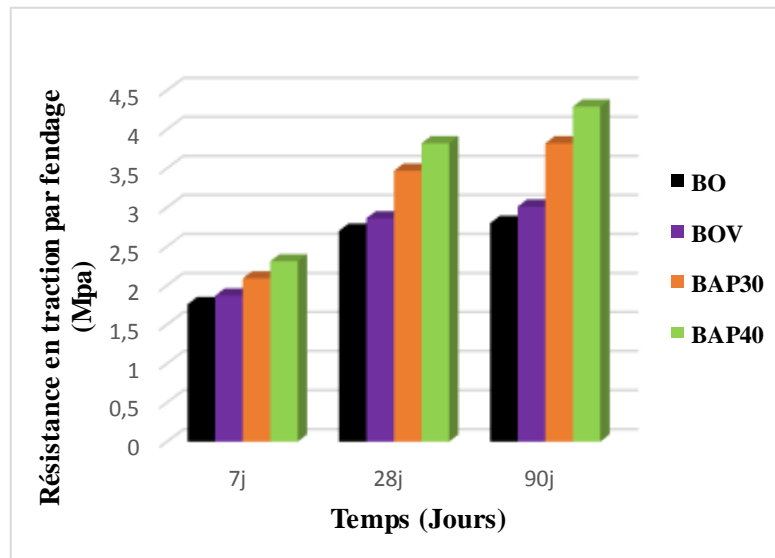


Figure VI.14 : Résistance en traction par fendage des bétons utilisés.

La résistance en traction du béton est influencée par les défauts de discontinuité dans la pâte de ciment hydraté et par les fissures dans les cristaux individuels qui sont associées aux vides. Les fissurations causées par le retrait peuvent aussi agir sur la résistance [Neville 2000].

La résistance en traction est une propriété mécanique importante pour la durabilité des réparations sous sollicitations de retrait puisque le matériau est soumis à d'importante contrainte de traction, notamment en surface. Cette propriété mécanique sera donc un paramètre dont il faudra tenir compte pour différencier le comportement des réparations réalisées avec les différents bétons.

VI.2.2.2 Propriétés physiques

VI.2.2.2.1 Essai de retrait

Le retrait est une donnée importante à connaître pour n'importe quel béton. L'essai de retrait permet d'évaluer le potentiel de contraction d'un béton pendant les premiers mois suivant sa fabrication. C'est une variation dimensionnelle négative pour la durabilité.

Le retrait est un phénomène très complexe, à cause du processus d'hydratation du ciment et des échanges hydriques avec le milieu environnant tout au long de la vie du matériau. Généralement, il se développe fortement aux jeunes âges.

1) Méthodologie d'essai

Une campagne expérimentale sur le retrait total et endogène a été réalisée au Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Constructions, suivant les recommandations de la RILEM -TC 107-CSP Standardized Tests Methods for Creep and Shrinkage [RILEM 1998].

Le principe de ce test est de mesurer en fonction du temps, la variation de longueur des éprouvettes due aux conséquences de l'hydratation et du séchage des matériaux cimentaires. Ces essais de retrait sont exécutés sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28)cm³ en béton étudiés (BO) ,(BOV), (BAP30) et (BAP40), (même composition et même protocole de fabrication) que les essais mécaniques.

Les éprouvettes sont dotées à leurs extrémités de plots métalliques noyés dans le béton, afin de les placer verticalement dans un rétractomètre équipé d'un comparateur digital de précision ± 0.01, qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon (FigureVI.15).

A 24 heures après démoulage, les mesures de retrait total et de retrait endogène sont réalisées à des termes très courts au départ. La fréquence de mesure augmente après avec le temps. Les déformations de retrait ont été suivies sur une période de 200 jours.



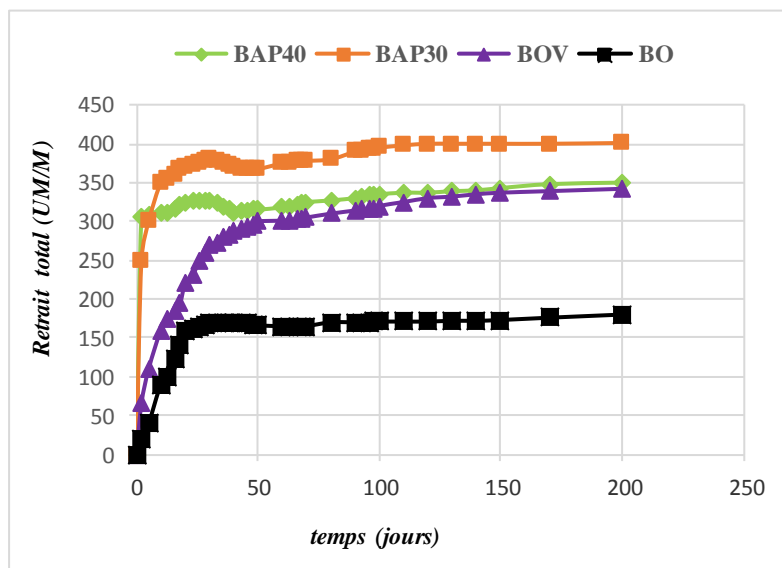
FigureVI.15 : Essai de retrait (rétractomètre).

Le retrait endogène est mesuré sur des éprouvettes sans échanges hydriques avec le milieu ambiant. Elles sont enveloppées dans des feuilles d'aluminium. D'autre part, les éprouvettes destinées à déterminer le retrait total sont conservées sans aucune protection. Le retrait de séchage est

déduit du retrait total en considérant ce dernier comme une superposition du retrait endogène et de séchage.

2) Retrait total

L'évolution moyenne du retrait total en fonction du temps des bétons utilisés est illustrée sur la FigureVI.16, avec une échéance jusqu'à 200 jours.



FigureVI.16 : Evolution des déformations de retrait total des bétons utilisés.

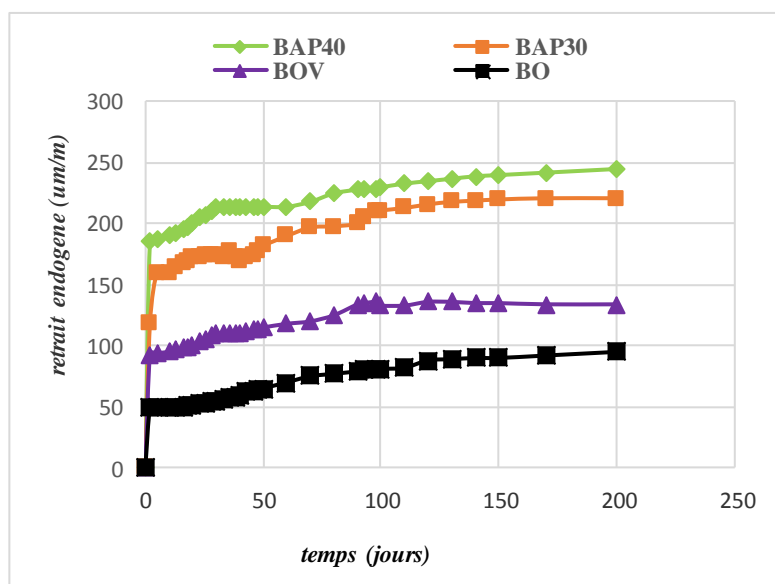
De la FigureVI.16, toutes les déformations de retrait total commencent à se stabiliser aux 150 jours. A la fin de l'essai les valeurs expérimentales du retrait total à 200 jours, sont les suivantes : 180 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le (BO), 342 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le (BOV). Pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30), (BAP40), elles sont de 401 $\mu\text{m}/\text{m}$, et 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivement.

Le béton ordinaire(BO) est le matériau qui a développé les déformations de retrait total les moins importantes. Il s'agit aussi du matériau qui possède la quantité de ciment la moins importante et le volume de pâte le plus faible [Laurence 2001]. Par ailleurs le (BOV) vient en deuxième ordre, avec un potentiel de retrait plus important. Le (BAP30) et le (BAP40) ont notamment présenté des amplitudes élevées des variations dimensionnelles, en raison de

la quantité élevée du liant (ciment+ FC), ainsi que le volume important de la pâte.

3) Retrait endogène

Les mesures du retrait endogène des bétons utilisés sont réalisées sur des éprouvettes exemptées d'échanges hydriques avec le milieu extérieur. Les résultats obtenus sont présentés sur la FigureVI.17.

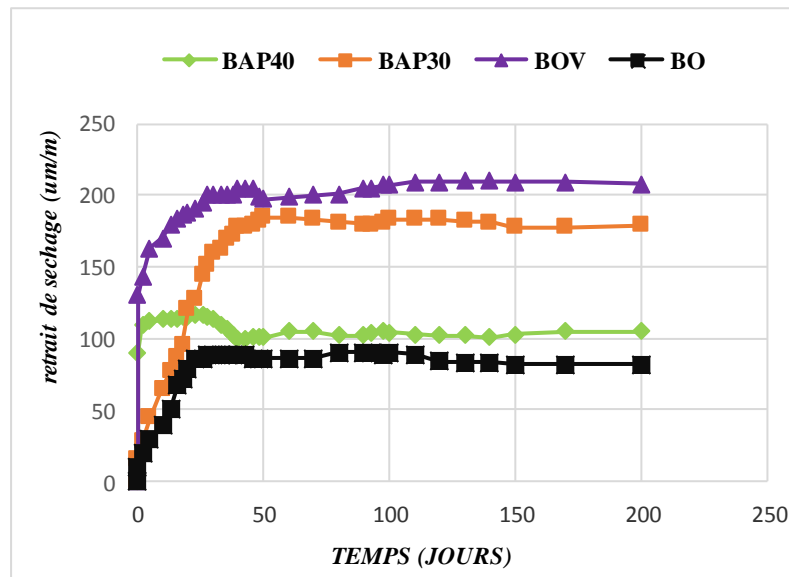


FigureVI.17 : Evolution des déformations de retrait endogène des bétons utilisés.

D'après la FigureVI.17, l'allure du comportement du retrait endogène de tous les bétons utilisés est similaire. Le développement des variations dimensionnelles a été très important pendant 50 jours. Après cette période, la cinétique de déformation a commencé à ralentir et se stabiliser pour d'afficher à 200 jours les déformations endogènes comme suit : 95µm/m, 147µm/m , 195µm/m , 245µm/m pour les (BO), (BOV) (BAP30), (BAP40) respectivement . Il est constaté que les déformations du retrait des (BAP30), (BAP40) sont plus élevées que celles du (BO) et du (BOV) en raison de la quantité élevée du liant (ciment+ FC), ainsi que le volume important de la pâte. En effet, les bétons avec un rapport E/L élevé ont présenté des amplitudes de retrait endogène moins importantes que celles avec un rapport E/L bas [Shengwen et al 2021].

4) Retrait de séchage

Le retrait de séchage est dû au mouvement de l'eau qui se trouve dans les pores du béton vers le milieu extérieur lors de son séchage. Ce retrait dépend des conditions ambiantes dans lesquelles se trouve le béton. Le retrait de séchage est calculé par la différence entre le retrait total et le retrait endogène. La FigureVI.18 présente l'évolution du retrait de séchage des bétons utilisés en fonction du temps.



FigureVI.18 : Evolution des déformations de retrait de séchage des bétons utilisés.

Il est remarqué, que les valeurs de retrait de séchage du (BAP40) et du (BAP30) sont inférieures par rapport au (BOV). Les variations dimensionnelles produites par le séchage à 200 jours sont comme suit : 80µm/m, 207µm/m , 180µm/m , 110µm/m pour le (BO), le (BOV) le (BAP30), le (BAP40) respectivement (FigureVI.18).

Le retrait de séchage pour les deux variantes de bétons autoplaçants le (BAP30) et le (BAP40) est moins important que le béton ordinaire vibré. Dans le cas du béton autoplaçant (BAP) malgré un volume de pâte plus important que celui du béton ordinaire vibré, le faible rapport eau/ciment et la présence des fines de filler calcaire ont permis de raffiner la porosité capillaire et ainsi de rendre le matériau moins sensible au séchage et donc de diminuer son retrait [Laurence 2001].

5) Bilan

Les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) présentent des amplitudes de retrait endogène plus importantes que le béton ordinaire vibré(BOV) , Ceci est peut être aussi due au fait que le retrait endogène est un phénomène relatif à l'hydratation du ciment qui confirme sa cinétique et le volume des hydrates constitués. Le volume conséquent d'ajout minéral dans le (BAP) semble affecter cette hydratation et aussi le retrait endogène.

Cette caractérisation du retrait endogène des matériaux indique que des déformations importantes sont générées dans les réparations, avant que les échanges hydriques avec le milieu extérieur débutent. Étant empêchées par le support (substrat), ces déformations peuvent avoir pour effet d'induire un état initial de contraintes de traction dans la réparation. Ce chargement initial par déformations endogènes a été réduit par une cure d'humidité de 3 jours réalisée sur les réparations après leur mise en place alors que le matériau n'est pas encore durci [Laurence 2001].

Le retrait de séchage est considéré comme étant l'un des principaux facteurs affectant la durabilité de l'adhérence entre une réparation et son support [Saucier 1990].

Les amplitudes de retrait de séchage produites pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) sont moins importantes que le béton ordinaire vibré(BOV). Malgré le volume de pâte du béton autoplaçant (BAP) plus important que celui du béton ordinaire vibré, le faible rapport eau/(C+FC) et la présence de filler calcaire ont permis de raffiner la porosité capillaire et ainsi de rendre le matériau moins sensible au séchage et donc de diminuer le retrait. Et par ailleurs le fait des proportions importantes en adjuvants (superplastifiants) pour la composition autobloquante peut avoir des impacts sur la structure des hydrates et sur une éventuelle combinaison compliquée entre les structures hydratées et les particules des adjuvants [Proust 2002].

6) Confrontation avec les travaux antérieurs

La première constatation est consacrée à la confrontation entre les valeurs du retrait évaluées pour les bétons utilisés. On peut distinguer que le retrait

endogène diminue avec l'accroissement du rapport E/C. Plusieurs chercheurs ([Tazawa et al 2000], [Igarashi et al 2000], [Turcry 2004], [Rozière et al 2007], [Pertué 2008], [Siad 2010]) ont rapporté que le retrait endogène est plus supérieur pour des rapports E/C plus faibles. Pertué [Pertué 2008] ajoute que ce phénomène est développé par le fait que la réduction d'humidité relative intérieure est plus rapide et plus intense pour des rapports E/C faibles.

La dissemblance du retrait endogène aperçue pour les compositions du (BAP) peut compacter la structure poreuse en présence de fillers calcaires qui affectent l'hydratation du ciment et pareillement la microstructure et la morphologie des hydrates [Yurtdas 2003]. En effet, au moment de la prise, une part uniquement de l'hydratation est accomplie. Celle-ci continue ultérieurement à l'intérieur d'un squelette à la fois poreux et rigide : ce qui entraîne une réduction de la quantité en eau dans l'espace des pores. Cette réduction a les mêmes conséquences mécaniques qu'un séchage [Acker 1988].

Le retrait de séchage est dû à la perte d'une partie de l'eau de gâchage dans le cas où le béton est conservé dans une atmosphère à humidité relative plus faible que celle de la matrice cimentaire. Il est attaché aussi en premier lieu à la vaporisation de l'eau comprise dans les réseaux poreux du béton vers l'environnement. Le séchage est d'autant plus fort que le volume d'eau préliminaire dans le matériau est important [Assié 2004], [Loser et al 2009], [Rozière et al 2007]. La diminution du retrait de séchage par l'ajout de fillers calcaires a été signée par de nombreux auteurs [Bui et al 1999], [Turcry et al 2005], [Koehler 2007], [Loser et al 2009]. [Turcry et al 2005] additionnent que cela peut inspirer que l'emploi de filler calcaire induit un accroissement de la densité et par conséquent une diminution des transferts d'humidité [Siad 2010].

Parallèlement au suivi des déformations de retrait, la masse des éprouvettes suit.

VI.2.2.2.2 Relation entre retrait de séchage et perte de masse

Les mesures du retrait de séchage sont accompagnées de la mesure de perte de masse. Les pertes de masse constatées correspondent à l'évaporation de l'eau libre. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance pourvue d'une précision de 0,1% (FigureVI.19). Le calcul est effectué en pourcentage. La perte en masse est comme suit :

$$\Delta M (\%) = 100 \times (M_{int} - M_t) / M_{int}$$

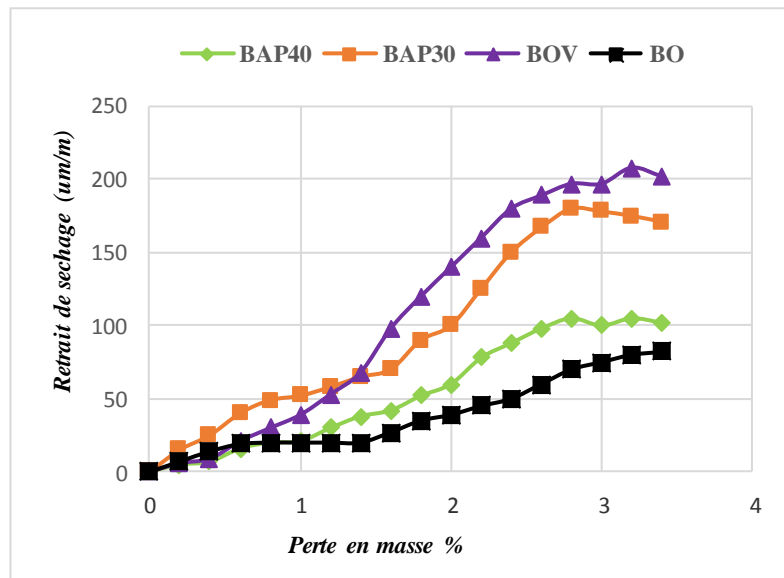
M_{int} : la masse initiale de l'éprouvette avant séchage,

M_t : la masse mesurée à l'instant «t».



FigureVI.19 : Balance de pesé de la masse.

La figure suivante présente l'évolution du retrait de séchage en fonction de la variation de la masse des éprouvettes en bétons utilisés dans cette étude.



FigureVI.20 : Retrait de séchage des bétons utilisés en fonction de la perte de masse.

À partir de la FigureVI.20, la première observation inscrite de la représentation du retrait de séchage en fonction de la variation de la perte de masse est l'accroissement du retrait de séchage de tous les bétons utilisés en fonction de la variation de la masse. Néanmoins, on enregistre en premier lieu une perte d'eau élevée qui n'a quasiment aucun effet sur le retrait. Selon [GCI 2009], au début de retrait de séchage, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($>0.05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper. Cette perte d'eau affronte partiellement un petit retrait. Ensuite le retrait est immédiatement relatif à la perte d'eau comme il est présenté sur la FigureVI.20. Cette proportionnalité est remarquée à partir des 4 jours d'âge jusqu'à 200jours.

VI.3 Conclusion

Ce chapitre est consacré à une présentation des résultats des essais de caractérisation de différents bétons utilisés dans cette étude (matériau de réparation et le matériau de substrat).

Ce chapitre a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Les formulations des (BAPs) destinés à la réparation répondent aux recommandations relatives au béton frais, exigées par la réglementation [AFGC]. Les (BAP30) et le (BAP40) ont donné des bétons fluides avec une stabilité et une homogénéité convenables.

- ❖ Pour les propriétés mécaniques, la résistance à la compression à 28 jours est très proche pour les classes de résistance désirées de tous les bétons formulés à la réparation.
- ❖ Le (BAP40) a développé une rigidité plus élevée que le (BOV) et le (BAP30), ce qui s'explique par la rigidité supplémentaire apportée au matériau par les granulats qui sont couplés à une matrice cimentaire plus dense.
- ❖ Pour les propriétés physiques, il est remarqué que les variations dimensionnelles produites par le séchage pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) sont moins importantes que le béton ordinaire vibré(BOV). Inversement au retrait de séchage, les amplitudes de retrait endogène pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) sont plus importantes que celle du béton ordinaire vibré(BOV). Ces déformations endogènes ont été réduites par une cure d'humidité de 3 jours réalisée sur le système réparé après sa mise en place à la réparation.

Ces propriétés des (BAPs) confectionnés donnent des avantages pour les utiliser comme matériaux de réparation.

L'étude d'adhérence entre (Substrat-Réparation) et la compatibilité déformationnelle du système à réparer fait l'objet principal du chapitre suivant.

VII.1 Introduction

Lors de la campagne expérimentale, les différentes caractéristiques relatives aux matériaux (BOV), (BAP30) et (BAP40) de réparation ont permis les prévisions de leur comportement avec le temps, et d'évaluer leur influence sur la capacité d'adaptation au système réparé. Dans le présent chapitre, nous exposons les résultats des différentes expériences, qui sont regroupées en deux parties :

1) La première partie s'intéresse à l'évaluation d'adhérence entre la réparation appliquée et la surface du substrat à réparer ainsi qu'au mode de rupture et le type de liaison (Réparation-Substrat). Les composites (Réparation/Substrat) ont été soumis à la traction par fendage. Cette étude nécessite de prendre en compte quelques facteurs pouvant influencer le système réparé (Réparation/Substrat). Il est donc important d'analyser l'impact de la texture du substrat sur l'adhérence, pour deux niveaux de rugosité de surface : lisse (Lis) et rugueuse (Rug), pour les quelles trois différents types d'humidité : Surface sèche (SS), Surface saturée humide (SSH), Surface saturée en eau superficiellement sèche (SSS), sont appliquées.

2) La deuxième partie présente une évaluation de la compatibilité déformationnelle du béton de réparation utilisé avec le substrat, pour mieux comprendre la capacité d'adaptation entre les deux matériaux (Substrat-Réparation).

La réparation subit des variations dimensionnelles dues au retrait de séchage qui sont induites par le séchage global du matériau de réparation. Lorsque ces déformations sont empêchées par la présence d'un substrat, elles conduisent à des fissurations à la surface du matériau de réparation. Il est donc intéressant d'examiner la réponse des composites (Réparation/Substrat) sous l'effet hydrique.

VII.2 Etude de l'adhérence et de la liaison de réparation

Pour qu'une réparation soit durable, il faut une bonne liaison entre le béton du substrat et celui de la réparation.

L'objectif principal de cette partie d'étude est d'évaluer la résistance d'adhérence entre les deux bétons en contact (Substrat-Réparation), de déterminer la texture adéquate de l'état des surfaces des substrats pour une meilleure liaison, et de constater le mode de rupture de chaque béton de réparation. L'adhérence entre le béton de réparation et le substrat est évaluée par un essai de fendage (Chapitre V).

La fiabilité d'un essai d'adhérence nécessite d'abord un examen visuel de toutes les éprouvettes composites (Réparation/Substrat), afin de s'assurer qu'il n'y a pas des fissures à l'interface résultant du retrait. Les éprouvettes utilisées dans cette étude ont fait l'objet de la phase II du programme expérimental (Chapitre V).

L'essai d'adhérence est appliqué après 120 jours du mûrissement des éprouvettes des composites (Réparation/Substrat) cylindriques de $(10 \times 20) \text{cm}^2$, et qui a permis de mesurer la contrainte à la rupture de ces éprouvettes (Réparation/Substrat). Plus cette contrainte est élevée, plus l'interaction entre le béton de réparation et le substrat est forte.

VII.2.1 Mode de rupture des composites

Par ailleurs, les modes de rupture ou la réponse des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) soumises à des essais, présentent différentes formes de défaillance. Deux modes de rupture remarquées sur les éprouvettes sont constatés dans notre cas :

- ❖ Les ruptures adhésives (mode 1) : ce type de rupture a lieu à l'interface entre la réparation et le substrat. Il dénote une absence d'adhérence entre le béton de réparation et le substrat (FigureVII.1(a)).
- ❖ Les ruptures cohésives (mode 2) : ce type de rupture n'a pas lieu à l'interface entre les deux parties. Il peut avoir lieu, soit dans le béton du substrat, soit dans le béton de réparation (FigureVII.1(b)).

L'obtention d'une rupture cohésive par rapport à une rupture adhésive caractérise une bonne adhésion entre les deux parties du système réparé et montre que le point faible du système ne se situe pas à l'interface.

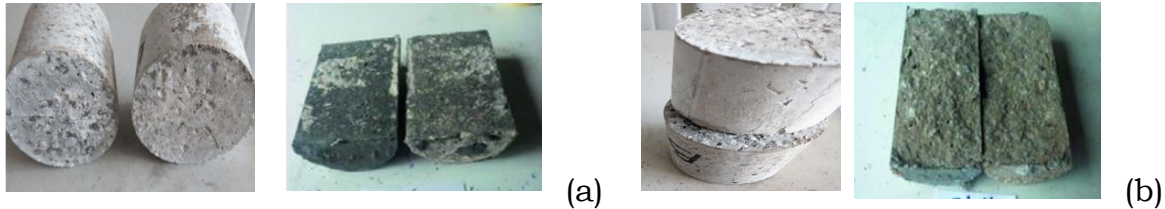


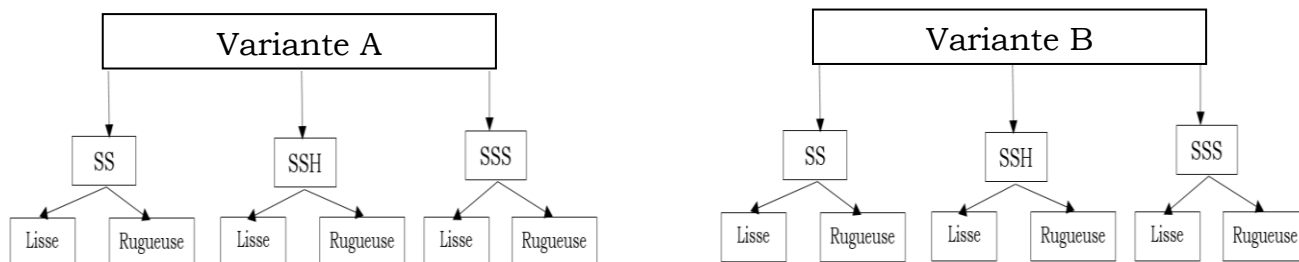
Figure VII.1 : Différents modes de rupture. (a) Adhésive. (b) Cohésive.

VII.2.2 Evaluation de la Résistance d'adhérence par fendage

L'essai de traction indirecte par fendage est un paramètre fortement représentatif pour estimer un échec de réparation à base de ciment. Cette méthode est plus valide que d'autres. Elle présente des résultats plus cohérents [Momayez 2005 ; Espeche 2011]. L'essai est appliqué dans le but d'évaluer la résistance d'adhérence entre les deux bétons des éprouvettes composites (le béton de réparation et le béton du substrat).

L'essai de fendage a été appliqué sur des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) cylindriques de $(10 \times 20) \text{cm}^2$, qui ont deux types d'orientation de plan d'interface. Dans le premier type (Variante A) la surface d'interface de l'éprouvette composite est parallèle à son axe longitudinal. Par contre, dans le deuxième type (Variante B), la surface d'interface de l'éprouvette composite est parallèle à son axe transversal, (Voir Chapitre V).

La préparation de la surface du substrat de chaque variante va subir une combinaison de deux paramètres (trois types d'humidité et deux types de rugosité) selon douze préparations différentes (FigureVII.2).



FigureVII.2 : Les douze combinaisons de la préparation de la surface des substrats.

SSS : Surface Superficiellement Sèche

SSH : Surface Superficiellement Humide

SS : Surface Sèche

Les résultats de la résistance d'adhérence considérée sont la moyenne de trois à quatre éprouvettes, de chaque réparation par essai.

VII.2.3 La résistance d'adhérence de la variante A (Interface Longitudinale)

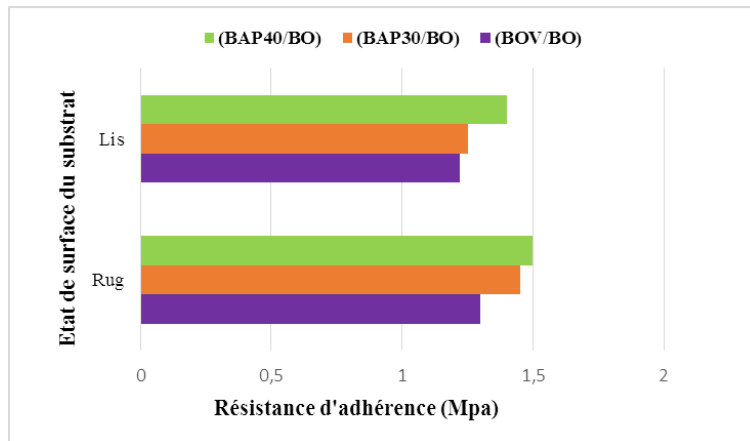
Les résistances d'adhérence par fendage sont présentées au TableauVII.1, pour chaque composite (Réparation/Substrat).

TableauVII.1 : Résistance d'adhérence par fendage de la variante A.

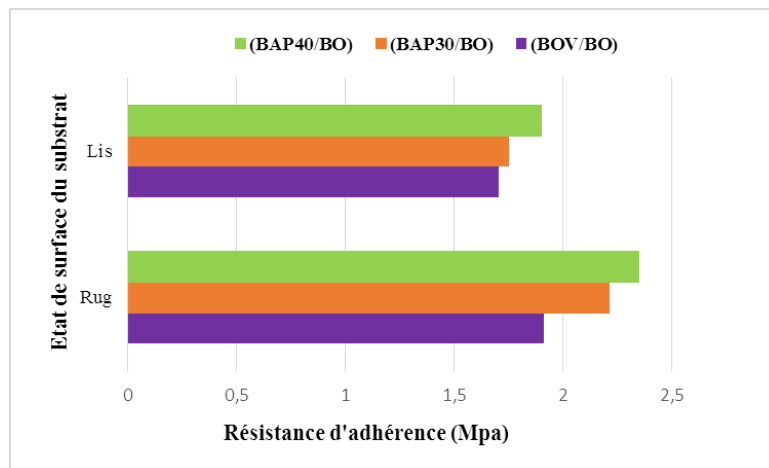
Etat de surface du substrat		Bétons de Réparation Rd (MPa)		
Rugosité	Humidité	(BOV/BO)	(BAP30/BO)	(BAP40/BO)
Rugueuse	SS	1,30	1,45	1,50
	SSS	1,91	2,21	2,35
	SSH	1,82	1,95	1,95
Lisse	SS	1,22	1,25	1,40
	SSS	1,70	1,75	1,90
	SSH	1,31	1,40	1,45

VII.2.3.1 Effet de la rugosité de la surface du substrat sur l'adhérence

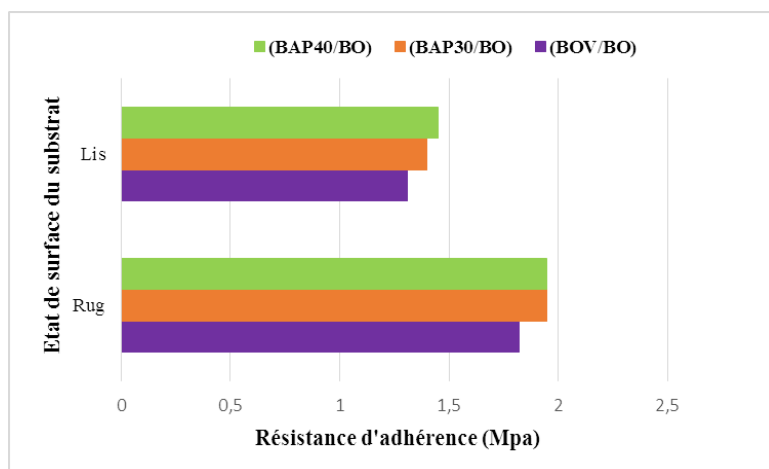
Les FigureVII.3 à VII.5, présentent les résistances d'adhérence pour les différentes rugosités pour chaque état d'humidité de la surface du substrat.



FigureVII.3 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SS).



FigureVII.4 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSS)



FigureVII.5 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSH)

Les résultats obtenus (FigureVII.3) montrent que dans le cas des substrats sèches (SS), l'application des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur des substrats rugueux améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO), de 6%, 14%, et 7% par rapport au cas où ces bétons de réparation sont appliqués sur des substrats à surface lisse.

La FigureVII.4 indique que, dans le cas des substrats saturés sèches (SSS), les valeurs de résistance d'adhérence des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) obtenues, enregistrent une augmentation de 11%, 21%, et 20% respectivement, sur des substrats rugueux par rapport aux valeurs obtenues sur des substrats à surface lisse.

Dans le cas des substrats saturés humides (SSH) (FigureVII.5), l'application des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur des substrats rugueux améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 28%, 28,5%, et 25,6% par rapport au cas où ces bétons de réparation sont appliqués sur des substrats à surface lisse.

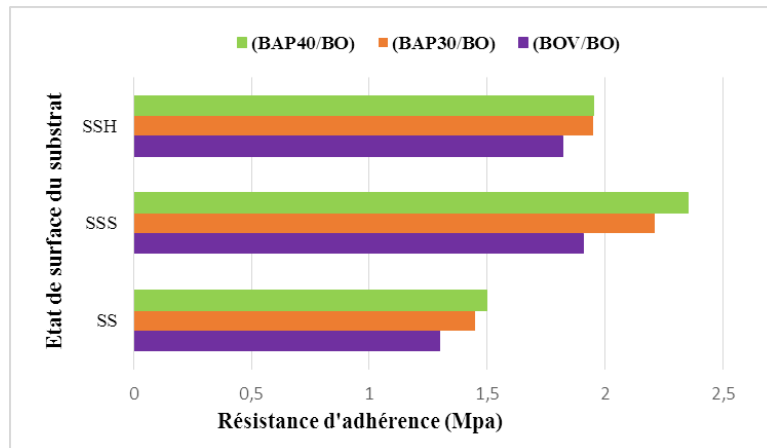
Les résultats présentés sur les histogrammes ci-dessus (FigureVII.3 à VII.5) montrent que la réparation appliquée sur une surface du substrat rugueuse donne les meilleures résistances par rapport au cas où elle est appliquée sur une surface du substrat lisse, quel que soit l'état d'humidité du substrat et quel que soit le type de béton de réparation utilisé.

L'utilisation des matériaux cimentaires sur des substrats rugueux offrent une très bonne adhérence avec les bétons de réparation. Ce résultat est confirmé par plusieurs chercheurs : [Delatte et al 2001 ; Abu et al 2000 ; Matana et al 2005 ; Beushausen et al 2006 ; Toutandji et al 2001]. D'autre part Benhadji [Benhadji 2007] a constaté que les (BAP_s) doivent être appliqués sur des substrats rugueux afin d'assurer une réparation efficace.

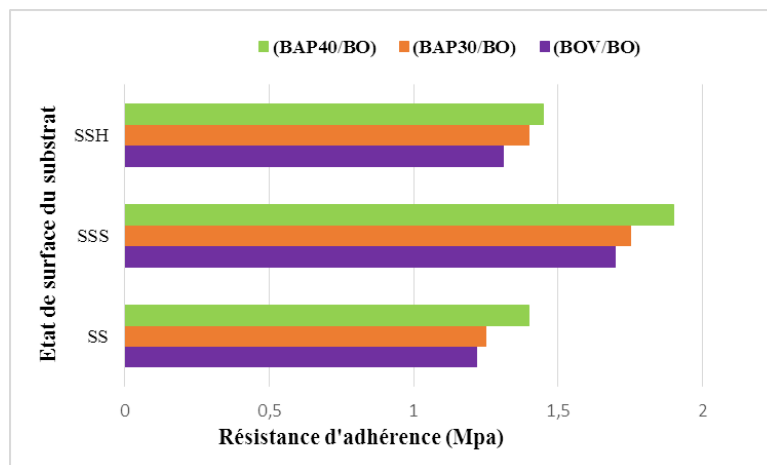
Ceci signifie que la surface rugueuse d'un substrat lui permet de s'accrocher à la pâte du nouveau matériau. Cet accrochement crée, ainsi, des blocages mécaniques qui favorisent l'ancrage de la réparation à son substrat. [Cleland 1997] et [Yuan et al 1994] ont lié de leur côté l'amplitude des forces d'adhérence à la rugosité de la surface des supports.

VII.2.3.2 Effet de l'état d'humidité de la surface du substrat sur l'adhérence

Les histogrammes FigureVII.6 et FigureVII.7, présentent les résistances d'adhérence pour les différents états d'humidité pour chaque niveau de rugosité.



FigureVII.6 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat rugueuse.



FigureVII.7 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat lisse.

D'après la FigureVII.6, les bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) appliqués sur la surface rugueuse du substrat saturée superficiellement, sèche (SSS) améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 4,80%, 11,8%, et 17% par rapport à un état de surface saturée superficiellement humide (SSH).

La FigureVII.7, montre que les composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) ayant une surface du substrat lisse, saturée superficiellement

sèche (SSS) enregistrent une amélioration de résistance d'adhérence de 23%, 20%, et 24% respectivement par rapport à un état de surface saturée superficiellement humide (SSH).

Cette amélioration est le résultat de l'absence de la pellicule d'eau sur le substrat à surface saturée superficiellement sèche (SSS). Un substrat humide en surface provoque une stagnation d'eau qui peut jouer un rôle d'écran dans la zone d'interface et empêcher par voie de conséquence l'interpénétration des hydrates dans la microrugosité de l'ancien béton. Des résultats similaires par des réparations appliquées sur des surfaces avec eau stagnée, ont été constatés par Courard [Courard 2000].

Dans le même contexte, dans le cas de la surface du substrat rugueuse la réparation par les bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40), sur une surface sèche (SS) réduit respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 32%, 34,4%, et 36,2% par rapport à un état de surface saturée superficiellement sèche (SSS).

Dans le cas de la surface du substrat lisse, l'application respective des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur une surface sèche (SS) réduit respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 28,3%, 28,6%, et 26,3% par rapport à un état de surface saturée superficiellement sèche (SSS).

Ces résultats montrent que les substrats ont une surface trop sèche (SS) qui réduit le rapport E/C du matériau de réparation. Cette réduction est due à l'absorption du substrat sec d'une partie de la teneur en eau contenue dans le béton de réparation, encore frais. Par conséquent l'hydratation du ciment sera incomplète ce qui affaiblit sa résistance.

VII.2.4 La résistance d'adhérence de la variante B (Interface Transversale)

Le Tableau VII.2, récapitule les résistances d'adhérence par fendage pour chaque composite (Réparation/Substrat).

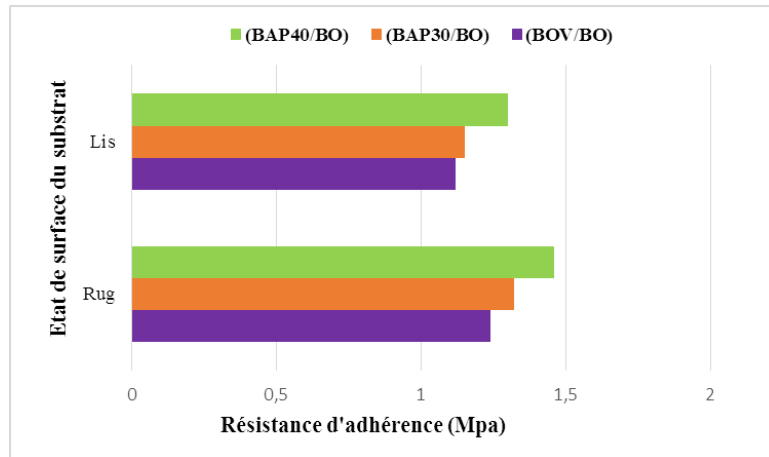
Les meilleures valeurs de la résistance d'adhérence ont été enregistrées par les composites ayant un état d'humidité (SSS) et une surface du substrat rugueuse.

TableauVII.2 : Résistance d'adhérence par fendage de la variante B.

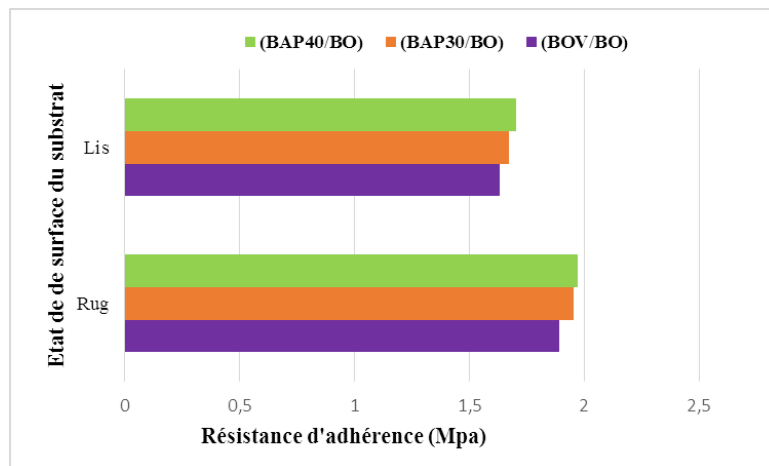
Etat de surface du substrat		Bétons de Réparation Rd (MPa)		
Rugosité	Humidité	(BOV/BO)	(BAP30/BO)	(BAP40/BO)
Rugueuse	SS	1,24	1,32	1,46
	SSS	1,89	1,95	1,97
	SSH	1,80	1,80	1,85
Lisse	SS	1,12	1,15	1,30
	SSS	1,63	1,67	1,70
	SSH	1,27	1,30	1,36

VII.2.4.1 Effet de la rugosité de la surface du substrat sur l'adhérence

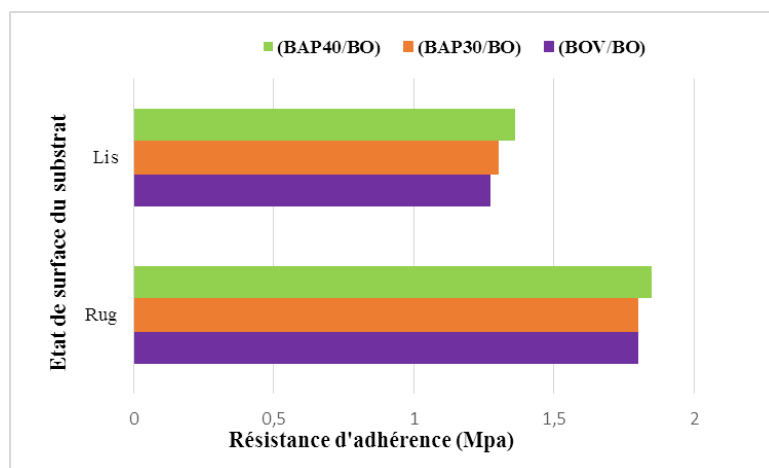
Pour mieux faire ressortir l'impact de la texture de la surface, nous avons présenté les résistances d'adhérence sur les histogrammes FigureVII.8 à VII.10 pour les différentes rugosités pour chaque état d'humidité de la surface du substrat.



FigureVII.8 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SS).



FigureVII.9 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSS).



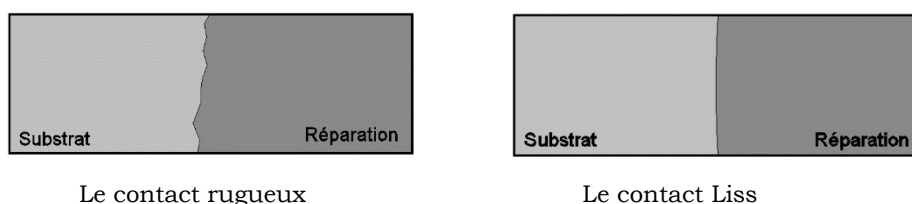
FigureVII.10 : Effet de la rugosité sur l'adhérence à l'état d'humidité(SSH).

Les résultats obtenus (FigureVII.8) montrent que dans le cas des substrats sèches (SS), l'application des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur des substrats rugueux améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO), résultants de 9,7%, 13%, et 11% par rapport au cas où ces bétons de réparation sont appliqués sur des substrats à surface lisse.

La (FigureVII.9), montre que dans le cas des substrats saturés sèches (SSS), les valeurs de résistance d'adhérence des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) obtenues, enregistrent une augmentation de 13,8%, 14,5%, et 13,7% respectivement, sur des substrats rugueux par rapport aux valeurs obtenues sur des substrats à surface lisse.

Dans le cas des substrats saturés humide (SSH) (FigureVII.10), l'application des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur des substrats rugueux améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 29,5%, 27,8%, et 26,5% par rapport au cas où ces bétons de réparation sont appliqués sur des substrats à surface lisse.

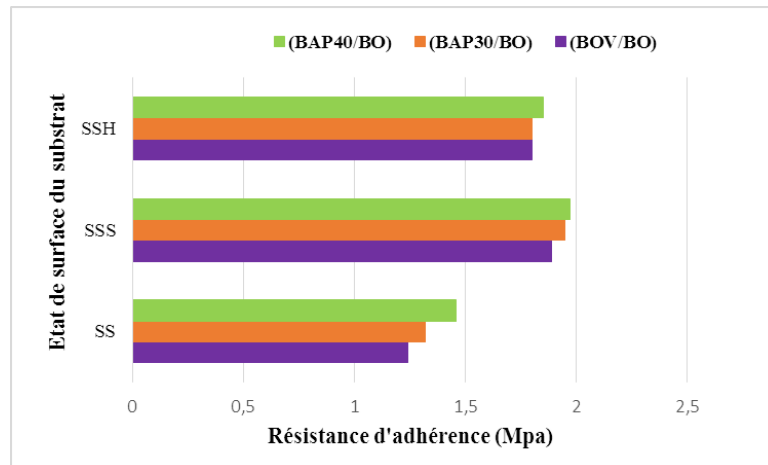
On observe que la rugosité du substrat augmente la résistance d'adhérence de tous les composites (Réparation/BO). En effet, dans beaucoup d'études [Julio 2004 ; Momayez 2005], l'augmentation de la rugosité d'une surface conduit à une augmentation de la surface de contact, ce qui devrait favoriser l'adhérence et la liaison (FigureVII.11).



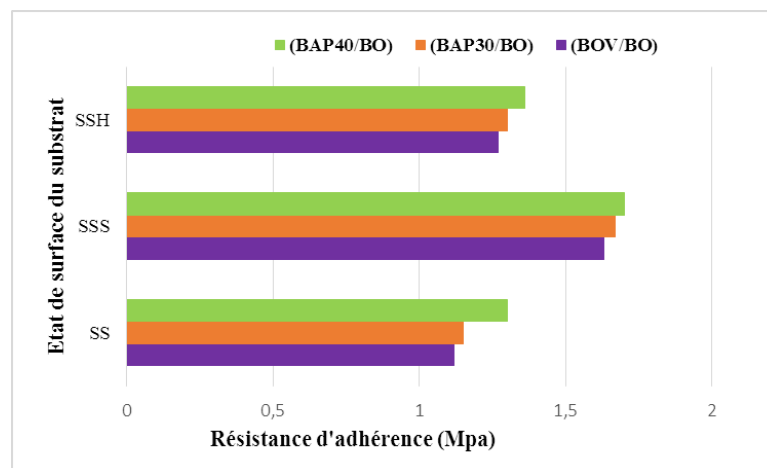
FigureVII.11 : Le contact entre la réparation et le substrat (rugueux, liss).

VII.2.4.2 Effet de l'état d'humidité de la surface du substrat sur l'adhérence

Les histogrammes FigureVII.12 et FigureVII.13 présentent les résistances d'adhérence pour les différents états d'humidité pour chaque niveau de rugosité.



FigureVII.12 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat rugueuse.



FigureVII.13 : Effet de l'état d'humidité sur l'adhérence de la surface du substrat lisse.

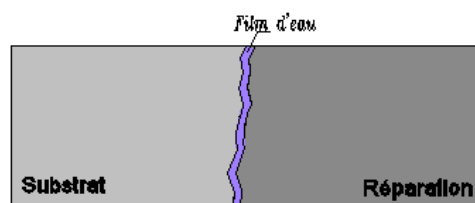
Selon les FigureVII.12 et FigureVII.13, dans le cas de la surface du substrat rugueuse, l'application respective des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40), sur la surface saturée superficiellement sèche (SSS) améliore respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO), résultants de 4,80%, 7,8%, et 6,1% par rapport à un état de surface saturée superficiellement humide (SSH) et les composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) ayant une surface du substrat lisse, saturée superficiellement sèche (SSS) enregistrent une amélioration de résistance d'adhérence de 22,1%, 22,2%, et 20% respectivement par rapport à un état de surface saturée superficiellement humide (SSH).

Dans le même contexte, dans le cas de la surface du substrat rugueuse la réparation par les bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40), sur une surface sèche (SS) réduit respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 34,4%, 32,3%, et 25,9% par rapport à un état de surface saturée superficiellement sèche (SSS).

Dans le cas de la surface du substrat lisse, l'application respective des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) sur une surface sèche (SS) réduit respectivement la résistance d'adhérence des composites (Réparation/BO) de 31,3%, 31,15%, et 23,6% par rapport à un état de surface saturée superficiellement sèche (SSS).

Ces résultats montrent que la partie du béton de réparation appliquée (BOV), (BAP30) et (BAP40), qui est en contact avec la surface saturée superficiellement sèche (SSS) est plus fluide grâce à une augmentation localisée du rapport E/C, ce qui devrait favoriser le contact avec la surface du substrat et permettre d'obtenir une meilleure adhérence.

Par ailleurs, l'eau en excès reste à l'interface, ce qui limite le contact entre les deux bétons (Réparation/Substrat). C'est ce que l'on a constaté à l'état de surface du substrat saturée superficiellement humide (SSH).



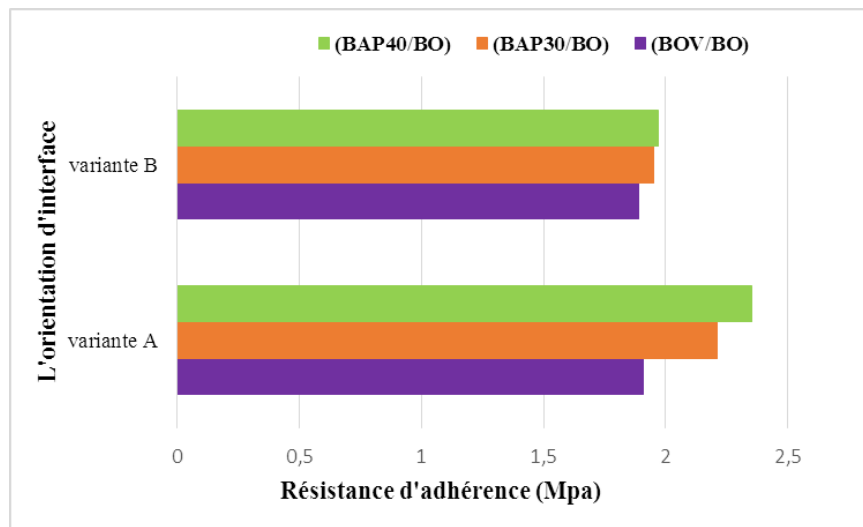
FigureVII.14 : Formation d'un écran d'eau à l'interface de la surface du substrat (SSH).

L'analyse des résultats de la résistance d'adhérence obtenus par l'essai de fendage sur des composites (Réparation/Substrat), dénote que la réparation doit être appliquée sur une surface du substrat rugueuse et saturé d'eau avec une surface superficiellement sèche (SSS). Donc, il a été décidé d'adopter dans le reste de cette étude une texture du substrat rugueuse et une surface saturé superficiellement sèche (SSS), pour les composites (Réparation/Substrat).

VII.2.5 Influence de l'orientation d'interface sur l'adhérence

L'orientation de l'interface, peut avoir un effet sur la résistance d'adhérence et sur le mode de rupture.

La FigureVII.15, illustre une comparaison entre l'orientation d'interface longitudinale (variante A) et transversale (variante B) des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) et l'état des surfaces des substrats rugueuses et d'humidité (SSS).



FigureVII.15 : Comparaison de l'orientation d'interface sur l'adhérence.

L'histogramme (FigureVII.15) , montre les valeurs des résistances d'adhérence obtenues à partir d'un essai de fendage. Les résistances obtenues sont peu importantes pour les composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) de la (variante B) par rapport à celles de la (variante A). Les résultats de l'effet de l'orientation de l'interface sur la résistance de liaison, sont en accord avec les résultats de [Julio 2004 ; Momayez 2005].

En outre, le mode de rupture résultant de cet essai de fendage est également différent pour les deux variantes.



Mode1



Mode2

FigureVII.16 : Modes de rupture des éprouvettes composites.

En effet, une rupture adhésive : est une rupture qui a lieu à l'interface entre la réparation et le substrat. En revanche, une rupture cohésive : est une rupture qui n'a pas lieu à l'interface entre les deux bétons, mais qui peut avoir lieu, soit dans la réparation, soit dans le substrat.

Une séparation parfaite qui se produit entre le matériau de réparation et le substrat donne une réparation non réussie, sachant que l'interface (zone de transition) entre le matériau de réparation et le béton du substrat est l'endroit le plus faible dans l'éprouvette composite. Par contre, dans une rupture due à l'écrasement du matériau de réparation, l'écrasement du substrat ou une combinaison des deux, indique un succès de réparation, où l'articulation (zone de transition) entre le matériau de réparation et le béton du substrat ne présente pas une zone faible dans l'éprouvette [Guo et al 2020].

Il a été remarqué (FigureVII.16), des ruptures sous forme d'une séparation parfaite entre les deux bétons (mode 2). Ce mode s'est manifesté dans les composites, dont l'orientation d'interface est transversale (variante B). Il se rencontre dans trois à quatre cas sur quatre pour chaque réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40). Cet échec est dû à l'insuffisance de la surface de réparation sur les substrats. Il se produit une liaison moins importante.

Par contre, le mode (1) est rencontré dans le cas des composites, ayant l'orientation d'interface longitudinale (variante A). Ce mode est le plus dominant pour les deux types de réparation (BAP30) et (BAP40) où, on enregistre trois à quatre cas sur quatre pour chaque réparation.

Généralement, l'adhérence entre la réparation et le substrat est forte pour les composites (variante A) par rapport à ceux de la (variante B). Ces résultats sont probablement dus à l'orientation de l'interface qui peut être prise en compte comme l'un des paramètres les plus importants pour assurer une parfaite liaison entre le substrat et la réparation.

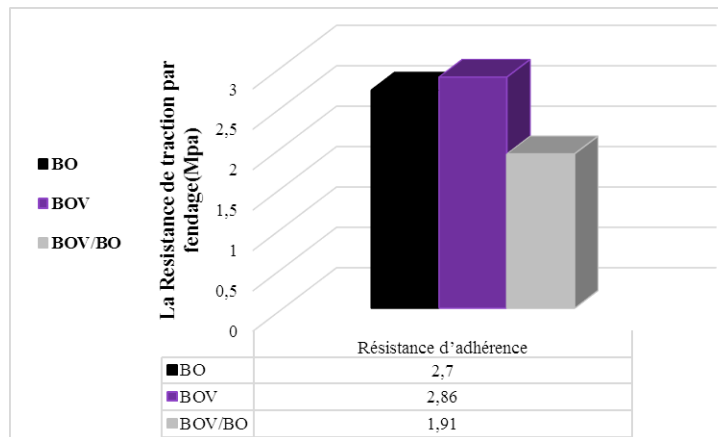
VII.2.6 Influence du type du béton de réparation sur l'adhérence

L'étude de l'influence du type du béton de réparation est entamée après avoir constaté que la réparation doit être appliquée sur un substrat rugueux et saturé d'eau avec une surface superficiellement sèche (SSS). Les valeurs de

la résistance d'adhérence pour chaque composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO) sont présentées sur Les FigureVII.17 à VII.19 respectivement.

1) Composites (BOV/BO)

La FigureVII.17, présente les résistances d'adhérence par fendage des (BO), (BOV) et le composite (BOV/BO).

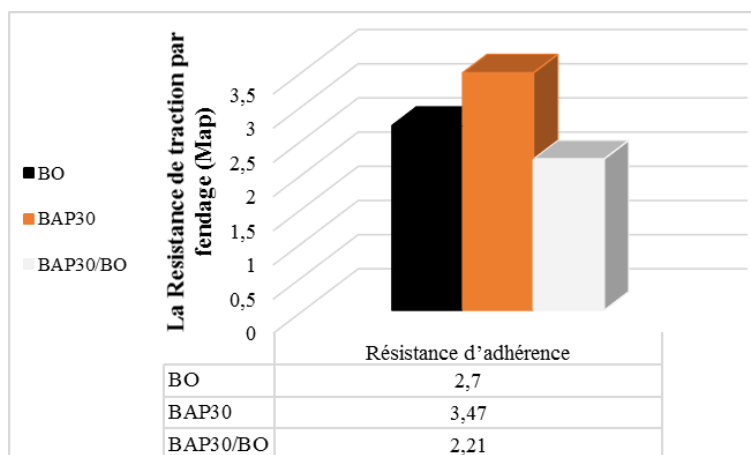


FigureVII.17 : Résistance d'adhérence des BO, BOV et (BOV/BO).

La FigureVII.17, présente la résistance d'adhérence du (BOV/BO) ainsi que celles des bétons (BOV) et (BO). La résistance d'adhérence du (BOV/BO) représente 70,74% de la résistance à l'adhérence du béton du substrat(BO).

2) Composites (BAP30/BO)

La FigureVII.18, présente les résistances d'adhérence des BO, BAP30 ainsi que la résistance obtenue par le composite (BAP30/BO).

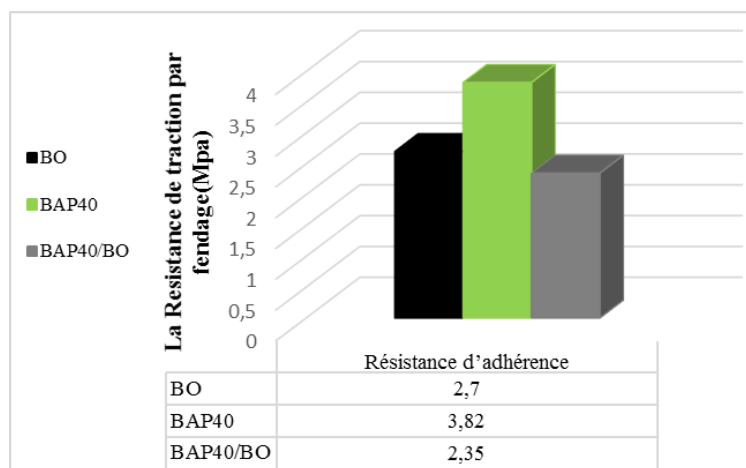


FigureVII.18 : Résistance d'adhérence des BO, BAP30 et (BAP30/BO).

Selon les résultats présentés à la FigureVII.18, la résistance d'adhérence du (BAP30/BO) affiche une valeur de 82% de la résistance d'adhérence du béton du substrat(BO). Autrement dit, la résistance du composite (BAP30/BO) est légèrement au-dessous de la valeur de résistance du (BO) obtenue après 28 jours.

3) Composites (BAP40/BO)

La FigureVII.19, illustre les résistances d'adhérence des (BO) ,(BAP40) et du composite (BAP40/BO).



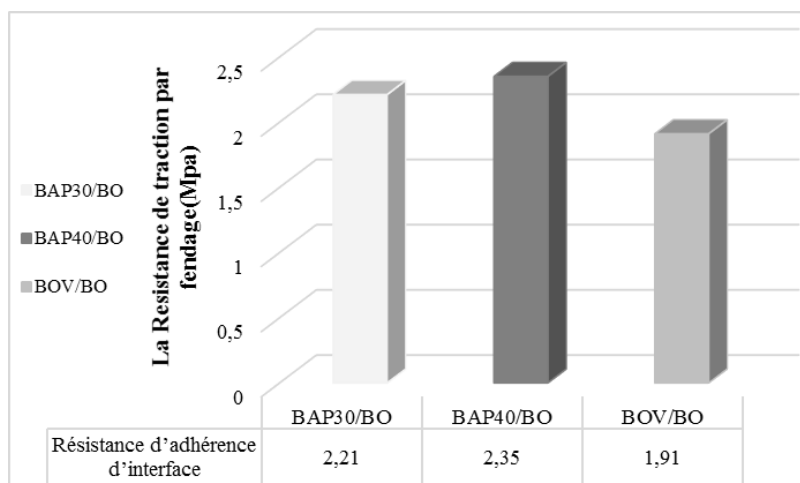
FigureVII.19 : Résistance d'adhérence des BO, BAP40 et (BAP40/BO).

Selon les résultats présentés dans la FigureVII.19, la résistance d'adhérence du (BAP40/BO) affiche une valeur de 87% de la résistance d'adhérence du béton du substrat(BO). Par ailleurs, la résistance de liaison du composite (BAP40/BO) n'atteint pas la valeur de la résistance à la traction du substrat(BO).

VII.2.7 Comparaison de l'adhérence d'interface des différents bétons de réparation

Les composites qui ont donné des résistances importantes ont présenté une bonne adhérence.

La FigureVII.20, illustre une comparaison des résistances d'adhérence par fendage obtenues pour les différents composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO).



FigureVII.20 : Résistance d'adhérence des (BOV/BO),(BAP30/BO)et (BAP40/BO).

L'histogramme (FigureVII.20), montre que les résistances d'adhérence d'interface du (BAP40/BO) et de (BAP30/BO) ont une augmentation de 23% et 15,7% respectivement par rapport au (BOV/BO).

Les réparations par le (BAP30) et le (BAP40) présentent des valeurs d'adhérence acceptables. Les (BAPs) ont bien contribué à la liaison. Lukovic [Lukovic 2012] a rapporté que l'amélioration d'hydratation du ciment avec la présence des fines de filler calcaire (FC) est censée réduire la porosité et augmenter la micro-dureté dans la zone d'interface.

La meilleure adhérence du (BAP40) est due aussi à sa maniabilité, qui contribue à la propagation rapide du matériau de réparation, En plus le (BAP40) a une capacité à s'étaler sur la surface du substrat plus que celle du (BAP30). C'est ce que Courard définit comme la mouillabilité du matériau [Courard 1998, 2000]. Pour lui le matériau doit avoir une bonne mouillabilité, c'est-à-dire capable de s'étaler totalement sur la surface du substrat, pour assurer une adhérence maximale avec ce substrat.

La FigureVII.21 montre les modes de rupture au fendage, des composites (BOV/BO) présentant des ruptures adhésives (a) avec un décollement à l'interface. C'est le cas le plus dominant. Concernant les composites

(BAP30/BO) et (BAP40/BO), il a été remarqué dans la majorité des cas une rupture cohésive(b).

L'obtention d'une rupture cohésive par rapport à une rupture adhésive caractérise une bonne adhérence entre les deux parties du composite (Substrat-Réparation). En outre, elle indique une réparation plus réussie, dans laquelle les performances monolithiques sont obtenues entre la réparation et le béton du substrat.

D'autre part, le béton autoplaçant (BAP) manifeste une compatibilité satisfaisante avec le substrat. D'après [Courard 1998], si la rupture se produit le long de l'interface du matériau de réparation et du substrat, il s'agit d'une rupture incompatible (d'adhésion). Par contre, si le béton de réparation et le béton de substrat sont compatibles, la rupture résultante est de cohésion et est considérée comme compatible.

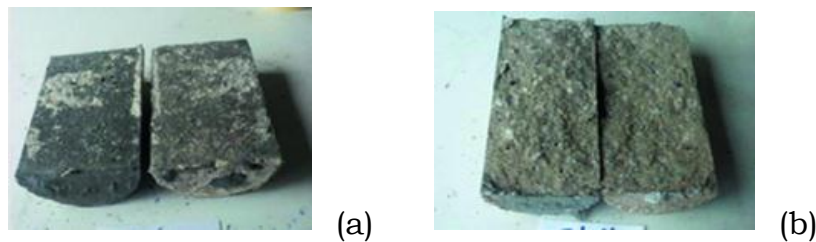


Figure VII.21 : Modes de rupture des (BOV/BO),(BAP30/BO)et (BAP40/BO).

VII.2.7.1 Confrontation avec les travaux antérieurs

La norme européenne de la réparation [EN1504-3 2006], indique que la résistance de liaison (adhérence) doit être d'au moins 2MPa dans le cas d'une réparation structurelle et 1MPa pour les réparations non structurelles. L'évaluation de la qualité de liaison ou d'adhérence est déterminée selon la classification proposée par [Sprinkel et Ozyildirim 2000] et utilisée par [Tayeh et al 2013].

Le TableauVII.3 récapitule l'évaluation des résistances d'adhérence de chaque composite (Réparation/Substrat) selon [Sprinkel et Ozyildirim 2000].

TableauVII.3 : Evaluation de la qualité d'adhérence selon Sprinkel et Ozyildirim.

Qualité de liaison (Mpa) Selon Sprinkel et Ozyildirim		Evaluation des résistances d'adhérence		
		(BOV/BO)	(BAP30/BO)	(BAP40/BO)
Excellente	≥2,1	/	2,21	2,35
Très bonne	1,7-2,1	1,91	/	/
Bonne	1,4-1,7	/	/	/
Passable	0,7-1,4	/	/	/
Mauvaise	0,0-0,7	/	/	/

Les résultats obtenus sont présentés dans le TableauVII.3, paraissent acceptables étant donné que la résistance d'adhérence est comprise dans l'intervalle [1,91-2,35] Mpa. Une excellente qualité d'adhérence est obtenue par le (BAP40/BO) et le (BAP30/BO) et une très bonne adhérence par le (BOV/BO) selon les recommandations de certains auteurs [Sprinkel et Ozyildirim 2000].

Comme nous l'avons vu précédemment les propriétés rhéologiques sont différentes entre le (BOV) et les (BAPs). Les (BAPs) ont un bon étalement sur la surface du substrat que le (BOV). Le (BAP) s'étale sous l'effet de l'eau alors que le (BOV) s'affaisse sous son poids. Le (BAP) s'étale totalement sur la surface du substrat, alors que, le (BOV) ne s'étale que partiellement laissant alors des vides dans l'interface (Substrat-Réparation).

[Theriault et Neale 2000] rapportent que l'adhérence est liée aux forces d'adhésion qui sont développées au cours du processus de l'hydratation et qui deviennent plus importantes avec l'utilisation du filler calcaire (FC), qui peut être attribué à l'amélioration de la microstructure spécialement au niveau de la zone de transition à l'interface entre le béton de réparation et le substrat. D'après [Benyahia 2017] l'amélioration de la microstructure n'est pas seulement régie par l'activité pouzzolanique, mais aussi par la capacité des particules du filler calcaire (FC) plus fines à combler les espaces entre les particules de ciment, entraînant une augmentation significative de la force intermoléculaire et du verrouillage mécanique.

Donc les résultats d'adhérence et la qualité de liaison par les bétons autoplaçants (BAP30) et (BAP40) destinés à la réparation sont meilleurs, en comparaison avec celles du (BOV).

VII.3 Etude de la compatibilité déformationnelle

L'étude de Cette deuxième partie de ce chapitre met en évidence la compatibilité déformationnelle entre les deux matériaux (Substrat-Réparation). Les éprouvettes utilisées font l'objet de la phase III du programme expérimental.

Une bonne compatibilité déformationnelle entre le matériau de réparation et le substrat se définit comme un équilibre entre l'ensemble des propriétés du matériau de réparation et du substrat. Il est distingué dans cette étude que le module élastique et l'effet hydrique d'une réparation qui subit des variations dimensionnelles dues au retrait de séchage limite la durabilité de la réparation.

Les éprouvettes composites (Réparation/Substrat) (16x32)cm² utilisées dans cette partie ont une texture de substrat rugueuse, saturée d'eau avec une surface superficiellement sèche (SSS).

VII.3.1 Retrait

Un des facteurs pris en compte dans les conditions de compatibilité entre le produit de réparation et le substrat à réparer est le retrait. Une variation dimensionnelle importante due au retrait ayant lieu au cours de l'hydratation de la réparation, sera la cause du décollement de cette dernière [Saucier 1997 ; Emmons 1994 ; Normand 2005]. La différence entre l'évolution du retrait des deux parties du système réparé impactera la durabilité de la réparation, notamment l'adhérence dans le système. Les résultats obtenus dans la recherche récente de [Tran 2006] montrent que le phénomène de retrait de la réparation influence le mécanisme du décollement de l'interface (Substrat-Réparation).

Ainsi, les auteurs [Emmons 1994 ; Normand 2005] recommandent comme condition de compatibilité que le béton de réparation utilisé ait un retrait au

cours de l'hydratation moins important, ou égal à celui du substrat et surtout que ce retrait soit le plus faible. Cette recommandation peut être contestable puisque la réparation a généralement lieu sur un substrat âgé qui ne subit donc plus de variation dimensionnelle liée à l'hydratation. Le béton de réparation est celui concerné par ce phénomène de retrait.

Comme le montre les résultats d'évolution du retrait présentés au (Chapitre VI), les variations dimensionnelles dues au retrait de trois bétons de réparation sont sensiblement différentes, notamment lorsque on les compare à celle du béton du substrat(BO).

Généralement dès que la réparation est mise en place, celle-ci va subir des variations dimensionnelles dues au retrait lors du séchage du béton de réparation. Il est donc intéressant d'analyser ces comportements volumétriques différents, au séchage sur la fissuration de surface des réparations.

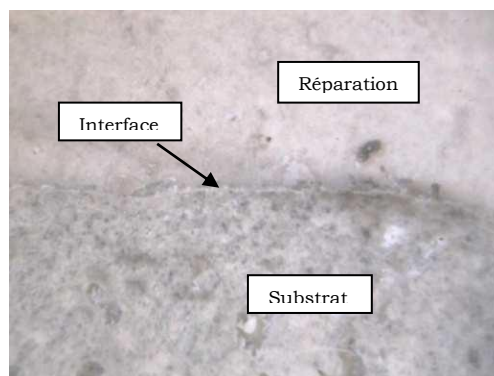
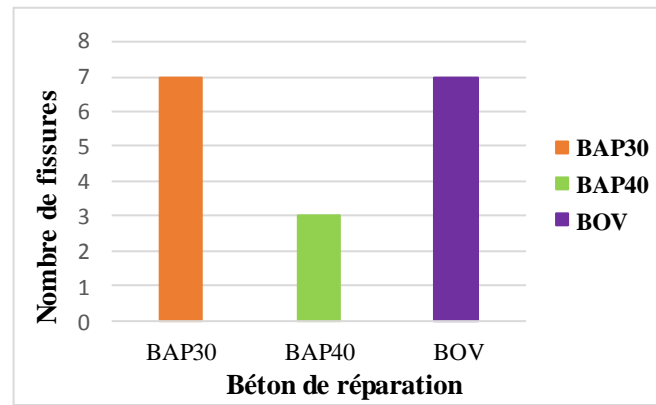


Figure VII. 22 : Une Observation de l'interface des composites.

VII.3.1.1 Apparition de la fissuration due au retrait

1) Influence de la nature du matériau de réparation

Après une analyse et observation visuelle, à l'aide de la lunette à grossissement, des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) de trois types de réparation, les fissurations visibles en surface de réparation sont quantifiées. Les résultats obtenus sont présentés dans la FigureVII.23 et sont des valeurs moyennes obtenues sur quatre éprouvettes pour chaque béton de réparation.



FigureVII.23 : Nombres des fissurations des bétons de réparation.

Après une analyse et une estimation des fissures sur la surface de réparation, il est constaté que le béton autoplaçant (BAP40) développe un réseau de fissure plus faible que ceux du béton ordinaire vibré (BOV) et du béton autoplaçant (BAP30).

Il est constaté d'autre part que le béton de réparation ayant une meilleure résistance à la traction, comme on l'a montré au (Chapitre VI), offre une bonne qualité de résistance à la fissuration, tel que le (BAP40).

Les travaux de Ghezal [Ghezal 2014] nous ont permis de constater que le matériau se déforme lorsque le champ des contraintes internes devient plus important que la résistance en traction.

2) Influence du retrait de séchage

Il est montré, malgré le mode de cure humide subi par les éprouvettes composites après le démoulage [Espeche 2011], La réparation va subir des variations dimensionnelles dues au retrait de séchage qui sont induites par le séchage global de matériau de réparation. Ces déformations lorsqu'elles sont empêchées par la présence d'un substrat, conduisent à la fissuration de la surface de matériau de réparation.

Les données et les résultats obtenus sont regroupés dans le TableauVII.4.

TableauVII.4 : Récapitulation retrait de séchage des bétons de réparation utilisés.

Bétons de Réparation	Valeur Max de retrait de séchage	Nombres des éprouvettes (Réparation/Substrat)	Nombres des fissures
(BOV)	207	4	7
(BAP30)	180	4	7
(BAP40)	110	4	3

Une compatibilité déformationnelle adéquate est obtenue par l'utilisation du béton autoplaçant, car le (BAP30) et le (BAP40) donnent des valeurs de retrait de séchage moins que le (BOV) avec le temps, du fait que les paramètres de formulation tels que la présence de fillers calcaires (FC) et le faible rapport E/C ont permis de raffiner la porosité capillaire et ainsi de rendre le matériau moins sensible au séchage. Ces derniers ont un effet significatif sur le comportement volumétrique du matériau et sur sa capacité d'adaptation par retrait. Le béton autoplaçant (BAP) pourrait se révéler un matériau mieux que le (BOV) sur le plan d'adaptation. Donc une réussite de formulation des (BAP30) et (BAP40) qui répond à l'exigence d'un matériau de réparation.

VII.3.2 Module d'élasticité

Les différences de modules d'élasticité mesurés sur les trois bétons de réparation indiquent à l'avance les différences de comportement mécanique entre les réparations réalisées avec chaque matériau. Le module d'élasticité du béton est en effet un paramètre important dans le contexte des réparations.

L'évaluation de la compatibilité déformationnelle entre les deux matériaux en contact, est effectué, par une analyse du comportement mécanique en compression des composites (Réparation/Substrat), de façon à suivre les variations dimensionnelles longitudinales, du couple (Substrat-Réparation) sous un chargement de compression et de comparer les deux comportements en parallèle. L'effort de compression est appliqué progressivement, jusqu'à l'apparition de la première fissure, soit sur le substrat ou la réparation et qui se traduit par l'arrêt de la machine.

Rappelons que cet essai est mené sur des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) cylindriques de $(16 \times 32) \text{cm}^2$.

Nous nous intéressons, tout d'abord, au comportement des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) soumises à la compression. Dans ce but, les grandeurs déterminées sont :

- ❖ Le comportement déformationnelle des bétons de réparation.
- ❖ La force d'initiation de fissuration d'interface.
- ❖ La comparaison de la capacité portante des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO).

Les résultats exposés représentent des valeurs moyennes obtenues sur trois éprouvettes pour chaque béton de réparation.

VII.3.2.1 Le comportement déformationnelle des bétons de réparation

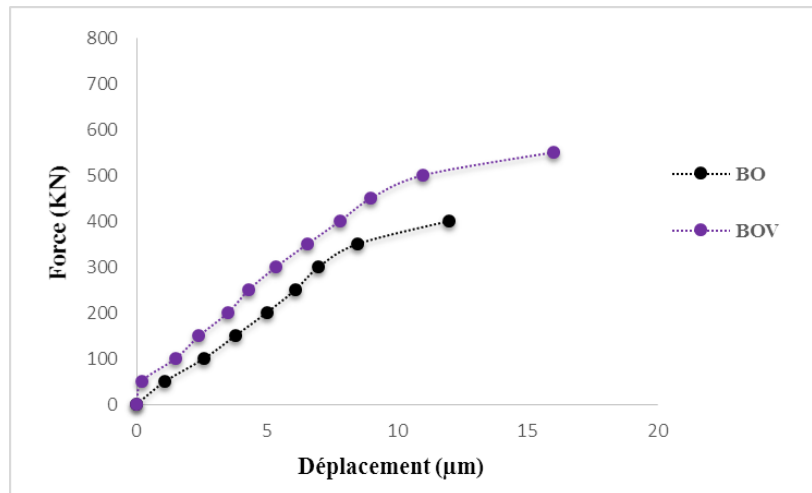
VII.3.2.1.1 Relation entre la force et le déplacement

Les courbes des Figures VII.24, VII.25, VII.26 présentent la relation entre la force de compression appliquée et le déplacement longitudinal obtenu sur les éprouvettes composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO).

Généralement, le comportement du béton en compression est quasiment élastique linéaire et isotrope.

Cette étape présente la phase pré-pic dans laquelle le comportement des bétons est élastique et la déformation résiduelle est nulle. Les seules fissures lisibles sont des microfissures généralement causées par le retrait mais non pas par la sollicitation mécanique [Aubrée 2014]. Néanmoins, l'apparition de microfissure commence dans la deuxième phase (au pic), où la déformation résiduelle longitudinale augmente [Molez 2003].

1) Composites (BOV/BO)



FigureVII.24 : Courbes force de compression – déplacement du composite (BOV/BO).

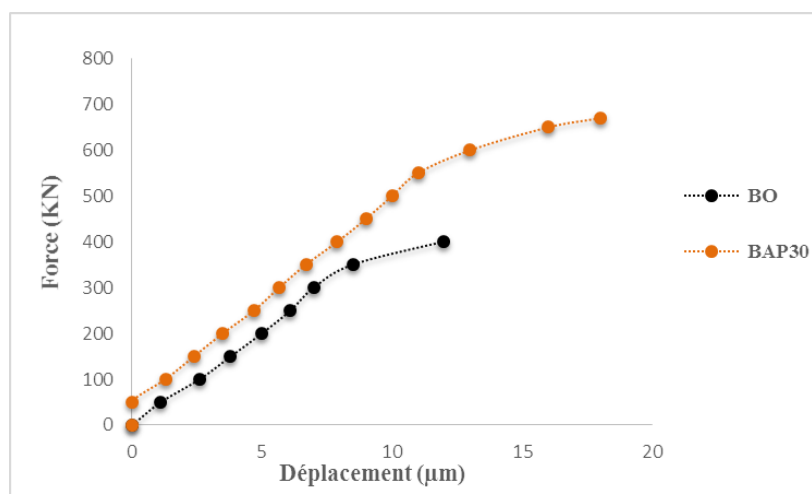
Les courbes force-déplacement (FigureVII.24) montrent le développement du déplacement longitudinal résultant de l'effort de compression appliqué aux composites (BOV/BO). Les deux bétons ont une allure similaire quasi linéaire, représentant un comportement élastique.

Au même niveau du chargement à 250KN, le (BO) affiche une valeur du déplacement de $6,1 \cdot 10^{-3} \text{mm}$, et le (BOV) affiche un déplacement de l'ordre de $4,9 \cdot 10^{-3} \text{mm}$. Le (BOV) présente une diminution de déformation de l'ordre de 19% par rapport à celle du (BO).

Par ailleurs, sous une force de rupture du (BO) de 390KN (pic), il se produit un déplacement de $12 \cdot 10^{-3} \text{mm}$ pour le (BO) et de $8,8 \cdot 10^{-3} \text{mm}$ pour le (BOV), donc une différence de 26% par rapport à celle du (BO).

Donc, une légère différence entre la progression du taux des déformations de (BOV) et (BO) est constatée.

2) Composites (BAP30/BO)



FigureVII.25 : Courbes force de compression – déplacement du composite (BAP30/BO).

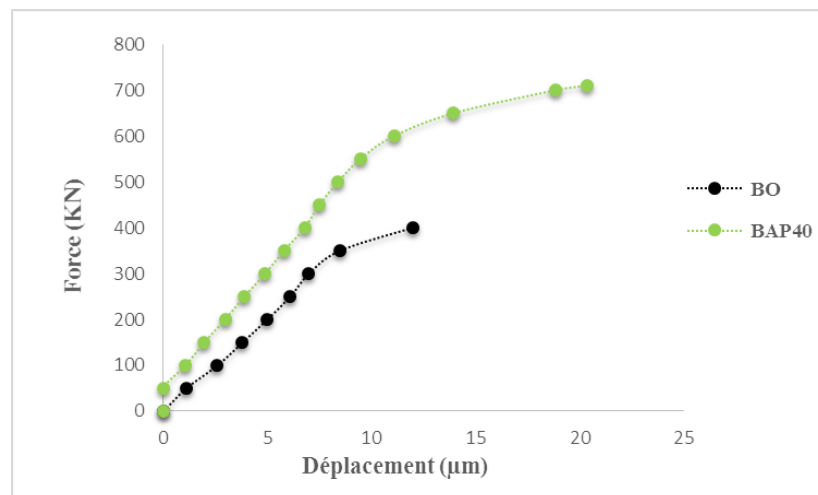
La FigureVII.25 présente les courbes force-déplacement du composite (BAP30/BO). Les deux bétons manifestent une allure qui commence par une partie linéaire, puis une seconde où la charge s'accroît, tandis que les déformations continuent à évoluer jusqu'à la rupture ; la phase pré-pic du (BAP30) est légèrement étendue que celle du (BO).

Comme il est montré sur la FigureVII.25 dans la phase pré-pic le (BO) à un déplacement de $6,1 \cdot 10^{-3}$ mm due à une force de l'ordre de 265kN, tandis que, le (BAP30) affiche une valeur du déplacement de l'ordre de $5,15 \cdot 10^{-3}$ mm pour la même force. Donc, une diminution de déformation de 15% par rapport à celle du (BO).

Ainsi sous une force de rupture du (BO) de 396kN (pic), il se produit un déplacement de $12 \cdot 10^{-3}$ mm pour le (BO) et de $9,2 \cdot 10^{-3}$ mm pour le (BAP30). Une différence de l'ordre de 23% entre la variation dimensionnelle des deux bétons (BAP30) et (BO) est enregistrée.

Il a été remarqué que le (BAP30) présente un comportement déformationnelle plus proche que celui du (BO). Ce qui est expliqué par le faible écart de la rigidité et du module élastique entre les deux bétons à savoir, le (BAP30) et le (BO) (Chapitre VI).

3) Composites (BAP40/BO)



FigureVII.26 : Courbes force de compression – déplacement du composite (BAP40/BO).

Les courbes force-déplacement (FigureVII.26) montrent le développement du déplacement longitudinal résultant de l'effort de compression appliqué aux composites (BAP40/BO). Les deux courbes sont caractérisées par une phase élastique puis une phase où la charge s'accroît, de même que les déformations, jusqu'à la rupture. La phase élastique du (BAP40) est plus étendue que celle du (BO).

Sous un effort de compression qui correspond à 265kN, dans la phase élastique, le (BO) affiche une valeur de déplacement de $6,1 \cdot 10^{-3} \text{mm}$, alors que pour la même force le (BAP40) donne une valeur de déplacement de $4,21 \cdot 10^{-3} \text{mm}$. Le (BAP40) présente une diminution de la variation dimensionnelle de l'ordre de 30% par rapport à celle du (BO).

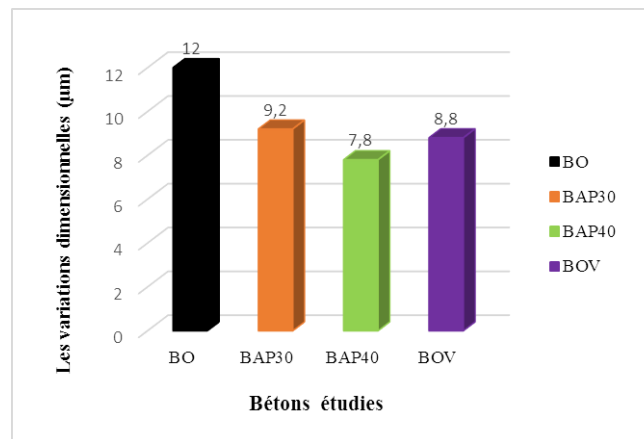
Par ailleurs, sous une force de rupture de 396kN (pic du (BO)), il se produit un déplacement de $12 \cdot 10^{-3} \text{mm}$ pour le (BO) et de $7,8 \cdot 10^{-3} \text{mm}$ pour le (BAP40). Donc une diminution de la variation dimensionnelle de l'ordre 35% par rapport à celle du (BO).

Un comportement déformationnelle légèrement faible du (BAP40) dans les deux phases est constaté par rapport à celui du (BO), en raison des valeurs moins importantes de rigidité et du module élastique du (BO) comparées à celles du (BAP40) (Chapitre VI). En effet, le module du béton est fonction du module du squelette granulaire et de la matrice cimentaire.

VII.3.2.1.2 Comparaison de la variation dimensionnelle des bétons de réparation

À partir des Figures VII.24, VII.25, VII.26 précédentes, il apparaît clairement qu'au pic du (BO), il se produit un déplacement de $12.10^{-3}m$, au moment où le déplacement atteint $8,8.10^{-3}mm$ pour le (BOV), de $9,2.10^{-3}mm$ pour le (BAP30) et de $7,8.10^{-3}mm$ pour le (BAP40).

La FigureVII.27 illustre les variations dimensionnelles des différents bétons au niveau du pic de (BO).



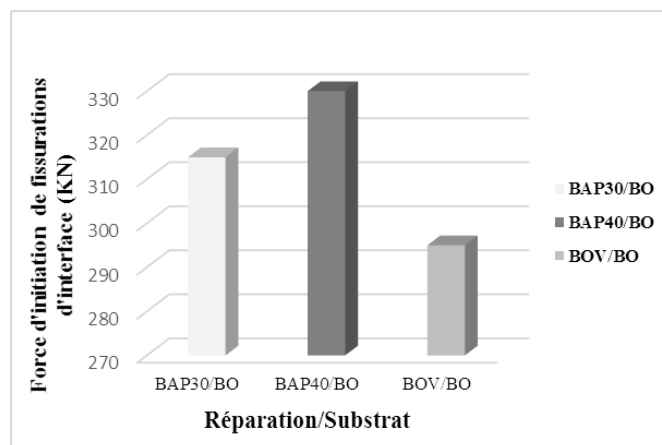
FigureVII.27 : Les variations dimensionnelles des différents bétons au niveau du pic de (BO).

Selon l'histogramme (FigureVII.27) le (BOV) et le (BAP30) ont une tendance de variation dimensionnelle proche de celle du (BO), à cause du faible écart entre la rigidité et le module élastique de (BOV) et du (BAP30) par rapport à celle du (BO). Donc une bonne compatibilité dimensionnelle entre le (BOV) et le (BO) et entre le (BAP30) et le (BO) est constatée. Une compatibilité adéquate entre le (BAP40) et le (BO) est remarquée. Laurence [Laurence 2001] rapporte que les paramètres de formulation des (BAPs) tels que, le pourcentage du squelette granulaire, la présence de fillers calcaires (FC) et le rapport E/C ont un effet significatif sur le comportement viscoélastique du matériau, par conséquent, ils conduisent à un faible taux de déformations par rapport au (BO).

VII.3.2.2 La force d'initiation de fissuration d'interface

Comme il a été mentionné précédemment, la réparation va être fissurée si les contraintes de traction due à l'augmentation de l'amplitude du retrait au niveau de la réparation dépassent la résistance en traction au niveau de cette dernière .D'autre part, sous l'action de chargement mécanique externe, la fissure se propage dans la réparation jusqu'à l'interface (Substrat-Réparation) et peut entraîner le décollement.

Les forces d'initiation de fissuration d'interface des éprouvettes composites (BOV/BO),(BAP30/BO)et (BAP40/BO) soumises un essai de chargement de compression sont regroupées dans la FigureVII.28. Ce sont des valeurs moyennes obtenues sur quatre éprouvettes pour chaque composite.



FigureVII.28 : Les forces d'initiation de fissuration d'interface des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO).

Les forces d'initiation de fissuration d'interface des éprouvettes composites sont de 295KN, et de 330KN ,315KN pour les composites (BOV/BO) (BAP40/BO) et (BAP30/BO) respectivement, En autre terme l'apparition de fissure d'interface des éprouvettes composites (BOV/BO) a été plus avancée par rapport aux éprouvettes composites (BAP30/BO) et (BAP40/BO).

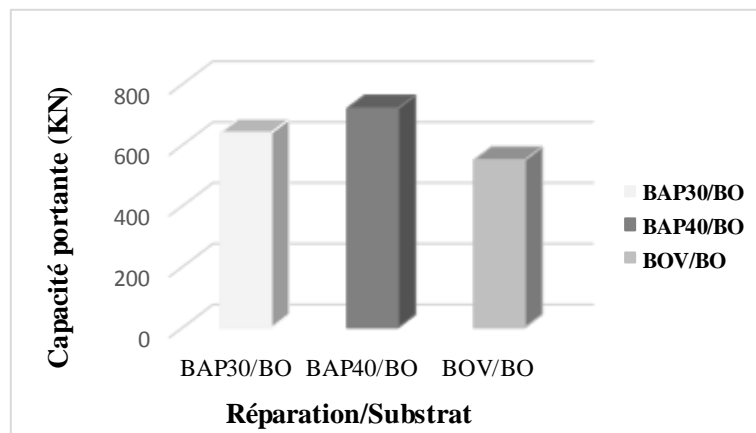
Ce qui est dû à la présence d'ajout de filler calcaire qui contribue à la densification de la zone de transition et permet de retarder significativement la propagation de la fissure à l'interface. Ce qui justifie les bons résultats d'adhérence obtenus pour le (BAP40) et le (BAP30).

Il a été remarqué que les fissurations d'interface des éprouvettes composites (BAP40/BO) ont été retardées par rapport à celles du (BAP30/BO).

[Ramtani 1990] a observé que les fissures verticales se propagent de façon lente et stable et le décollement de l'interface, s'initie dès que la fissure dans la réparation atteint le niveau de l'interface.

VII.3.2.3 Comparaison de la capacité portante des composites BOV/BO, BAP30/BO et BAP40/BO

Le pic pour des éprouvettes composites sous un chargement de compression (du point de vue capacité portante) est atteint pour une force de 550KN pour les composites (BOV/BO), pour une force de compression de 640KN et 720KN pour les composites (BAP30/BO) , (BAP40/BO) respectivement.



FigureVII.29 : Capacité portante des composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO).

L'histogramme ci-dessus (FigureVII.29), montre la capacité portante pour les composites (BOV/BO), (BAP30/BO) et (BAP40/BO). Les deux bétons autoplaçants (BAP30) et (BAP40) de réparation offrent au système réparé une augmentation de la capacité portante de 17% et 31% respectivement par rapport au (BOV). Ce résultat est dû à la rigidité supplémentaire apportée au béton autoplaçant (BAP), par le rôle bénéfique du squelette granulaire couplé à la matrice cimentaire.

VII.4 Conclusion

Ce chapitre permet de mettre en évidence la capacité d'adaptation et l'adhérence des bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40) au béton ordinaire du substrat (BO), en tenant compte d'une combinaison des deux principaux paramètres, qui sont la rugosité et l'état d'humidité de surface du substrat. Cette étude était présentée en deux phases :

1^{ère} phase : Evaluer et quantifier la résistance d'adhérence des composites (Réparation/Substrat) cylindriques de $(10 \times 20) \text{cm}^2$. Avec une constatation du mode de rupture produit, nous avons choisi l'essai de traction indirecte (fendage).

2^{ème} phase : Evaluation de la compatibilité déformationnelle entre (Substrat-Réparation), pour mieux comprendre la capacité d'adaptation entre les deux matériaux, à partir d'une analyse du comportement mécanique en compression des composites (Réparation/Substrat) cylindriques de $(16 \times 32) \text{cm}^2$. En fin une constatation d'une réponse des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) sous l'effet hydrique, d'un point de vue du retrait.

Les principaux résultats et observations se résument de la façon suivante :

- ❖ Les meilleures résistances d'adhérence par fendage ont été obtenues par les trois bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40), qui sont appliqués sur une surface du substrat rugueuse et saturée superficiellement sèche (SSS).
- ❖ L'état optimal de la surface du substrat rugueuse, saturée avec une surface superficiellement sèche (SSS) a été adoptée dans le reste de cette étude.
- ❖ Les composites ayant une interface parallèle à leur axe transversal (Variante B) ont présenté une rupture adhésive quel que soit le type du

béton de réparation. Une rupture cohésive apparaît dans le cas de la (Variante A) l'interface parallèle à leur axe longitudinal, pour le système a réparé par le (BAP30) et (BAP40).

- ❖ Une excellente qualité d'adhérence est obtenue par (BAP40) et (BAP30) et une très bonne adhérence par (BOV) (selon la classification de Sprinkel et Ozyildirim).
- ❖ Une réparation par le (BAP30) et le (BAP40) améliore les performances du système réparé par rapport au béton ordinaire vibré (BOV) de 15,7% et 23% respectivement. D'une part la présence de filler calcaire dans le (BAP) a un effet de remplissage et de densification, qui peut être attribué à l'amélioration de la microstructure au niveau de la zone de transition à l'interface entre le béton de réparation et le substrat. Et d'autre part, cette amélioration peut être attribuée à la pénétration du béton fluide des (BAPs) dans la microrugosité des substrats, ce qui assure par la suite le maximum de lien mécanique.
- ❖ Les composites (BOV/BO) ont présenté des ruptures adhésives, c'est le cas le plus dominant. Le mode de rupture cohésive et monolithique est présenté par les composites (BAP30/BO) et (BAP40/BO). Donc les (BAPs) se caractérise par une compatibilité satisfaisante avec le substrat(BO).
- ❖ Le béton de réparation qu'ait une meilleure résistance à la traction, tel que (BAP40), offre une bonne qualité de résistance à la fissuration.
- ❖ Le (BAP30) et (BAP40) donnent avec le temps des valeurs de retrait de séchage moins que le (BOV). Ce qui est signifié une bonne capacité d'adaptation des (BAPs) par retrait au béton du substrat (BO).
- ❖ Le (BOV) et le (BAP30) ont une tendance des variations dimensionnelles proches que le (BO), ce qui s'explique par le faible écart entre la rigidité et le module élastique du (BOV) et du (BAP30)

par rapport au (BO). Tandis que Le (BAP40) a présenté des valeurs des variations dimensionnelles légèrement faibles par rapport à celle du(BO), ce qui est expliqué par la différence de la rigidité et le module d'élasticité entre (BAP40) et (BO).

- ❖ La force d'initiation de fissuration d'interface des composites (BOV/BO) est de 295KN, et de 330KN-315KN pour les composites (BAP40/BO) et (BAP30/BO) respectivement, En autre terme l'apparition de fissure d'interface des composites (BOV/BO) a été plus avancée par rapport des composites (BAP30/BO) et (BAP40/BO). Ce qui justifie les bons résultats d'adhérence obtenues par le (BAP40) et (BAP30).
- ❖ Les (BAP30) et (BAP40) de réparation offrent au système réparé, une augmentation de 17% et 31% respectivement de la capacité portante par rapport au (BOV).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Une association d'un béton jeune avec un support (substrat) de béton plus ancien provoque divers types de problèmes, tant physico-chimiques que mécaniques. L'objectif principal de ce travail de recherche est de mettre en évidence d'une part la compatibilité entre les deux matériaux, en particulier la compatibilité dimensionnelle, et d'autre part la liaison entre le béton du substrat et celui de la réparation à base cimentaire.

Le facteur prépondérant pour l'obtention d'une bonne adhérence est essentiellement la préparation de la surface du substrat.

Un bon comportement mécanique d'un système réparé réside dans un choix adéquat du matériau de réparation qui permettra une conception plus durable de la réparation.

Il est question donc, de trouver dans un premier lieu un béton dont la formulation répond à l'exigence d'un matériau de réparation.

Nous avons opté, pour cela pour un béton à base cimentaire, en l'occurrence le béton autoplaçant vu les avantages qu'il présente à l'état frais, en tant que matériau de réparation : la stabilité, l'homogénéité, la déformabilité du fait qu'il suit parfaitement les formes des surfaces à réparer.

Le choix du béton de réparation constitue la première phase du programme expérimental qui consiste en :

- une identification des constituants choisis pour formuler les bétons de réparation et du substrat.
- une caractérisation des différentes propriétés des bétons obtenus (réparation- substrat).
- une caractérisation à l'état frais, en particulier celle des (BAPs) pour évaluer leur fluidité, leur ségrégation dynamique et statique et leur temps d'écoulement (essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de la boîte en L, essai de stabilité au tamis et essai V-funnel).
- une caractérisation à l'état durci incluant les propriétés mécaniques (la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité)

et les propriétés physiques (évolution des variations dimensionnelles dues au retrait).

Nous avons aussi, préparé dans cette phase, des éprouvettes de béton du substrat, qui seront utilisées dans la phase II et III.

Les résultats obtenus de cette phase sont les suivants :

- ❖ Les formulations des (BAPs) destinés à la réparation répondent convenablement aux recommandations relatives au béton frais, exigées par la réglementation [AFGC] : les (BAP30) et (BAP40) ont donné des bétons fluides avec une stabilité et une homogénéité convenables.
- ❖ Les résistances à la compression à 28 jours de tous les bétons formulés pour la réparation sont très proches des classes de résistance ciblées,
- ❖ Le (BAP40) a développé une rigidité plus élevée que le (BOV) et le (BAP30), ce qui s'explique par la rigidité supplémentaire apportée au matériau par les granulats qui sont couplés à une matrice cimentaire plus dense.
- ❖ Les variations dimensionnelles produites par le séchage pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) sont moins importantes que celles du béton ordinaire vibré (BOV). Inversement au retrait de séchage, les amplitudes de retrait endogène pour les deux formulations de béton autoplaçant (BAP30) et (BAP40) sont plus importantes que le béton ordinaire vibré(BOV).

La deuxième phase comporte la réparation d'un système représenté par des éprouvettes composites (Réparation/ Substrat) de (10x20)cm². L'adhérence entre la réparation appliquée et le substrat à réparer, et le mode de rupture produit sont étudiés et évalués à travers un essai de traction indirecte (fendage).

Les résultats constatés se résument dans ce qui suit :

- ❖ Les meilleures résistances d'adhérence par fendage ont été obtenues par les trois bétons de réparation (BOV), (BAP30) et (BAP40), qui sont appliqués sur une surface du substrat rugueuse, saturée superficiellement sèche (SSS) et sont respectivement (1,91Mpa-2,21Mpa-2, 35Mpa). Les substrats des surfaces rugueuses permettent de ce fait, d'assurer un meilleur accrochement mécanique avec le matériau de réparation et d'améliorer la résistance au glissement à l'interface par rapport aux surfaces lisses. D'autre part la surface saturée superficiellement sèche(SSS) (sans stagnation d'eau en surface) permet de garantir une bonne liaison avec la réparation.
- ❖ Les faibles résistances d'adhérence ont été estimées pour les cas des surfaces sèches(SS) et les surfaces saturées humides(SSH) : la surface sèche (SS) réduit l'eau contenue dans le matériau de réparation. Cette réduction est due à l'absorption du substrat sec d'une partie de la teneur en eau contenue dans le béton de réparation, encore frais. Par conséquent l'hydratation du ciment sera incomplète ce qui affaiblit sa résistance. Un substrat avec une surface humide(SSH) réduit son énergie d'adhésion par une stagnation d'eau qui peut jouer un rôle d'écran dans la zone d'interface.
- ❖ L'état optimal de la surface du substrat rugueuse, saturée avec une surface superficiellement sèche(SSS) a été adoptée dans le reste de cette étude.
- ❖ Quel que soit le type du béton de réparation, les composites (Réparation/Substrat) ayant une interface parallèle à leur axe transversale (Variante B) ont présenté une rupture adhésive ; cet échec est dû à l'insuffisance de la surface de la réparation sur les substrats. Il se produit dans ce cas une liaison moins importante. Une rupture cohésive apparaît dans le cas d'interface parallèle à l'axe longitudinale des composites (Variante A).

- ❖ Une excellente qualité d'adhérence est obtenue par le (BAP40) et le (BAP30) et une très bonne adhérence par le (BOV) (selon la classification de Sprinkel et Ozyildirim).
- ❖ Une réparation par le (BAP30) et le (BAP40) améliore les performances du système réparé par rapport au béton ordinaire vibré (BOV) de 15,7% et 23% respectivement. D'une part la présence de filler calcaire dans le (BAP) a un effet de remplissage et de densification, qui peut être attribué à l'amélioration de la microstructure au niveau de la zone de transition à l'interface entre le béton de réparation et le substrat. D'autre part, cette amélioration peut être attribuée à la pénétration du béton fluide des (BAPs) dans la microrugosité des substrats, ce qui assure par la suite le maximum de lien mécanique.

Le travail entrepris est achevé par la réparation d'un système représenté par des éprouvettes composites (Réparation/Substrat) de $(16 \times 32) \text{cm}^2$.

L'objectif de cette phase est de comprendre la capacité d'adaptation entre les deux matériaux (Substrat-Réparation).

Une évaluation de la compatibilité déformationnelle entre ces deux bétons à partir d'une analyse du comportement mécanique en compression des composites (Réparation/Substrat) est présentée, en plus d'une constatation de la réponse des composites (Réparation/Substrat) sous l'effet hydrique, du point de vue du retrait.

Les résultats dégagés de cette phase sont :

- ❖ Le (BAP30) et le (BAP40) donnent avec le temps des valeurs de retrait de séchage moins que le (BOV) . Ce qui signifie une bonne capacité d'adaptation des (BAPs) par retrait au béton du substrat (BO).
- ❖ Le (BOV) et le (BAP30) ont une tendance des variations dimensionnelles proches du (BO), ce qui s'explique par le faible écart entre la rigidité et le module élastique du (BOV) et du (BAP30) par rapport au (BO) alors que le (BAP40) a présenté des valeurs des variations dimensionnelles légèrement faibles par

rapport à celles du (BO), ce qui revient à la différence entre la rigidité et le module d'élasticité du (BAP40) et du (BO).

- ❖ Les fissures d'interface du système réparé par le (BOV) apparaissent plutôt que celles des systèmes réparés par le (BAP40) et le (BAP30), à cause de la présence des fines de filler calcaire qui contribuent à la densification de la zone de transition et permettent de retarder significativement la propagation des fissures à l'interface d'où les bons résultats d'adhérence obtenues par le (BAP40) et le (BAP30).
- ❖ Les (BAP30) et (BAP40) de réparation offrent au système réparé, une augmentation de 17% et 31% respectivement de la capacité portante par rapport au (BOV) en raison de la rigidité supplémentaire apportée aux bétons autoplaçants (BAPs) par le rôle bénéfique du squelette granulaire qui est couplé à la matrice cimentaire. Ces propriétés sont dues aux formulations de ces bétons.

Cette étude a montré que les performances du (BAP) donnent des avantages pour être utilisé comme un matériau de réparation. Une bonne formulation réussie de (BAP) permet d'obtenir les propriétés rhéologiques, mécaniques et physiques voulues, qui répondent à l'exigence d'un matériau de réparation. En outre, une adhérence et une qualité de liaison excellente sont obtenues par les (BAPs) en comparaison à celles du (BOV). La réparation par le (BAP) a en fin développé une capacité d'adaptation dimensionnelle favorable au système de réparation.

Tous les résultats obtenus, contribuent à obtenir une réparation plus durable.

Perspectives

- ❖ Compléter l'analyse expérimentale de propagation des fissures dans la réparation, par un couplage de retrait avec l'effet du fluage en traction.
- ❖ Examiner Le comportement mécanique de système réparé vis-à-vis de l'épaisseur de la réparation.
- ❖ Modéliser la compatibilité dimensionnelle des bétons autoplaçants (BAPs) comme réparation adhérent dans un système de réparation.
- ❖ Etudier l'adhérence chimique dans les réparations à base de matériau cimentaire et l'effet des adjuvants chimiques au (BAP), tels que les compensateurs de retrait, latex, ou autres.
- ❖ Considérer l'effet de différentes additions au (BAP) sur le comportement mécanique de système réparé.
- ❖ Analyser l'interface de réparation par microscopie à balayage afin d'affirmer les résultats de l'essai de l'adhérence.

Comme la réparation avec le (BAP) a prouvé son efficacité en laboratoire, il serait maintenant intéressant d'étudier le comportement d'une réparation sur une infrastructure existante exposée aux variations climatiques et soumise à des chargements mécaniques réels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abdessemed M, Kenai S, Bali A, Kibboua A, «Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP: experimental and numerical modeling», construction and building materials, Vol.25, N°3, P.1270-1276, March **2011**

AbuTair A I, Rigden S R, Burley E, «Testing the bond between repair materials and concrete substrate», ACI Materials Journal, Vol.93, N°6, P.553-558, January **1996**

Abu-Tair AI, Lavery D, Nadjai A, Rigden SR , Ahmed TMA, «A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening», Construction and Building Materials, Vol.14, N°3, P.171-176, April **2000**

Acker P, «Comportement mécanique du béton : apport de l'approche physico chimique», Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC N°152, Paris, **1988**

AFGC 2002, «Recommandations de l'Association Française de Génie Civil», Bétons Auto-Plaçants, Juillet **2002**

AFGC 2008, «Recommandations de l'Association Française de Génie Civil», Bétons Auto-Plaçants, Janvier **2008**

ASTM, ASTM C29/C29M-97, «Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate», reapproved, **2003**

ASTM C 496 , «Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing Materials», **2004**

Assié S, «Durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, **2004**

Aubrée N, «Caractérisation du comportement post-pic en compression du béton armé et non armé, et extension au béton renforcé de fibres», thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, **2014**

Austin S, Robins P, Pan Y, «Tensile bond testing of concrete repairs», Materials and structures, Vol.28, P.249-259, June **1995**



- BAEL**, «Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites», fascicule N°62 – Titre 1er – Section I, BAEL 91 révisé 99, Avril **1999**
- Baron J, Ollivier J P**, «Les bétons – Bases et données pour leur formulation», Editions Eyrolles, **1996**
- Barquins M, Fadel K**, «Adhésion et collage», Journal. Découverte, Vol.271, P.31-46, **1999**
- Bazant Z P**, «Creep and Shrinkage of Concrete Mathematical Modeling», in the Fourth International RILEM Symposium, Evanston, **1986**
- Bazant Z P, Panula L, Kim JK, Xi Y**, «Improved prediction model for time dependent deformations of concrete: part 6-simplified code type formulation», Materials and Structures, Vol.25, P.219-223, May **1992**
- Benhadji M**, «Etude du comportement d'une poutre réparée par reprofilage : application du béton autoplaçant», Mémoire de Magister, Université de Médéa, 130 pages, **2007**
- Benyahia A, Ghrici M, Choucha S, Omran A**, «Characterization of fiber reinforced self-consolidating mortars for use in patching damaged concrete», Latin American Journal of Solids and Structures, Vol.14, N°6, P.1124-1142, June **2017**
- Benzerour M**, «Etude du renforcement et de la modélisation des tabliers de ponts en béton armé par des rechargements adhérents», 19^{ème} rencontres universitaires de Génie civil, Université de Sherbrooke, Group béton québec, Canada, **2003**
- Bethmont S**, « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) - étude expérimentale des interactions granulaires », thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, Décembre **2005**
- BetonlabPro 2, Sedran T, Larrard F**, «Computer Aided MixDesign Software», Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris **2000**
- Beushausen H , Alexander M G**, «Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage», Materials and Structures, Vol.40, P.189–199, September **2006**
- Bissonnette, Benoit** «Le Fluage en Traction : Un aspect important de la Problématique des réparations minces en béton», Thèse de doctorat, Québec, Université Laval, 290 p, **1996**

Bissonnette B, Pigeon M, «Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations», Materials and structures, Vol.33, N°2, P.108-118, March **2000**

Boukni B, «Contribution à l'étude expérimentale de comportement thermomécanique des bétons», Thèse de doctorat, Université Constantine ALGERIE, **2012**

Bouksani O, «Réparation des ouvrages en béton-Reprofilage-», Thèse de doctorat, Université Houari Boumediene ALGERIE, **2013**

Budget de d'état au secours du patrimoine immobilier «Article paru dans le quotidien Liberté» du 16 Mai **2012**

Bui V.K, Montgomery D, «Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume», Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting concrete Stockholm, Suède, P.373-384, **1999**



Calgaro J.A , De vauxclairs, C.B.T, «Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées **1994**

Chanvillard P, Aitcin P, Lupien C, «Rusurfaçage en béton renforcé de fibres d'acier» Autoroute 40, comité de KKLAND, Rapport de recherche, Université de Sherbooke, Ministère des Transports **1989**

Cleland, D J , Long A E, «The pull-off test for concrete patch repairs», Proceedings of the Institution of Civil Engineers , Vol.122, N°4, P.451-460, November **1997**

Courard L, «Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation», Thèse Université de Liège, **1998**

Courard L, «Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products», Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol.33, P. 65-72, January **2000**

Courard L, «Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified by admixtures», Materials and structures, Vol.35, N°3, P.149-155, April **2002**

Couvrat P, «Le collage structural moderne, théorie et pratique», Technique et documentation, Lavoisier édition, **1992**

Cusson D, Mailvaganam N, «Durability of Repair materials», Concrete International: Design and Construction, Vol.18, N°3, P.34-38, January **1996**

D

Delatte N, Chen S, Davidson J, Sehdev A, Nader A, Endfinger M, «Design and quality control of concrete overlays», University Transportation Center, Alabama, Report N°01220, P.56, December **2001**

Delatte N, Sehdev A, «Mechanical properties and durability of bonded-concrete overlays and ultrathin whitetopping concrete», Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.1834, N°1, P.16-23, January **2003**

De Larrard F, «Structures granulaires et formulations des bétons», Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Avril **2000**

De Larrard F, Sedran T, «Mixture-proportioning of high performance concrete», Cement and Concrete Research, Vol.32, N°11, P.1699-1704, November **2002**

Department of the Army, «Engineering and design-evaluation and repair of concrete structures», Manual 1110-2-2002 [en ligne], DC, USA, CECW-EG, **1995**

Dreux G, Festa J, «Nouveau guide du béton», Eyrolles édition, France, RILEM TC 107-CSP. Measurement of time-dependent strains of concrete, Materials and structure, Vol.31, P.507-512, **1995**

E

El Barrak M, «contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais» Thèse de doctorat Université Toulouse III – Paul Sabatier Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA/UPS – Génie Civil, **2005**

Emberson N K, Mays, G C, «Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete: 3) Reinforced concrete members in flexure», Magazine of Concrete Research, Vol.48, N°174, P.45-57, March **1996**

Emmons P.H, «Concrete repair and maintenance illustrated», Kingston, MA 02364-0800 (USA): R. S. Means company, inc. **1993**

Emmons P.H, Vaysburd A.M, Mcdonald J E, «A Rational approach to durable concrete repairs», Concrete International, Vol.15, N°9, P.40-45 September **1993**

Emmons P.H, Vaysburd A.M, «Factors affecting the durability of concrete repair: The contractor's viewpoint», Construction and Building Materials, Vol.8, N°1, P.5-16, **1994**

Emmons P.H, Vaysburd A.M, «Total system concept - necessary for improving the performance of repaired structures», Concrete International, Vol.17, N°3, P.31-36, January **1995**

Emmons P.H, Vaysburd A.M, «System concept in design and construction of durable concrete repairs», Construction and Building Materials, Vol.10, N°1, P.69-75, February **1996**

EN 933-1, «Norme Française, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats» Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, **2012**

EN 934-2, «Norme Française, Superplastifiant Norme Française, Norme Européenne Adjuvants pour béton, mortier et coulis», Partie 2 : adjuvants pour bétons. Définitions et exigences, Avril **1998**

EN 1008, «Norme Française, Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage», d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Norme française, **2003**

EN 12390-2, «Norme Française, Essais pour béton durci», Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Indice de classement : P.18-438, **2001**

EN 206-1, «Norme Française, Béton», Partie 1 : Spécification performance, production et conformité, **2004**

EN 12390-3, «Essais pour béton durci», Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, **2012**

EN 12390-5, «Essais pour béton durci», Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes, **2012**

EN 12390-6, «Essais pour béton durci», Partie 6 : Résistance en traction par fendage d'éprouvettes, Indice de classement : P 18-434, **2001**

EN 12350-8, «Essai pour béton frais», Partie 8 : béton autoplaçant – Essai d'étalement au cône d'Abrams, **2010**

EN 12350-9, «Essai pour béton frais», Partie 9 : béton autoplaçant – Essai d'écoulement à l'entonnoir en V, **2010**

EN 12350-10, «Essai pour béton frais», Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L, **2010**

EN 12350-11, «Essai pour béton frais», - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis, **2010**

EN 1504-3, «Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures», Definitions, **2006**

Espeche A.D, León J, «Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test», Construction and building materials, Vol.25, N°3, P.1222-1235, March **2011**

Eurocode2, 01, «Design of concrete structures», – Partie 1: General rules for buildings», October **2001**

F

Farhat H , «Durabilité des réparations en béton de fibres: effets du retrait et de la fatigue», Thèse de doctorat Université Paul SABATIER , Toulouse **1999**

Fathy A, Zhu H, Kohail M, «Factors affecting the fresh-to-hardened concrete repair system», Construction and Building Materials, Vol.320, P.126279, February **2022**

Felt E J, «Resurfacing and patching concrete pavement with bonded concrete», Proceeding of highway research board, **1956**

Ferraris C.F, Wittmann F.H, «Shrinkage mechanisms of hardened cement paste», Cement and Concrete Research, Vol.17, N°3, P.453-464, May **1987**

G

Gadri K, «Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable», Thèse de doctorat Université Biskra ALGERIE, **2018**

Garbacz A, Górká M, Courard L, «Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems», Magazine of Concrete Research, Vol.57, N°1, P.49-60, February **2005**

Garbacz A, Courard L, Bissonnette B, «A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering», Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol.61, N°1, P.73-84, **2013**

GCI, «Cours : Durabilité et Réparations du Béton», Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet **2009**

Ghezal A F, «Compatibilité déformationnelle des bétons autoplacants pour des utilisations dans les réparations des infrastructures routières», Doctoral dissertation, École de technologie supérieure, **2014**

Gibbs J C, ZHU W, «Strength of hardened self-compacting concrete» Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, P.199-209, September **1999**

Granju J. L, «Debonding of thin cement based overlays», Journal of materials in civil engineering, Vol.13, N°2, P.114-120, April **2001**

GUI, «The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification», Production and Use, **2005**

Guo T, Weng X, Liu C, Yu Q, Zhang C, Li Y «Evaluation of the bonding and fatigue properties of an innovative rapid repair structure for concrete pavement», Construction and Building Materials, Vol.235, P.117484, February **2020**



Hassan K E, Brooks J J, Al-Alawi L, «Compatibility for repair mortars with concrete in a hot-dry environment», Cement and Concrete Composites, Vol.23, N°1, P.93-101, February **2001**

Hornain H, GrandDuBé, «Grandeurs associées à la durabilité des bétons», Presses des Ponts , **2007**



Igarashi S, Bentur A, Kovler K, «Autogenous Shrinkage and induced Restraining Stresses in High-Strength Concretes», Cement and Concrete Research, Vol.30, N°11, P.1701-1707, November **2000**



Jacobs F, Hunkler F, «Design of self-compacting concrete for durable concrete structure» In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM, **1999**

Julio F A B, Branco, Silva V D «Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface», Construction and Building Materials, Vol. 18, N°9, P.675-681, November **2004**



Koehler E P, «Aggregates in Self-Consolidating Concrete», Thèse de doctorat, the University of Texas at Austin, **2007**



Laurence O, «La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation», Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, **2001**

Lecompte A, De Larrard F, Mechling J M, «Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé», Bulletins des LCPC, N° 234, P.89-105, Septembre **2001**

Loser R, Leemann A, «Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete», Materials and Structures, Vol.42, N°1, P.71-82, **2009**

Lukovic M, Ye G, Van Breugel K, «Reliable concrete repair: A critical review», In Proceeding of 14 international conference Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, July **2012**



- Mailvaganam N , Mitchell L**, «Réparations pour la remise en service des ouvrages en béton», Rapport N°59 de l'Institut de recherche en construction, Publications du Conseil national de recherche du Canada, ISSN 1206-1239, P.4, **2003**
- Mangat P S, Flaherty F**, «Long-term performance of high-stiffness repairs in highway structures», Magazine of concrete research, Vol.51, N°5, P.325-339, October **1999**
- Masuzyo C, Luca F, Fausto M, Adriano R, Giovanni P**, « Shrinkage induced edge curling and debonding in slab elements reinforced with bonded overlays: Influence of fibers and SRA »,Cement and Concrete Composites, Vol.102, P.105-115, September **2019**
- Matana M, Galecki G, Maerz N, Nanni A**, «Concrete substrate preparation and characterization prior to adhesion of externally bonded reinforcement», Proceedings of the International Symposium on bond Behaviour of FRP in Structures, P.133-140, **2005**
- Modjabi-Sangnier F**, «Approche quantitative de la notion de compatibilité des bétons de réparation autoplaçants», Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, **2003**
- Mohammadi M, Moghtadaei R.M, Samani N.A**, «Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete», Construction and Building Materials, Vol.51, N°.31, P.141-150, January **2014**
- Molez L**, «Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques», Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, Université Laval, **2003**
- Momayez A, Ehsani MR, Ramezani pour A A, Rajaie H**, «Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials», Cement and Concrete Research, Vol.35, N°4, P.748-757, April **2005**
- Morgan D.R**, «Compatibility of concrete repair materials and systems», Construction and Building Materials, Vol.10, N°1, P.57-67, February **1996**
- Mosser A.M**, «Outil d'aide à la gestion des interventions sur les barrages en béton», Thèse université de Laval, Faculté des sciences et de génie, P.127, **2004**



Naadia, T., M. Mouret and F. Kharchi. «Effect of the aggregate size on the rheological behaviour of the concretes», Proceedings of the 1st International conference on the technology and concretes durability, CITDUB1, USTHB, Algiers, **2004**

Nagakumar M S, Ajay N, Sharu Elishuba John, «An Analytical Approach to Analysis of Concrete Overlay (White Topping) Over Flexible Pavement (Hot Mix Asphalt) Using ANSYS Software». Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering, Vol.162, P.363–379, September **2021**

Nan Su, Kung-Chung H, His-Wen C, «A simple mix-design method for self compacting Concrete», Cement and concrete Research, Vol.31, N°12, P.1799-1807, December **2001**

Neville A M, «Propriétés des bétons», édition Eyrolles, 824 pages, **2000**

Ngassam, I. L. T., «Durabilité des réparations des ouvrages d'art en béton», Thèse de doctorat, Université Paris-Est, **2013**

Nguyen T H, «Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation», Thèse de doctorat, Université de Toulouse, **2010**

Normand B, Normand Jr, «Contribution à la mise au point d'une procédure de caractérisation quantitative des surfaces en béton en vue de travaux de réflexion», Thèse, Université Laval, **2005**



Oh S G , Nogushi T, Tomosawa F, «Toward mix design for rheology of self compacting concrete», In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM, **1999**

Okamura H, Ouchi M, «Self-Compacting Concrete», Journal of Advance Concrete Technology, Vol.1, N°1, P.5-15, **2003**

Okamura K, Ozawa K, Maekawa K , Tangtermsinikul S «High Performance Concrete Mechanism of Super-Fluidized Fresh Concrete», In Proceedings of

EITJSCE- AIT joint Seminar on Solution to Urban Infrastructural Problems through Civil Engineering Technology, Bangkok, P.16, **1992**

Ouchi M , Edamatsu Y, «A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete», Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.21, P.1-6, **1999**

Ozawa K, Sakata N , Okamura H, «Evaluation of self compactibility of fresh concrete using the Funnel test», Concrete Journal of JSCE, Vol.1994, N°490, P.61-70, **1995**



Pacheco J, «Design, Evaluation and Specification for Concrete Mixtures with Low Potential for Cracking» ,International RILEM Conference on Early-age and Long-term Cracking in RC Structures, Vol.31, P.51–60, May **2021**

P 18-598, «Norme Française, Granulats - Équivalent de sable. Norme française», **1990**

P 18-508 «Norme Française, Additions pour béton hydraulique-Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité», **2012**

P 18-305, «Norme Française, Béton Prêt à l'Emploi», **1996**

P 18-404, «Norme Française, Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes», Décembre **1981**

P 18-451 , «Norme Française, Mesure de l'affaissement du cône d'Abrams»,**1999**

P 18-353 , «Norme Française,Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aide de l'aéromètre à béton», **2007**

Perenchio W.F, «Secrets to a successful concrete overlay». Concrete Repair Digest, Vol.5, N°1, P.25-26, March **1994**

Perez F, «Contribution à étude du comportement mécanique des éléments bicouches sous sollicitations statiques et cycliques», université de Laval, Phd Thèse, Canada, P.218, Mars **2005**

Persson J, Husson S, Guilhot B, «Influence of finely ground limestone on cement hydration», Cement and Concrete Composites, Vol.21, N°2, P.99-105, April **1999**

Persson B. «Self-compacting concrete at fire temperatures», Lund Institute of Technology , Division of Building Materials, **2003**

Pertué A, «Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la

fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges», Thèse de doctorat, l'institut de saint Nazaire France, **2008**

Petersson P, Billberg P, VAN B K, «A model for self-compacting concrete», Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete, 1999, Paris, RILEM Publications S.A.R.L, P.333- 344, **1999**

Poston R W, Kesner K, McDonald J E, Vaysburd A M et Emmons P H, «Concrete repair material performance – Laboratory study», ACI Materials Journal, Vol.98, N°2, P.137-147, January **2001**

Proust E, «Retrait et fluage des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés», Thèse de doctorat de l'INSA Toulouse, **2002**

Pye G B , Beaudoin J J, «An energy approach to bond strength determinations in cement systems», Cement and Concrete Research, Vol.22, N°4, P.551-558, July **1992**

Q

Qian J, You C, Wang Q, Wang H, Jia X, «A method for assessing bond performance of cement-based repair materials», Construction and Building Materials, Vol.68, N°4, P.307-313, October **2014**

R

Ramanathan P, Baskar I, Muthupriya P, Venkatasubramani R, «Performance of self compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures», KSCE Journal of Civil Engineering , Vol.17, N°2, P.465-472, March **2013**

Ramtani S, «Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilatéral», Thèse de doctorat, Université Paris 6 : Ecole normale supérieure de Cachan, **1990**

Ray I, Davalos J.F, Luo S, Elamine R, «Interface characterization of overlay-substrat cementitious by direct shear test» 34th International SAMPE Technical Conference, November **2002**

Reangsing C, Rittiwong T, Schneider JK, «Effects of mindfulness meditation interventions on depression in older adults: A meta-analysis», *Aging & Mental Health*, Vol.25, N°7, PP.1181-1190, **2021**

Recommendations RILEM TC 107-CSP, «Measurement of time-dependent strains of concrete», *Materials and Structures*, Vol.31, P.507-512, October **1998**

RILEM CPC8, «Modulus of elasticity of concrete in compression», *Materials and Structures*, **1972**

Rizkalla S , Labossiere P, «FRP extends service life of rehabilitated infrastructure», In proceedings of the Conference of the Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS), Sherbrooke, Canada, **1996**

Rozière E, Granger S, Turcry Ph, Loukili A, «Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete», *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, N°8, P.626–636, September **2007**



Saak A W, Jennings H M, Shah S P, «New methodology for designing self compacting concrete», *ACI Materials Journal*, Vol.98, N°6, P.429-439, January **2001**

Saucier F, «La durabilité de l'adhérence des réparations en béton», Thèse de doctorat Université Laval, Québec, Canada, P.145, **1990**

Saucier F, Claireaux D, Cusson M, Pigeon, «The challenge of numerical modeling strains and stresses in concrete repairs», *Cement and concrete research* Vol.27, N°8, P.1261–1270, August **1997**

Sedran T, « Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application au béton autonivelants », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars, **1999**

Sedran T, de Larrard F, «Optimization of self compacting concrete thanks to packing model », *Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, P.321-332, **1999**

Shen J , Yurtdas I, Diagana , Alex Li «Une nouvelle méthode de formulation des bétons autoplaçants (BAP)» XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin, **2008**

Shengwen T, Desheng H, Zhen H, «A review of autogenous shrinkage models of concrete», *Journal of Building Engineering*, Vol.44, P.103412, December **2021**

Siad H, «Influence du type d'addition minérale sur le comportement ysiomécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, **2010**

Sierra R, «Réparation des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C₃S et de ciment Portland», 7^{ème} Congrès international de la chimie des ciments, Paris, France, Vol.3, Thème 6, P.201-206, **1980**

Silfwerbrand J, «Thin concrete inlays on old concrete roads», Concrete Pavment Design and Rehabilitation, Vol.2, P.255-260, **1985**

Silfwerbrand J , **Paulsson J**, «Better bonding of bridge deck overlays», Concrete International, Vol.20, N°10, P.56-61, January **1998**

Silfwerbrand J, «Improving concrete bond in repaired bridge decks», Concrete International, Vol.12, N° 9, P.61-66, September **1990**

Skokandić D, Vlašić A, Kušter Marić M, Srbić M, Mandić Ivanković A, «Seismic Assessment and Retrofitting of Existing Road Bridges: State of the Art Review», Materials, Vol.15, N°7, P.2523, March **2022**

Sonebi M, Bartos P J M, «Hardened SCC and its bond with reinforcement», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, P.275-289, September **1999**

Spengler A, Schiessl P, «Sand-rich self-compacting concrete», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, P.387-392, October **2001**

Sprinkel M, Ozyildirim C, «Evaluation of high performance concrete overlays placed on route 60 over lynnhaven inlet in Virginia», Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, August **2000**

Syyed Adnan R, Hassam A, Hatem A, Muhammad K, Fahad I, «Utilization of Self-Consolidated Green Material for Sustainable Development: An Environment Friendly Waste Materials Application for Circular Economy», Polymers, Vol.13, N°17, P.2985, July **2021**



Talbot C, Pigeon M, Beaupré D, Morgan D R, «Influence of surface preparation on long-term bonding of shotcrete», ACI Materials Journal, Vol.91, N°6, P.560-566, December **1994**

Tayeh B A, Abu B H , Bakar, Megat Johari MA, «Characterization of the interfacial

bond between old concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete repair composite», *Materials and Structures*, Vol.46, N°5, P.743-753, **2013**

Tazawa E I, Sato R, Sakai E, Miyazawa S, «Work of JCI on autogenous shrinkage» Shrinkage of Concrete Shrinkage», Edited by Baroghel-Bouny et Aïtcin, Proceedings of the International RILEM Workshop, **2000**

Thanh S P, «Modélisation numérique de l'interface acier-béton : Application au comportement des structures en béton renforcées par des aciers plats crantés», Thèse de doctorat, Université Paris- Est, **2013**

Theriault M, Neale KW, «Design equations for axially loaded reinforced concrete columns strengthened with fibre reinforced polymer wraps», *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.27, N°5, P.1011-1020, October **2000**

Toutandji H , Ortiz G, «The effect of surface preparation on the bond between FRP sheets and concrete members», *Composites Structures*, Vol.53, N°4, P.457-462, September **2001**

Toutlemonde F, le Maou F, «Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation. Le point sur quelques techniques de laboratoire», *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Vol.203, P.105-119, May **1996**

Tran Q T, «Interface ancien-nouveau béton : caractérisation du comportement adoucissant de l'interface en cours de décollement et son évolution dans le cas de sollicitation de fatigue», Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, **2006**

Trende U , Büyükoztük T, «Size effect and influence of aggregate roughness in interface fracture of concrete composites», *ACI Materials journal*, Vol.95, N°4, P. 331-338, January **1998**

Trung N, «Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation», Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, **2010**

Turcry P, «Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, **2004**

Turcry P, Roziere I, Loukili A, «XXIII^{ème} rencontres universitaires de génie civil, risque et environnement», **2005**



Vaysburd A.M., «Interfacial bond and surface preparation in concrete repair», The Indian concrete journal, January **2001**

Venkatesh N, Simone H, Viktor M, «Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing », Construction and Building Materials, Vol.205, P.586-601, April **2019**

Vieira M, Bettencourt A , «Deformability of hardened SCC», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, P.637-644, August **2003**



Wang YS, Peng KD, Alrefaei Y, Dai JG, «The bond between geopolymer repair mortars and OPC concrete substrate: Strength and microscopic interactions», Cement and Concrete Composites, Vol.119, P.103991, May **2021**

Weiss WJ, «Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete», Phd Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, P.240, **1999**



Yahia A, Tanimura M, Shimoyama Y, «Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio», Cement and Concrete Research , Vol.35, N°3, P.532-539, March **2005**

Yazdi MA, Gruyaert E, Tittelboom K Van, Boon N, «Treatment with nano-silica and bacteria to restore the reduced bond strength between concrete and repair mortar caused by aggressive removal techniques» Cement and Concrete Composites, Vol.120, P.104064, July **2021**

Youjun X, Baoju, Y, Jian , Shiqiong Z, «Optimum mix parameters of high strength self-compacting concrete with ultra-pulverized fly ash», Cement and Concrete Research , Vol.32, N°3, P.477-480, March **2002**

Yuan Y S, Marosszky M, «Restrained shrinkage in repaired reinforced concrete elements», Matériels and structures, Vol.27, P.375–382, August **1994**

Yurtdas I, «Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : Etude expérimentale sur mortier», Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille (France), **2003**