POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title: Confinement de l'expansion causée par la réaction alcalis-granulats avec du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP)

Auteur: Author: Sarra Abid

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Citation: Abid, S. (2021). Confinement de l'expansion causée par la réaction alcalis-granulats avec du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6572/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL: https://publications.polymtl.ca/6572/

Directeurs de recherche: Advisors: Jean-Philippe Charron

Programme: Program: Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTREAL

Affiliée à l'Université de Montréal

Confinement de l'expansion causée par la réaction alcalis-granulats avec du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP)

SARRA ABID

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Mai 2021

© Sarra Abid, 2021.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

Confinement de l'expansion causée par la réaction alcalis-granulats avec du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP)

Présenté par

Sarra ABID

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mahdi BEN FTIMA, président

Jean-Philippe CHARRON, membre et directeur de recherche

Benoît FOURNIER, membre externe

DÉDICACE

À mes parents Bchira et Foued.

REMERCIEMENTS

D'abord, je souhaite remercier sincèrement mon directeur de recherche, le professeur Jean-Philippe Charron, pour sa confiance, son soutien, son expertise et surtout l'originalité du projet réalisé. Je tiens également à souligner son engagement qui a permis la réalisation du projet dans les meilleures conditions.

Ensuite, je tiens à remercier Clélia Desmettre pour sa participation très active et pertinente sur plusieurs aspects du projet de recherche. Son sens critique et sa rigueur scientifique ont été des ressources indispensables pour le bon déroulement et la réussite du projet.

Merci aux professeurs Mahdi Ben Ftima et Benoît Fournier d'avoir accepté de siéger sur le jury d'examen de ce mémoire de maîtrise.

Je remercie aussi toute l'équipe technique du Laboratoire des Structures de l'École Polytechnique de Montréal pour leur contribution à la réalisation de ce projet, soit Mathieu Robidas, David Ek, Patrice Bélanger et Simon Bourget. Leur savoir-faire et leur rigueur scientifique qui a permis à plusieurs reprises de surmonter les difficultés techniques. Le projet n'aurait jamais été aussi plaisant sans leur bonne humeur et leur enthousiasme pour les projets de recherches des étudiants.

Je remercie l'organisme Mitacs et la VMSTL (Voie Maritime Saint-Laurent), principaux partenaires et sponsors, pour la bourse accordée dans la réalisation du présent projet.

Enfin, je remercie tous mes amis et collègues ayant participé de près ou de loin à la réalisation et le bon déroulement du projet, soient : Kim Séang lauch, Martin Pharand, Gabriel Lewis, Simon Bourget, Antoine Beaudoin.

RÉSUMÉ

Dans le contexte nord-américain, la majorité des structures sont exposées à des conditions environnementales sévères. La réaction alcalis-granulats (RAG) est une pathologie fréquente qui touche les infrastructures du Québec et engendre généralement un gonflement ainsi que de la fissuration. Le matériau avancé dans ce projet est le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP). Ce béton se caractérise par une résistance à la traction élevée et une capacité déformationnelle exceptionnelle. De plus, il offre une perméabilité à l'eau très faible et une sensibilité réduite à la RAG. La réparation proposée est un chemisage en BFUP coulé directement sur le substrat atteint. Ce faisant, un paramètre important à prendre en considération est le retrait restreint de la réparation. En effet, par sa rigidité élevée, la structure atteinte vient entraver le retrait de la réparation générant ainsi des contraintes de traction dès le jeune âge. Une partie de la capacité de déformation de la réparation est donc consommée par le retrait restreint. Ainsi, l'objectif principal de ce projet était de quantifier le comportement du BFUP sous effets de retrait restreint, puis évaluer la marge de déformation disponible, de différentes configurations de réparations en BFUP, pour confiner l'expansion de la RAG.

Dans un premier temps, un dispositif d'essai a été développé. Il a été inspiré de l'essai de retrait restreint à l'anneau (ASTM-C1581, 2004) ainsi que l'essai d'expansion développé par Argouges et al. (2010). Ce dispositif a permis de simuler la restriction du retrait imposée par la structure existante sur la réparation en BFUP pour se rapprocher des conditions d'une application structurale réelle, puis générer une expansion dans le BFUP pour simuler l'expansion de la RAG.

Par la suite, un programme expérimental préliminaire a été mené. Ce programme a permis de valider la géométrie du dispositif et des spécimens testés, la procédure d'essai (chargement, instruments de mesure, acquisition) ainsi que la méthode d'analyse des résultats avant de procéder aux essais du programme expérimental principal.

Le programme expérimental principal réalisé sur des spécimens en BFUP sous forme d'anneau a permis de mettre en avant le potentiel du BFUP par rapport à la même réparation en béton à hautes performances (BHP) et d'évaluer la performance de différentes configurations de réparations en BFUP. La réalisation de l'essai sur un béton à hautes performances (BHP) a permis de montrer qu'une réparation avec ce matériau ne peut pas résister à son retrait restreint. En effet, une

localisation de fissure a été observée pendant la durée de l'essai de retrait restreint. Cette réparation ne peut donc pas confiner l'expansion de la RAG sans renforcement.

En variant le dosage en fibres, les réparations en BFUP testées n'ont présenté aucune fissure pendant l'essai de retrait restreint et quelques dizaines de microdéformations, seulement, ont été consommées par le retrait restreint. L'essai d'expansion a permis de montrer, quant à lui, que la marge de déformation disponible pour confiner la RAG est inversement proportionnelle au dosage en fibre dans la réparation, soit 0.28%, 0.20% et 0.17% pour le BFUP 2%, 3% et 4% respectivement.

Finalement, la variation des conditions aux limites dans la réparation a permis de montrer que l'introduction d'armatures augmente le niveau de restriction dans l'anneau mais prolonge de 30% sa marge de déformation disponible pour confiner la RAG, soit 0.26% pour un BFUP 3% armé (1.2% d'armatures) comparée à 0.20% pour un BFUP 3% non armé. En revanche, la présence de joints froids engendre des zones de faiblesse dans les zones de reprise. L'amorce d'ouverture du joint dans le BFUP 3% avec armatures et joints est de l'ordre de 0.02%. Ceci dit, la réalisation d'un joint performant a permis de faire propager la fissure dans le BFUP au lieu de suivre la forme du joint. Ceci a permis de prolonger la marge de déformation disponible pour la RAG en présence de joints et une marge probable de l'ordre de 0.2% est attendue.

ABSTRACT

In the North American context, the majority of structures are exposed to severe environmental conditions. The alkali-aggregate reaction (AAR) is a frequent pathology that affects Quebec's infrastructures and generally causes swelling and cracking. The material advanced in this project is ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). This concrete is characterized by high tensile strength and exceptional deformation capacity. In addition, it offers very low water permeability and reduced sensitivity to alkali-aggregate reaction. The proposed repair is a UHPFRC jacketing cast directly onto the affected substrate. An important parameter to consider is the restrained shrinkage of the repair. Indeed, by its high rigidity, the affected structure restrains the shrinkage of the repair, thus generating tensile stresses from an early age. A part of the deformation capacity of the repair is therefore consumed by the restrained shrinkage. Thus, the main objective of this project was to quantify the behavior of UHPFRC under the effects of restrained shrinkage, then to assess the strain margin available for different UHPFRC repair configurations to contain the expansion of AAR.

First, a test device was developed. It was inspired by the ring test (ASTM-C1581, 2004) as well as the expansion test developed by Argouges et al. (2010). This device is able to simulate the shrinkage restriction imposed by the existing structure on the UHPFRC repair to approximate the conditions of a real structural application, then generate an expansion in the UHPC to simulate the expansion of the AAR.

Subsequently, a preliminary experimental program was carried out. This program made allowed to determine the final geometry of the device and the specimens tested and to validate the test procedure (loading, measuring instruments, acquisition) as well as the method of analysis of the results before proceeding to the tests of the main experimental program.

The main experimental program, carried out on ring specimens of UHPFRC repair, highlighted the potential of UHPFRC over the same ordinary concrete repair and evaluated the performance of different configurations of UHPFRC repairs. Performing the test on high performance concrete (HPC) showed that this material cannot withstand its restricted shrinkage. Indeed, a macrocrack was observed during the restricted shrinkage test. This repair cannot confine the expansion engendered by AAR.

By varying the fiber dosage in UHPFRC, the repairs tested showed no cracks during the restricted shrinkage test and only a few dozen macrostrains were consumed by the restricted shrinkage. The expansion test showed that the deformation margin available to confine the AAR is inversely proportional to the fiber dosage in the repair, i.e. 0.28%, 0.2% and x% for UHPRFC 2%, UHPRFC 3% and UHPRFC 4% respectively.

Finally, the variation of the boundary conditions in the ring repairs tested demonstrated that the introduction of reinforcements in the repair increases the level of restraint in the ring but extends by 30% its available deformation margin to confine the AAR, i.e. 0.26% for a UHPRFC 3% (1.2% reinforcement).

Finally, the variation of the boundary conditions in the repair made it possible to show that the introduction of reinforcements increases the level of restraint in the ring but extends by 30% its available deformation margin to confine the AAR, i.e. 0.26% for a 3% fiber reinforced UHPFRC with 1.2% reinforcement compared to 0.20% for a non-reinforced UHPFRC. On the other hand, the presence of cold joints creates areas of weakness in the recovery areas. The amorce of the crack in the repairs with reinforcements and joints is of the order of 0.02%. That said, making a performing joint made it possible to propagate the crack in the UHPFRC instead of following the shape of the joint. This extended the strain margin available for the AAR in the presence of joints and a probable margin of around 0.2% is expected.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XIV

LISTE DES FIGURES XV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XX

LISTE DES ANNEXES XXIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Problématique 1

1.2 Objectifs du projet 5

1.3 Méthodologie 6

1.3.1 Développement et validation d'un dispositif d'essai 6

1.3.2 Programme expérimental principal 6

1.4 Portée 6

1.5 Organisation du mémoire 7

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 8

2.1 Réaction alcalis-granulats 8

2.1.1 Mécanismes de la RAG 8

2.1.1.1 Réaction alcalis-carbonates 9

2.1.1.2 Réaction alcalis-silice 9

2.1.2 Autres paramètres d'influence 10

2.1.2.1 Conditions environnementales 10
2.1.2.2 Rapport E/C et perméabilité 11
2.1.2.3 Air entrainé 12
2.1.2.4 Température 12
2.1.3 Conséquences 12
2.1.3.1 Observations sur les infrastructures 13
Description du gonflement 13
Patron de fissuration 14
2.1.3.2 Modification des propriétés mécaniques 16
2.1.4 Méthodes de réparation existantes 17
2.2 Bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) 19
2.2.1 Principes fondamentaux 19
2.2.2 Propriétés mécaniques 19
2.2.2.1 Comportement en compression 19
2.2.2.2 Comportement en traction 21
2.2.3 Déformations 24
2.2.3.1 Retrait 24
2.2.3.2 Fluage 26
2.2.4 Durabilité 27
2.2.5 Indicateurs de durabilité 27
2.2.5.1 Autocicatrisation du BFUP 29
2.2.5.2 Sensibilité à la RAG 30
2.3 Retrait restreint 32
2.3.1 Essais de retrait restreint 32

2.3.1.1 Essais linéiques 32
2.3.1.2 Essais en plaques 33
2.3.1.3 Essai sur anneau 34
Critères d'uniformité 36
Contrainte maximale résiduelle 37
Degré de restreinte 39
2.3.2 Retrait restreint du BFUP 43
2.3.2.1 Dosage en fibres 43
2.3.2.2 Fluage et relaxation 44
2.3.2.3 Conditions de séchage 46
2.4 Synthèse 48
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 50
3.1 Dispositif d'essai développé 50
3.1.1 Concept de l'essai 51
3.1.2 Dimensions du spécimen 56
3.2 Procédure expérimentale et instrumentation 59
3.2.1 Conditions pour l'essai de restreint 60
3.2.2 Condition pour l'essai d'expansion 63
CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE 66
4.1 Programme préliminaire 66
4.2 Résultats de l'essai préliminaire de retrait restreint 67
4.2.1 Déformations et degré de restreinte 67
4.2.2 Contraintes et degré de relaxation 69
4.3 Résultats de l'essai préliminaire d'expansion 71

4.4 Conclusion 77

CHAPITRE 5 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRINCIPALE 79

5.1 Programme expérimental principal 79

5.2 Résultats des essais de caractérisation 82

5.3 Résultats du programme principal 86

5.3.1 Évaluation de la performance du BHP 86

5.3.1.1 Déformations et degré de restreinte 86

5.3.1.2 Contrainte résiduelle réelle 89

5.3.2 Évaluation de l'influence du dosage en fibres dans le BFUP 90

5.3.2.1 Résultats de l'essai de retrait restreint 91

5.3.2.2 Résultats de l'essai d'expansion 96

5.3.3 Évaluation de l'influence des conditions aux limites des réparations en BFUP 100

5.3.3.1 Résultats de l'essai de retrait restreint 103

5.3.3.2 Résultats de l'essai d'expansion 105

5.3.4 Signification pratique des résultats 111

CHAPITRE 6 CONCLUSION 117

6.1 Rappel des objectifs 117

6.2 Conclusions 117

6.2.1 Dispositif d'essai développé 117

6.2.2 Résultats du programme expérimental principal 118

6.3 Recommandations et perspectives 120

6.3.1 Amélioration du dispositif d'essai 120

6.3.2 Programme d'essais complémentaires 121

6.3.3 Modèles numériques 122

RÉFÉRENCES 123

ANNEXES 128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques de différents types de béton (Charron et al., 2013) 20

Tableau 2.2 Indicateurs de durabilité des bétons à l'état non fissuré (Charron et al., 2013) 28

Tableau 2.3 Indicateurs de durabilité des bétons à l'état fissuré (Charron et al., 2013).....29

Tableau 2.4 Dimensions du montage d'essai normalisé (ASTM-C1581, 2004).....35

Tableau 2.5 Degré de restreinte pour différents taux d'armatures (Hobbs, 1990) 39

Tableau 3.1 Critères d'uniformité adoptés pour des études antérieures du retrait restreint à l'anneau 58

Tableau 3.2 Classification des niveaux de restreinte pour le BFUP dans les structures composites ou hybrides (Denarié, 2006).....59

Tableau 4.1 Dimensions des spécimens du programme préliminaire.....67

Tableau 5.1 Programme expérimental principal 80

Tableau 5.2 Essais de caractérisation réalisés pour les différentes gammes de BFUP 2, 3 et 4% vol. de microfibres.....81

Tableau 5.3 Résultats des essais de caractérisation sur les bétons étudiés 83

Tableau 5.4 Résumé des résultats de retrait restreint pour la variation du dosage en fibre dans le BFUP.....95

Tableau 5.5 Récapitulatif des résultats de l'essai d'expansion (variation du dosage en fibres) 99

Tableau 5.6 Bilan des résultats des essais de retrait restreint, d'expansion ainsi que l'essai de traction directe pour les gammes de BFUP testées 100

Tableau 5.7 Résumé des résultats de l'essai d'expansion pour différentes conditions aux limites 110

Tableau 5.8 Bilan des résultats des essais de retrait restreint, d'expansion ainsi que l'essai de traction directe pour les configurations de BFUP 3% testées 111

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Endommagements des ouvrages de la VMSTL.....2

Figure 1.2 Problèmes de fonctionnalité liés à la RAG relevés sur les ouvrages de la VMSTL.....2

Figure 2.1 Croquis de la fissuration polygonale en surface et des fissures subparallèles dans le béton atteint par RAG (Forster et al., 1998).....11

Figure 2.2 Modélisation de la courbe d'expansion d'éléments atteints par la RAG (Larive, 1997) 14

Figure 2.3 Patron de fissuration causée par la RAG relevé sur une des structures de la Voie Maritime du Saint Laurent 16

Figure 2.4 Comportement en compression du BFUP (Hassan et al., 2012) 20

Figure 2.5 Comportement en traction d'un béton non fibré (Bernard, 2000).....21

Figure 2.6 Comportement typique en traction de béton standard fibré et de BFUP (a) Béton ordinaire fibré ; (b) BFUP (Naaman, 2003) 22

Figure 2.7 Évolution de la résistance en traction au cours du temps d'un BFUP et un BUHP (Hassan et al., 2012).....23

Figure 2.8 Comportement déformationel en traction des béton et des armatures en acier (Charron et al., 2013).....24

Figure 2.9 Évolution des retraits endogène et de séchage d'un BFUP (Habel, 2004).....25

Figure 2.10 Fluage du BFUP en compression et en traction (Rossi et al., 2014) 27

Figure 2.11 Résultats d'expansion due à la RAG pour des spécimens de BFUP selon ASTM C1260 (Graybeal, 2006).....31

Figure 2.12 Dispositif de retrait restreint linéiques (Charron et al., 2004) 33

Figure 2.13 Géométrie de l'échantillon de dalle retenue pour les travaux de Weiss et al. (1998) .34

Figure 2.14 Essai normé de retrait restreint sur anneau (ASTM-C1581, 2004) 35

Figure 2.15 Contrainte ortho-radiale de traction (σ_Θ) et contrainte radiale (σ_r) générées dans l'anneau de BFUP lors de l'essai de retrait restreint sur anneau (Yoo et al., 2014) 37

Figure 2.16 Idéalisation de l'essai de retrait restreint sur anneau (Yoo et al., 2014) 38

Figure 2.17 Degré de restreinte associé à chaque épaisseur (t_c) de BFUP étudiée (Yoo et al., 2017) 40

Figure 2.18 Degré de restreinte pour différentes épaisseurs d'acier (Hossain et al., 2004) 41

Figure 2.19 Abaques permettant de déterminer le degré de restreinte en fonction des paramètres géométriques d'un essai sur anneau (pour E' = 15 GPa) (adapté de Moon, J.-H. et al. (2006)) 42

Figure 2.20 Effet des fibres sur la contrainte résiduelle dans le béton (Yoo et al., 2017) 44

Figure 2.21 Contrainte théorique élastique (σ_{el}), résiduelle (σ_{res}) et de relaxation (σ_{rel}) du BFUP (Yoo et al., 2017).....46

Figure 2.22 Illustration conceptuelle des montages de retrait restreint et de gradient de contrainte dans l'anneau en béton. (a) sous séchage non-uniforme, (b) sous séchage uniforme (Moon, J. H. et al., 2006).....48

Figure 3.1 Schéma du cœur expansif Argouges et al. (2010) 51

Figure 3.2 Géométrie de l'essai de retrait restreint à l'anneau.....52

Figure 3.3 Diagramme des étapes de réalisation de l'essai développé 52

Figure 3.4 Comportement en pré-pic d'un BFUP - Illustration de la déformation en traction consommée par le retrait restreint 53

Figure 3.5 Vue schématique des composantes du cœur expansif 55

Figure 3.6 Cœur expansif inséré dans l'anneau d'acier de l'essai de retrait restreint.....55

Figure 3.7 Comportement en pré-pic d'un BFUP - Illustration de la phase 2: Essai d'expansion.56

Figure 3.8 Géométrie adoptée pour l'essai sur anneau 57

Figure 3.9 Surface transversale de séchage de l'anneau de BFUP et du prisme adapté 60

Figure 3.10 Instrumentation de l'anneau et prisme de retrait 61

Figure 3.11 Installation des anneaux de retrait restreint dans la chambre environnementale.....62

Figure 3.12 Scellement des prismes adaptés.....62

Figure 3.13 Installation des pétales et du cône, composantes du cœur expansif 63

Figure 3.14 Système de chargement pour l'essai d'expansion 64

Figure 3.15 Instrumentation de l'essai développé 65

Figure 4.1 Retraits libre et restreint.....68

Figure 4.2 Degré de restreinte procuré par l'anneau à l'étude.....69

Figure 4.3 Contrainte résiduelle réelle et contrainte élastique théorique développées dans le BFUP 70

Figure 4.4 Distribution de la contrainte sur l'épaisseur de l'anneau de BFUP 70

Figure 4.5 Degré de relaxation.....71

Figure 4.6 Essai d'expansion appliqué sur anneau d'acier sans BFUP 72

Figure 4.7 Essai d'expansion appliqué sur un anneau d'acier avec BFUP 72

Figure 4.8 Évolution de la force de la presse en fonction du déplacement vertical du vérin.....73

Figure 4.9 Évolution de la charge appliquée en fonction du temps 74

Figure 4.10 Évolution de la charge verticale en fonction de la déformation 75

Figure 4.11 Ouvertures de fissures simultanées au rayon interne et externe de l'anneau de BFUP 76

Figure 4.12 Patron de fissuration de l'anneau de BFUP (vue de dessous).....76

Figure 5.1 Spécimens d'os pour les essais de traction directe.....82

Figure 5.2 Évolution du module d'élasticité en fonction du temps des bétons testés.....84

Figure 5.3 Loi de comportement en traction du BFUP 2% à différentes échéances.....84

Figure 5.4 Loi de comportement en traction du BFUP 3% à différentes échéances.....85

Figure 5.5 Loi de comportement en traction du BFUP 4% à différentes échéances.....85

Figure 5.6 Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps des bétons testés.....86

Figure 5.7 Déformations de retrait libre et restreint du BHP 87

Figure 5.8 Fissuration de l'anneau de BHP sous effets de retrait restreint.....88

Figure 5.9 Degré de restreinte de l'anneau de BHP 88

Figure 5.10 Contrainte résiduelle réelle générée dans l'anneau de BHP, contrainte élastique théorique et résistance à la traction mesurée 90

Figure 5.11 Degré de relaxation du BHP 90

Figure 5.12 Déformations de retrait libre et restreint des BFUP testées.....92

Figure 5.13 Degré de restreinte des gammes de BFUP testées.....93

Figure 5.14 Contraintes réelles et élastiques ainsi que résistance à la traction calculées pour les gammes de BFUP testées 94

Figure 5.15 Degré de relaxation calculé pour différentes gammes de BFUP 95

Figure 5.16 Instants moyens de macrofissuration des réparations en BFUP testées lors de l'essai d'expansion 96

Figure 5.17 Patron de fissuration des différents anneaux en BFUP.....97

Figure 5.18 Évolution de la force en fonction de la déformation moyenne mesurée au rayon intérieur de l'anneau de BFUP 98

Figure 5.19 Anneau de BFUP avec armatures circulaires soudées.....101

Figure 5.20 Prisme de retrait avec armatures.....101

Figure 5.21 Anneau avec joints et armatures 102

Figure 5.22 Surface de joint traitée 103

Figure 5.23 Déformation du retrait libre et restreint des configurations testées 104

Figure 5.24 Degré de restreinte des deux configurations testées avec et sans armatures 105

Figure 5.25 Instants moyens de macrofissuration des conditions testées 106

Figure 5.26 Évolution de la charge verticale de la presse en fonction de la déformation.....107

Figure 5.27 Développement de la macrofissure dans l'anneau de BFUP 3% armé sans joint.....108

Figure 5.28 Développement de la macrofissure dans l'anneau de BFUP 3% avec armatures et joints 108

Figure 5.29 Fissure traversante se propage dans le BFUP 109

Figure 5.30 Déformation de retrait libre et restreint des béton testés 112

Figure 5.31 Contraintes résiduelles réelles induite dans les anneaux testés 113

Figure 5.32 Degrés de relaxation et de restreinte des bétons testés 113

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABRÉVIATIONS

ACI American Concrete Institute

ASTM American society for testing and materials

BO Béton ordinaire

BFHP Béton fibré à hautes performances

BFUP Béton fibré à ultra-hautes performances

BRF Béton renforcé de fibres

CSH Silicates de calcium hydraté

E/C Rapport eau sur ciment

GRS Groupe de Recherche en génie des Structure de l'école Polytechnique

LVDT Linear Variable Differential Transformer

OCDE organisation de la coopération et du développement économique

RAC Réaction alcalis-carbonates

RAG Réaction alcalis-granulats

RAS Réaction alcalis-silice

RH Degré d'humidité

RILEM Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux

VMSTL Voie Maritime du Saint-Laurent

SYMBOLES

A_1 Critère d'uniformité

A_2 Critère d'uni-axialité

E_c Module élastique du béton (aussi appelé module de Young)

E_s Module élastique de l'acier (aussi appelé module de Young)

f'_c Résistance à la compression du béton

f_t Résistance à la traction du béton

K_1, K_2 Coefficients de régression

P_{res} Pression résiduelle à l'interface acier/béton

R_e Rayon externe de l'anneau de béton

R_i Rayon interne de l'anneau de béton

r_{ic} Rayon interne de l'anneau en béton

r_{is} Rayon interne de l'anneau en acier

r_{oc} Rayon externe de l'anneau en béton

r_{os} Rayon externe de l'anneau en acier

$\boldsymbol{e}_{acier}$ Épaisseur de l'anneau d'acier

$\boldsymbol{e}_{béton}$ Épaisseur de l'anneau de béton

w Ouverture de fissure

ν_c Coefficient de poisson du béton

ν_s Coefficient de poisson de l'acier

φ Facteur de réduction de contrainte du au fluage

ψ Degré de restreinte

λ Degré de relaxation due au fluage

λ_1, λ_2 Coefficients de régression

τ_l Temps de latence

τ_c Temps caractéristique

β Expansion maximale de RAG

ε_{st} Déformation de retrait libre

ε_{sh}	Déformation due au retrait restreint
σ_{res}	Contrainte résiduelle maximale
$\sigma_{ela\text{-}max}$	Contrainte élastique maximale

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Développement des équations de la théorie d'élasticité de Thimoshenko 128

Annexe B Protocole expérimental.....131

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

La réaction alcalis-granulats (RAG) est une pathologie qui atteint les structures en béton. Elle est classée la 12ème cause de dégradation des structures selon l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (Charron, 2019). Il s'agit d'une réaction chimique qui se produit en présence d'une humidité élevée (HR ≥ 85%) dans les pores du béton, d'une concentration suffisamment élevée d'alcalis actifs (Na^+, K^+) dans la solution des pores (PH élevé) et de granulats contenant certaines phases réactives de silice, silicate ou carbonate. Elle engendre une expansion volumique du volume de béton allant jusqu'à 0.2 à 0.5% à long terme (Saouma, 2014; Smaoui, 2003), le plus fréquemment due à la production d'un gel silico-calco-alcalins en présence d'eau dans la porosité du béton (produit de la réaction alcalis-silice, principale responsable de la RAG). Lorsque le gonflement dépasse un certain taux (0.05% selon Hobbs, 1988), les pressions induites causent la fissuration du béton. Des ouvertures de fissures de l'ordre de 1 mm et 10 mm à long terme peuvent être relevées sur les éléments structuraux (cas des poutres, colonnes) et les bétons de masse (cas des barrages par exemple) respectivement (Hobbs, 1988; Smaoui, 2003). De surcroit, la réaction alcalis-granulats occasionne des problèmes de fonctionnalité associés au gonflement des ouvrages atteints, notamment des déformations non-uniformes dans les éléments structuraux comme le désalignement de piles de ponts ou de portes de ponts mobiles. Par ailleurs, la présence de fissures générées par la RAG modifie les propriétés mécaniques et de perméabilité du béton favorisant ainsi la pénétration d'agents agressifs et d'eau. Ceci facilite l'initiation ou l'accélération de d'autres mécanismes de détérioration, endommagement au gel-dégel et corrosion des armatures, particulièrement présents dans les régions aux conditions environnementales sévères. La durée de vie et la durabilité des structures atteintes par la RAG sont donc très affectées. Il en résulte des coûts de réparations répétitives et d'entretien élevés.

Les conditions climatiques extrêmes du Québec conduisent plusieurs structures atteintes par la RAG à présenter un état de surface inquiétants. Dans le cas particulier des infrastructures et ouvrages portuaires fortement atteints par la RAG, tel que ceux de la Voie Maritime du Saint Laurent (VMSTL), cette réaction n'engendre pas seulement un gonflement et un dépôt de gel

siliceux aux surfaces (Figure 1.1). Elle pose surtout des limitations au niveau de la fonctionnalité de certaines structures (Figure 1.1).

Gonflement et fissuration d'un pilier de pont mobile de l'une des stations de la voie maritime

Dépôt de gel silico-calco-alcalin en surface

Figure 1.1 Endommagements des ouvrages de la VMSTL

a) Réduction de la taille des canaux de la voie maritime

b) Désalignement d'une pile de pont-levis de la voie maritime

Figure 1.2 Problèmes de fonctionnalité liés à la RAG relevés sur les ouvrages de la VMSTL

En effet, la Figure 1.2a montre que la réduction de la taille des canaux de navigation à cause du gonflement des parois latérales peut rendre les manœuvres des navires plus compliquées et peut même bloquer leur passage à long terme pour des raisons de sécurité. Aussi, les expansions volumétriques causées par la RAG provoquent, en service, le désalignement d'équipements vitaux de piles de ponts. Tel est le cas d'un pont-levis se trouvant au niveau de la voie maritime illustré à la Figure 1.1b.

Il est important de trouver des solutions pour limiter la détérioration des structures atteintes par la RAG premièrement pour contenir le gonflement de ces structures associé à la RAG et deuxièmement pour limiter les réactions additionnelles. Dans la première optique d'intervention pour confiner la réaction de gonflement, il existe déjà quelques techniques de réparation : le chemisage par béton neuf ou matériaux composites, le soulagement des pressions internes par découpe de rainures, l'application d'une précontrainte externe ou de coques en acier installées autour de la structure affectée pour contrer les effets d'expansion (Bérubé et al., 2000; Smaoui, 2003). Cependant, ces techniques de réparation structurale ne sont que partiellement efficaces. En effet, elles agissent sur la principale conséquence de la RAG, le gonflement, mais ne permettent pas de limiter l'apport en eau, essentiel à la réaction chimique, ni la pénétration des agents agressifs responsables d'autres mécanismes de détérioration.

Dans la deuxième optique d'intervention pour limiter la poursuite de la réaction chimique et le gonflement additionnel, certains produits de scellement de surface tels que la résine époxy ou le coulis de ciment (Bérubé et al., 2000; Bérubé et al., 2005; Smaoui, 2003) ont démontré une certaine efficacité pour réduire la pénétration de l'eau dans le béton atteint par la RAG. l'application de ces produits peut réduire le processus de réaction chimique en éliminant une partie de l'apport d'eau au béton, cependant ils n'apportent pas de contrôle ou de confinement à la structure atteinte. Une solution procurant une combinaison de scellement et confinement serait avantageuse.

Une nouvelle gamme de béton, les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), présente un potentiel intéressant pour agir sur ces niveaux. En effet, ce béton se distingue des bétons ordinaires par une très grande résistance à la traction et une capacité de déformation exceptionnelle d'environ 0.2% (Charron et al., 2013). Ce matériau peut offrir un réel effet de confinement et permettrait vraisemblablement de supporter le gonflement de la RAG sans fissure localisée pendant une période prolongée. De plus, le BFUP se caractérise par une perméabilité à l'eau très faible (1000

fois plus faible qu'un béton ordinaire) (Charron et al., 2013), ce qui favorisera une réduction de l'humidité dans les pores du béton, élément indispensable pour la RAG. Le BFUP est aussi peu sensible à la RAG (Graybeal, 2006; Vernet, 2003). En effet, la réaction alcalis-granulats nécessite la présence d'eau libre dans les pores du béton, ce qui n'est pas le cas des BFUP vu leur faible perméabilité et leur réseau poreux particulièrement fin.

Tous ces critères font du BFUP un matériau intéressant à considérer pour la réparation des structures affectées par la RAG. D'ailleurs, une première tentative de réparation par chemisage en BFUP, coulé sur place, d'un phare en Bretagne affecté par une réaction de gonflement impliquant la présence de sulfates et d'alcalis a été réalisée. Vu sa très faible perméabilité, associée à des propriétés mécaniques exceptionnelles et une grande facilité d'application (béton autoplaçant), le BFUP présentait dans ce cas la solution unique avec une perspective de durabilité à long terme. Une couche de BFUP de 60mm a été coulée sur place par hélicoptère (Dénarié et al., 2013). Aucune donnée n'est disponible sur les critères de conception du chemisage et sur la performance de la réparation, d'où l'intérêt de ce projet de recherche.

L'approche de réparation en BFUP proposée dans le cadre de ce projet de recherche implique que le BFUP sera soumis à deux types de sollicitations mécaniques. Tout d'abord, le BFUP devra résister aux efforts de retrait restreint généré au jeune âge par le retrait endogène du matériau entravé par la structure existante. Ensuite, le BFUP devra reprendre le gonflement de la structure par la RAG. Il importe donc de considérer ces deux types de sollicitations mécaniques dans ce projet afin de pouvoir déterminer avec confiance la performance du BFUP pour confiner la RAG et étanchéiser la structure atteinte.

À ce jour, aucun essai normalisé n'existe permettant d'appliquer ces deux sollicitations consécutives de retrait restreint et de gonflement à des spécimens de béton. Il est donc apparu, dès l'initiation du projet, essentiel de développer un nouveau dispositif d'essai permettant de reproduire cette condition particulière.

Le dispositif à concevoir devra donc d'abord simuler la restriction du retrait imposée par la structure existante sur la réparation en BFUP pour se rapprocher des conditions d'une application structurale réelle. La structure entrave les déformations de retrait du BFUP surtout au jeune âge. Dès qu'une partie du retrait est entravée, une contrainte de traction se développe dans la réparation et active le comportement viscoélastique (Bjøntegaard, 1999). Le dispositif devra donc permettre

de mesurer le retrait, le comportement viscoélastique ainsi que les contraintes et déformations induites par le retrait restreint. Le dispositif devra ensuite générer une expansion dans le BFUP pour simuler l'expansion de la RAG.

Étant donné que l'expansion de spécimens incorporant des granulats réactifs nécessite des conditions environnementales particulières (température et humidité relative élevée) et une longue période de temps (Hooton, 1995) difficile à respecter dans le cadre de ce projet, le dispositif devra permettre d'imposer une expansion rapide et uniforme. De plus, le dispositif d'essais devra permettre de tester différentes configurations de réparations (différents % de fibres dans le BFUP, présence de joints de construction, d'armatures). Ainsi, le dispositif permettra de déterminer la marge de déformation disponible pour chaque gamme et configuration de réparation en BFUP afin d'assurer un scellement et un confinement efficaces.

1.2 Objectifs du projet

L'objectif général de ce projet est d'évaluer la performance des bétons fibrés à ultra-hautes performances pour confiner les effets d'expansion causées par la RAG.

Ce projet de recherche se subdivise en quatre objectifs spécifiques :

1. Développer et valider un dispositif d'essai capable de reproduire les effets du retrait restreint du BFUP de la réparation ainsi que l'expansion qu'il subira par la suite sur une structure atteinte par la RAG ;
2. Caractériser le comportement au jeune âge du BFUP dû au retrait restreint pour déterminer sa mise en charge initiale et sa déformation initiale ;
3. Caractériser le comportement à long terme du BFUP lorsque soumis à une expansion causée par la RAG pour déterminer sa capacité de déformation résiduelle ;
4. Évaluer la performance de différentes configurations de réparation en BFUP (pourcentage de fibres dans le BFUP, présence de joint froid, présence d'armature) pour contrôler les expansions causées par la RAG en assurant un certain niveau d'étanchéité de la structure.

1.3 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie adoptée en vue de satisfaire les objectifs énoncés à la section précédente.

1.3.1 Développement et validation d'un dispositif d'essai

L'enjeu de cette étape est de concevoir un dispositif d'essai simple permettant de reproduire les deux types de sollicitations attendus sur la réparation en BFUP proposée, d'abord une condition d'entrave pour évaluer le retrait restreint de la réparation, ensuite une expansion uniforme imposée et qui soit représentative des expansions de la RAG. Une fois le dispositif développé, un programme expérimental préliminaire sera réalisé afin de déterminer la géométrie finale du dispositif et pour également valider la procédure d'essai (chargement, instruments de mesure, acquisition) ainsi que la méthode d'analyse des résultats avant de procéder aux essais du programme expérimental principal.

1.3.2 Programme expérimental principal

La première portion des essais sera dédiée à l'étude du retrait restreint du BFUP. Les données extraites du programme expérimental principal permettront la comparaison du comportement au jeune âge (retrait et viscoélasticité) des différentes configurations de réparations testées. Des équations basées sur la théorie d'élasticité permettront de déterminer la contrainte et la déformation de traction générée dans le BFUP ainsi que la partie relaxée par l'effet de la viscoélasticité.

La deuxième portion des essais du programme principal, consacrée au comportement du BFUP sous l'expansion de la RAG, permettra de déterminer la réserve de déformation en traction restante dans le BFUP après que celui-ci ait subit les effets du retrait retreint. Cette réserve sera comparée au niveau de déformation en traction attendue par la RAG et permettra de confirmer le potentiel du BFUP à sceller et confiner une structure atteinte.

1.4 Portée

Ce projet de recherche vise à évaluer le potentiel d'un chemisage en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) pour ralentir les expansions générées par la RAG , tout en offrant un bon niveau d'étanchéité et un confinement mécanique. Il va permettre de bien comprendre le

comportement du BFUP au jeune âge sous condition d'entrave du retrait, et d'évaluer la capacité de différentes configurations de BFUP à confiner les expansions causées par la réaction alcalis granulats. Cette étude permettra aussi d'initier une démarche en vue de proposer une méthode de confinement et une configuration de réparation en BFUP fiable capable de confiner les expansions de la RAG et de ralentir la réaction en agissant directement sur un paramètre indispensable à la réaction chimique, soit l'apport en eau.

Le but de ce mémoire est également de valoriser davantage la durabilité des bétons fibrés à ultra hautes performances et leur capacité de déformation accrue. Ces avantages justifient l'investissement dans le coût intial plus élevé des BFUP. Ce coût est en effet en partie absorbé initialement par le fait que les propriétés du BFUP permettent de l'utiliser dans des réparations plus minces (moins de volume de béton) et plus durables que celles réalisées avec les bétons conventionnels. Due à cette durabilité accrue, la différence de coût entre une réparation mince en BFUP et une réparation conventionnelle est généralement absorbée à moyen-long terme par une diminution des coûts d'entretien et de maintenance de la structure.

1.5 Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Le présent chapitre introduit ce projet de recherche. Le chapitre 2 est subdivisé en 4 sections. Les 3 premières constituent la revue de littérature portant respectivement sur la réaction alcalis granulats, les bétons fibrés à ultra hautes performances et le retrait restreint. La 4ème section couvre une synthèse de cette revue de la documentation. Le chapitre 3 étale la méthodologie expérimentale globale adoptée pour atteindre les objectifs de ce projet. Les chapitres 4 et 6 couvrent respectivement les résultats du programme expérimental préliminaire et principal. Finalement, le chapitre 6 détaille les conclusions du projet de recherche ainsi que les recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Réaction alcalis-granulats

La réaction alcalis-granulats (RAG) est un mécanisme de détérioration majeur qui affecte la durabilité des structures en béton. Une bonne évaluation de ses causes ainsi que de ses conséquences est cruciale et présente souvent le critère décisif entre l'échec ou le succès d'une intervention appliquée à la structure atteinte par la RAG. Ce chapitre décrit les processus chimiques à l'origine de cette réaction et ses impacts sur les infrastructures.

2.1.1 Mécanismes de la RAG

La réaction alcalis-granulats est une réaction acido-basique. Les réactifs acides sont les minéraux solides présents dans les granulats. Ils sont chimiquement instables et réagissent très rapidement dans un milieu où le pH est élevé. Les réactifs basiques sont les hydroxydes alcalins (Na^+, K^+, OH^-) présents dans les interstices de la pâte de ciment et l'hydroxyde de calcium sous forme solide (Chatterji, 2005; Saouma, 2014).

Pour initier cette réaction, trois conditions essentielles doivent coexister, soit la présence de granulats réactifs dans le béton, une concentration élevée en alcalis et une humidité relative supérieure à environ 85% (Charron, 2019; Fournier et al., 2000). La réactivité des granulats est directement liée à la quantité et la finesse des phases réactives présentes dans les granulats. Les ions hydroxyles et alcalins présents dans la solution interstitielle des pores du béton sont, quant à eux, considérés comme la force motrice de la RAG. Le potentiel de manifestation de la RAG est fonction de la concentration en alcalis par m^3 de béton. Celle-ci est considérée préjudiciable lorsque la teneur en alcalis actifs dépasse 3 kg/m^3 (Bérubé et al., 1992), quoique cette valeur peut varier grandement en fonction,, entre autres, de la nature et du degré de réactivité du granulat (CSA A23.2-27A). Il importe de mentionner que les alcalis proviennent non seulement du ciment, mais aussi des minéraux alcalins des granulats, du sable de mer non lavé ou d'ajouts cimentaires riches en alcalis et aussi de certains adjuvants chimiques riches en alcalis. Ceci augmente le risque d'endommagement dû à la RAG (Fournier et al., 2000).

Trois types de réaction alcalis-granulats sont généralement rencontrés : la réaction alcalis-silice (la plus fréquente au Québec (Bérubé et al., 2000)) et la réaction alcalis-carbonate (RAC) . Elles diffèrent par le type des phases minérales impliquées dans la réaction.

2.1.1.1 Réaction alcalis-carbonates

La RAC résulte de la réaction de la dolomite, présente dans les granulats de type dolomitiques argileux, avec les alcalis. Les cristaux de dolomite subissent un processus de dédolomisation en présence d'hydroxyles alcalins, ouvrant ainsi des micro-canaux permettant une pénétration plus profonde des alcalis dans les granulats. La réaction a lieu entre la dolomie et les hydroxyles alcalins et produit de la calcite, de la brucite et des carbonates alcalins qui réagissent à leur tour avec la portlandite pour régénérer des alcalis. Ceci suggère que la RAC est un processus qui se poursuit indéfiniment tant que les conditions sont favorables. Le béton atteint par la RAC subit par la suite une fissuration qui est induite par l'expansion des granulats à travers divers processus combinés, soit les pressions hydrauliques générées par la migration des molécules d'eau et des ions alcalins dans les espaces restreints de la matrice de dolomite, l'adsorption des ions alcalins et de l'eau à la surface des minéraux argileux autour des grains de dolomite ainsi que la réorganisation et la croissance des produits de la dédolomisation (Gillott et al., 1969).

Les granulats du Canada qui sont sensibles à la RAC présentent un potentiel d'expansion nocive et très rapide causant la fissuration au bout de 3 ans. Or, l'occurrence de cette réaction dans les structures est est principalement limitée au sud de l'Ontario au Canada, et à certains pays à travers le monde (Fournier et al., 2000).

2.1.1.2 Réaction alcalis-silice

Contrairement à la RAC, la réaction alcalis-silice (RAS) est beaucoup plus fréquente. Elle est directement liée à l'instabilité de la silice dans des conditions de pH élevé. Selon la phase siliceuse engagée dans la réaction, deux types de la RAS sont distinguées (Fournier et al., 2000). La réaction alcalis-silicate implique les grains de quartz très fins et variés (concentration supérieure à 5%) (Charron, 2019). Cette catégorie est commune dans l'est du Canada et elle est caractérisée par une expansion due à l'exfoliation des minéraux argileux et une fissuration qui peut prendre de 10 à 25 ans à apparaître (Fournier et al., 2000). La réaction alcalis-silice implique, quant à elle, des minéraux de silice mal cristallisés et/ou métastables (opale, tridymite, cristobalite et verres

volcaniques). Cette réaction est assez rapide et elle se manifeste même pour des quantités de minéraux faibles de 1 à 2% (Fournier et al., 2000). Elle produit un gel silico-alcalin formé de silicates de calcium et de potassium hydratés principalement à l'intérieur et à proximité immédiate des particules de granulats réactifs (Dron et al., 1992). En présence d'eau (humidité relative interne supérieure à 85%), le gel formé gonfle, exerce une pression expansive et cause l'éclatement du béton. L'expansion de ce gel comprend deux phases. La première est l'hydratation du gel et l'augmentation de son volume au sein des particules réactives. Durant cette phase, la différence de potentiel chimique entre la solution dans le gel et la solution des pores de béton induit une absorption élevée d'eau et l'expansion du gel en réponse aux pressions osmotiques. Ensuite, le gel se diffuse dans la pâte de ciment où il échange une partie de ses alcalis avec du calcium présent dans la pâte. Il importe de mentionner que, lorsque le gel est partiellement déshydraté, son expansion s'arrête mais reprend très rapidement si une eau supplémentaire est fournie (Diamond, 1989; Figueira et al., 2019; Multon, 2003), d'où le caractère cumulatif et irréversible des gonflements causés par la réaction. L'expansion et la fissuration générées sont importantes et deviennent délétères au bout de quelques années lorsque des conditions favorables existent (Charron, 2019; Fournier et al., 2000).

2.1.2 Autres paramètres d'influence

La réaction alcali-granulats est une réaction qui ne se développe que dans des conditions particulières citées dans la section précédente. Par ailleurs, plusieurs autres paramètres externes influent sur le potentiel de manifestation de la réaction et sur ses effets. Les principaux paramètres d'influence sont discutés dans cette section.

2.1.2.1 Conditions environnementales

L'exposition d'une structure atteinte par la RAG à des conditions environnementales sévères induit souvent une fissuration de surface (Figure 2.1). Le cœur du béton gonfle avec une HR plus élevée alors que le béton de surface est moins expansif dû eux effets de séchage (vent, ensoleillement). De ce fait, des fissures subparallèles sont initialement provoquées étant donné le gradient de déformation. Les contraintes de traction sont par la suite soulagées par l'ouverture de fissures polygonales plus larges et perpendiculaires à la surface (Forster et al., 1998). La combinaison du gonflement différentiel, du retrait de séchage, des cycles gel/dégel ainsi que plusieurs autres

mécanismes accélère l'apparition des fissures et la pénétration d'agents agressifs amplifie ces ouvertures (Salmon et al., 1993). Des essais en laboratoire réalisés sur des spécimens incorporant des granulats hyper réactifs et soumis à des combinaisons différentes de conditions d'exposition ont montré que les échantillons soumis à des cycles mouillage/séchage présentent une plus petite expansion globale, mais une surface de fissuration plus étendue que les échantillons soumis à une humidité relative constante de 100%. Aussi, les échantillons ayant subi des cycles de gel/dégel présentent une plus grande expansion globale ainsi qu'une fissuration de surface plus étendue que les spécimens soumis à une humidité relative de 100% (Fournier et al., 2000). Ceci suggère que la fissuration due à la RAG peut accélérer la détérioration d'un élément par plusieurs mécanismes tels que le gel/dégel, l'attaque des sulfates et la corrosion des barres d'armature. De plus, la RAG peut, elle-même, être induite ou accélérée. En effet, lorsqu'un élément en béton incorporant des granulats réactifs fissure suite à des processus de dégradation, un chemin préférentiel pour l'eau et les alcalis est créé favorisant ainsi le déclenchement de la RAG.

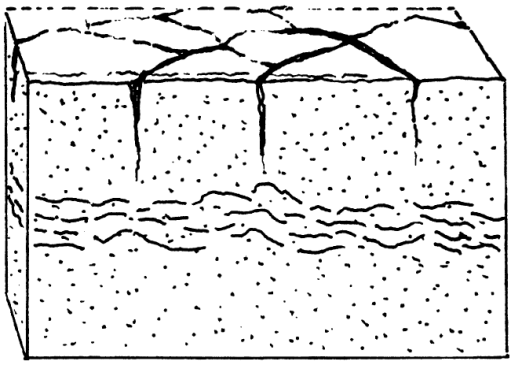


Figure 2.1 Croquis de la fissuration polygonale en surface et des fissures subparallèles dans le béton atteint par RAG (Forster et al., 1998)

2.1.2.2 Rapport E/C et perméabilité

Une humidité relative élevée est essentielle pour le développement d'une expansion nocive due à la RAG. Un rapport E/C faible améliore les propriétés mécaniques et diminue la quantité d'eau libre interne ainsi que la perméabilité (porosité plus faible). Ceci limite la pénétration et la mobilité d'eau et d'autres agents nocifs et réduit la migration d'alcalis externes dans le béton ralentissant ainsi la vitesse de la réaction (Forster et al., 1998). Néanmoins, une porosité plus faible peut restreindre les expansions et un plus grand volume de ciment entraine une augmentation de la

concentration en alcalis dans la solution interstitielle. Ceci dit, une étude réalisée à l'Université Laval a montré que pour une même concentration en alcalis et des rapports E/C de l'ordre 0.35 à 0.55 une réduction du rapport E/C résulte en une réduction de l'expansion induite par la RAG (Fournier et al., 2000).

2.1.2.3 Air entrainé

L'utilisation de l'air entrainé, en limitant l'endommagement dû aux cycles de gel-dégel dans le béton, peut potentiellement réduire les effets de la RAG, mais ne peut pas prévenir son déclenchement (Fournier et al., 2000). Ce réseau de bulles d'air peut aussi recevoir le gel silico-alcalin expansif et éviter/ou retarder les expansions délétères qui compromettent la stabilité du béton en service. Toutefois, l'endommagement dû à la RAS est généralement généré avant que le gel s'accumule dans les bulles d'air, ce qui fait que l'air entraîné a peu d'impact sur l'ampleur de l'expansion atteinte par la RAS.

2.1.2.4 Température

La température est aussi un paramètre à ne pas négliger. Une augmentation de la température de 10°C permet de doubler la vitesse d'une réaction chimique, notamment la RAG (Hobbs, 1988). Plusieurs enquêtes en laboratoire ont montré qu'une élévation de la température, pour une gamme de 20°C à 60°C, augmente les taux d'expansion au jeune âge mais peut entraîner une expansion ultime légèrement plus faible en raison de l'évaporation de l'eau sous haute température (Forster et al., 1998; Hobbs, 1988; Larive, 1997). Cependant, d'autres expériences montrent que les gonflements ultimes sont quatre fois supérieurs à 13°C qu'à 38°C (Wood et al., 1987). Malgré l'absence d'un consensus, la température reste un paramètre important à prendre en compte pour une étude préventive de la RAG, étant donné que le seuil d'humidité relative et de perte en eau est grandement influencé par la température.

2.1.3 Conséquences

La RAG est l'une des causes principales de la détérioration des structures en béton dans plusieurs pays à travers le monde. Comme présenté dans les sections précédentes, les structures les plus endommagées par cette réaction sont celles qui sont exposées à des conditions d'humidité élevée. Tel que cela sera décrit plus en détail dans cette section, ces endommagements prennent la forme

de fissurations internes et de surface ainsi que des modifications des propriétés intrinsèques au béton. Dans la plupart cas, ces endommagements ne sont pas critiques pour la résistance ultime de la structure, ils modifient plutôt le comportement en service en réduisant la fonctionnalité de la structure ou sa durabilité du au gonflement. Il est donc indispensable qu'une évaluation fiable des modifications apportées à ces structures soit faite, notamment pour les structures et infrastructures majeures comme les piles et piliers de ponts, les portes d'écluses, les barrages et les réacteurs nucléaires. Cette section présente les types d'endommagement relevés sur les structures atteintes par la RAG ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques.

2.1.3.1 Observations sur les infrastructures

La réaction alcalis-granulats la plus fréquente est la RAS. Elle se caractérise par la production d'un gel qui, en présence d'eau, gonfle et génère des expansions. Lorsque les contraintes développées dépassent la résistance à la traction, une fissure se développe. Cette section présente les niveaux de gonflement, ainsi que la fissuration relevée sur les structures.

Description du gonflement

Il est difficile de déterminer de manière précise le taux d'expansion d'une structure réelle étant donné l'implication d'autres paramètres dû à la modification des conditions d'exposition durant toute l'année. Un consensus existe cependant sur la cinétique d'évolution des gonflements. Dans un premier temps, l'évolution est assez rapide puis se stabilise lorsqu'elle atteint un palier de fin de réaction (Clayton, 1989; Hobbs, 1988; Larive, 1997; Li et al., 2001). La Figure 2.2 présente la cinétique de gonflement libre d'une éprouvette réactive. Selon Larive (1997), le temps de latence, τ_l, caractérise le temps d'accélération de la réaction par augmentation de la diffusion de la microfissuration dans le béton. Le temps caractéristique τ_c, est, quant à lui, relatif à l'étape d'atténuation des gonflements. Il caractérise donc la durée nécessaire pour atteindre le palier final de déformation maximale β. Bien que cette courbe d'expansion représente la suite logique du processus, il importe de mentionner qu'en laboratoire, la tendance asymptotique de cette courbe est fortement accélérée/influencée par le lessivage des alcalis du béton, ce qui entraîne l'arrêt progressif de la réaction et conséquemment de l'expansion.

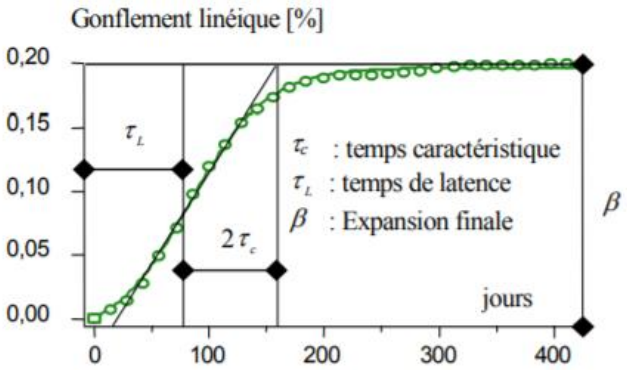


Figure 2.2 Modélisation de la courbe d'expansion d'éléments atteints par la RAG (Larive, 1997)

Une évaluation des endommagements de trois ponts à Québec (Du-Vallon bridge, Père-Lelièvre bridge et St-David bridge) montre que les expansions relevées après 35 ans, évaluée à l'aide de la fissuration superficielle, d'un indice d 'endommagement pétrographique (DRI) et d'un essai de chargement cyclique (SDT), varient entre 0.02 % et 0.08 % pour les bétons structuraux comparativement à 0.28 % et 0.49 % pour les bétons massifs (Smaoui, 2003). Le taux d'expansion mesuré annuellement varie en moyenne entre 0.007 % et 0.018 % (Bérubé et al., 2005; Smaoui, 2003). Ces niveaux d'expansion sont observés sur des structures exposées à des conditions climatiques sévères et présentant d'importants signes de dégradation associés non seulement à la RAG, mais aussi à la corrosion et cycles de gel/dégel. L'augmentation du volume d'un élément peut être déduite à partir de l'écrasement des joints ou suite à la manifestation d'une difficulté occasionnelle croissante dans le fonctionnement des machines attachées au béton (par exemple, les portes des écluses et les moteurs de la VMSTL ou les portes du déversoir des barrages). Ceci dit, Saouma (2014) affirme que les expansions volumétriques maximales dues exclusivement à la RAG, relevées sur les structures, sont de l'ordre de 0.2 % à 0.5 %. Par ailleurs, des essais d'expansion réalisés sur des blocs (400 x 400 x 700mm) en exposition extérieure a permis d'obtenir des valeurs d'expansion d'autant plus élevées entre 0.5 et 0.7% après 20-25 ans (Fournier et al., 2018).

Patron de fissuration

Selon Hobbs (1988), la fissuration due à la RAG s'initie pour une expansion générant une déformation de traction de l'ordre de 0.05 %. Le comportement à la fissuration des éléments

affectés par cette réaction est étroitement lié aux dimensions de la structure, aux contraintes internes et externes et au degré d'humidité. Lorsque les expansions sont restreintes par la présence d'autres éléments structuraux adjacents ou par la présence des barres d'armatures, la réaction est ralentie et l'aspect extérieur du motif des fissures devient directement lié à la distribution des contraintes dans le béton. L'expansion se produit perpendiculairement à la direction de retenue des mouvements et les fissures qui en résultent ont tendance à s'aligner parallèlement à la direction de retenue maximale. Par exemple, dans le cas d'une chaussée, la distribution des contraintes entraine des fissures longitudinales sur la majeure partie de la surface (Bérubé et al., 2005; Forster et al., 1998; Hobbs, 1988). En revanche, sur les bétons de masse, peu ou non renforcés et peu chargés, la fissuration est polygonale, diffuse et ouverte. Elle est très similaire à celles des fissures de retrait ou celles générées par le gel/dégel. La fissuration de surface présente un motif polygonal irrégulier tel qu'illustré sur la Figure 2.3. La taille et la régularité du motif dépendent de la cohésion, de l'uniformité et de l'isotropie du béton constituant la structure ainsi que de la vitesse du retrait. Cette fissuration est due à l'éclatement du béton près de la surface. C'est une réponse à une expansion différentielle tel qu'expliqué dans la Section 2.1.1. Elle est ensuite amplifiée par des agents climatiques externes (Charron, 2019; Saouma, 2014). Selon Hobbs (1998), l'ouverture des fissures dues à la RAS ne dépasse généralement pas 1 mm et sa profondeur est de l'ordre de 20 à 40 mm. Néanmoins, il a été rapporté, pour des structures non armées (cas des barrages), des ouvertures de l'ordre de 10 mm et de profondeur 300 mm (Smaoui, 2003). Outre la fissuration de surface, des dépôts de gel siliceux de couleur blanche apparaissent à la surface à travers la porosité du béton et le long des fissures. Il est aussi à noter que la RAC, en particulier, cause l'écaillage et la délamination de la surface extérieure de l'élément atteint suite à l'exfoliation des minéraux argileux (Gillott et al., 1969).

Figure 2.3 Patron de fissuration causée par la RAG relevé sur une des structures de la Voie Maritime du Saint Laurent

2.1.3.2 Modification des propriétés mécaniques

Le comportement mécanique du béton atteint par la RAG, et plus particulièrement la RAS, dépend fortement de la nature des granulats et de la teneur en alcalis du ciment utilisé (Esposito et al., 2016; Larive, 1997; Siemes et al., 2000; Smaoui, 2003). Il a aussi été démontré qu'il est fonction du niveaux d'expansion atteint par la structure atteinte (Sanchez et al., 2017). Cette réaction affecte les propriétés mécaniques d'une manière graduelle avec l'avancement de la réaction.

De nombreux auteurs ont étudié l'évolution des propriétés mécaniques d'éprouvettes cylindriques (Smaoui, 2003; Smaoui et al., 2004) ou cubiques (Swamy et al., 1988) incorporant des granulats réactifs coulées en laboratoire par comparaison à des éprouvettes de béton sain non réactif. Des chutes de l'ordre de 10 à 15 % de la résistance à la compression ont été observées par certains (Smaoui, 2003; Smaoui et al., 2004) pour un niveau d'expansion de 0.1 %. D'autres chercheurs ont observé une plus grande réduction de la résistance à la compression (de l'ordre de 40-50 %) sur des spécimens prismatiques ayant subi des expansions variant entre 2.5 et 3 % (Esposito et al., 2016). Enfin, d'autres n'observent aucune modification significative du comportement en compression du béton atteint quel que soit le niveau d'expansion (Larive, 1997; Siemes et al.,

2000). En ce qui concerne la résistance à la traction, une perte de résistance est plus significative (Sanchez et al., 2017). Une réduction de l'ordre de 48 % a été observée par Smaoui (2003) sur des éprouvettes cylindriques coulées en laboratoire contenant des granulats réactifs et atteignant un niveau d'expansion de 0.1% et une perte de 85 % a été observée par Siemes et al. (2000) sur des carottes issues d'ouvrages réels et pour des niveaux d'expansion variant entre 0.5 % et 1%.

Si l'ampleur de l'impact de la RAG sur les résistances en compression et en traction ne fait pas toujours consensus entre les études, un consensus semble en revanche exister quant à son impact sur le module d'Young. Ce dernier semble diminuer rapidement avec l'avancée de la réaction. Les réductions de module relevées sur des cylindres en béton incorporant des granulats réactifs coulés en laboratoire sont comprises entre 40 et 80 % pour des niveaux d'expansion variant de 0.1 à 0.6% (Bérubé et al., 2000; Larive, 1997; Smaoui, 2003; Smaoui et al., 2004; Swamy et al., 1988).

2.1.4 Méthodes de réparation existantes

Plusieurs interventions ont eu lieu sur les ouvrages atteints par la RAG, notamment ceux d'Hydro-Québec, dans l'objectif d'enrayer la réaction et ses conséquences. Les méthodes varient selon l'avancement de la réaction et le niveau de dégradation ainsi que la catégorie d'intervention dans laquelle elles s'insèrent. Parmi les méthodes utilisées, une première méthode consiste à appliquer un scellant à base de silane en surface ou encore une couche d'enduit après avoir nettoyé les surfaces au jet de sable ou au jet d'eau sous pression. Une deuxième méthode consiste à enlever la couche extérieure du béton dégradé puis à appliquer une surépaisseur de béton ordinaire, autoplaçant ou projeté (avec ou sans ajout d'armatures, avec ou sans adjuvant anti-RAG) (Bérubé et al., 2000; Bérubé et al., 2005; Smaoui, 2003). En limitant la pénétration d'eau dans l'ouvrage (par scellement des fissures ou renouvellement du béton détérioré en surface respectivement), ces deux méthodes font partie d'une première catégorie d'intervention visant essentiellement à ralentir la réaction en limitant l'apport d'humidité externe au sein du béton ce qui permet de limiter la poursuite de la RAG.

D'autres méthodes s'inscrivent dans la deuxième catégorie d'intervention qui consiste plutôt à confiner la réaction de gonflement et limiter ses conséquences (Fissuration et diminution des caractéristiques mécaniques) en renforçant structurellement la structure affectée. Parmi ces méthodes on compte le renforcement par post tension de câbles ou tiges d'acier, le chemisage de la structure par plaques d'acier et l'application d'une ou plusieurs couches de matériau composite

(Bérubé et al., 2000; Smaoui, 2003). Bien que ces méthodes soient mécaniquement efficaces, elles présentent divers inconvénients. De manière générale, ces méthodes ne permettent pas d'arrêter la réaction puisqu'elles agissent surtout sur ses conséquences. Elles ont également un effet souvent négatif sur l'esthétisme général de l'ouvrage. De manière plus spécifique aux différentes méthodes utilisées, les plaques d'acier peuvent être sujettes à la corrosion et nécessitent aussi d'avoir de l'espace pour les installer. Les matériaux composites, quant à eux, présentent une meilleure durabilité que les plaques d'acier, mais leur mise en place est assez complexe vu qu'elle nécessite une préparation délicate de la surface (ponçage, meulage des angles, évacuation de la poussière...). De plus, ils ne peuvent être appliqués que sur des surfaces sèches (Abou Chakra, 2016), ce qui n'est pas le cas de la majorité des structures atteintes par la RAG.

En résumé, toutes les méthodes citées précédemment agissent généralement soit sur l'origine de la réaction soit sur ses conséquences mais rarement sur les deux. Une réparation idéale et durable devrait agir sur l'effet et l'origine de la réaction. C'est à dire confiner les gonflements délétères causés par la RAG et éliminer au moins un des paramètres indispensables à l'initiation et la progression de la réaction, soit l'humidité relative supérieure à 85%, la concentration élevée en alcalis ou les granulats réactifs. La réparation idéale qui sera à l'étude dans ce mémoire consistera à utiliser de minces réparations structurales en BFUP.

2.2 Bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP)

L'intérêt des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) pour l'application recherchée réside, d'une part, dans la compacité élevée de leur matrice cimentaire qui leur procure une excellente durabilité à l'état non fissuré et, d'autre part, dans leur comportement mécanique exceptionnel en traction. Celui-ci résulte d'un excellent contrôle de la fissuration par les fibres, qui leur procure également une excellente durabilité à l'état fissuré.

Ce chapitre vise à présenter les différentes propriétés des BFUP, soit ses propriétés mécaniques, de déformation et de durabilité.

2.2.1 Principes fondamentaux

Comparé aux bétons ordinaires, le BFUP se distingue par les principes suivants (Charron et al., 2013; Tayeh et al., 2013) :

- Une homogénéité améliorée de la matrice cimentaire assurée par la composition granulaire très fine (gros granulats éliminés) et l'incorporation d'ajouts cimentaires généralement pouzzolaniques très actifs;
- Une compacité exceptionnellement élevée et une diminution de la quantité d'eau libre dans la matrice (rapport E/C très faible), ce qui conduit à une porosité beaucoup plus fine et donc une durabilité bien supérieure à l'état non fissuré;
- Une meilleure ductilité grâce à l'introduction de fibres d'acier courtes (microfibres) et en grande quantité. Ces fibres assurent un comportement écrouissant en traction en pré-pic et un comportement adoucissant en post-pic.

Les sections qui suivent décriront en détail les comportements du BFUP et expliqueront le choix de ce matériau pour le présent projet.

2.2.2 Propriétés mécaniques

2.2.2.1 Comportement en compression

Le rapport eau/liant (E/L) plus faible du BFUP par rapport aux bétons conventionnels lui procure une résistance à la compression (f'_c) fortement accrue. Le Tableau 2.1 présente la composition de

différents bétons par rapport à un béton ordinaire (BO). Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), par sa matrice plus compacte, son homogénéité améliorée et le pourcentage élevé de microfibres, présente des performances beaucoup plus élevées en compression. En effet, un plus grand volume de pâte cimentaire et un rapport E/L faible (compris entre 0.15 et 0.25) résultent en une résistance à la compression jusqu'à 9 fois plus grande que celle d'un béton ordinaire. La présence des fibres n'a pas d'impact significatif sur le comportement en compression, excepté la présence d'une phase légèrement écrouissante entre la phase élastique et l'atteinte de f'_c (Hassan et al., 2012; Plumey et al., 2002). Ceci signifie qu'un BFUP présentera un f'_c très similaire au même mélange sans fibres (Hassan et al., 2012; Plumey et al., 2002). Cependant, le comportement post-pic (phase de rupture) sera plus ductile en présence des fibres (Figure 2.4).

Tableau 2.1 Caractéristiques de différents types de béton (Charron et al., 2013)

Composition	BO	BHP	BFHP *	BFUP
Rapport eau/liant	≥ 0.40	0.30 à 0.40	0.30 à 0.40	0.15 à 0.25
Liant	300-400 kg/m3	350 à 450 kg/m3	350 à 550 kg/m3	800 à 1000 kg/m3
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres	Non	Non	40 à 120 kg/m3 (0.5 à 1.5 %-vol.)	160 à 480 kg/m3 (2 à 6 %-vol.)
Propriétés	**BO**	**BHP**	**BFHP ***	**BFUP**
Compression - f'_c	20 à 40 MPa	50 à 90 MPa	50 à 90 MPa	120 à 180 MPa
Traction - f'_t	1.5 à 2.5MPa	3.0 à 4.5MPa	3.0 à 4.5 MPa	7 à 15 MPa
Module - E_c	20 à 25 GPa	25 à 35 GPa	25 à 35 GPa	30 à 45 GPa

* : Dosage en fibre minimal de 0.5% pour réduction de perméabilité et apport structural significatifs

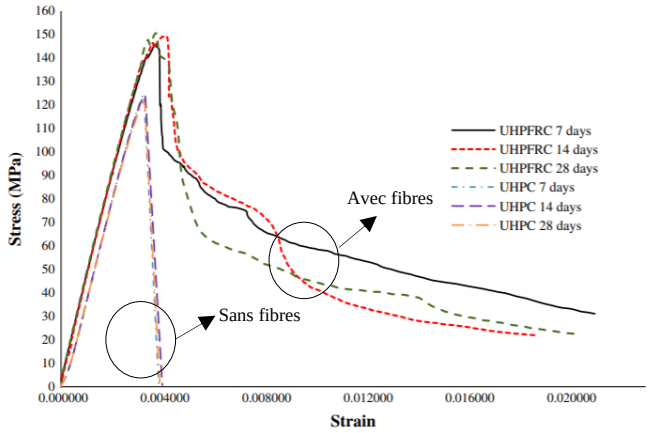


Figure 2.4 Comportement en compression du BFUP (Hassan et al., 2012)

2.2.2.2 Comportement en traction

Le comportement en traction du BFUP est directement lié à la présence des fibres (Charron et al., 2013). Pour mieux comprendre le mécanisme d'action des fibres, il importe d'assimiler, dans un premier temps, le comportement en traction d'un béton non fibré. La Figure 2.5 illustre l'évolution de la contrainte par rapport à la déformation des bétons non renforcés de fibres. Initialement le béton peut présenter des microfissures de surface résultant des effets thermiques et de retrait qui, lorsque la déformation augmente, se propagent simultanément avec la formation et la diffusion d'autres microfissures perpendiculairement à la direction de chargement. Les microfissures se densifient et s'interconnectent jusqu'à la localisation d'une macrofissure qui est repérée, sur la Figure 2.5, par le point C. Ce niveau de déformation correspond à la résistance maximale en traction du béton. Lorsque la macrofissure continue de s'ouvrir, il y a une rupture fragile du béton (chute rapide de la résistance) avec la séparation de l'élément en question en deux morceaux distincts.

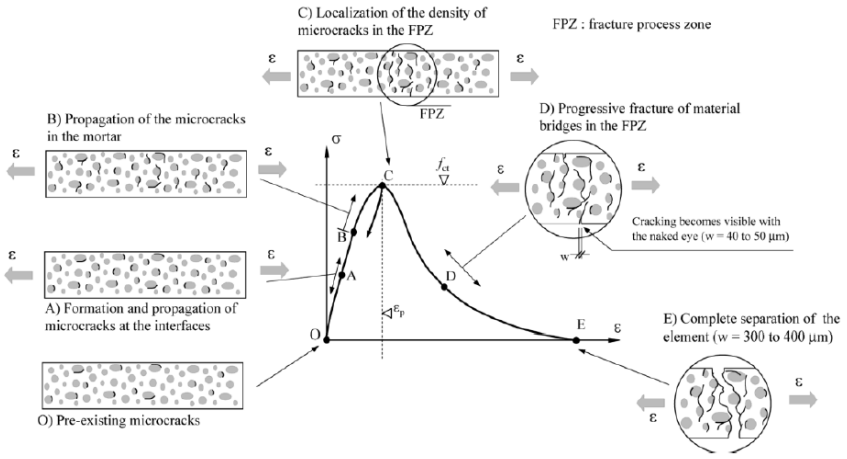


Figure 2.5 Comportement en traction d'un béton non fibré (Bernard, 2000)

La Figure 2.6 compare, de manière schématique, le comportement déformationnel d'un béton ordinaire fibré et celui d'un BFUP. Les deux courbes sont subdivisées en deux parties, l'une présentant le comportement pré-pic par rapport à la déformation et l'autre le comportement post-pic en fonction de l'ouverture de fissure. Le comportement pré-pic des bétons fibrés standards (Figure 2.6a est très court et similaire aux mêmes bétons conventionnels non fibrés. La résistance maximale en traction est atteinte très rapidement après la fin du domaine élastique et correspond à un niveau

de déformation peu élevé. Ceci est expliqué par le fait que peu de microfissures se développent en pré-pic. En effet, les fibres utilisées dans les bétons standards sont généralement longues et de gros diamètre. Elles ne peuvent donc pas contrôler l'ouverture des microfissures, mais viendront coudre les macrofissures en phase post-pic retardant ainsi la rupture. Ce contrôle de la fissuration en post-pic procure une ductilité après la localisation, avec une phase adoucissante en post-pic. Ainsi, une résistance résiduelle à la traction en service est assurée malgré la présence d'une fissure localisée (Charron et al., 2013).

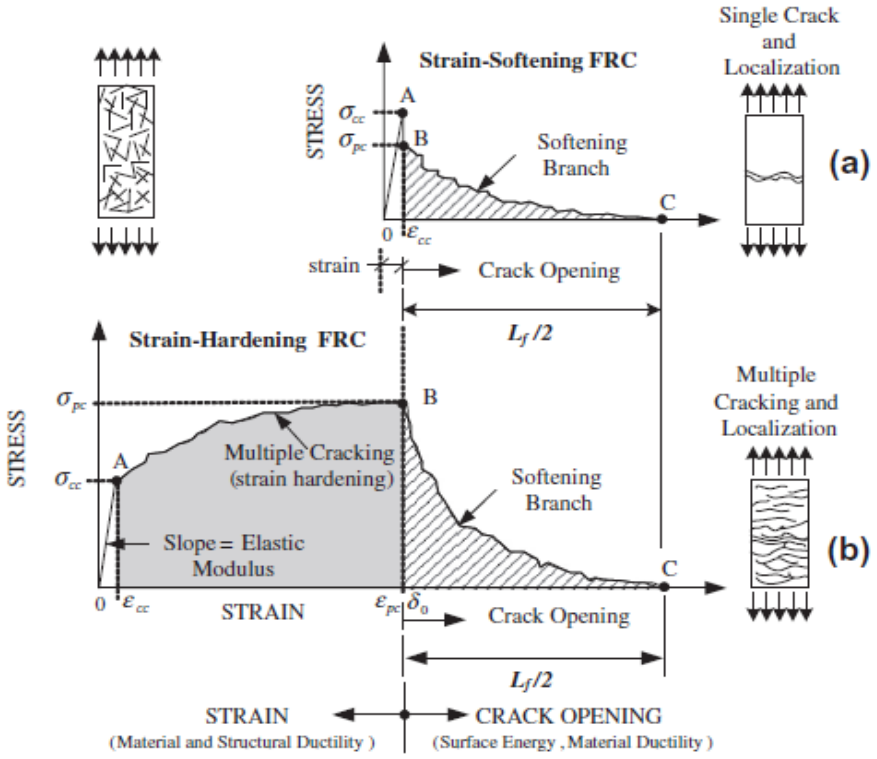


Figure 2.6 Comportement typique en traction de béton standard fibré et de BFUP (a) Béton ordinaire fibré ; (b) BFUP (Naaman, 2003)

La Figure 2.6b illustre le comportement en traction des BFUP. Ce dernier se caractérise par la présence d'une phase dite écrouissante entre la fin du comportement linéaire et l'atteinte de la résistance maximale en traction. La présence de fibres courtes, de petit diamètre et en grande quantité, permet l'apparition et la reprise des efforts au niveau d'une multitude de microfissures très fines en pré-pic. Ainsi, la formation, la coalescence et la localisation des fissures sont retardées. La ductilité est alors significativement améliorée (Habel, 2004; Hassan et al., 2012). Une fois le

pic de résistance atteint, une macrofissure localise dans le BFUP qui présente alors un comportement adoucissant en post-pic avec une perte de résistance très lente puisque les fibres continuent à contrôler la fissure localisée qui s'ouvre parallèlement à la densification des microfissures. Par ailleurs, la résistance à la traction est très élevée. Elle est jusqu'à 10 fois plus importante que la résistance en traction d'un béton ordinaire selon le Tableau 2.1. La Figure 2.7 montre aussi que la résistance d'un BFUP est beaucoup plus élevée (environ le double) que celle du même béton mais cette fois non fibré (Béton à ultra-haute performance, BUP). Ceci s'explique par l'absence de la phase d'écrouissage en pré-pic en l'absence des microfibres. La présence des fibres joue donc un rôle majeur dans l'amélioration de la résistance maximale à la traction puisqu'elles reprennent une grande partie des efforts de traction surtout lorsque les microfissures commencent à se former (Hassan et al., 2012; Rossi et al., 1987).

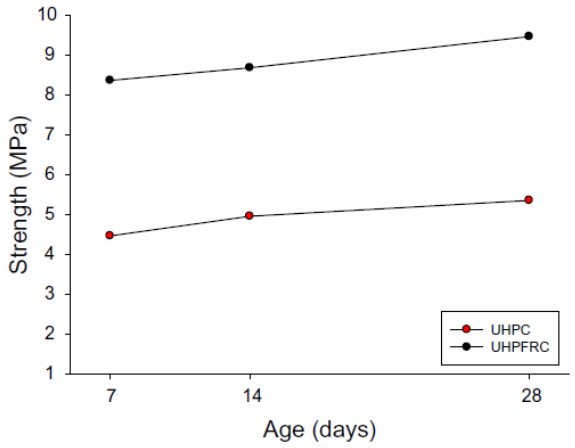


Figure 2.7 Évolution de la résistance en traction au cours du temps d'un BFUP et un BUHP (Hassan et al., 2012)

À titre indicatif, la Figure 2.8 compare la capacité de déformation de différentes catégories de béton (béton ordinaire BO, béton à hautes performances BHP, béton fibré à hautes performances BFHP et BFUP) au comportement d'une barre d'armature en acier. Outre sa résistance à la traction exceptionnelle, le BFUP présente une phase écrouissante très longue avant la localisation d'une macrofissure au pic de résistance. Sa capacité de déformation, ici pour un BFUP comprenant 4 %

volumique de microfibres d'acier, est comparable au niveau de déformation qui provoque la plastification d'une barre d'armature en acier de limite élastique de 400 MPa. Ceci signifie qu'un tel BFUP travaille dans son domaine pré-pic dans les structures et que les ouvrages en BFUP sont dimensionnés de telle sorte à ce que seules des microfissures et non des macrofissures se forment dans le BFUP. Ceci permet d'assurer une excellente durabilité des structures en BFUP, même en condition fissurée, tel que cela sera discuté plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Dû à l'excellent comportement en traction du BFUP, les structures en BFUP peuvent être optimisées et allégées puisqu'elles peuvent être exemptées de plus de 50 à 85% des armatures passives normalement retrouvées dans une structure comparable en béton armé (Charron, 2019).

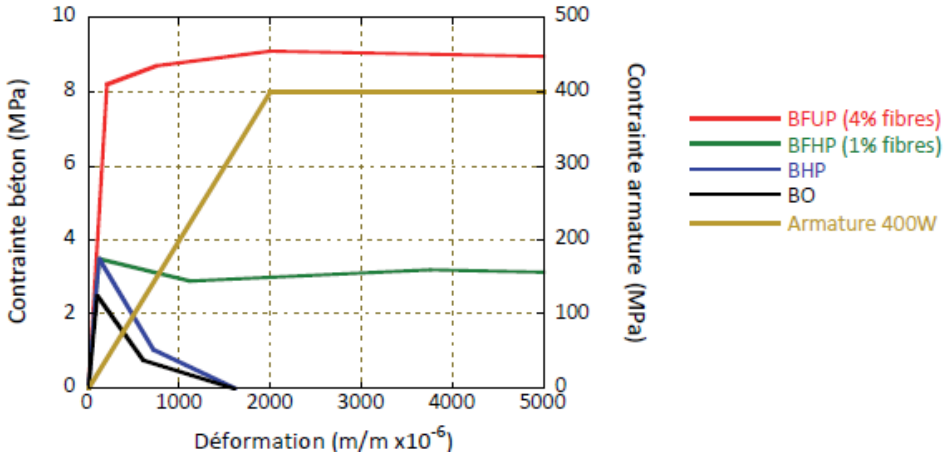


Figure 2.8 Comportement déformationel en traction des béton et des armatures en acier (Charron et al., 2013)

2.2.3 Déformations

2.2.3.1 Retrait

Les BFUP se caractérisent par un retrait élevé au jeune âge, dû à leur faible rapport eau/liant. Ces déformations sont dues principalement au retrait endogène qui varie entre 250 et 475με à 28 jours (Habel, 2004; Habel et al., 2006; Kamen, 2007). En effet, le BFUP contient beaucoup plus de ciment et ses pores capillaires sont plus fins et nombreux d'où l'augmentation des dépressions capillaires causées par l'autodessiccation de la pâte et le retrait élevé.

Au très jeune âge (jusqu'à 1 à 2 jours après le contact eau-liant), le BFUP présente généralement une légère expansion, due à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation (dégagement de chaleur 3 fois plus important qu'un béton ordinaire dû à la quantité importante de ciment) (Habel et al., 2006). Un important retrait, principalement dû au retrait endogène ou d'autodessiccation, a ensuite lieu rapidement, avant de se stabiliser progressivement avec une augmentation plus lente (Wang et al., 2019). À l'opposé d'un béton ordinaire, le retrait de séchage du BFUP est beaucoup moins important que le retrait endogène, même sur le long terme, tel qu'illustré sur la Figure 2.9. Kamen (2007) observe un retrait de séchage de l'ordre de 100 με après plus d'un an. Ce faible retrait de séchage s'explique par la faible quantité d'eau restante dans les pores capillaires, la grande partie de l'eau initiale ayant été consommée par la réaction d'hydratation durant la période de prise (24 à 48h).

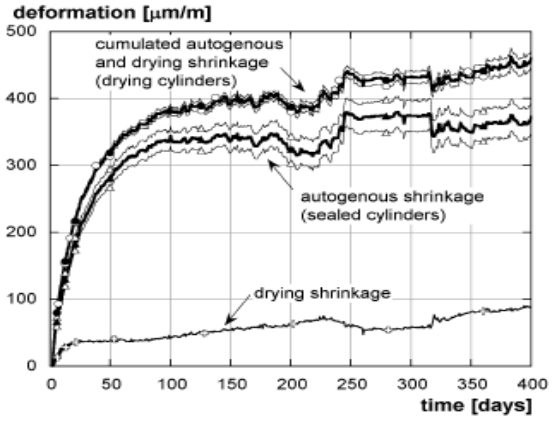


Figure 2.9 Évolution des retraits endogène et de séchage d'un BFUP (Habel, 2004)

Les fibres présentes dans le BFUP peuvent influencer son retrait. En effet, ces dernières jouent un rôle de restreinte interne et diminuent les déformations libres (Kamen, 2007; Wang et al., 2019). Cette entrave génère une contrainte de traction dans le BFUP qui pourrait causer sa fissuration au jeune âge. À noter que dans plusieurs applications structurales, le retrait du BFUP n'est pas libre. Il est restreint par la structure existante (par les barres d'armatures par exemple ou encore par l'ancien béton dans le cas des réparations minces). Ceci diminue évidemment les déformations proportionnellement au degré d'entrave, mais génère en contrepartie des contraintes de traction dans le BFUP qui peuvent induire de la fissuration. Néanmoins, les chercheurs s'accordent sur le fait que sous condition de restreinte totale, les contraintes de traction générées dans le BFUP sont

assez faibles, de l'ordre de 30 % à 47% de la résistance à la traction maximale (Kamen, 2007). Le BFUP présente donc peu de risque de fissuration due au retrait restreint à bas âge (Habel, 2004; Habel et al., 2006; Kamen, 2007). La thématique du retrait restreint sera abordée de manière plus approfondie a la Section 2.3.

2.2.3.2 Fluage

De part son volume de pâte très élevé (avoisinant 60 à 70%), le BFUP présente un grand potentiel de fluage au jeune âge. Cette déformation différée est donc non instantanée. Elle augmente initialement rapidement puis ralentie et se stabilise avec le temps (Habel, 2004). Deux types de mécanismes prépondérants expliquent le comportement du fluage, soit les mécanismes de migration d'eau à court terme et de l'écoulement viscoélastique des feuillets CSH à long terme (Charron, 2019).

Selon Habel (2004), le fluage en compression du BFUP pour un niveau de chargement variant de 27% à 46% de la résistance à la compression (variant de 34 à 58 MPa) est de l'ordre de 50 μm/m/MPa après 100 jours.

D'autres études observent un fluage en compression un peu moins élevé (Kamen, 2007; Rossi et al., 2014). La Figure 2.10 présente l'évolution du fluage en compression et en traction d'un BFUP étudié par Rossi et al.(2014). Pour des spécimens chargés à 7 jours et un niveau de chargement de 30%, le fluage en compression varie de 20 à 29 μm/m/MPa à 25 jours. Le fluage en traction est quant à lui plus élevé pour les mêmes conditions de chargement. Il atteint 38 μm/m/MPa à 25 jours. Habel (2004) mesure aussi un fluage en traction élevé. Pour un chargement qui débute à 2h, une valeur de 160 μm/m/MPa est observée à 7 jours. Elle correspond à 60% de la déformation libre.

Le potentiel de fluage en traction du BFUP est un réel atout. Il permet de compenser les effets de retrait et le risque de fissuration surtout au jeune âge (Kamen, 2007).

En résumé, le BFUP présente un fluage assez élevé surtout comparé aux autres types de bétons malgré son faible rapport E/L. Ceci est attribuable au volume de pâte particulièrement élevé dans le BFUP.

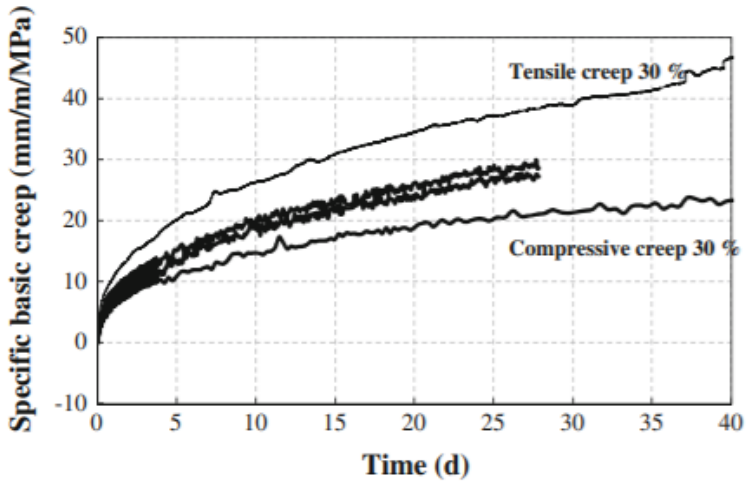


Figure 2.10 Fluage du BFUP en compression et en traction (Rossi et al., 2014)

2.2.4 Durabilité

Une structure est dite durable quand elle répond aux exigences de l'utilisation en service et de sécurité tout au long de sa durée de vie. La durabilité est caractéristique de la structure. Elle dépend de plusieurs paramètres intrinsèques au béton et d'autres externes tels que la résistance à la traction et à la compression, les conditions d'exposition, les modes de transport des agents agressifs et l'état de fissuration de l'élément (Charron et al., 2013). Dans cette section, la durabilité du BFUP sera discutée.

2.2.5 Indicateurs de durabilité

Dans la littérature, plusieurs indicateurs de durabilité du béton sont étudiés. Le Tableau 2.2 présente des indicateurs de durabilité pour les BO, BHP, BFHP et BFUP en condition non fissurée. Il comprend dans sa première partie la perméabilité à l'air et à l'eau, la diffusion effective, la sorptivité, la vitesse de corrosion et finalement la porosité. Il présente aussi des informations sur la vitesse de corrosion et la porosité à l'eau. La deuxième partie présente les indicateurs relatifs par rapport au béton ordinaire (BO).

De par sa compacité et son réseau poreux très fin, le BFUP présente des caractéristiques de durabilité remarquables en condition non-fissurée. Sa perméabilité à l'eau est extrêmement faible de l'ordre de 10^{-19} m^2 et elle est plus de 1000 fois plus faible que celle d'un BO. Sa perméabilité à l'air est aussi très faible ainsi que sa porosité à l'eau. Ils sont 100 fois moins importants que les

indicateurs du BO. Puisque ces indicateurs reflètent la facilité et la vitesse de pénétration des agents agressifs délétères (Charron et al., 2013), des valeurs plus faibles indiquent une meilleure résistance et une pénétration ralentie de ces agents, d'où l'avantage d'utiliser le BFUP sur le plan de durabilité. Grâce à sa durabilité exceptionnelle combinée à un comportement mécanique accru, le BFUP est très intéressant pour des applications de couches minces réparatrices ou de renforcement et des structures hybrides neuves. Par exemple, l'application d'une couche de réparation mince en BFUP en surface d'un ouvrage agit comme une barrière efficace contre la pénétration des agents agressifs et augmente considérablement la durabilité de l'ouvrage.

Tableau 2.2 Indicateurs de durabilité des bétons à l'état non fissuré (Charron et al., 2013)

Indicateur de durabilité	BO	BHP et BFHP *	BFUP
Perméabilité à l'air, K_{air} (m^2) [20, 22, 40, 41]	10^{-15} - 10^{-16}	10^{-17}	< 10^{-19}
Perméabilité à l'eau, K_{eau} (m/s) [15, 42-44]	10^{-11} - 10^{-12}	10^{-13}	< 5×10^{-14}
Diffusion effective, D_{eff} (m^2/s) [22, 45, 46]	2×10^{-11} - 2×10^{-12}	2×10^{-12} - 2×10^{-13}	2×10^{-14}
Sorptivité, S (kg/m^2/$s^{1/2}$) [15, 47-49]	0.01-0.03	0.003-0.01	0.0003
Vitesse de corrosion, C (µm/an) [45]	1.20	0.25	< 0.01
Porosité à l'eau,φ (%)[22, 42, 45, 48]	12 - 16	8 - 12	1 - 6
Indicateur de durabilité relatif	**BO**	**BHP et BFHP ***	**BFUP**
$K_{air}/K_{air\ BO}$	1	0.018	< 0.0002
$K_{eau}/K_{eau\ BO}$	1	0.018	< 0.0091
$D_{eff}/D_{eff\ BO}$	1	0.100	0.0018
S/S_{BO}	1	0.325	0.0150
C/C_0	1	0.208	< 0.0083
Indicateur de durabilité relatif critique	**1**	**≤ 0.325**	**≤ 0.015**

* : En condition non fissuré le BFHP devrait avoir des indicateurs de durabilité similaires à ceux du BHP.

En condition non fissurée, le transport des agents agressifs est très lent et est principalement gouverné par la diffusion. La perméabilité à l'eau devient cependant le mode de transport dominant à l'état fissuré et la pénétration se fait au voisinage des ouvertures d'une manière assez rapide (Charron et al., 2013). Une étude montre une augmentation significative de la perméabilité à l'eau à partir d'une ouverture de fissure de l'ordre de 0.05 à 0.1 mm (Wang et al., 1997).

Le Tableau 2.3 présente une comparaison des ouvertures de fissures ainsi que de la perméabilité à l'eau obtenues sur différents bétons pour différents niveaux de contrainte en traction dans la barre d'armature d'un tirant. Ce tirant représente une barre d'armature ainsi que son recouvrement dans

la section tendue d'une poutre en béton armé. Le Tableau 2.3 se limite à la perméabilité à l'eau étant donné que c'est le mode de transport prédominant à l'état fissuré. Pour des niveaux de contraintes représentatifs des conditions de service d'une structure (200 à 300 MPa) (Charron et al., 2013), le BFUP (4% de fibres) présente une ouverture inférieure à 0.05 mm (microfissures) dans tous les cas, soit une ouverture inférieure au seuil qui initie le transport des agents agressifs au niveau des fissures. Comparé au béton de référence (BO), le BFUP présente, à l'état fissuré, toujours un niveau de perméabilité à l'eau 1000 fois plus faible.

Tableau 2.3 Indicateurs de durabilité des bétons à l'état fissuré (Charron et al., 2013)

Contrainte armatures	Ouverture de fissures (w en mm)			Perméabilité à l'eau (K_{eau} en m/s)		
(σ_s en MPa)	BO - BHP*	BFHP	BFUP	BO - BHP*	BFHP	BFUP
200	0.22	0.08	0	2.0×10^{-6}	4.4×10^{-7}	1.3×10^{-9}
250	0.27	0.12	< 0.05	3.9×10^{-6}	1.2×10^{-6}	2.4×10^{-9}
300	0.29	0.16	< 0.05	5.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}	4.6×10^{-9}
Contrainte armatures	**Fissure relative au BO (w/w_{BO})**			**Perméabilité relative au BO (K/K_{BO})**		
(σ_s en MPa)	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**	**BO - BHP***	**BFHP**	**BFUP**
200	1	0.364	0	1	0.220	0.001
250	1	0.444	< 0.185	1	0.307	0.001
300	1	0.552	< 0.172	1	0.314	0.001
Indicateur de perméabilité relatif critique				**1**	**≤ 0.314**	**≤ 0.001**

& : Les contraintes dans les armatures retrouvées en service varient entre 200 et 300 MPa.

* : À l'état fissuré le BHP a une perméabilité similaire au BO au droit de la fissure.

Le BFUP présente donc une excellente durabilité en comparaison aux autres gammes de béton, que ce soit à l'état non fissuré dû à sa faible porosité ou à l'état fissuré dû au contrôle des fissures assuré par les fibres. La présence des microfibres en quantité suffisante permet en effet le développement de plusieurs microfissures avant la localisation d'une macrofissure, ce qui permet de ralentir la cinétique de transport en condition fissurée.

2.2.5.1 Autocicatrisation du BFUP

L'autocicatrisation traduit la capacité du béton à colmater partiellement ou totalement une fissure. Ce phénomène est expliqué par l'hydratation des grains de ciment non hydratés, la formation de cristaux de carbonate de calcium dans la fissure et/ou le transport d'impuretés dans l'eau qui pénètre la fissure (Charron et al., 2013). En ce qui concerne le BFUP, vu que 50 à 60 % des grains de ciment restent non hydratés (Charron, 2019), la cicatrisation est assurée principalement par leur

hydratation avec l'arrivée d'eau par les fissures. Par ailleurs, une fissure plus fine cicatrise plus rapidement (Charron et al., 2013). Ainsi, étant donné le patron de fissures beaucoup plus fines dans le BFUP, ce dernier est capable de cicatriser plus rapidement. Une limitation de la pénétration des agents agressifs est assurée ainsi qu'une recouvrance de son imperméabilité.

2.2.5.2 Sensibilité à la RAG

La réaction alcalis-granulats est l'une des problématiques majeures qui affectent les structures et génèrent des expansions délétères. Ses conséquences ont déjà été présentées précédemment. Puisque le BFUP est le matériau de réparation proposé pour ce projet visant le confinement des gonflements causés par la RAG, il importe de bien comprendre son comportement dans des conditions favorables à la manifestation de la réaction.

Bien que la teneur en alcalis ne dépasse généralement pas le seuil critique dans les BFUP et malgré l'absence des gros granulats dans leur formulation (Piérard et al., 2013), des chercheurs se sont intéressés à la sensibilité des BFUP à la RAG. Ils ont montré, tel qu'attendu, qu'il est peu probable que la RAG soit nuisible sous n'importe quelle méthode de cure (Graybeal, 2006; Vernet, 2003). En effet, le développement de la réaction nécessite la présence d'eau libre dans les pores, ce qui n'est pas le cas des BFUP qui présentent une faible perméabilité et un réseau poreux particulièrement fin.

L'essai ASTM C1260, permettant d'étudier la sensibilité à la RAG, étudie l'expansion des spécimens soumis à une réaction accélérée. Cet essai indique que des valeurs d'expansion inférieures à 0.10 % (seuil définissant un matériau réactif) après 14 jours de test démontrent une innocuité du béton à la RAG. En revanche, les valeurs d'expansion supérieures à 0.20 % sont potentiellement nocives. Pour des essais réalisés sur BFUP, les résultats d'expansion sont d'un ordre de grandeur en dessous du seuil de 0.1% après 14 jours et même après 28 jours pour des spécimens mis en cure (à la vapeur) ainsi que des spécimens laissés à l'air libre, tel qu'illustré sur la Figure 2.11 (Graybeal et al., 2007; Graybeal, 2006).

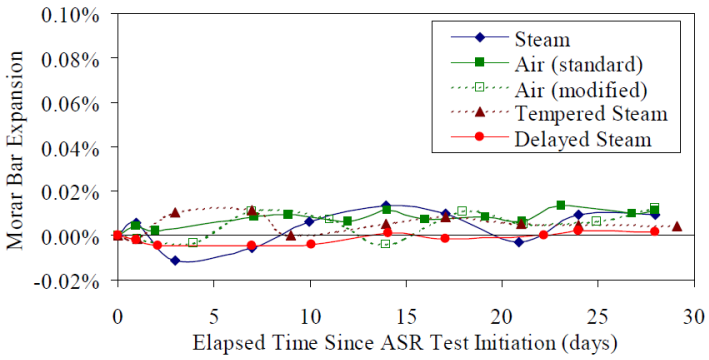


Figure 2.11 Résultats d'expansion due à la RAG pour des spécimens de BFUP selon ASTM C1260 (Graybeal, 2006)

2.3 Retrait restreint

Dans le cas particulier des réparations en béton, notamment les réparations en BFUP, le comportement déformationnel interne est gêné par la structure existante ou les armatures présentes dans la réparation. Cette limitation des déformations génère des contraintes qui activent le comportement viscoélastique et peut causer la fissuration particulièrement au jeune âge du béton. Malgré son retrait endogène important par rapport aux autres bétons (Section 2.2.3.1), le BFUP présente un grand potentiel de fluage qui lui confère une capacité de relaxation en conditions d'entrave. Il présente généralement un risque faible de macrofissuration à bas âge (Habel, 2004; Kamen, 2007). Afin de s'assurer du bon comportement d'une réparation en BFUP, il est nécessaire de déterminer la capacité (mécanique et déformationnelle) résiduelle d'un BFUP en condition d'entrave. Pour ce faire, il importe de quantifier le retrait restreint en termes de déformations et contraintes. Ce chapitre recense, dans sa première partie, les avantages et inconvénients de quelques dispositifs de retrait restreint existants, afin de justifier le choix d'essai retenu dans ce projet et de cibler la géométrie sur laquelle l'essai d'expansion sera réalisé. La seconde partie du chapitre est dédiée au retrait restreint du BFUP ainsi que plusieurs paramètres qui l'influencent.

2.3.1 Essais de retrait restreint

Dans les sous-sections qui suivent, 3 principales catégories d'essais de retrait restreint sont présentées. Ils sont regroupés selon la géométrie du spécimen, soit des essais linéiques, des essais en plaques et des essais sur anneau.

2.3.1.1 Essais linéiques

Le dispositif de l'essai de retrait restreint linéique est illustré à la Figure 2.12. Le principe de ce type d'essai est de couler le béton dans un coffrage longiligne (dans un moule en forme d'os par exemple). Un premier spécimen est libre de se déformer (non illustré ici). Le second spécimen est en condition de déformation restreinte (Figure 2.12). Une extrémité du second spécimen est fixée au bâti du montage, alors que l'autre extrémité peut se déplacer. L'idée est de venir compenser le déplacement de l'extrémité libre, dû au retrait, en appliquant une force dans la direction opposée. Ainsi, lorsque la déformation longitudinale de l'éprouvette atteint une valeur seuil déterminée (de l'ordre de 6 $\mu\varepsilon$ (Charron et al., 2004)), un incrément de force est appliqué pour compenser cette

déformation. La donnée extraite du premier spécimen est le retrait libre. La donnée extraite du deuxième spécimen est l'évolution de la contrainte générée dans le béton due au retrait restreint, en fonction du temps. L'essai linéique a été utilisé par plusieurs chercheurs pour caractériser le comportement au jeune âge du béton (Kovler, 1994), les déformations différées (fluage, relaxation) dans les matériaux cimentaires soumis à des conditions d'entrave (Charron, 2004), l'impact des ajouts expansifs et des fibres (Schwartzentruber et al., 2004) et l'influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton en conditions de déformations restreintes (Charron et al., 2004).

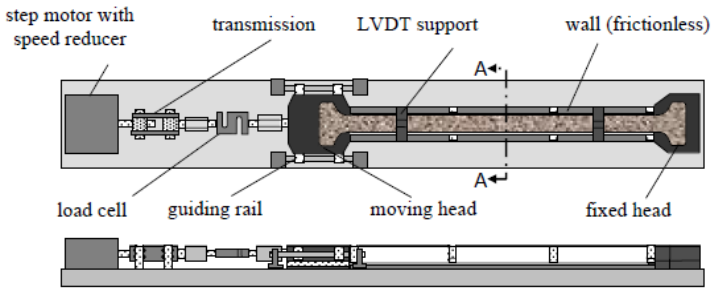


Figure 2.12 Dispositif de retrait restreint linéiques (Charron et al., 2004)

Trois difficultés se présentent dans ce type d'essai. La première est la restriction retardée. En effet, l'entrave mécanique ne peut être appliquée qu'après la prise et le durcissement du béton. De ce fait, une partie des données au très jeune âge est perdue. La deuxième réside dans la complexité du système de chargement et d'asservissement. Le spécimen présente deux extrémités élargies et ne peut pas être considéré comme infini. Dans ce cas la contrainte générée ne peut pas être uniformément répartie sur toute la longueur et la rupture se produit souvent au voisinage des extrémités élargies du spécimen.

2.3.1.2 Essais en plaques

Les spécimens utilisés pour ce type d'essai sont représentatifs d'une dalle. Les premiers travaux de recherche utilisant ce type de montage se basaient sur la restriction des déplacements dans les deux directions par des rainures longitudinales à la base qui entrave le retrait de la dalle (Becq-Giraudon, 1996). Or, cette méthode n'assure pas une restriction suffisante. Un ancrage aux extrémités de la dalle a donc été introduit pour favoriser l'entrave (Weiss et al., 1998). La Figure 2.13 illustre le

dispositif expérimental de cet essai qui s'applique sur une dalle de 35x75x1000mm. Il permet l'étude de la fissuration due à la reprise de bétonnage, au retrait restreint d'une dalle et l'évaluation du retrait biaxial et plastique (Becq-Giraudon, 1996; Shaeles et al., 1988; Weiss et al., 1998).

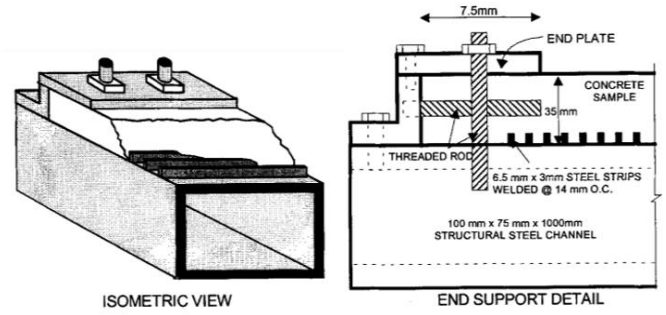


Figure 2.13 Géométrie de l'échantillon de dalle retenue pour les travaux de Weiss et al. (1998)

2.3.1.3 Essai sur anneau

Ce type d'essai, illustré sur la Figure 2.14, est très fréquemment utilisé pour évaluer le potentiel de fissuration due au retrait. Il consiste en un anneau en béton coulé autour d'un anneau d'acier. Ce dernier s'oppose par sa rigidité aux déformations de l'anneau de béton. La contrainte de traction dans le béton est alors autogénérée (générée naturellement par le retrait). Cet essai est généralement préféré par rapport aux autres types d'essais pour la simplicité de l'essai et la facilité de l'acquisition, mais surtout pour le fait qu'il permet d'éviter les effets de bord puisque sa forme circulaire permet de le considérer comme un élément infini. Il permet aussi d'éluder la complexité des systèmes de chargement puisque la contrainte est auto-générée. Outre la géométrie simple, le test sur anneau permet une préparation facile et peu coûteuse des échantillons à tester. De plus, plusieurs informations pertinentes peuvent être tirées, telles que les contraintes résiduelles maximales et élastiques dans le béton, son potentiel de fissuration et la largeur de l'ouverture de fissure ainsi que le degré de restreinte et de relaxation (Altoubat et al., 2017; Altoubat et al., 2001; Shah et al., 2006; Turcry et al., 2006; Yoo et al., 2014).

Dans ce contexte, un essai normalisé à l'anneau a été développé pour étudier principalement le potentiel de fissuration d'un anneau de mortier coulé dans un moule circulaire autour d'un anneau en acier comme illustré à la Figure 2.14. Les dimensions de ce dispositif d'essai normalisé sont

présentées au Tableau 2.4 (ASTM-C1581, 2004). Deux jauges de déformation, au minimum, sont installées à mi-hauteur sur la surface intérieure de l'anneau en acier.

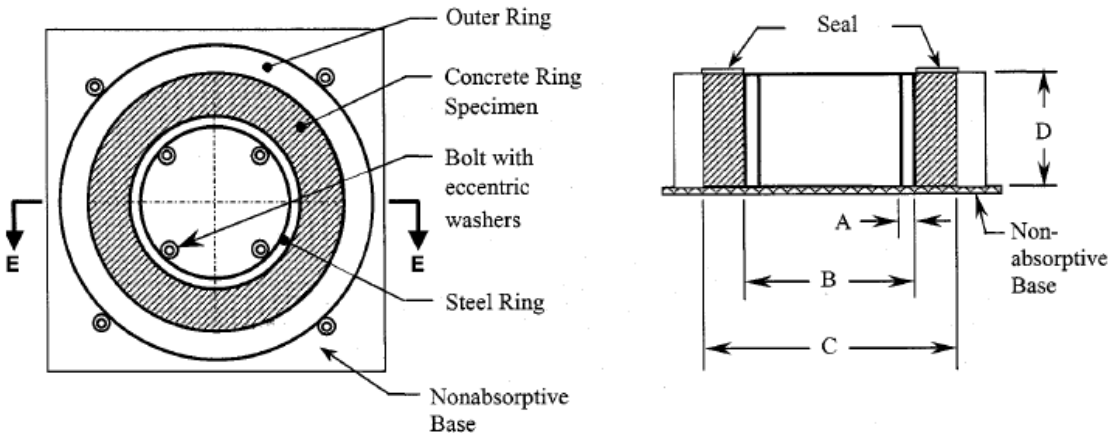


Figure 2.14 Essai normé de retrait restreint sur anneau (ASTM-C1581, 2004)

Tableau 2.4 Dimensions du montage d'essai normalisé (ASTM-C1581, 2004)

Dimension sur la figure 2.14	A	B	C	D
Dimension en mm	12,5 ± 0,13	330 ± 3	406 ± 3	150 ± 6

Il est à noter que cet essai considère un séchage circonférentiel, une fois le spécimen démoulé à 24h. Les facettes supérieures et inférieures de l'anneau de mortier sont scellées tel qu'illustré sur la Figure 2.14. Ce type de séchage est jugé par plusieurs chercheurs non uniforme sur l'épaisseur de l'anneau de béton et présente une complication quant à la détermination des contraintes maximales de traction générées, parce qu'il implique un champ de contrainte complexe et nécessite la détermination de plusieurs paramètres liés à l'évolution du degré d'hydratation sur toute l'épaisseur du béton. Pour éviter cette problématique, la majorité des études ont opté pour l'uniformisation du séchage en scellant la circonférence du spécimen et en favorisant donc le séchage radial au niveau des deux surfaces supérieures et inférieures (Hossain et al., 2004; Shah et al., 2006; Yoo et al., 2017). Ceci est cependant moins représentatif des conditions de séchage d'une

application structurale réelle. L'influence de la condition de séchage des échantillons sera traitée plus en détails à la Section 2.3.2.

La simplicité de l'essai de retrait à l'anneau a mené rapidement à sa sélection pour le projet. Dans ce contexte, les sous-sections qui suivent détaillent la manière d'exploiter cet essai en termes de critères de choix des dimensions ainsi que des équations mathématiques qui permettent la détermination des contraintes générées et des degrés de relaxation et d'entrave dans l'anneau de béton.

Critères d'uniformité

Une étude effectuée par Yoo et al. (2014) montre que le développement des contraintes de traction dans le béton, dans l'essai sur anneau de retrait restreint, est rarement affecté par le diamètre de l'anneau d'acier. Toutefois le choix des dimensions ne se fait pas d'une manière aléatoire. En effet, lorsque l'anneau de béton se contracte dû à l'effet du retrait, l'anneau en acier s'oppose à ce retrait, ce qui génère une contrainte de traction principalement ortho-radiale non uniforme sur la profondeur de l'anneau en béton ainsi qu'une contrainte radiale qualifiée de « parasite » dû au fait qu'elle réduit la contraction de traction dans le béton lors de l'essai de retrait empêché (Figure 2.15). Le gradient de contrainte radiale dans l'épaisseur de béton augmente à mesure que l'épaisseur du béton augmente. Ceci est expliqué par le fait que l'anneau de béton n'est plus considéré infini et soumis à une contrainte uni-axiale de traction. Dans ce cadre, Messan (2006) a défini des critères purement géométriques d'uni-axialité (*A1*) et d'uniformité (*A2*) qui indiquent respectivement si les dimensions de l'anneau permettent de diminuer l'effet parasite de la contrainte radiale et d'avoir une distribution plus uniforme des contraintes sur toute l'épaisseur de l'anneau en béton. Le calcul de ces critères est simple et est donné par les équations (1) et (2), avec R_i et R_e les rayons interne et externe de l'anneau de béton respectivement.

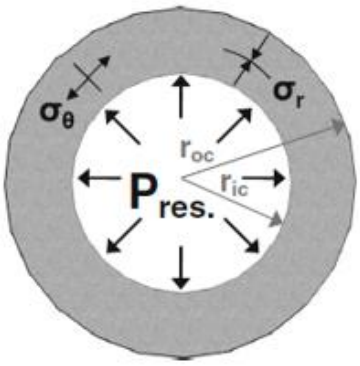


Figure 2.15 Contrainte ortho-radiale de traction (σ_θ) et contrainte radiale (σ_r) générées dans l'anneau de BFUP lors de l'essai de retrait restreint sur anneau (Yoo et al., 2014)

$$A1 = \left|\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{\theta\theta}}\right| = \frac{Re^2 - Ri^2}{Re^2 + Ri^2} \quad (1)$$

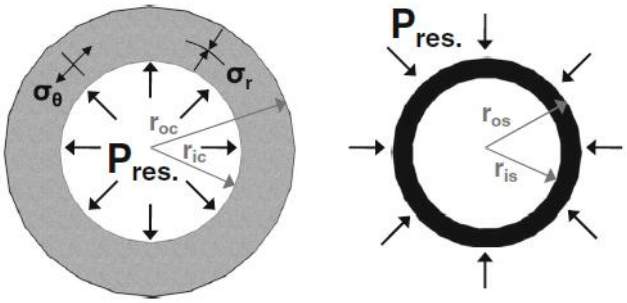
$$A2 = \left|\frac{\sigma_{\theta\theta(Ri)}}{\sigma_{\theta\theta(Re)}} - 1\right| = \frac{1}{2}\left(\frac{Re^2}{Ri^2} - 1\right) \quad (2)$$

Plus les paramètres *A1* et *A2* sont faibles, plus le champ de contrainte de traction ortho-radiale dans le béton peut être considéré comme unidirectionnel et le gradient de la contrainte ortho-radiale entre les rayons internes et externes est réduit respectivement. Les dimensions de l'essai normé, par exemple, procurent des critères d'uniformité *A1* et *A2* respectivement égaux à 0.2 et 0.26.

Contrainte maximale résiduelle

Afin d'analyser l'effet de la restriction du retrait de l'anneau en béton par l'anneau en acier, Hossain et al. (2004) ont développé une approche qui consiste à déterminer la contrainte de traction ortho-radiale maximale développée dans l'anneau en béton au niveau de l'interface acier-béton. Étant donné que la contrainte ortho-radiale dans l'anneau en béton est présumée être approximativement uniforme sur l'épaisseur de l'anneau (See et al., 2003), la réponse du béton à son propre retrait empêché par l'anneau en acier (ASTM-C1581, 2004) peut être simplement calculée à partir de la déformation enregistrée au niveau de l'anneau intérieur en acier. Le calcul

de la contrainte ressentie sur l'anneau intérieur en acier peut être simplifié en un modèle de contrainte plan tel qu'illustré sur la Figure 2.16.



Anneau en béton Anneau en acier

Figure 2.16 Idéalisation de l'essai de retrait restreint sur anneau (Yoo et al., 2014)

À l'interface acier-béton, il existe une pression d'interface fictive P_{res} équivalente à la pression qui génère la déformation mesurée sur la surface intérieure de l'anneau en acier (Hossain et al., 2004). La théorie d'élasticité de Timoshenko et al. (1951) appliquée à un cylindre creux soumis à une pression permet de déterminer la pression résiduelle fictive à l'interface P_{res}. Elle peut être calculée par l'équation 3 :

$$P_{res}(t) = \frac{({r_{os}}^2 - {r_{is}}^2)}{2.r^2}.E_s.\varepsilon_{st}(t) \tag{3}$$

Dans l'équation 3, E_s est le module d'élasticité de l'anneau interne en acier, ε_{st} la déformation contrôlée de l'anneau en acier et r_{os} et r_{is} réfèrent respectivement aux rayons externe et interne de l'anneau en acier.

Ensuite, en réutilisant la solution de contrainte élastique d'un cylindre sous pression dont le rayon est égal à r_{os}, la contrainte de traction circonférentielle maximale $\sigma_{Résiduelle}$ peut être calculée avec l'équation 4 (Hossain et al., 2004). Dans cette équation, r_{oc} réfère au rayon externe de l'anneau en béton.

$$\sigma_{Résiduelle}(t) = -\varepsilon_{st}(t).E_s.\frac{{r_{os}}^2 + {r_{oc}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{os}}^2}.\frac{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2}{2 \cdot {r_{os}}^2} \tag{4}$$

En raison du faible rapport de l'épaisseur et du rayon de l'anneau en acier, la contrainte interne mesurée sur l'anneau intérieur en acier est approximativement égale à la contrainte de traction ortho-radiale dans l'anneau de béton. Il est supposé que, dans la phase élastique du béton, la contrainte dans le béton augmente en douceur et de manière continue et stable à mesure que le retrait du béton évolue. Par conséquent, une diminution brusque et instantanée de la contrainte indique la fissuration de l'anneau en béton (ASTM-C1581, 2004).

Degré de restreinte

Le degré de restreinte est un paramètre très important à prendre en compte lors de l'essai de retrait restreint. Dans le cas particulier de ce projet, il importe que ce degré soit représentatif de la restreinte relevée sur une structure réelle, puisque la réparation proposée est directement coulée sur la structure existante et peut éventuellement incorporer des armatures qui entravent son retrait. Dans la littérature, la restreinte moyenne relevée sur des éléments structuraux dont la déformation est limitée par les armatures ou autres éléments structuraux (par exemple les poutres) est de l'ordre de 75% (De la Varga et al., 2019; Denarié, 2006). En présence d'armature dans la réparation, le taux d'entrave des déformations est directement lié au taux d'armature. Certaines mesures d'entrave des déformations ont déjà été faites dans le cas de béton affecté par la RAG qui prenait de l'expansion en présence d'armatures (Hobbs, 1990). Le Tableau 2.5 présente les pourcentages de restriction d'expansion d'un béton affecté par la RAG en fonction du taux d'armature utilisé. Pour un taux d'armature de 2%, par exemple, la restreinte relevée sur l'élément est aussi égale à 75%.

Tableau 2.5 Degré de restreinte pour différents taux d'armatures (Hobbs, 1990)

%Armatures	1	2	2,78	3	4
Expansion libre (mm/m)	1	1	1	1	1
Expansion restreinte (mm/m)	0,4	0,25	0,2	0,15	0,1
Degré de restreinte (%)	60%	75%	80%	85%	100%

Concernant l'essai sur anneau, plusieurs paramètres géométriques influencent sur le degré de restreinte, appliqué par l'anneau d'acier sur l'anneau en béton, et donc sur l'amplitude des contraintes de traction qui sont générées dans le béton. Les principaux paramètres géométriques qui modifient le degré de restreinte sont les épaisseurs des anneaux d'acier et de béton.

Le degré de restreinte ψ, compris entre 0 et 1, 1 correspondant à une restreinte totale (100% des déformations restreintes), peut être déterminé pour chaque configuration d'essai. Il est déterminé par l'équation 5 et est fonction du rapport des déformations gênées ε_{st} et des déformations libres ε_{sh}, des rayons intérieurs et extérieurs de l'anneau d'acier (r_{is} et r_{os} respectivement) et des propriétés intrinsèques au matériau (ν_s et ν_c, les coefficients de poisson de l'acier et du béton, respectivement) (Moon, J.-H. et al., 2006).

$$\Psi = 1 - \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_{st}(t)}{\varepsilon_{sh}(t)}\left[\frac{{r_{is}}^2}{{r_{os}}^2}(1+\nu_s) + (1-\nu_s)\right] \tag{5}$$

En déterminant ce facteur ψ pour différentes configurations d'essais, il est possible de déterminer dans quelle mesure les paramètres de l'essai qui modifient le niveau de restreinte atteint dans l'anneau. Dans ce contexte, une étude a été réalisée en utilisant un anneau d'acier de dimensions fixes (r_{is}=127 mm et r_{ic}=145,5 mm) et des conditions de séchage similaires, mais en faisant varier les épaisseurs de BFUP (20, 30 et 40 mm). Il a été démontré que le degré de restreinte est plus important pour une plus petite épaisseur de BFUP, tel qu'illustré à la Figure 2.17 (Yoo et al., 2017), ce qui augmente les contraintes de traction générées dans le béton et hausse son risque de fissuration.

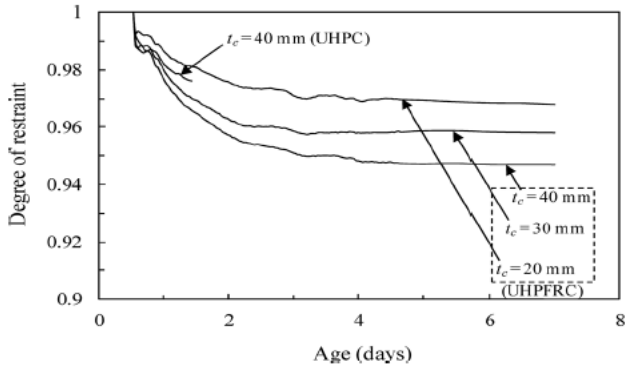


Figure 2.17 Degré de restreinte associé à chaque épaisseur (t_c) de BFUP étudiée (Yoo et al., 2017)

Il a également été montré que la restreinte augmente pour un anneau en acier plus épais (Yoo et al., 2014). Ceci a été confirmé par Hossain et al. (2004) en utilisant des spécimens de géométries identiques excepté au niveau des épaisseurs d'acier qui variaient entre 3.1, 9.5 et 19 mm tout en conservant le même diamètre extérieur de l'anneau d'acier. Cette étude a permis de conclure qu'un anneau en acier de 19 mm d'épaisseur procure une plus grande restreinte que des anneaux de 9.5 mm qui procurent eux-mêmes une plus grande restreinte que les anneaux d'acier de 3.1 mm d'épaisseur (Figure 2.18). Ce résultat s'explique par le fait qu'un anneau en acier plus épais procure une plus grande rigidité qui s'oppose à la déformation de l'anneau en béton.

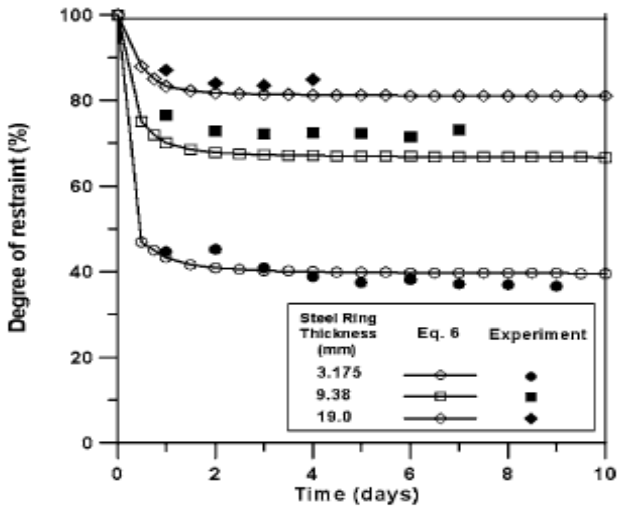


Figure 2.18 Degré de restreinte pour différentes épaisseurs d'acier (Hossain et al., 2004)

Si le comportement de fluage du béton à l'étude est connu, il est aussi possible de prédire le degré de restreinte avant d'effectuer un essai via l'équation 6 proposée par Moon et al. (2006).

$$\Psi = 1 - \frac{E'_c}{E_{st}} \frac{1}{\frac{E'_c}{E_{st}} - \frac{1-(\frac{r_{is}}{r_{os}})^2}{1-(\frac{r_{oc}}{r_{os}})^2} \frac{(1+\nu_c)(\frac{r_{oc}}{r_{os}})^2 + (1-\nu_c)}{(1+\nu_s)(\frac{r_{is}}{r_{os}})^2 + (1-\nu_s)}} \tag{6}$$

L'équation 6 fait intervenir le module d'élasticité effectif du béton E_c' (module qui prend en compte l'effet de fluage). Celui-ci peut être déterminé à partir du module d'élasticité E_c du béton et de l'évolution du fluage $\varphi(t)$ avec l'équation 7 (Khan et al., 2017):

$$Ec' = \frac{Ec}{1 + \varphi(t)} \tag{7}$$

En utilisant un module d'élasticité effectif de 15 GPa, l'équation 6 a permis de déterminer les abaques présentés à la Figure 2.19 (Moon, J.-H. et al., 2006). Ceux-ci permettent de déterminer le degré de restreinte en fonction des combinaisons possibles de géométrie du spécimen à l'étude.

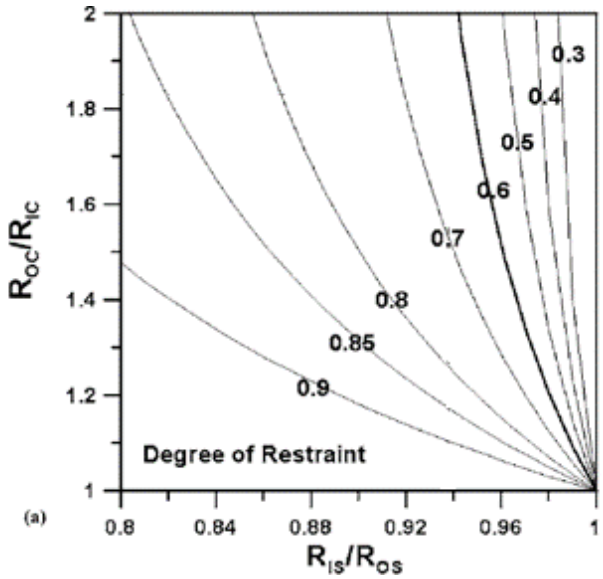


Figure 2.19 Abaques permettant de déterminer le degré de restreinte en fonction des paramètres géométriques d'un essai sur anneau (pour E' = 15 GPa) (adapté de Moon, J.-H. et al. (2006))

Étant donné que ce projet s'intéresse plus particulièrement au BFUP, la section suivante fera état du retrait restreint spécifique à ce matériau ainsi que des paramètres qui l'influencent.

2.3.2 Retrait restreint du BFUP

Le BFUP est un matériau qui se distingue par sa grande résistance à la traction et sa déformabilité exceptionnelle. Tel que discuté à la Section 2.2, ceci est assuré par son rapport E/L très faible, son volume de pâte élevé et la présence de fibres courtes de petit diamètre en grande quantité qui permettent un meilleur contrôle des fissures. Ces caractéristiques procurent une résistance à la traction élevée, un plus grand potentiel de fluage en traction et un retrait majoritairement endogène. Dans les sous-sections suivantes l'influence de la présence des fibres, du fluage en traction ainsi que les conditions de séchage lors de l'essai de retrait restreint sur anneau seront discutées.

2.3.2.1 Dosage en fibres

Il importe de mentionner que l'évolution de la déformation de l'anneau en acier est très peu affectée par la présence des fibres. Le BFUP présente un retrait similaire quel que soit le pourcentage de fibres. Ceci s'explique par le fait que le retrait du BFUP, qui est majoritairement endogène, est lié essentiellement aux dépressions capillaires se produisant au niveau de la pâte de ciment indépendamment de la présence des fibres. Cependant, la présence de ces dernières permet d'éviter une fissuration précoce due aux contraintes de traction générées dans le béton en réponse à la restriction du retrait. En effet, Yoo et al. (2017) ont démonté que pour deux spécimens de BFUP, l'un sans fibres (UHPC) et l'autre avec 2% vol. de fibres (UHPFRC), malgré une évolution similaire de retrait et de contrainte de traction dans le béton au jeune âge, le retrait restreint a engendré une fissuration dans le BFUP sans fibre (UHPC) à 1.4 jours alors qu'aucune fissuration n'a été observée en présence de fibres (Figure 2.20). Ceci illustre l'effet bénéfique des fibres à contrôler les fissures de retrait (Yoo et al., 2017).

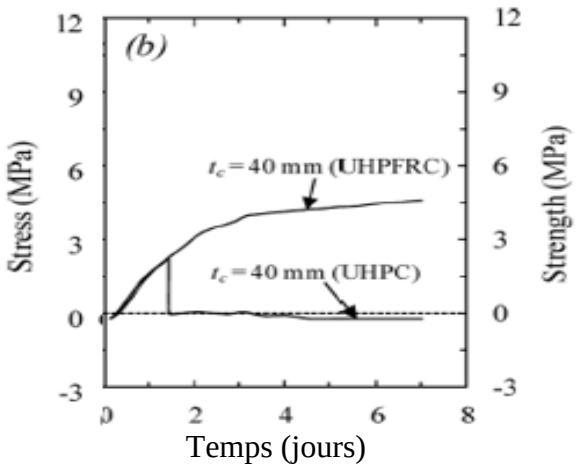


Figure 2.20 Effet des fibres sur la contrainte résiduelle dans le béton (Yoo et al., 2017)

D'autres auteurs sont arrivés aux mêmes conclusions. En effet, Wang et al. (2019) ont montré que les niveaux de retrait restreint de différents BFUP incorporant 1 et 2% vol. de fibres à 14 jours sont similaires. En revanche, le pourcentage de fibres incorporées affecte l'âge de fissuration. Celui-ci est retardé pour une quantité de fibres plus grande. En effet, aucune fissure n'apparait sur l'instrument de mesure des ouvertures de fissures avec une résolution de 0.01 mm pour les BFUP à 2 % vol. de fibres et la déformation retenue mesurées par les jauges installées à l'intérieur de l'acier est d'environ 141 με à 80 jours. Pour le BFUP à 1% de fibres, l'évolution de la déformation suit celle du BFUP 2% jusqu'à ce que des microfissures d'une ouverture de l'ordre de 0.02 à 0.05 mm apparaissent et la déformation retenue diminue pour atteindre 99 με à 80 jours. Ces résultats montrent également le fait que la déformation retenue, et donc la contrainte mesurée sur l'anneau en acier, continue à augmenter pour un béton sain mais diminue en présence de microfissuration (Wang et al., 2019). Par ailleurs, lorsque la contrainte de traction dépasse la résistance maximale du BFUP, la fissure localise et une diminution significative de la contrainte est observée. Par leur ductilité, les fibres assurent cependant une diminution graduelle des efforts lors du comportement adoucissant du BFUP en post-pic, tel qu'expliqué à la Section 2.2.2.2.

2.3.2.2 Fluage et relaxation

La contrainte de traction interne générée dans le BFUP est une conséquence de la réponse mécanique du matériau aux déformations volumiques d'origine thermique, endogène et de séchage. Sous des conditions de déformation restreinte, cette contrainte devient plus importante et peut

présenter un problème pour les structures en service. Les recherches réalisées sur le retrait restreint sont généralement orientées vers l'étude du patron de fissuration et des contraintes de traction développées dans le béton dont les déformations sont partiellement restreintes. Toutefois, pour une étude pertinente du comportement du béton au jeune âge, il importe de s'intéresser à ses propriétés viscoélastiques, soit le fluage, une augmentation de la déformation dans le temps sous chargement maintenu, et la relaxation, une réduction de la contrainte dans le temps sous déformation imposée. Les conditions de relaxation ou de fluage pures ne se rencontrent que dans des essais au laboratoire. Dans le cas de structures réelles, les deux phénomènes surviennent souvent simultanément car les conditions de chargement ou de déformation imposées ne sont pas parfaites ou évoluent dans le temps. Par exemple, dans une réparation en béton, la restriction du retrait génère une contrainte de traction. Cette sollicitation est accompagnée d'une déformation différée qui augmente dans le temps avec un taux décroissant tant que le chargement est appliqué. C'est le fluage en traction, qui agit dans le sens opposé du retrait. La contrainte de traction générée par le retrait est également partiellement relaxée par la viscoélasticité du béton.

Afin de quantifier la relaxation de la contrainte de traction dû à la viscoélasticité, Hossain et al. (2004) proposent une équation de calcul d'une contrainte élastique maximale dans l'essai sur anneau qui ne tient pas compte des effets de la viscoélasticité. Ensuite, la différence de cette contrainte et la contrainte résiduelle développée sous conditions d'entrave, et calculée par l'équation 4 présentée à la Section 2.3.1.3, permet de déduire le degré de relaxation de la contrainte dû à la viscoélasticité.

La contrainte élastique maximale dans l'essai sur anneau peut être calculée avec l'équation 8. Elle représente le niveau de contrainte maximale qui pourrait se développer si la viscoélasticité n'avait pas eu lieu. Elle est fonction du retrait libre, des rayons internes et externes de l'anneau de béton et d'acier, du module élastique du béton et celui de l'anneau en acier qui assure la restreinte du retrait (Hossain et al., 2004).

$$\sigma_{\text{Élas-max}}(t) = \frac{-\varepsilon_{sh}(t) \cdot E_s \cdot \dfrac{{r_{os}}^2 + {r_{oc}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{os}}^2}}{\dfrac{E_c}{E_s} \cdot \left[\dfrac{(1+\nu_s) \cdot {r_{is}}^2 + (1-\nu_s) \cdot {r_{os}}^2}{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2}\right] + \left[\dfrac{(1-\nu_c) \cdot {r_{os}}^2 + (1+\nu_s) \cdot {r_{oc}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{os}}^2}\right]} \quad (8)$$

La Figure 2.21 présente l'évolution des contraintes élastique maximale (σ_{el}) et résiduelle (σ_{res}), calculées respectivement avec les équations 8 et 4, pour le BFUP étudié par Yoo et al. (2017). La contrainte résiduelle est égale à 3 MPa et la contrainte élastique maximale est de 10.5 MPa à 7 jours. La viscoélasticité conduit donc à une relaxation (σ_{rel}) de l'ordre de 7 MPa à 7 jours.

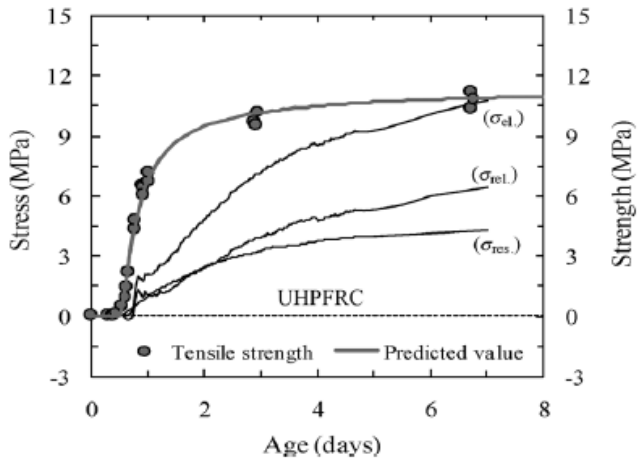


Figure 2.21 Contrainte théorique élastique (σ_{el}), résiduelle (σ_{res}) et de relaxation (σ_{rel}) du BFUP (Yoo et al., 2017)

Le degré de relaxation λ, déterminé par l'équation 9, permet de comparer le potentiel de relaxation de différents matériaux (Altoubat et al., 2017) :

$$\lambda = 1 - \frac{\sigma_{Résiduelle}(t)}{\sigma_{Élas\text{-}max}(t)} \tag{9}$$

Des études sur le BFUP démontrent une relaxation des contraintes de l'ordre de 65 à 80 % pour des degrés de restreinte qui varient entre 80 et 95 % (Wang et al., 2019; Yoo et al., 2017; Yoo et al., 2014).

2.3.2.3 Conditions de séchage

La condition de séchage de l'échantillon est un paramètre qui influence la réponse du béton au retrait restreint. Avec le scellement total des surfaces de l'anneau de béton de l'essai de retrait

restreint (aucun échange d'humidité avec l'extérieur et donc sans retrait de séchage) ou le scellement de la circonférence ortho-radiale seulement (Figure 2.22b), un séchage uniforme de l'anneau est assuré. Cette condition de séchage est préférable au séchage non-uniforme. En effet, dans le cas d'un séchage uniforme, l'essai de retrait restreint permet de tester des anneaux de grandes tailles, et donc des mélanges contenants de gros granulats ou encore des fibres longues. Pour ces anneaux plus épais, un séchage non-uniforme aurait été problématique pour l'exploitation des résultats étant donné que le gradient hydrique présent et l'effet sur l'hydratation (Moon, J.-H. et al., 2006). Dans le cas du séchage uniforme, la contrainte de traction qui se développe est maximale au rayon interne de l'anneau de béton et diminue ensuite en fonction de $1 / r^2$ (où r est la distance radiale à travers l'épaisseur de béton) en se déplaçant vers l'extérieur de l'anneau (Hossain et al., 2004).

En revanche, le séchage circonférentiel est considéré non uniforme. Ceci peut être expliqué par le fait qu'il induit un gradient au niveau du degré d'hydratation et du pourcentage d'humidité sur l'épaisseur de l'anneau de béton. De ce fait, une contrainte additionnelle maximale due au retrait de séchage non uniforme est générée au niveau du rayon externe du béton tel qu'illustré sur la Figure 2.22a. Ceci complique la détermination de plusieurs informations pertinentes, notamment les contraintes de traction maximales générées dans le béton et le degré de restreinte associé à chaque configuration d'essai (Moon, J. H. et al., 2006). La contrainte générée par le séchage non uniforme fait intervenir un coefficient de diffusion du gradient d'hydratation et des mesures d'humidité sur l'épaisseur de l'anneau en béton. Elle est élevée, surtout pour des durées de séchage courtes et pour des bétons qui présentent un retrait de séchage important. Ceci n'est pas le cas du BFUP pour lequel le taux de retrait de séchage (20% du retrait total par exemple selon Habel (2004)) est relativement faible par rapport à son retrait endogène (80% du retrait total). La contrainte « parasite » due aux conditions de séchage n'a donc pas d'impact significatif sur la contrainte maximale résiduelle dans un anneau en BFUP. Sur la base de cette hypothèse, Wang et al. (2019) ont réalisé des essais sur des échantillons de BFUP avec un séchage circonférentiel sans scellement.

Bien que, pour le BFUP, la condition de séchage ne semble pas être très problématique, elle peut légèrement modifier la réponse du matériau. Il est sans doute préférable d'adopter un séchage uniforme, mais étant donné que l'un des objectifs principaux de ce projet est de détecter le moment de fissuration de l'anneau, il importe de ne pas sceller les surfaces extérieures de l'anneau de BFUP.

Dans le cadre de ce projet, un séchage libre sans scellement sera donc adopté pour tous les spécimens.

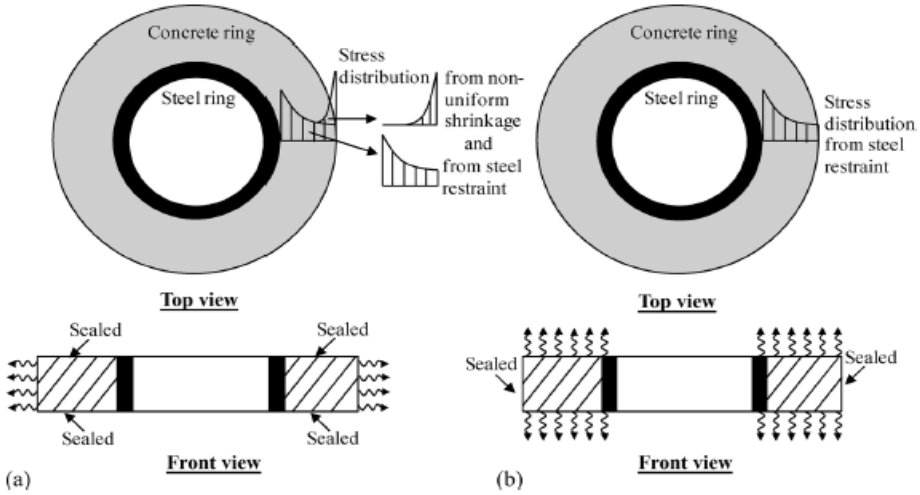


Figure 2.22 Illustration conceptuelle des montages de retrait restreint et de gradient de contrainte dans l'anneau en béton. (a) sous séchage non-uniforme, (b) sous séchage uniforme (Moon, J. H. et al., 2006)

2.4 Synthèse

La RAG est une pathologie des structures qui est assez courante. Pour son initiation, trois conditions doivent coexister, soit une concentration élevée en alcalis, des granulats réactifs et une humidité relative supérieure à 85%. Elle réduit généralement les propriétés mécaniques du béton et génère des expansions volumétriques allant jusqu`à 0.2 et 0.5%, relevées sur des bétons structuraux et bétons massifs respectivement, ainsi que de la fissuration.

Plusieurs tentatives de réparation ont été adoptées. Ces réparations permettent soit de ralentir la réaction en limitant l’humidité interne au sein du béton ou de confiner les gonflements qui en résultent. Le matériau proposé dans ce projet est le béton fibré à ultra hautes performances. Il se distinguent des autres bétons par une résistance à la traction élevée ainsi qu’un comportement ductile assuré par la présence de fibres courtes en grande quantité. Son comportement en traction écrouissant en pré-pic permet d’offrir un bon potentiel de confinement des expansions de la RAG.

De plus, sa durabilité accrue, notamment sa faible perméabilité à l'eau en conditions non fissurée et fissurée permet de limiter l'apport en humidité au cœur du béton, ce qui pourrait ralentir la cinétique de la réaction. De plus, le BFUP est très peu sensible à la RAG (Graybeal, 2006; Vernet, 2003). Tous ces facteurs font du BFUP une option idéale pour les réparations minces surtout, pour les structures exposées à des conditions environnementales sévères.

La solution de réparation proposée dans ce projet est un chemisage par couche mince de BFUP. Une fois le béton d'enrobage retiré, une réparation en BFUP est directement coulée sur la structure existante atteinte. Par sa rigidité, le substrat existant restreint la déformation de la réparation en BFUP. Il est alors important de considérer les effets d'entrave du retrait sur la capacité de déformation restante en traction du BFUP, celle-ci doit être suffisante pour supporter le gonflement généré par la RAG sans présenter de macrofissures.

Dans la littérature, trois principales catégories d'essais de retrait restreint existent, soit les essais linéiques, les essais en plaques et l'essai de retrait sur anneau. Ce dernier est le plus utilisé grâce à sa simplicité; c'est notamment ce qui a mené à sélection pour le présent projet. Contrairement aux autres essais, l'essai de retrait à l'anneau ne requiert aucun chargement. Lorsque l'anneau s'oppose à la déformation du BFUP qui l'entoure, la contrainte de traction est auto-générée. Cet essai, appliqué à une réparation, permet de déterminer la contrainte réelle de traction dans le béton de réparation, la contrainte élastique maximale qui aurait pu se développer si la restreinte du retrait de la réparation n'avait pas lieu, ainsi que les degrés de relaxation et de restreinte de la réparation. L'essai permettra donc de bien caractériser la performance du BFUP pour la réparation envisagée.

Dans le cas particulier de réparation en BFUP, l'essai sur anneau sera influencé par plusieurs paramètres, notamment la présence des fibres qui retardent la localisation des fissures, l'effet de la viscoélasticité qui assure une relaxation des contraintes de 65 à 80 %, le degré de restreinte et la présence de joints dans la réparation. Les programmes expérimentaux de ce projet doivent donc fournir des informations sur ces paramètres.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Le retrait du BFUP de réparation est généralement partiellement restreint par l'ancien béton (substrat) et/ou la présence d'armatures, tel que discuté à la Section 2.3. Cette restriction induit des contraintes de traction qui peuvent être particulièrement critiques au jeune âge. La déformation restreinte et les contraintes développées font apparaitre le comportement viscoélastique du béton de réparation. Dans le cas particulier de ce projet, la réparation en BFUP vise les structures atteintes par la réaction alcali-granulats. La réparation en BFUP doit donc supporter également une expansion générant des contraintes de traction additionnelles. La RAG ayant une cinétique très lente, il est généralement difficile de générer ses expansions en laboratoire vu la complexité d'apport d'humidité au béton, afin qu'il puisse gonfler par la RAG, étant chemisé par un BFUP peu perméable. Un dispositif expérimental a donc été développé afin de pouvoir restreindre le retrait du BFUP de réparation dans un premier temps, ensuite appliquer mécaniquement des expansions représentatives de celles pouvant être observées sur des structures atteintes par la RAG. Le présent chapitre présente en détail le montage développé, le protocole expérimental adopté ainsi que les phases expérimentales réalisées.

3.1 Dispositif d'essai développé

Le dispositif d'essai développé dans le cadre de ce projet est inspiré de l'essai de retrait restreint sur anneau (ASTM-C1581, 2004) présenté à la Section 2.3.1.3 et le montage de cœur expansif de Argouges et al. (2010) (Figure 3.1). Les dimensions du spécimen ainsi que les méthodes de chargement et d'acquisition sont cependant repensées pour mieux s'adapter au contexte de cette étude (niveau de restriction du retrait retrouvé dans les structures et autres paramètres) et pour être capable de générer différents niveaux d'expansion représentatifs de l'effet de gonflement d'une structure atteinte par la RAG.

Plusieurs essais normalisés d'expansion causée par la RAG existent. Ces essais créent des expansions dans des prismes libres de se déformer. Ces essais ne sont, par contre, pas adaptés à la mesure des contraintes ou déformations de traction générées par la RAG. L'essai proposé dans le cadre de ce projet a pour objectif justement de quantifier la déformation maximale de la RAG qu'une réparation en BFUP peut supporter. Dans un premier temps, la réparation sera soumise à son retrait restreint, par la suite une expansion imposée lui sera appliquée par un cœur expansif

inspiré de celui illustré sur la Figure 3.1 pour reproduire différents niveaux d'expansion représentatifs de la RAG.

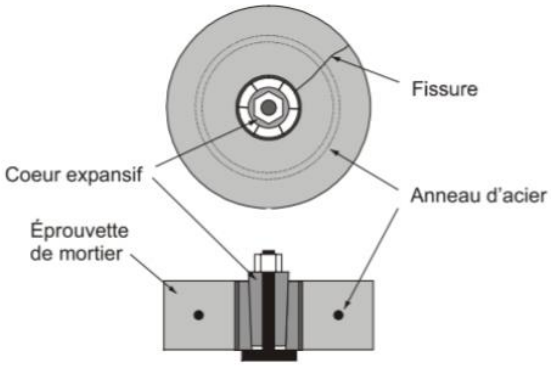


Figure 3.1 Schéma du cœur expansif Argouges et al. (2010)

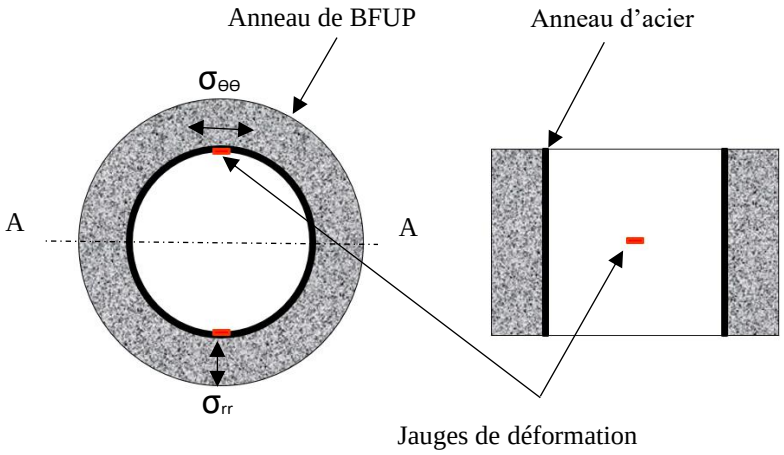
Cette section décrit le dispositif d'essai développé pour reproduire, dans un premier temps, la restriction du retrait d'une réparation mince en BFUP et, dans un deuxième temps, l'expansion causée par la RAG et agissant sur la réparation en BFUP. Le concept de l'essai sera tout d'abord présenté, suivi d'une description du chargement et de l'instrumentation utilisée pour répondre aux objectifs de l'essai

3.1.1 Concept de l'essai

Tel que mentionné à la Section 2.3.1.3, l'essai de retrait restreint sur anneau a été retenu pour ce projet car il est simple et permet d'éviter plusieurs difficultés reliées à l'acquisition, à la date du début d'essai et aux conditions limites. L'anneau en BFUP testé dans le cadre de ce projet (Figure 3.3) simule une couche de réparation mince en BFUP appliquée sur un substrat en béton très rigide de la structure existante.

Cet essai se fait en deux étapes consécutives. Dans un premier temps, le retrait de l'anneau en BFUP a lieu et est restreint par un anneau central en acier, ce qui induit des contraintes de traction dans le BFUP. Par la suite, l'essai d'expansion est réalisé en activant mécaniquement l'expansion d'un cœur expansif positionné au centre du montage. La Figure 3.3 présente, sous forme de diagramme, les deux phases de réalisation de l'essai et détaille, pour chacune d'entre-elles, les informations brutes obtenues durant les essais ainsi que les informations complémentaires à obtenir

en parallèle pour exploiter les essais, les phénomènes mis en jeu ainsi que les types de résultats obtenus. Ce diagramme est expliqué plus en détail, phase par phase, dans les paragraphes qui suivent.



a) Vue de dessus b) Coupe A-A

Figure 3.2 Géométrie de l'essai de retrait restreint à l'anneau

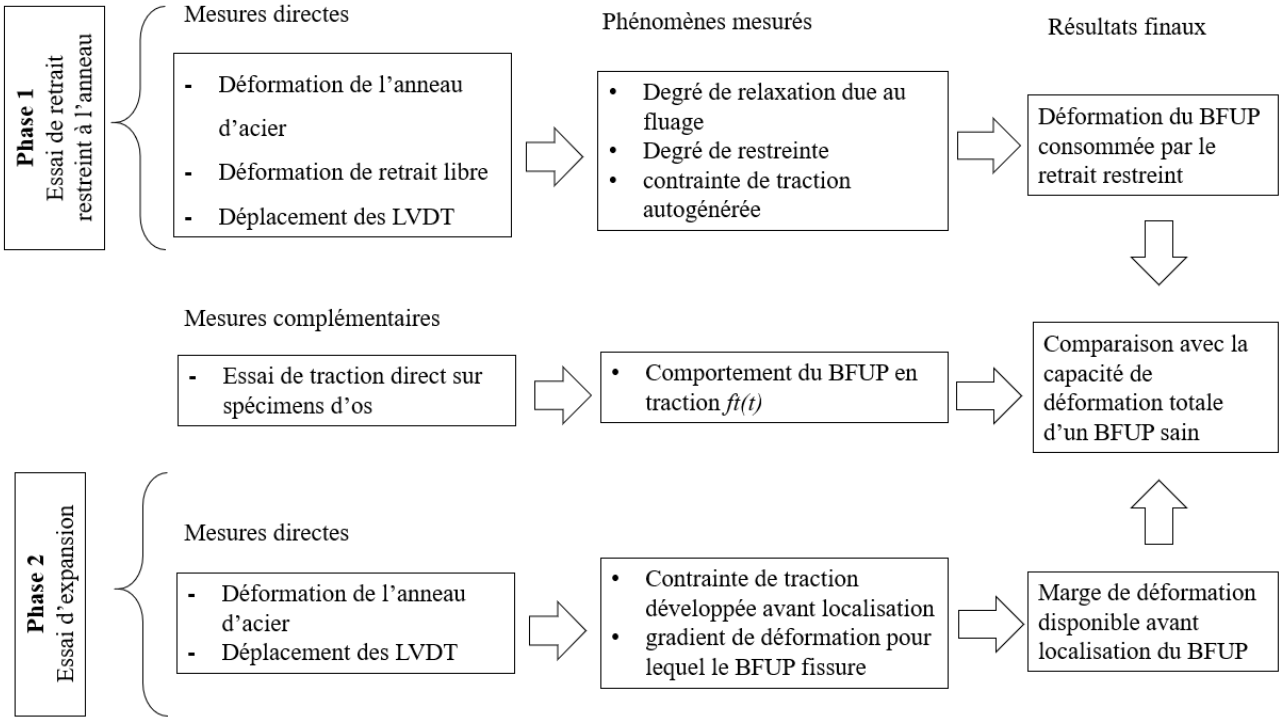


Figure 3.3 Diagramme des étapes de réalisation de l'essai développé

Phase 1 – Essai de retrait restreint

Cette phase d'essai commence immédiatement suite à la coulée de l'anneau de BFUP. L'anneau d'acier, de par sa rigidité, s'oppose au retrait du BFUP, ce qui génère une contrainte de traction principalement ortho-radiale $\sigma_{\theta\theta}$ dans le BFUP ainsi qu'une contrainte radiale dite « parasite » (Figure 3.3). L'analyse des résultats de ce mémoire se concentrera sur la contrainte ortho-radiale puisque les dimensions choisies pour l'essai proposé font en sorte de minimiser la contrainte radiale. Cette contrainte ortho-radiale peut être calculée à partir de la déformation mesurée par les jauges installées à l'intérieur de l'anneau d'acier à mi-hauteur (Figure 3.2) en utilisant l'équation (4) présentée à la Section 2.3.1.3. Dû à cet état de contrainte en traction dans le BFUP, une partie de la capacité de sa déformation en traction est consommée par le retrait restreint. La Figure 3.4 présente la courbe de comportement pré-pic en traction du BFUP, sur laquelle est indiquée cette contrainte $\sigma_{\theta\theta}$. La déformation équivalente $\varepsilon_{éq}$ consommée par le retrait restreint correspond alors à la déformation associée à $\sigma_{\theta\theta}$ sur la Figure 3.4.

Parallèlement aux mesures des déformations restreintes sur l'anneau d'acier, un essai de retrait libre est également effectué sur un spécimen prismatique adapté pour simuler les dimensions de l'anneau de BFUP et soumis aux mêmes conditions de séchage, afin de déterminer les degrés de restreinte du retrait et de relaxation due au fluage.

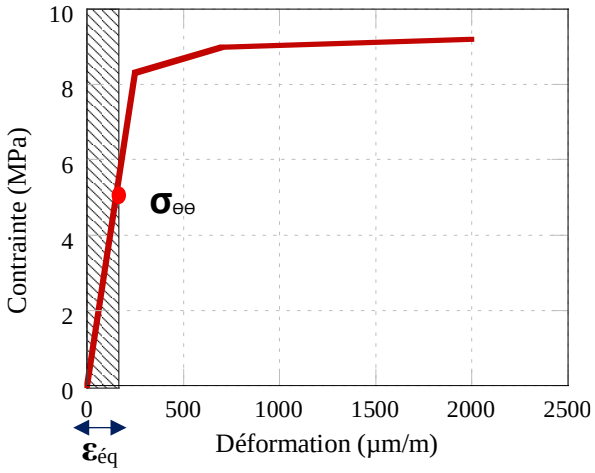
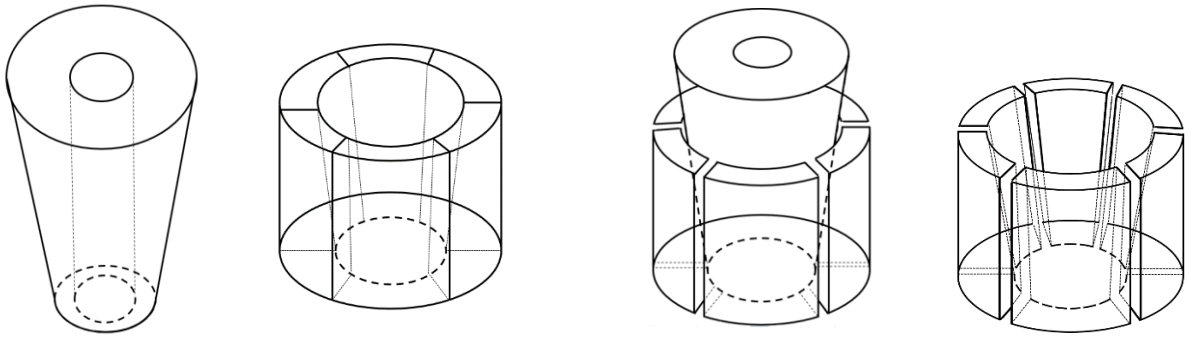


Figure 3.4 Comportement en pré-pic d'un BFUP - Illustration de la déformation en traction consommée par le retrait restreint

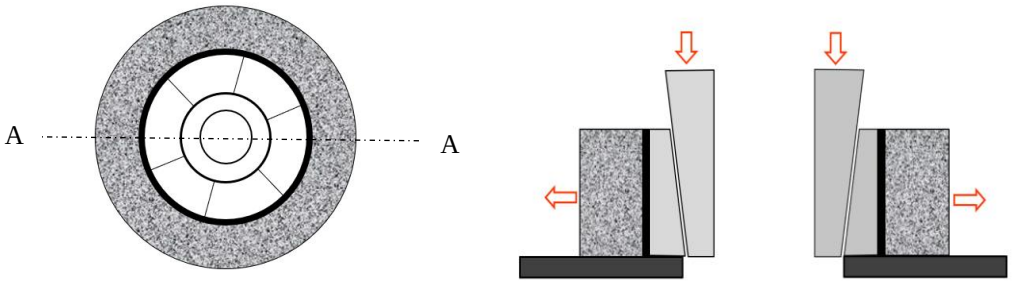
Phase 2 – essai d'expansion

La deuxième phase de l'essai consiste à appliquer une expansion représentative de celle causée par la réaction alcalis-granulats. Un système mécanique relativement simple inspiré des travaux de Argouges et al. (2010) permet d'induire une déformation ortho-radiale ($\varepsilon_{\Theta\Theta}$) en traction dans le BFUP par l'intermédiaire d'un cœur expansif en acier. Ce cœur expansif est constitué d'un cône, évidé pour alléger cette pièce, et d'un ensemble de 6 pétales qui sont initialement assemblées côte-à-côte (Figure 3.5a et b). Le cône s'insère dans les pétales pour former le cœur expansif (Figure 3.5 c). Celui-ci est ensuite installé à l'intérieur de l'anneau d'acier qui entrave le retrait du BFUP (Figure 3.6). Ceci permet de conserver l'anneau d'acier en place durant les deux phases de l'essai et ainsi éviter le relâchement des contraintes de traction générées par l'essai de retrait restreint avant de procéder à la phase 2 de l'essai. Cet anneau en acier permet également une bonne répartition des contraintes sur l'anneau en BFUP durant l'essai d'expansion. La déformation ortho-radiale ($\varepsilon_{\Theta\Theta}$) en traction dans l'anneau en BFUP est induite en appliquant un chargement vertical sur le cône évidé à l'aide d'une presse hydraulique. Ce chargement vertical, piloté en déplacement, force la pénétration du cône à l'intérieur des pétales, ce qui génère une augmentation de l'espacement entre les pétales (Figure 3.5d) et conduit à une déformation ortho-radiale au niveau du diamètre interne de l'anneau de BFUP. L'anneau en acier a été sélectionné de telle sorte qu'il ne plastifie pas avant la localisation d'une macrofissure dans le BFUP. Ceci permet de réaliser le chargement jusqu'à ce qu'une macrofissure se forme pour les différentes configurations d'essais testées. Cela permet également d'utiliser les équations basées sur la théorie d'élasticité présentées à la Section 2.3.2.2 pour exploiter les résultats de cet essai, ces équations étant principalement fonctions du module d'élasticité de l'anneau d'acier E_s.



a) Cône b) Position initiale des pétales c) Cœur expansif d) Position finale des pétales

Figure 3.5 Vue schématique des composantes du cœur expansif



a) Vue de dessus b) Coupe A-A

Figure 3.6 Cœur expansif inséré dans l'anneau d'acier de l'essai de retrait restreint

Lors de la deuxième phase de l'essai, l'expansion appliquée induira une déformation ortho-radiale ($\varepsilon_{\theta\theta}$) de traction dans l'anneau en BFUP jusqu'à la formation d'une macrofissure. La déformation nécessaire pour localiser une macrofissure dans l'anneau en BFUP représentera alors la marge de déformation disponible, après prise en compte du retrait restreint et du comportement viscoélastique du BFUP, pour assurer un renforcement mécanique optimal et une étanchéité satisfaisante de la réparation en BFUP. Cette marge de déformation est inconnue, elle peut potentiellement s'étaler jusqu'au niveau de déformation maximale du BFUP sain si le retrait

restreint précédant n'a pas d'impact sur la capacité de déformation du BFUP ou être limitée à un niveau inférieur tel qu'illustré sur la Figure 3.7.

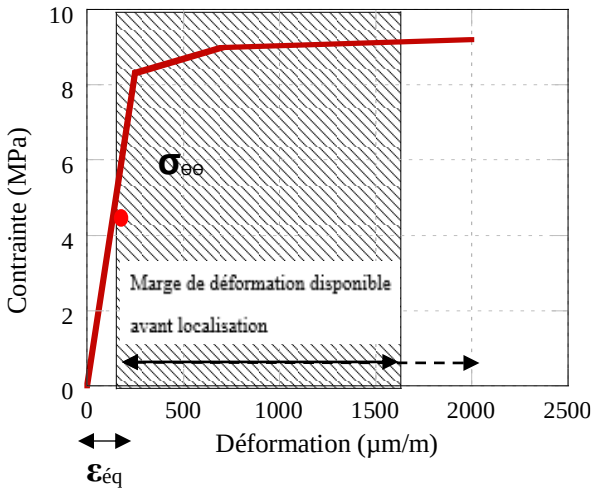


Figure 3.7 Comportement en pré-pic d'un BFUP - Illustration de la phase 2: Essai d'expansion

En réalisant l'essai d'expansion sur différentes configurations de réparations en BFUP, il sera possible de déterminer l'impact de ces configurations sur cette marge de déformation et donc d'étudier la performance de chaque configuration et sa capacité à renforcer et sceller une structure atteinte par la RAG.

3.1.2 Dimensions du spécimen

Les dimensions du spécimen étudié sont présentées à la Figure 3.8. Le choix de ces dimensions est basé principalement sur les paramètres suivants :

- Aspects pratiques et de faisabilité
- Critères d'uniformité et d'uni-axialité
- Degré de restreinte visé

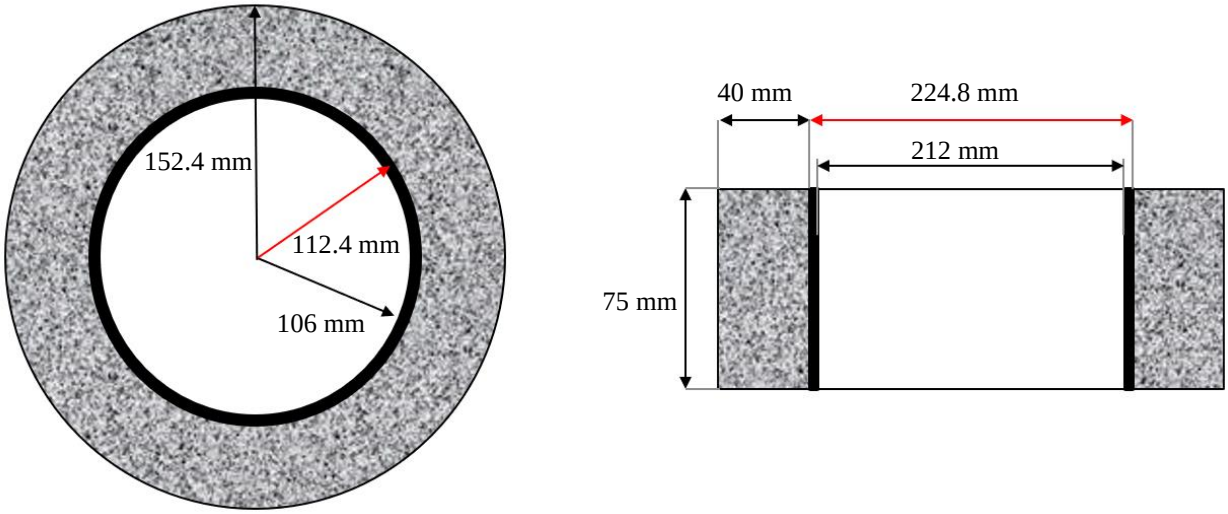


Figure 3.8 Géométrie adoptée pour l'essai sur anneau

L'épaisseur de l'anneau d'acier est égale à ¼ po soit 6.4 mm. Cette épaisseur a été choisie de manière à avoir un anneau suffisamment rigide pour restreindre le retrait du BFUP tout en restant suffisamment déformable pour l'essai d'expansion. L'épaisseur de la réparation de BFUP est, quant à elle, fixée à 40 mm. Ce choix a été fait selon un guide d'utilisation du BFUP pour des applications de réhabilitation des structures établi par Denarié (2006). En effet, sur les structures présentant des fissurations actives, une couche de minimum 30 mm de BFUP est requise. Cette épaisseur peut atteindre 50 mm lorsqu'elle renferme des armatures de renforcement. D'où le choix de la valeur moyenne de 40 mm. Les autres paramètres (R_{oc} = 152.4 mm et R_{is} = 106 mm) ont été choisis pour répondre aux critères d'uniformité et d'uni-axialité ainsi qu'au critère lié au degré de restreinte visé.

Le Tableau 3.1 recense les critères d'uni-axialité *A1* et d'uniformité *A2* adoptés dans des études antérieures portant sur le retrait restreint, ainsi que l'épaisseur des anneaux ($e_{béton}$) et le rayon interne de l'anneau en béton (R_{ic}) associés. Tel que décrit à la Section 3.1.2, ces critères donnent, respectivement, des indications sur l'effet parasite de la contrainte radiale (effet moindre pour *A1* faible) et sur l'uniformité de la distribution des contraintes ortho-radiales sur toute l'épaisseur de l'anneau en béton (meilleure uniformité pour *A2* faible).

Tableau 3.1 Critères d'uniformité adoptés pour des études antérieures du retrait restreint à l'anneau

Critères d'uniformité				
	$e_{béton}$	*Ric*	*A1*	*A2*
(Yoo et al., 2017)	20	145.5	0,13	0.15
	30		0.185	0.227
	40		0.24	0.31
(ASTM-C1581, 2004)	38	165	0.2	0.256
(Hossain et al., 2004)	75	150	0.4	0.625
(Briffaut, 2010)	70	240	0.25	0.33
(Weiss et al., 2002)	25	150	0.15	0.18
	75		0.32	0.62
	150		0.6	1.5
(Messan, 2006)	50	150	0.38	0.62
	40	160	0.22	0.25
(Yoo et al., 2014)	75	145.5	0.39	0.65
		171	0.35	0.53
Ce projet- (Abid 2021)	40	106	0.29	0.41

Le seuil maximal atteint pour les spécimens utilisés dans la littérature est de 0.4 et 0.65 pour *A1* et *A2* respectivement. Le spécimen normé (ASTM-C1581, 2004) présente, quant à lui, d'excellents critères de l'ordre de 0.2 et 0.256 pour *A1* et *A2* respectivement. Avec les rayons interne et externe du BFUP illustrés sur la Figure 3.8, le spécimen considéré pour ce projet procure des critères *A1* et *A2* de l'ordre de 0,29 et 0,41 respectivement, ce qui limite les effets parasites et la distribution des contraintes dans l'épaisseur de l'anneau.

Par ailleurs, en utilisant la courbe présentée à la Figure 2.19 dans la Section 2.3.1.3, les rapports R_{oc}/R_{ic} et R_{is}/R_{os} utilisé pour ce projet indiquent que le degré de restreinte, pour le spécimen étudié, est approximativement de l'ordre de 75%. Cette valeur sera validée lors d'essais préliminaires. Cela dit, une restreinte 75% est représentative des conditions retrouvées sur des structures réelles. En effet, le Tableau 3.2 présente une classification des niveaux de restreinte relevés sur des structures composites ou hybrides. Selon Denarié (2006), pour le BFUP coulé en place, le degré de restreinte varie entre 40 et 90%. Le niveau de restreinte moyen de 75% est classé élevé. De plus, De la Varga et al. (2019) présume que le degré de restreinte relevé sur les tabliers de ponts en béton armé dont le mouvement est limité par les armatures et d'autres éléments structuraux tels que les poutres est de l'ordre de 72%.

Tableau 3.2 Classification des niveaux de restreinte pour le BFUP dans les structures composites ou hybrides (Denarié, 2006)

Application	Degré de restreinte (%)	Classification
Préfabrication	0%	NC
Coulage sur place	40% à 60%	Modérée
	75%	Élevée
	80% à 90%	Très élevée

Finalement, afin de réduire l'effet du séchage non uniforme évoqué à la Section 2.3.2.3, bien que faible pour le BFUP, la hauteur du spécimen est réduite à 75 mm par rapport à la hauteur du spécimen de l'essai normé (ASTM-C1581, 2004) qui est égale à 150 mm.

3.2 Procédure expérimentale et instrumentation

Afin de réaliser l'essai développé, une procédure expérimentale complète a été mise en place. Cette section fait état des conditions dans lesquelles se déroulent les deux phases de l'essai. Le protocole expérimental détaillée est présenté dans l'Annexe B.

3.2.1 Conditions pour l'essai de restreint

Afin de pouvoir déduire, lors des essais de retrait restreint sur l'anneau proposé, la restriction du retrait effective, il faut quantifier le retrait libre du BFUP. Il est difficile de mesurer le retrait libre sur un même anneau de BFUP non restreint. En effet, la forme annulaire génère automatiquement une limitation des déformations. De plus, il est problématique d'installer une jauge de retrait à directement sur le béton après la coulée. Le retrait libre sera alors mesuré sur un spécimen prismatique dont les dimensions sont fixées en fonction des dimensions de l'anneau. Les dimensions choisies sont présentées sur la Figure 3.9. Le prisme de retrait libre présente la même section que l'anneau de BFUP, soit 75 mm x 40 mm (figure). Aussi, le rapport S/V (surface/volume de séchage) du prisme est de l'ordre de 0.007 qui est égal au rapport S/V de l'anneau de BFUP. Pour mesurer les déformations, une jauge de déformation TML 50 sera noyée dans le béton du prisme.

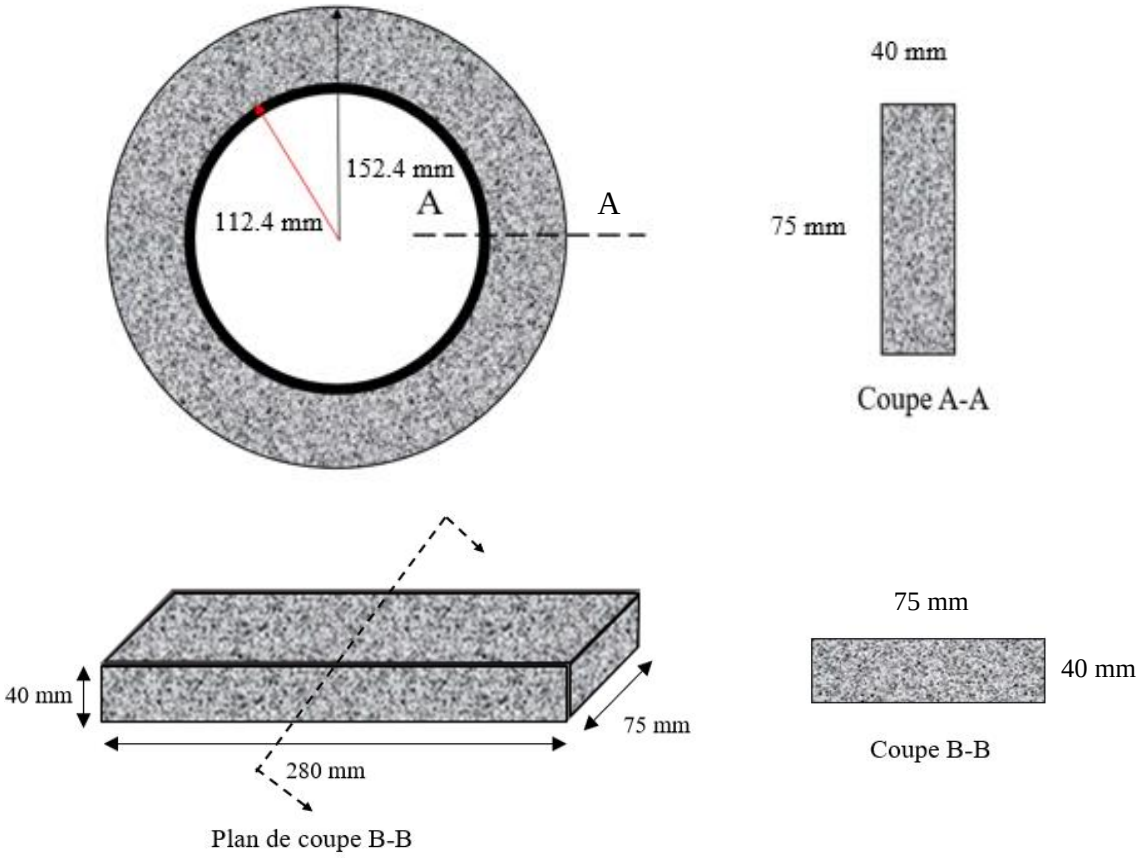
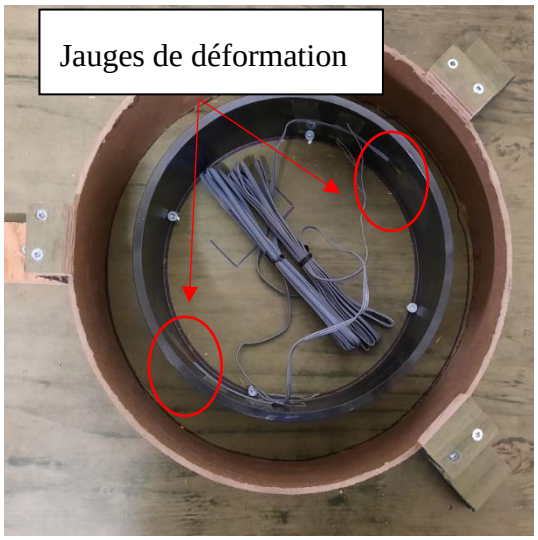


Figure 3.9 Surface transversale de séchage de l'anneau de BFUP et du prisme adapté

Instrumentation

Avant de débuter la phase 1 de retrait restreint, deux jauges de déformation pour acier sont installées, de manière diamétralement opposée, à mi-hauteur au niveau du rayon interne de l'anneau d'acier (Figure 3.10a). Les déformations ortho-radiales enregistrées par ces jauges permettent de calculer la contrainte de traction autogénérée dans le BFUP lors de son retrait, qui est restreint par l'anneau d'acier. Pour le prisme de retrait, une jauge de retrait est installée au centre (Figure 3.10b).



a) Jauges de déformation installées à mi-hauteur sur l'anneau d'acier

b) Jauge de retrait installée au centre du prisme de retrait adapté

Figure 3.10 Instrumentation de l'anneau et prisme de retrait

Conditions de séchage

Durant l'essai de retrait restreint, les anneaux sont placés dans une salle environnementale dans laquelle la température est maintenue constante de l'ordre de 23±2°C et le niveau d'humidité aussi de l'ordre de 50±5% (Figure 3.11). Aucune cure humide n'a été appliquée vu que cette dernière peut endommager des anneaux d'acier qui entrave le retrait du BFUP (Formation de rouille) et engendrer des fluctuations et modifier l'évolution du retrait. Aussi, afin de simuler les conditions

de séchage d'une réparation appliquée sur une structure réelle, aucun scellement n'est appliqué à l'anneau. De plus, puisque le BFUP présente un retrait de séchage relativement bas, l'absence de scellement ne modifie pas de manière prononcée les résultats de retrait tel que discuté à la Section 2.3.2.3.

Figure 3.11 Installation des anneaux de retrait restreint dans la chambre environnementale

Les prismes adaptés sont eux aussi placés dans la même chambre environnementale sans subir de cure. Cependant, ils sont scellés par de l'aluminium collant au niveau de 3 faces, tel que présenté à la Figure 3.12. Ceci permet de simuler les mêmes conditions de séchage que les anneaux (même surface/volume de séchage).

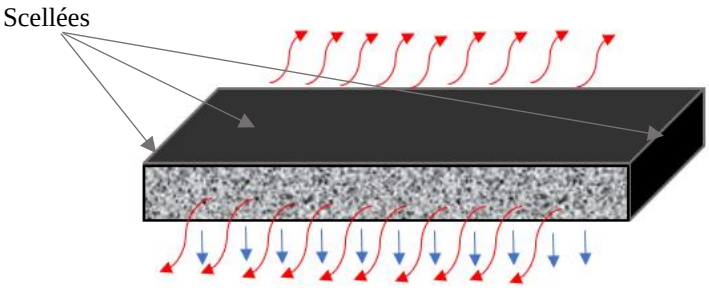


Figure 3.12 Scellement des prismes adaptés

3.2.2 Condition pour l'essai d'expansion

Durant la phase 1 de l'essai, la contrainte de traction est auto-générée dans le BFUP car que l'anneau d'acier entrave la déformation. Une fois l'essai de retrait restreint effectué, la phase 2 de l'essai consiste à appliquer une expansion sur l'anneau de BFUP. Le cœur expansif (cône + 6 pétales) est inséré dans l'anneau en acier du montage présenté à la section précédente et le tout est positionné sur une plaque en acier déposée sur la base d'une presse hydraulique de capacité 2.5 MN (Figure 3.13).

Figure 3.13 Installation des pétales et du cône, composantes du cœur expansif

Le cône du cœur expansif est ensuite comprimé verticalement par une plaque en acier fixée sur le vérin de la presse (Figure 3.14). Le chargement est contrôlé en déplacement du vérin. Des considérations géométriques permettent d'estimer approximativement le déplacement ortho-radial induit sur l'intérieur de l'anneau en BFUP à partir du déplacement vertical du cône. Connaissant ensuite la capacité de déformation des BFUP testés, il est possible d'estimer le déplacement vertical maximal qui devrait fort probablement être appliqué sur le cône pour localiser une macrofissure dans l'anneau en BFUP. Par exemple, avec les dimensions de l'anneau de ce projet et l'angle d'inclinaison du cône (8°), un calcul géométrique simple permet de montrer qu'un déplacement vertical de 30 mm génère une déformation ortho-radiale de l'ordre de 4 % à l'intérieur de l'anneau. Cette déformation dépasse largement la capacité de déformation en traction du BFUP généralement

comprise entre 2000 et 2500 με. Ces considérations permettent de définir la hauteur requise du cône et définir un taux de chargement préliminaire en déplacement. Ce taux de chargement sera ensuite ajusté lors des essais préliminaires.

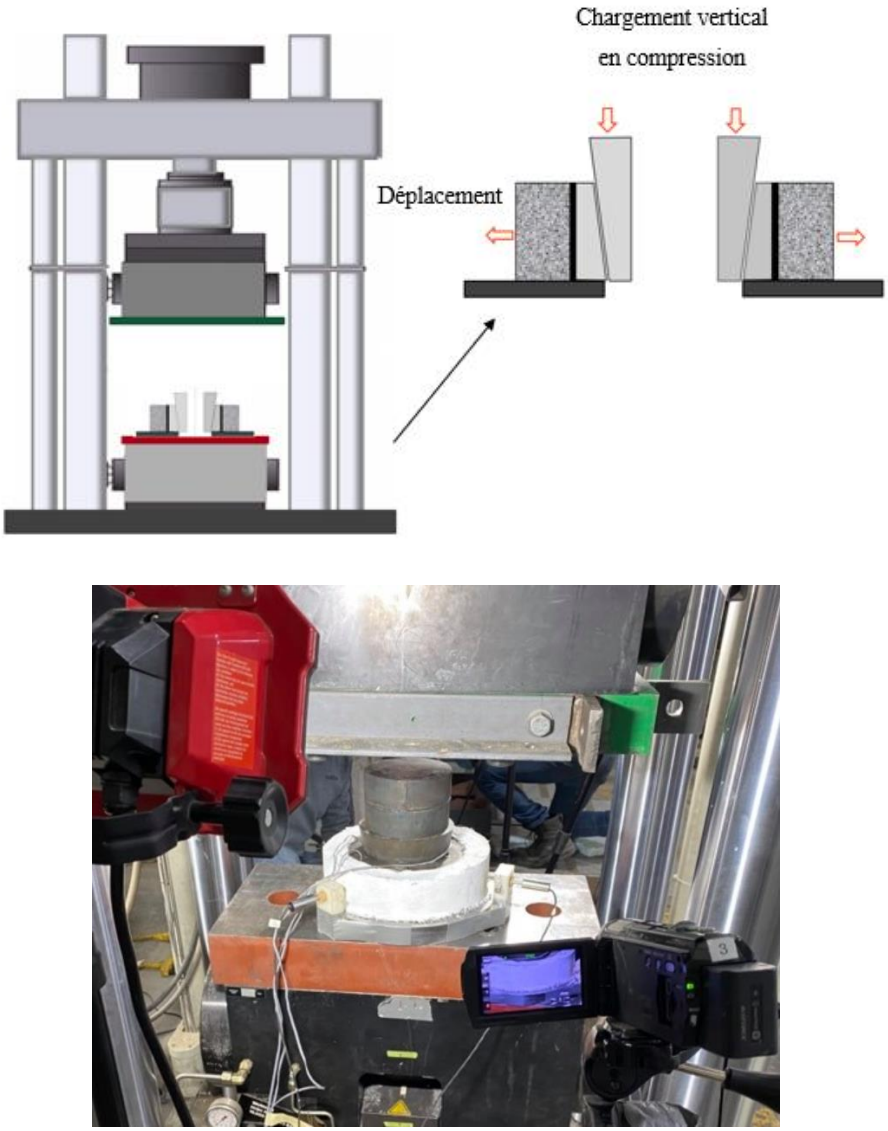
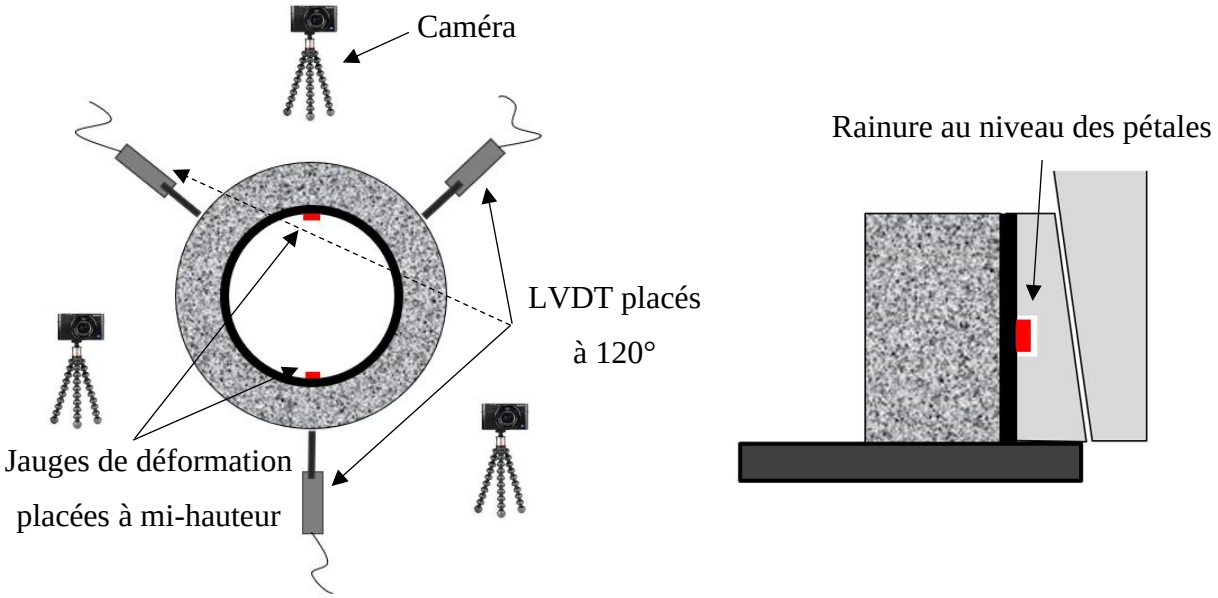


Figure 3.14 Système de chargement pour l'essai d'expansion

Instrumentation

Lors de la phase 2 correspondant à l'essai d'expansion, les jauges de déformations sont toujours présentes et permettent de mesurer la déformation ortho-radiale d'expansion au niveau du rayon interne de l'acier et d'en déduire les déformations dans l'anneau en BFUP. Pour ne pas

endommager ces jauges lors de l'essai d'expansion, une rainure est prévue sur tout le pourtour extérieur des pétales, à mi-hauteur (Figure 3.15 b). En plus de ces jauges, trois LVDT sont placés à l'extérieur de l'anneau, à 120° chacun (Figure 3.15 a). Ces capteurs additionnels, utilisés pour les phases 1 et 2 d'essais, permettent de mesurer le déplacement radial du rayon externe du béton et d'en déduire la déformation radiale correspondante. Des considérations géométriques permettent ensuite de déterminer la déformation ortho-radiale de la surface extérieure de l'anneau en BFUP. Ces données peuvent être comparées avec les données de déformations ortho-radiales déterminées au même endroit via les jauges intérieures et l'application de certaines équations. Lors de l'essai d'expansion, ces LVDT permettent de déterminer approximativement la déformation qui engendre la localisation de fissure au niveau du rayon externe de l'anneau de béton. Finalement, pour l'essai d'expansion spécifiquement (phase 2), trois caméras sont également installées autour du spécimen. Elles permettent de déterminer précisément l'instant et l'endroit de localisation de la macrofissure dans l'anneau de BFUP.



a) Jauges symétriques, caméras et LVDT placés à 120°

b) Détail de l'instrumentation lors de la phase 2

Figure 3.15 Instrumentation de l'essai développé

CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE

Cette étude préliminaire présente le développement et la validation des deux phases de l'essai développé, soit l'essai de retrait restreint (phase 1) et l'essai d'expansion (phase 2) réalisés sur un anneau de BFUP. Premièrement, il sera question de valider le choix des dimensions du spécimen ainsi que plusieurs concepts liés au retrait restreint discutés dans la Section 2.3, notamment les contraintes résiduelle et élastique ainsi que leur distribution dans la réparation en BFUP et les degrés de restreinte et de relaxation des contraintes. Deuxièmement, la méthode d'analyse utilisée pour déterminer la marge de déformation disponible pour les expansions causées par la RAG, à partir des résultats de l'essai d'expansion (phase 2), sera présentée.

4.1 Programme préliminaire

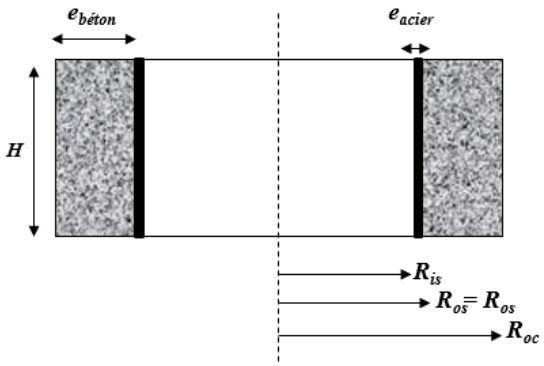
Le programme préliminaire a pour objectif de valider les points suivants :

- La conception et le bon fonctionnement du montage d'essai développé (pièces adéquates, instrumentation bien placée, protocole de chargement adéquat, etc.)
- Les dimensions du spécimen pour la campagne principale
- L'applicabilité des équations présentées à la Section 2.3 pour déterminer les contraintes et déformations de traction autogénérées, les degrés de restreinte et de relaxation lors de l'essai de retrait restreint (phase 1)
- Le bon fonctionnement de l'essai d'expansion et l'analyse des résultats extraits durant la phase 2 de l'essai

Les dimensions de l'anneau utilisé pour les essais préliminaires sont présentées au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Dimensions des spécimens du programme préliminaire

Paramètres géométriques	Dimensions (mm)	Schéma des différents paramètres de l'anneau de BFUP
Roc	152.4	
Ric	112.4	
Ris	106	
$e_{béton}$	40	
e_{acier}	6.4 (1/4 po)	
H	75	

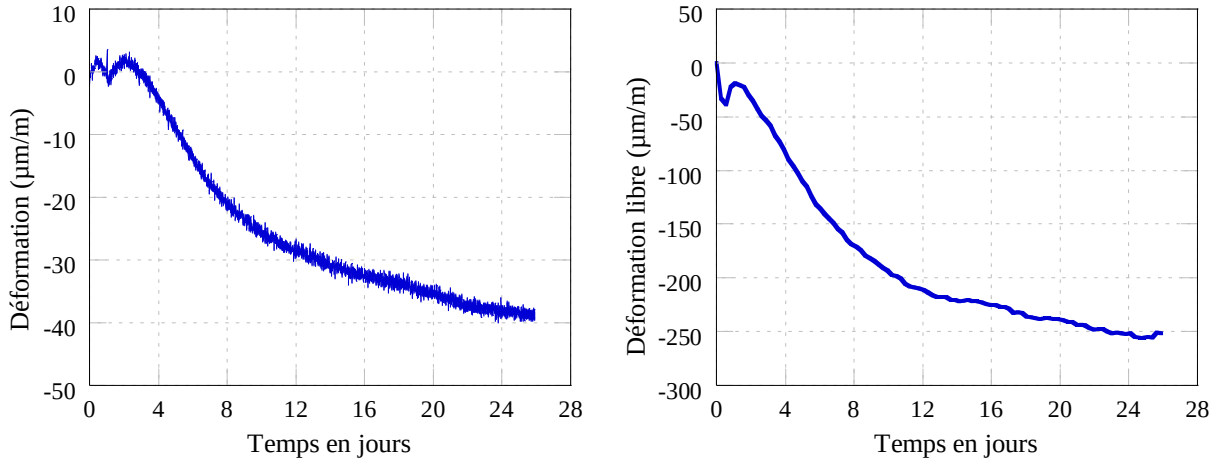


4.2 Résultats de l'essai préliminaire de retrait restreint

Cette section présente les résultats de l'essai de retrait restreint.

4.2.1 Déformations et degré de restreinte

La Figure 4.1a présente l'évolution de la déformation moyenne mesurée par les jauges de déformation installées à l'intérieur de l'anneau d'acier qui restreint le retrait de l'anneau de BFUP. La déformation restreinte atteint -40 µm/m à 26 jours. La Figure 4.1a présente quant à elle l'évolution du retrait libre mesuré sur le prisme adapté à l'anneau de retrait restreint (même surface/volume de séchage). Il atteint -250 µm/m à 26 jours. La déformation restreinte sur anneau présente donc 15,7% de la déformation libre mesurée sur le prisme correspondant.



a) Retrait restreint mesuré sur l'anneau en fonction du temps

b) Retrait libre mesuré sur prisme adapté en fonction du temps

Figure 4.1 Retraits libre et restreint

L'implémentation des données de déformations restreinte et libre mesurées dans les formules analytiques proposées par Hossain et al. (2004), et présentées à la Section 2.3, permettent de tracer l'évolution du degré de restreinte procuré par l'anneau d'acier sur l'anneau de BFUP (Figure 4.2). Initialement, le degré de restreinte est égal à 1. En effet, quand le BFUP est encore à l'état liquide, sa rigidité est presque nulle. La rigidité de l'anneau d'acier l'emporte et restreint toute déformation de l'anneau de BFUP. Lorsque ce dernier commence à gagner en rigidité, le niveau d'entrave diminue puis se stabilise proportionnellement au développement des propriétés mécaniques du BFUP. À 26 jours, la restreinte est de l'ordre de 85%. Ce niveau dépasse le niveau de restreinte seuil entre la classe de restreinte élevée et très élevée pour du BFUP coulé sur place selon Denarié (2006). Ceci suggère que l'anneau d'acier entrave grandement la déformation de la réparation en BFUP.

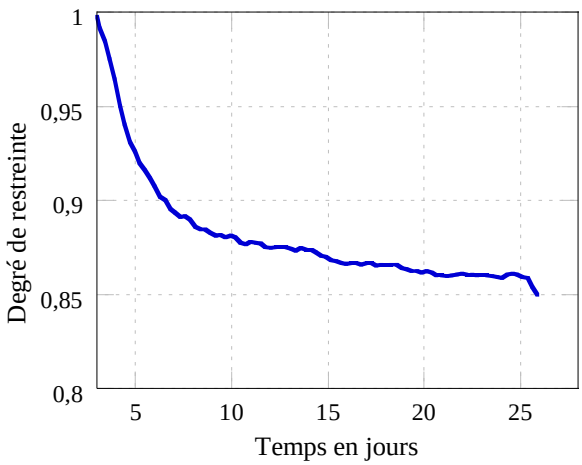


Figure 4.2 Degré de restreinte procuré par l'anneau à l'étude

4.2.2 Contraintes et degré de relaxation

La déformation relevée sur l'anneau d'acier (présentée précédemment à la Figure 4.1a) permet de calculer la contrainte de traction moyenne développée à l'intérieur de l'anneau de BFUP. Cette contrainte est dite résiduelle, car elle tient compte de l'effet de relaxation dû à la viscoélasticité du BFUP. La Figure 4.3 présente l'évolution de cette contrainte résiduelle développée au niveau du rayon intérieur de l'anneau de BFUP en fonction du temps ainsi que la contrainte élastique théorique. Cette dernière est, elle, déterminée à partir des mesures de retrait libre sur prisme adapté en appliquant les équations théoriques présentées à la Section 2.3. Elle représente la contrainte qui aurait pu se développer si la restriction de retrait avait eu lieu dans un matériau élastique. Contrairement à la contrainte résiduelle, la contrainte élastique théorique ne considère donc pas le comportement viscoélastique du BFUP.

La contrainte résiduelle présente une courbe continue sana baisse soudaine, signe qu'il n'y a pas eu de macrofissuration dans l'anneau de BFUP pendant la durée de l'essai. Son évolution est rapide au début de l'essai, puis ralentit ensuite dû aux effets de la viscoélasticité. À 26 jours, la contrainte résiduelle maximale est égale à 1.5 MPa. Au même âge (26 jours), la contrainte élastique est de l'ordre de 5 MPa. Une réduction des contraintes de l'ordre de 3.5 MPa est donc observée entre le comportement élastique théorique et le comportement viscoélastique réel, l'effet de la viscoélasticité du BFUP est donc très important.

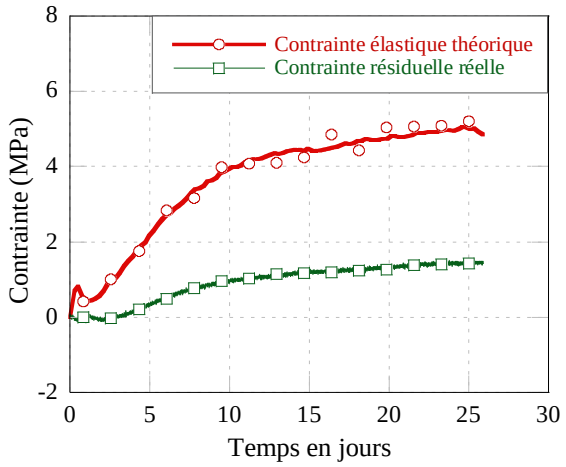


Figure 4.3 Contrainte résiduelle réelle et contrainte élastique théorique développées dans le BFUP

Alors que la Figure 4.3 présente l'évolution de la contrainte de traction dans le temps au centre de la surface intérieure de l'anneau de BFUP, la Figure 4.4 présente la distribution de la contrainte générée dans l'épaisseur de l'anneau de BFUP à 26 jours. La contrainte de 1.5 MPa calculée au centre de la surface intérieure de l'anneau de BFUP tombe à 1 MPa au niveau de la surface extérieure de l'anneau. Ceci montre que la distribution des contraintes sur l'épaisseur de la réparation est assez uniforme et le critère d'uniformité *A1*=0,29 (Section 3.1.2) est satisfait.

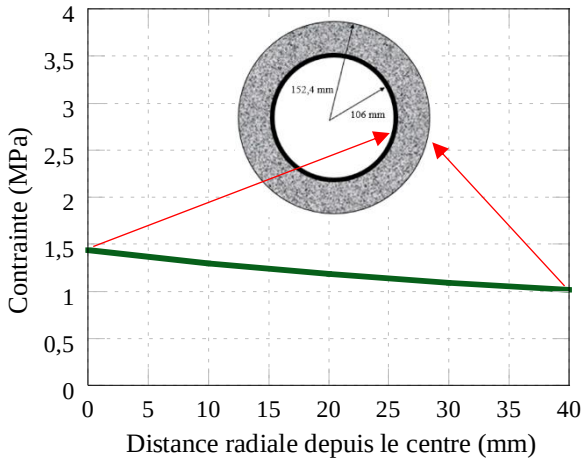


Figure 4.4 Distribution de la contrainte sur l'épaisseur de l'anneau de BFUP

Les mesures de contrainte élastique ainsi que celles de contrainte résiduelle permettent de déterminer la courbe d'évolution du degré de relaxation dû à la viscoélasticité dans la réparation de BFUP testée (Figure 4.5). En effet, la relaxation est déduite à partir du rapport de ces deux contraintes (Section 2.3.2.2). Le degré de relaxation évolue très rapidement au début de l'essai puis se stabilise. Son évolution est inversement proportionnelle à l'évolution de la contrainte élastique. Le degré de relaxation des contraintes atteint 70% à 26 jours. Ceci met en avant le grand potentiel de fluage du BFUP et l'avantage qu'il présente pour des applications de réparations soumises à une restreinte très élevée des déformations.

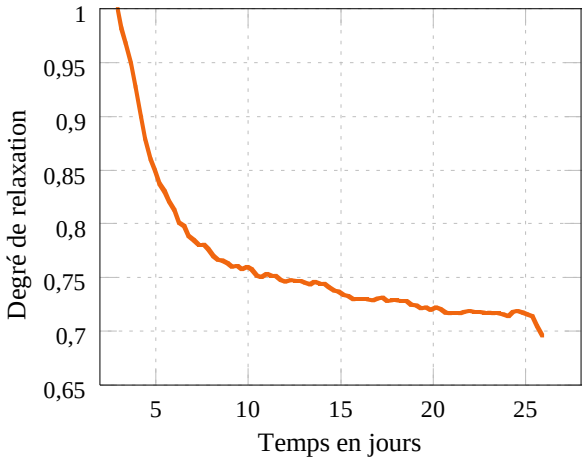


Figure 4.5 Degré de relaxation

4.3 Résultats de l'essai préliminaire d'expansion

Cette section présente les résultats préliminaires de l'essai d'expansion. La méthode d'analyse ainsi que les observations seront également présentées.

Pour bien comprendre la réponse obtenue lors de l'essai d'expansion appliqué sur l'anneau de BFUP, l'essai est d'abord réalisé de manière cyclique (3 cycles de chargement/déchargement) à vide sur un anneau d'acier sans BFUP (Figure 4.6). Ensuite, l'essai est réalisé sur un anneau de BFUP contenant 2.5% vol. de microfibres d'acier (Figure 4.7). Ceci permet de distinguer, sur la courbe de comportement mesuré, l'importance de la déformation de l'anneau d'acier.

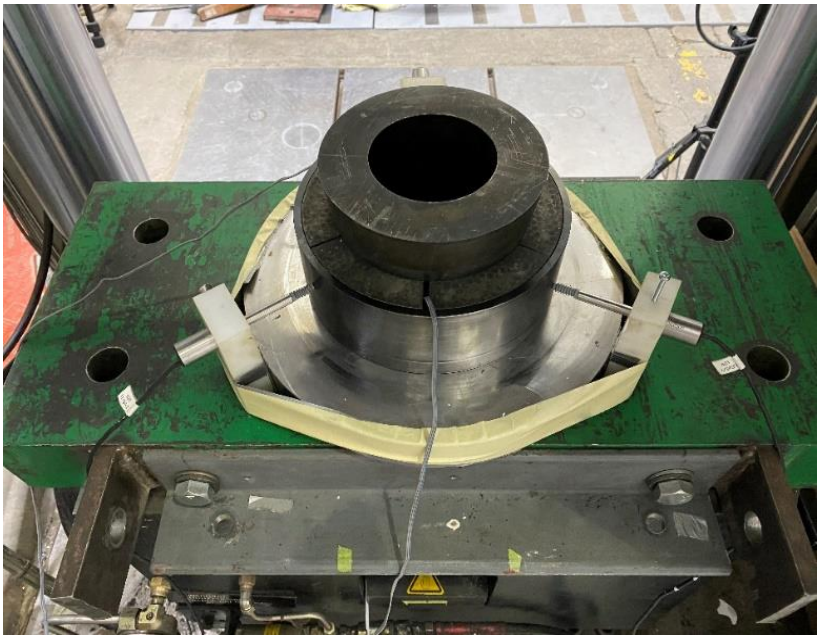


Figure 4.6 Essai d'expansion appliqué sur anneau d'acier sans BFUP

Figure 4.7 Essai d'expansion appliqué sur un anneau d'acier avec BFUP

La Figure 4.8 présente une superposition des courbes d'évolution de la force verticale appliquée par la presse en fonction du déplacement vertical du vérin pour les essais cycliques sur anneau d'acier seul et pour l'essai avec anneau de BFUP. Les trois essais cycliques présentent des courbes qui coïncident parfaitement. Ceci montre la répétabilité de l'essai proposé ainsi que la possibilité de réutilisation des anneaux d'acier plus d'une fois. Il est possible de distinguer deux pentes différentes sur les trois courbes. La première est due aux effets de montage, notamment au placement du cône et des pétales. Ensuite, la pente augmente proportionnellement à l'évolution de la charge appliquée. La courbe obtenue suite à l'essai sur anneau de BFUP concorde, elle aussi, avec celles des essais cycliques. Même après la fissuration du BFUP, l'évolution de la charge reste linéaire, signe que c'est le comportement de l'anneau en acier qui gouverne le comportement global force-déplacement lors de l'essai d'expansion. Ceci s'explique par la rigidité élevée de l'acier par rapport à celle du BFUP.

À noter que l'essai sur anneau de BFUP a été poussé plus loin (jusqu'à 15 mm de déplacement vertical) que les essais sur anneau d'acier seul qui ont été menés jusqu'à 6 mm. Après environ 7 mm, la courbe de l'essai sur anneau avec BFUP se stabilise signe que la plastification de l'anneau d'acier est atteinte.

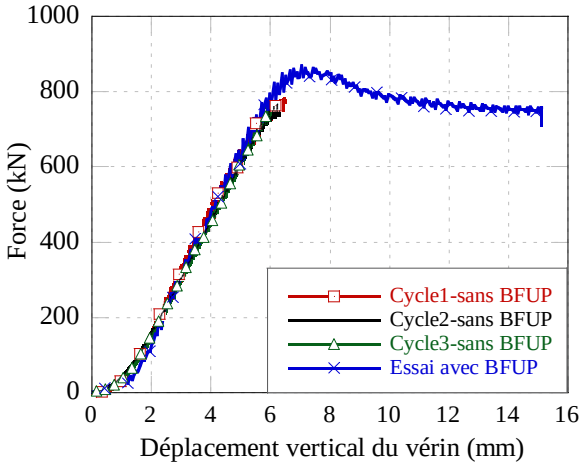


Figure 4.8 Évolution de la force de la presse en fonction du déplacement vertical du vérin

Étant donné que c'est la déformation de l'acier qui gouverne l'essai d'expansion, les jauges placées sur l'anneau d'acier ne permettent pas de distinguer les différentes phases de comportement du BFUP en traction (phases élastique, d'écrouissage puis adoucissante). Il devient donc impossible de pouvoir déterminer le moment de localisation d'une macrofissure à partir des courbes de données extraites lors de l'essai. L'instant de macrofissuration du BFUP est donc déterminé à l'aide des trois caméras installées à 120° autour du spécimen testé. Bien que cette méthode de détermination du moment de macrofissuration du BFUP, et donc de détermination de la marge de déformation disponible pour confiner la RAG, ne soit pas aussi précise qu'une lecture de capteur, elle est conservatrice. En effet, l'essai d'expansion réalisé au laboratoire applique une déformation rapide pendant quelques dizaines de minutes. L'évolution réelle de l'expansion de la RAG est beaucoup plus lente, la déformation étant imposée graduellement pendant des années. Une étude menée par Briffaut (2010) montre que la vitesse d'application d'une expansion sur le béton influence sa capacité de déformation. L'application d'une expansion lente offre une plus grande marge de déformation avant la fissuration du béton. Ceci peut être expliqué d'une part par le fait que, lorsque l'expansion est lente, le béton gagne davantage en rigidité et en résistance proportionnellement à sa maturité. D'autre part, le temps permet d'activer la viscoélasticité du béton qui tend à compenser, par fluage, une partie de la déformation imposée.

La synchronisation entre la cinétique d'évolution de la force verticale appliquée par la presse et la vidéo prise lors de l'essai permet de tracer la Figure 4.9. La localisation d'une macrofissure est détectée après 970 s pour un niveau de chargement de 633.5 kN.

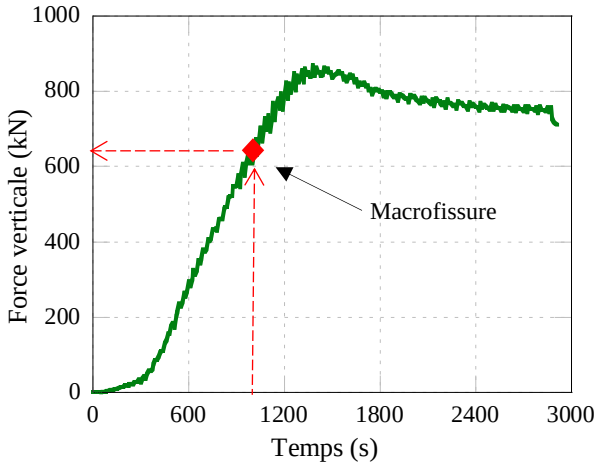


Figure 4.9 Évolution de la charge appliquée en fonction du temps

Le niveau de charge de 633.5 kN, qui correspond au moment de localisation d'une macrofissure sur l'anneau en BFUP (Figure 4.9), correspond à une déformation ortho-radiale du rayon interne de l'anneau de BFUP, mesurée par les jauges, de l'ordre de 2537.5 µm/m, soit une déformation de 0.25% (Figure 4.10). La déformation du rayon externe, mesurée par les trois LVDT placés à 120°, est quant à elle un peu plus élevée que la déformation interne. Elle est égale à 2679 µm/m, soit une déformation de 0.27%. Cette différence de déformation entre les rayons intérieur et extérieur de l'anneau de BFUP est expliquée par le fait que, lors de l'essai de retrait restreint, la restriction est un peu plus importante au rayon intérieur de l'anneau (contrainte plus élevée), ce qui procure une réserve de déformation légèrement inférieure à l'intérieur. Cela dit, le niveau de déformation interne et externe est assez similaire à une centaine de microdéformation près, signe d'une bonne distribution des contraintes sur l'épaisseur de la réparation. Ceci est confirmé par les observations faites sur l'éprouvette testée. La Figure 4.11 montre des ouvertures simultanées au niveau du rayon interne et externe de l'anneau de BFUP. Aussi, la Figure 4.12 montre que la localisation a lieu au niveau d'une pétale (et non pas au niveau d'un espace inter-pétales). Ceci indique une répartition homogène des déformations dans l'anneau de BFUP, sans concentration de contraintes au niveau des espaces inter-pétales. La distribution assez uniforme des microfissures développées en phase d'écrouissage confirme également cette bonne répartition des contraintes.

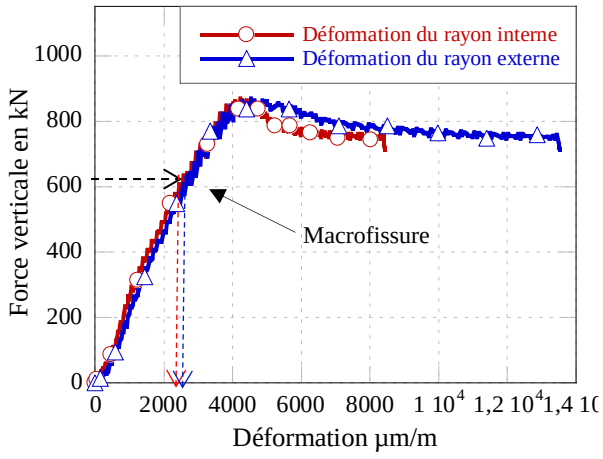


Figure 4.10 Évolution de la charge verticale en fonction de la déformation

Figure 4.11 Ouvertures de fissures simultanées au rayon interne et externe de l'anneau de BFUP

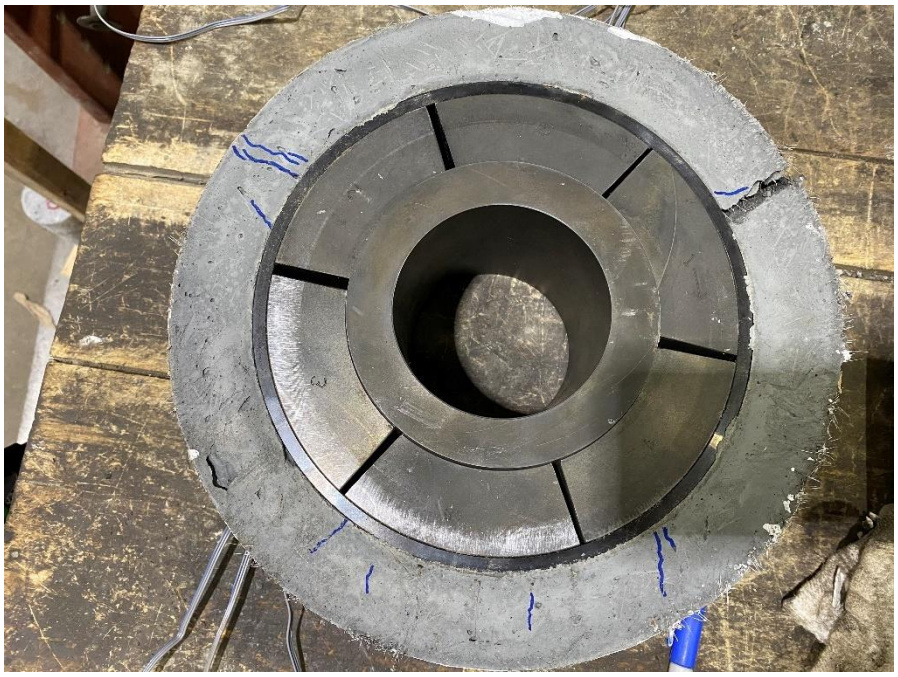


Figure 4.12 Patron de fissuration de l'anneau de BFUP (vue de dessous)

4.4 Conclusion

La campagne d'essais préliminaires a permis de valider plusieurs aspects liés au bon fonctionnement du dispositif développé et d'autres aspects concernant l'exploitation des résultats extraits des deux phases de l'essai. Les principales conclusions sont les suivantes.

Conclusions générales:

- La procédure de réalisation des deux phases de l'essai est validée. Le dispositif développé permet de reproduire successivement les effets du retrait restreint de la réparation en BFUP par la structure existante et ensuite les effets de l'expansion causée par la RAG.
- Les dimensions choisies pour le cœur expansif, les anneaux d'acier et de BFUP ainsi que celles du prisme de retrait libre sont adéquates. La distribution des contraintes lors de l'essai de retrait restreint est assez uniforme sur toute l'épaisseur de l'anneau de BFUP et la contrainte radiale parasite est réduite. Lors de l'essai d'expansion, la contrainte de traction générée dans l'anneau de BFUP est également assez uniforme avec des déformations assez semblables mesurées à ses rayons interne et externe. Il ne semble pas non plus y avoir de concentration de contrainte au niveau des espaces inter-pétales.
- L'essai d'expansion est reproductible.

Conclusions sur l'essai préliminaire de retrait restreint :

- L'application des équations présentées à la Section 2.3 permet de déterminer la contrainte résiduelle réelle de traction autogénérée par le retrait du BFUP ainsi que la contrainte élastique théorique du matériau. Elles sont de l'ordre de 1.5 MPa et 5 MPa respectivement après 26 jours.
- Le degré de restreinte apporté par l'anneau d'acier est de l'ordre de 85%.
- Le BFUP présente une viscoélasticité très importante qui permet une relaxation des contraintes dues au retrait restreint de l'ordre de 70%.

- La capacité de déformation du BFUP consommée par le retrait restreint sur une structure existante est peu élevée, elle est inférieure à 100 µm/m, ce qui lui laisse une grande capacité de déformation pour reprendre l'expansion de la RAG (plus de 2000 µm/m).

Conclusions sur l'essai préliminaire de retrait restreint :

- La déformation de l'anneau d'acier gouverne le comportement global force-déplacement vertical obtenu lors de l'essai d'expansion. Il n'est alors pas possible de distinguer les phases de comportement en traction du BFUP directement via ces courbes et une méthodologie de détection de la macrofissuration par caméra a été utilisée.
- La marge de déformation disponible pour confiner la RAG suite à l'essai de retrait restreint est de l'ordre de 2500 µm/m, soit 0.25% pour le BFUP 2.5% testé lors de cette phase préliminaire.

CHAPITRE 5 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE PRINCIPALE

Afin de déterminer les exigences de conception de la réparation proposée en BFUP pour confiner une structure atteinte par la RAG, un programme expérimental principal a été réalisé. Il a permis d'évaluer la performance de différentes configurations de réparation en BFUP. Cette section détaille les essais réalisés dans le programme principal ainsi que les résultats obtenus.

5.1 Programme expérimental principal

Une fois le montage et la procédure d'essai validés lors du programme expérimental préliminaire (Chapitre 4), l'objectif du programme principal est d'évaluer la performance de différentes configurations de réparations minces en BFUP à confiner les expansions causées par la RAG afin de déterminer les exigences de conception pour cette réparation. La phase expérimentale principale étudiera l'influence de trois paramètres sur le comportement des réparations en BFUP, également résumés au Tableau 5.1 :

-La 1ère condition d'essai évaluée est celle représentant le comportement d'une réparation en béton à hautes performances (BHP). Ceci permettra de comparer le potentiel de la réparation de BFUP proposée pour confiner les expansions délétères de la RAG par rapport à une réparation plus conventionnelle en BHP.

-La 2ème condition d'essai étudiée est le dosage en fibres incorporé dans le BFUP. La capacité de confinement de BFUP incorporant différents pourcentages de microfibres d'acier (2, 3 et 4% vol.) sera évaluée et comparée à celle du BHP. Les BFUP 2%, 3% et 4% étudiés correspondent, respectivement, aux matériaux UP-F2, UP-F3 et UP-F4 développés par Polytechnique Montréal et commercialisés par Sika.

-La 3ème condition d'essai évaluée est les conditions aux limites de la réparation en BFUP. L'influence de l'ajout d'un renforcement (armatures en acier) ainsi que des joints froids sur la performance de la réparation en BFUP pour confiner les expansions causées par la RAG sera étudiée. Cette fois, le BFUP 3% sans armature sera considéré comme la référence se retrouvant hors des zones de joints froids.

Deux spécimens seront testés par condition d'essai étudiée (Tableau 5.1). Ces spécimens subiront les deux phases d'essais, soit l'essai de retrait restreint pendant 28 jours suivi de l'essai d'expansion.

Tableau 5.1 Programme expérimental principal

Condition variable		BHP 0%	BFUP 2%	BFUP 3%	BFUP 4%	Armatures	Joints
Condition de référence		x					
Impact du dosage en fibres du BFUP	2%vol.		x				
	3%vol*			x			
	4%vol				x		
Impact des conditions limites de la réparation	Sans armatures et sans joints *			x			
	Avec armatures et sans joints			x		x	
	Avec armatures et avec joints			x		x	x

*Même condition d'essais.

Parallèlement aux essais du programme principal, des essais de caractérisation en traction uniaxiale (à 3, 7 et 28 jours) et en compression (à 3, 7 et 28 jours) ainsi que des essais de retrait libre (de 0 à 28 jours) sur prismes adaptés seront effectués pour les différents BFUP à l'étude. Ils permettront d'analyser adéquatement les résultats du programme principal. Le Tableau 5.2 présente un inventaire des essais de caractérisation et de retrait libre menés sur les trois gammes de BFUP

utilisés (2%, 3% et 4% vol. de fibres). Les spécimens associés seront prélevés sur les mêmes gâchées de béton que celles utilisées pour fabriquer les anneaux. Pour le BHP, seuls des essais de compression et de fendage (traction indirecte) à 7 et 28 jours ainsi que des essais de retrait libre sur prismes adaptés pendant 28 jours seront réalisés, sur trois spécimens à chaque échéance. Tous les spécimens de caractérisation seront installés dans la chambre environnementale maintenue à 23± 2°C et 50± 4% pour conserver la même condition de séchage que les anneaux et prismes de retrait libre.

Tableau 5.2 Essais de caractérisation réalisés pour les différentes gammes de BFUP 2, 3 et 4% vol. de microfibres

Essai de caractérisation	Nombre de spécimens	Échéances
Résistance à la traction f'_t	3 par échéance	3, 7 et 28 jours
Résistance à la compression f'_c	3 par échéance	3, 7 et 28 jours
Module d'Young E	1 par échéance	3, 7 et 28 jours
Retrait libre	2 par condition	0 à 28 jours

Le comportement en traction directe des BFUP sera évalué sur des spécimens en forme d'os (Beaurivage, 2009) tel qu'illustré sur la Figure 5.1. Cet essai permettra d'obtenir la courbe complète du comportement en traction, soit l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation en pré-pic ainsi que l'évolution de la contrainte en fonction de l'ouverture de la macrofissure dans la phase de comportement post-pic.

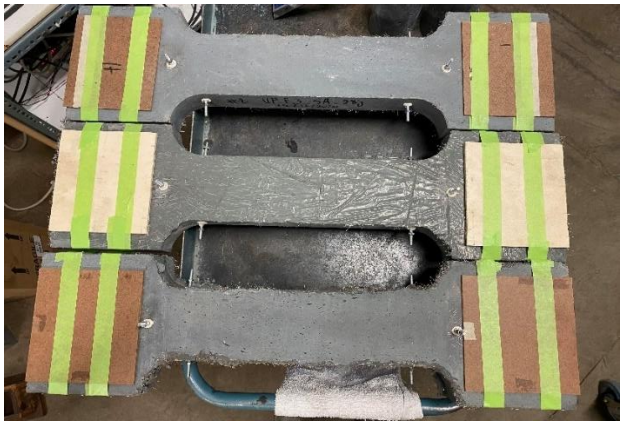


Figure 5.1 Spécimens d'os pour les essais de traction directe

La résistance à la compression (f'_c) des BFUP à l'étude sera évaluée selon la norme CSA A23.1(2019) sur des cylindres de 75 mm de diamètre et 150 mm de hauteur. L'évaluation du module de Young sera quant à elle effectuée sur un cylindre de 100 mm de diamètre selon la norme ASTM C469 (2014).

Les essais de caractérisation sont réalisés à trois échéances (Tableau 5.2) afin de déterminer l'évolution dans le temps des différents paramètres étudiés, soit $f'_t(t)$, $f'_c(t)$ et $E(t)$.

Les essais de retrait libre seront réalisés sur les prismes dont les dimensions ont été adaptées aux dimensions de l'anneau étudié (Section 3.1.2). Deux essais prismes seront réalisés.

5.2 Résultats des essais de caractérisation

Le Tableau 5.3 présente les résultats des essais de caractérisation menés sur les différents bétons étudiés dans ce projet. Contrairement au béton du substrat qui est endommagé par la RAG, il importe de bien comprendre l'évolution des propriétés du béton de réparation surtout au jeune âge. En effet, vu que la réparation est directement soumise au retrait restreint dès sa mise en place, il importe de s'assurer que la contrainte de traction générée sous entrave dans la réparation est inférieure à sa résistance en traction afin d'éviter la fissuration précoce. Aussi, le degré de restreinte évolue proportionnellement au développement de la rigidité de la réparation. D'où l'intérêt des essais de caractérisations à différentes échéances. Ceci permettra de déterminer l'évolution des propriétés des bétons utilisés en fonction du temps. Les spécimens de caractérisation n'ont subi

aucune cure. Ils ont été placés dans la même chambre environnementale que les anneaux et prismes de retrait (mêmes conditions de séchage).

Tableau 5.3 Résultats des essais de caractérisation sur les bétons étudiés

Propriétés	Échéance	BHP 0%	BFUP 2%	BFUP 3%	BFUP 4%
	3 j	45.5#	96.5	105	77.7
f'_c (MPa)	7 j	63	118	125	114.6
	28 j	75	138	138	139
	3 j	30400#	34400	37400	27045
E_c (MPa)	7 j	35700 #	39700	37400	34100
	28 j	39000 #	40800	38500	37400
	3 j	2.7	9	10.9	10.5
f'_t (MPa)*	7 j	3.6	9,9	11.5	11.6
	28 j	4	10.2	12.7	12.1

* Pour BHP, f_t mesurée par essai de fendage; Pour BFUP, f_t mesurée par essai de traction directe
# : Évalué selon CSA- A23.1-2019

Les mesures de la résistance à la compression f_c atteignent les valeurs attendues pour le BHP, soit 60 MPa selon CSA.A.23.1, ainsi que pour le BFUP, soit 120 MPa selon CSA.S6.

La Figure 5.2 présente l'évolution dans le temps du module d'élasticité des trois BFUP testés. Ces courbes ont été déterminées grâce à l'Équation 10 (Yoo et al., 2017), où f_{t28} est le module d'élasticité à 28 jours et λ_2 et k_2 sont les coefficients de régression déterminés grâce aux mesures de module déterminés à 3 et 7 et 28 jours.

$$E_t(t) = -E_{t28}(t).\,exp\{-\,\lambda 2.\,[\,ln(1 + (t - t_0))]^{-k2}\} \qquad (10)$$

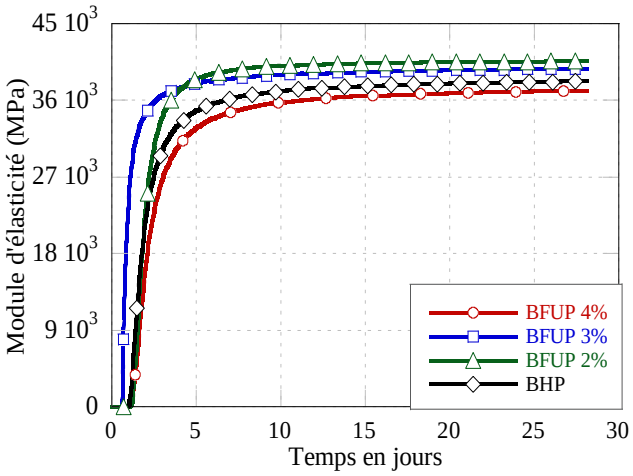


Figure 5.2 Évolution du module d'élasticité en fonction du temps des bétons testés

L'évolution du module d'élasticité de chaque BFUP est utilisée pour déterminer avec précision l'évolution de la contrainte de traction élastique maximale qui aurait pu se développer si les effets de fluage et relaxation n'avaient pas eu lieu.

Afin de caractériser le comportement des BFUP étudiés au cours du temps, des essais de traction sur spécimens d'os ont été réalisés à trois échéances, soit 3, 7 et 28 jours à raison de trois spécimens par échéance. Les courbes illustrées sur la Figure 5.3 à Figure 5.5 présentent, respectivement, les lois de comportement en traction du BFUP 2, 3 et 4% à différentes échéances.

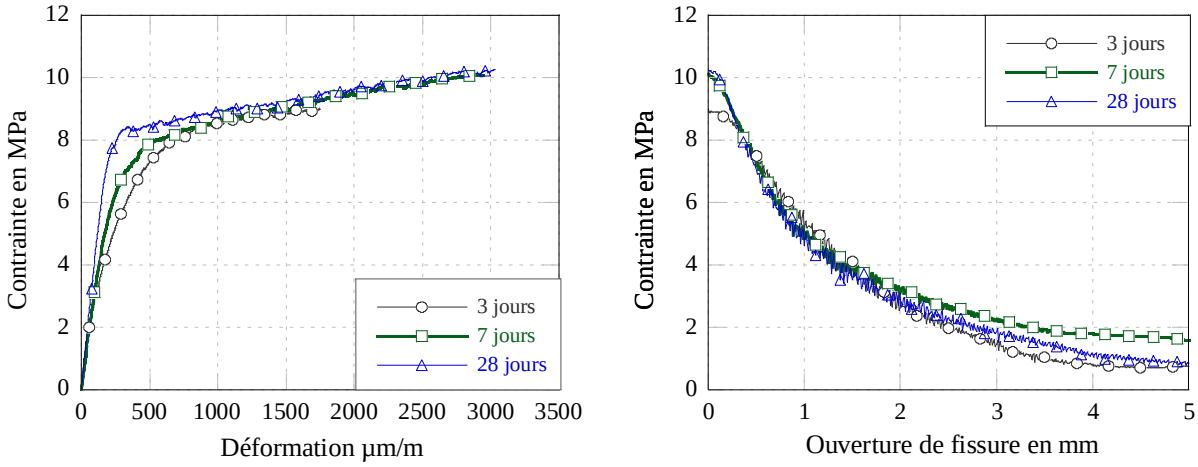


Figure 5.3 Loi de comportement en traction du BFUP 2% à différentes échéances

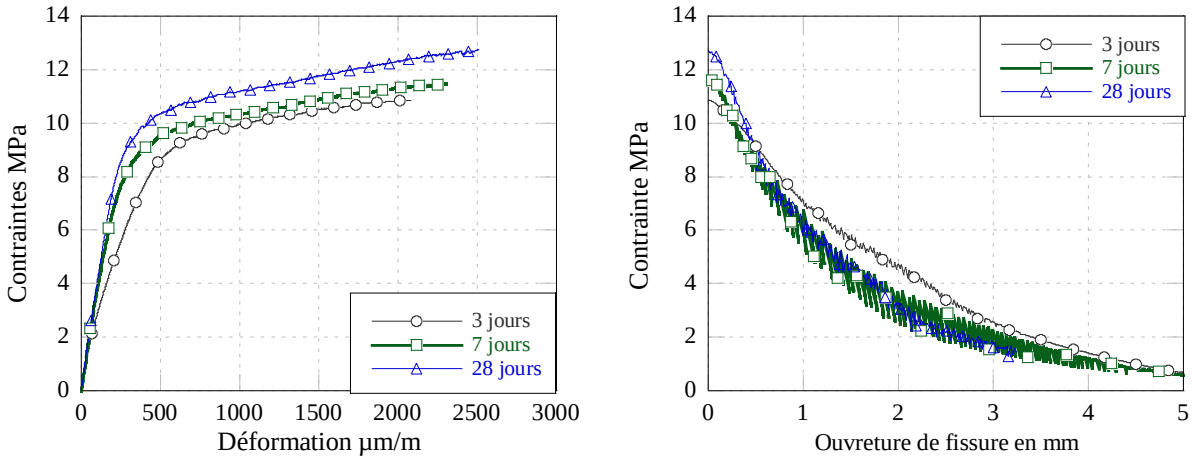


Figure 5.4 Loi de comportement en traction du BFUP 3% à différentes échéances

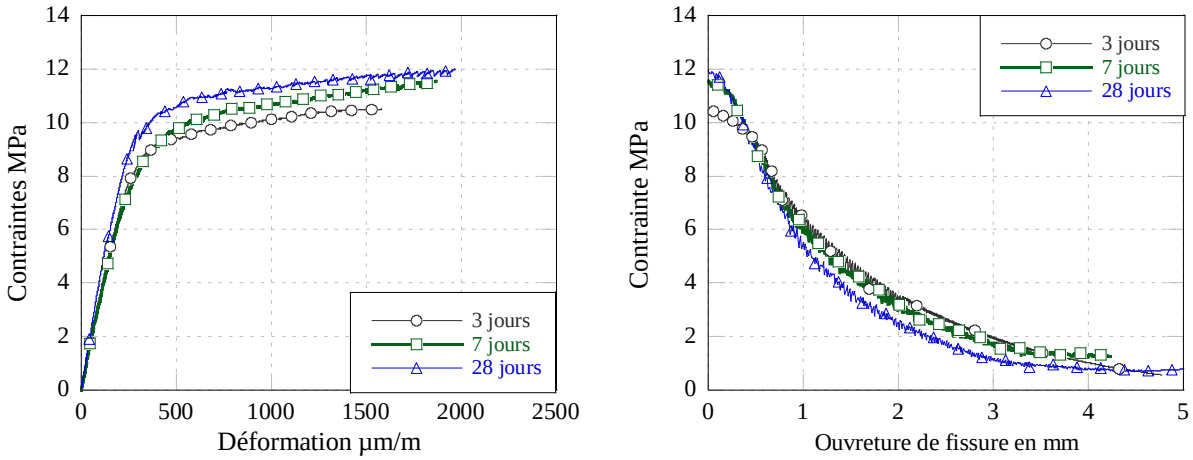


Figure 5.5 Loi de comportement en traction du BFUP 4% à différentes échéances

La Figure 5.6 présente, quant à elle, l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps des trois BFUP testés. Ces courbes ont été déterminées à l'aide de l'Équation 11 (Yoo et al., 2017), où f_{t28} est la résistance en traction à 28 jours et λ_1 et k_1 sont les coefficients de régression déterminés grâce aux mesures de la résistance en traction déterminés à 3 ,7 et 28 jours.

$$f_t(t) = -f_{t28}(t).\,exp\{-\,\lambda 1.\,[\,ln(1 + (t - t_0))]^{-k1}\} \quad (11)$$

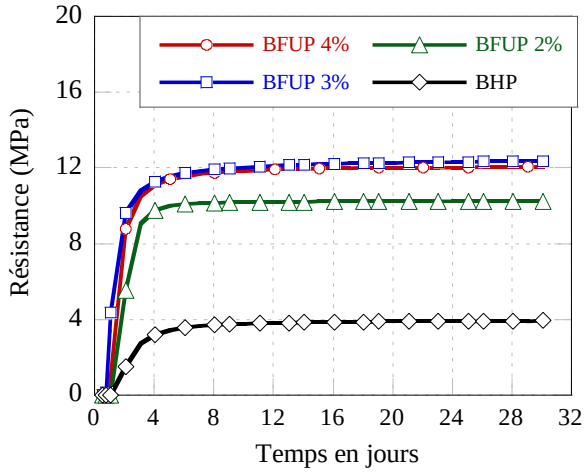


Figure 5.6 Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps des bétons testés

La résistance en traction du BFUP évolue très rapidement grâce à l'adjuvant accélérateur de prise introduit. On atteint 10.2, 12.7 et 12.1 MPa à 28 jours pour les BFUP incorporant 2, 3 et 4%vol de fibres respectivement. Le léger décalage dans le temps des courbes de résistance est lié aux dosages différents de superplastifiant et d'accélérateur utilisés dans les différents matériaux.

5.3 Résultats du programme principal

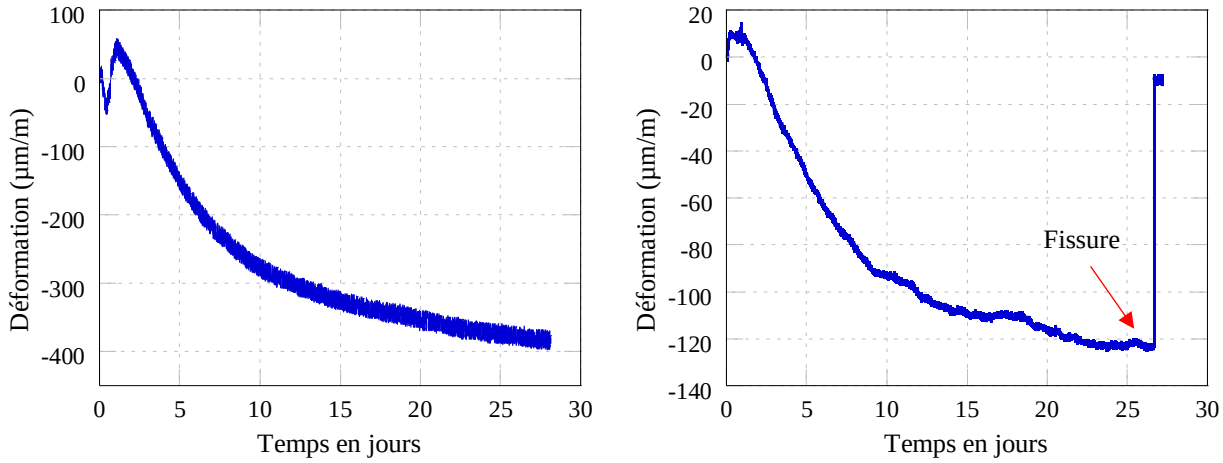
5.3.1 Évaluation de la performance du BHP

Dans cette section, les résultats de la 1ère condition d'essai sont présentés. L'évaluation du comportement d'une réparation en béton à hautes performances (BHP) permettra de mettre en avant le potentiel de la réparation de BFUP proposée pour confiner les expansions délétères de la RAG.

5.3.1.1 Déformations et degré de restreinte

Le retrait libre du BHP est mesuré sur un prisme de BHP adapté à l'anneau de retrait restreint (même surface/volume de séchage). La Figure 5.7 présente les courbes d'évolution du retrait libre et restreint mesurés sur le prisme adapté et sur l'anneau d'acier respectivement. Sur la courbe de retrait libre illustrée à la Figure 5.7a, une déformation positive est d'abord observée, signe d'un

gonflement. Ceci est dû à l'échauffement lors de la réaction d'hydratation. La déformation libre totale est de -400 µm/m à 28 jours. La Figure 5.7b présente, quant à elle, l'évolution de la déformation moyenne mesurée par les jauges de déformation installées à l'intérieur de l'anneau d'acier qui restreint le retrait de l'anneau de BHP. Cette déformation restreinte atteint -125 µm/m après 27 jours, ensuite une chute brusque des déformations est observée. Cette chute coïncide avec l'apparition, sur l'anneau de BHP, d'une macrofissure visible à l'œil nu (Figure 5.8). Ceci signifie que la restriction de la déformation par l'anneau d'acier a induit, dans le BHP, une contrainte supérieure à sa résistance à la traction. La déformation restreinte du BHP représente 31% de la déformation libre mesurée sur le prisme correspondant.



a) Courbes de retrait libre du BHP mesuré sur prisme adapté

b) Déformation de retrait restreint mesurée sur l'anneau de BHP

Figure 5.7 Déformations de retrait libre et restreint du BHP

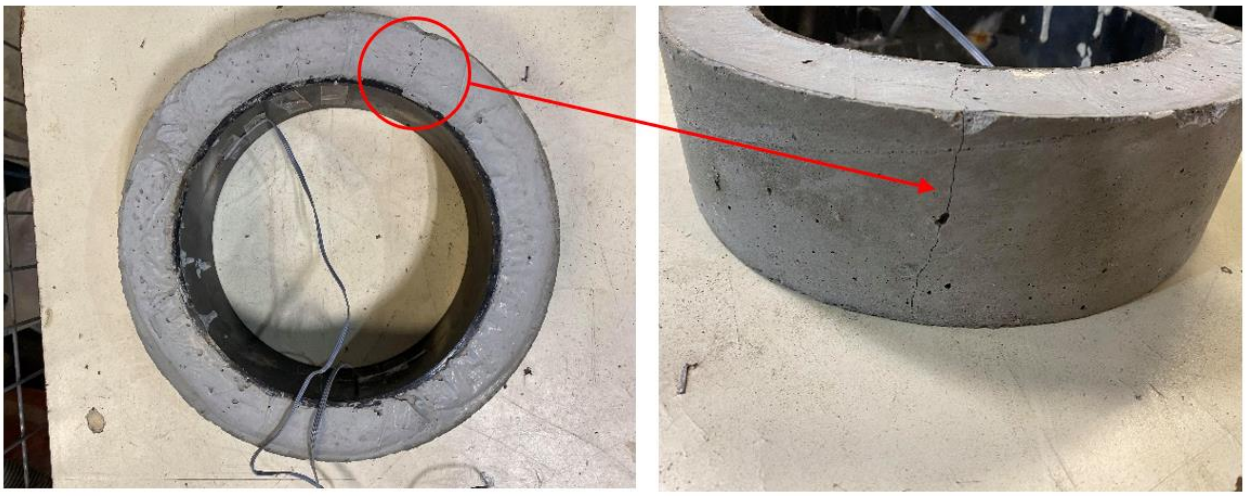


Figure 5.8 Fissuration de l'anneau de BHP sous effets de retrait restreint

La Figure 5.9 présente l'évolution du degré de restreinte que procure l'anneau d'acier mesuré avec l'équations 5 présentée à la Section 2.3. Le degré de restreinte est égal à 1 lorsque la rigidité de la réparation en BHP est faible. Il diminue par la suite lorsque la réparation gagne en rigidité pour atteindre 71% à 27 jours. Ce niveau de restreinte est classé élevé selon Denarié (2006) et il est représentatif de ce l'on peut retrouver sur une structure réelle.

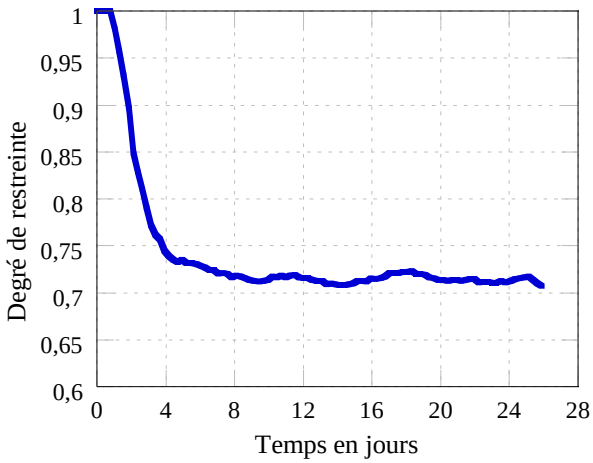


Figure 5.9 Degré de restreinte de l'anneau de BHP

5.3.1.2 Contrainte résiduelle réelle

L'évolution de la contrainte de traction résiduelle réelle déterminée à partir de la déformation restreinte relevée sur l'anneau d'acier est illustrée à Figure 5.10. Jusqu'au 27ème jour, la contrainte réelle présente une courbe continue et atteint une valeur maximale de 4.5 MPa. Ensuite, une baisse soudaine de contrainte est observée, signe de la localisation d'une macrofissure dans l'anneau de BHP pendant la durée de l'essai. Ceci s'explique par le fait que la contrainte développée dans l'anneau dépasse la résistance à la traction mesurée par essai de fendage à 28 jours et qui est de l'ordre de 4 MPa. La contrainte générée dans l'anneau de BHP à la rupture dépasse de 12% sa résistance à la traction. Ceci s'explique probablement par le fait que les deux mesures sont obtenues à partir de deux configurations d'essais différentes. De plus, durant l'essai de retrait restreint le comportement viscoélastique (fluage et relaxation) de la réparation en BHP est activé puisqu'elle est directement soumise à un chargement continu et constant jusqu'à la rupture. Cet essai permet de constater qu'une réparation en BHP a une forte probabilité de rupture en condition de retrait restreint. Dans ce contexte, elle sera donc incapable de confiner les expansions causées par la RAG sans un renforcement uniforme dans toute la réparation (armature). La contrainte théorique élastique illustrée sur la Figure 5.10 représente la contrainte qui aurait pu se développer dans l'anneau de BHP si la viscoélasticité n'avait pas été activée par le retrait restreint. Cette contrainte est plus élevée que la contrainte résiduelle réelle et elle dépasse la résistance à la traction à bas âge. Ceci montre que sans relaxation, la fissuration aurait été relevée beaucoup plus tôt, probablement 4 jours après le début de l'essai de retrait restreint.

Ces mesures de contrainte résiduelle et réelle permettent de tracer, sur la Figure 5.11, la courbe d'évolution du degré de relaxation dû à la viscoélasticité du BHP. À 28 jours, une relaxation des contraintes de l'ordre de 50% est observée.

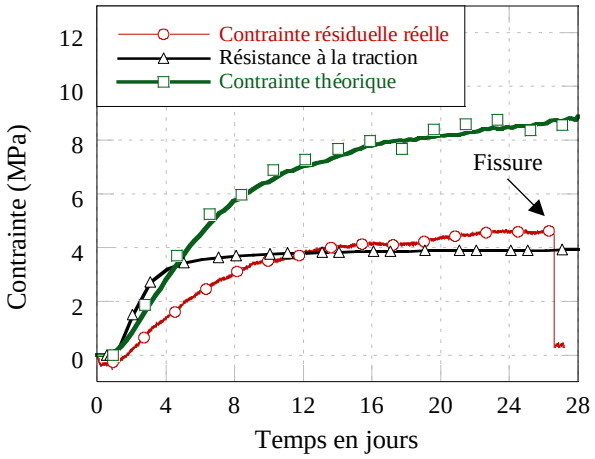


Figure 5.10 Contrainte résiduelle réelle générée dans l'anneau de BHP, contrainte élastique théorique et résistance à la traction mesurée

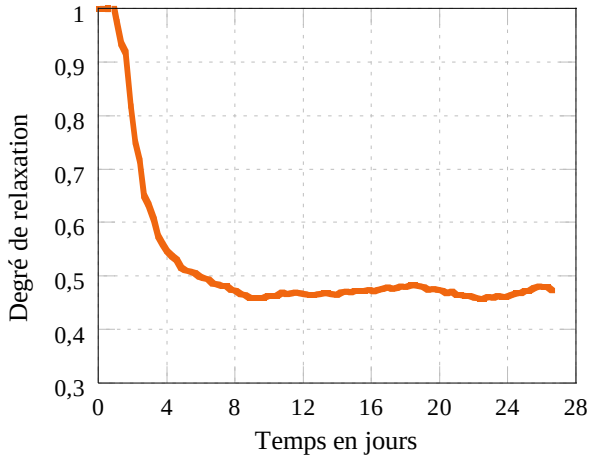


Figure 5.11 Degré de relaxation du BHP

5.3.2 Évaluation de l'influence du dosage en fibres dans le BFUP

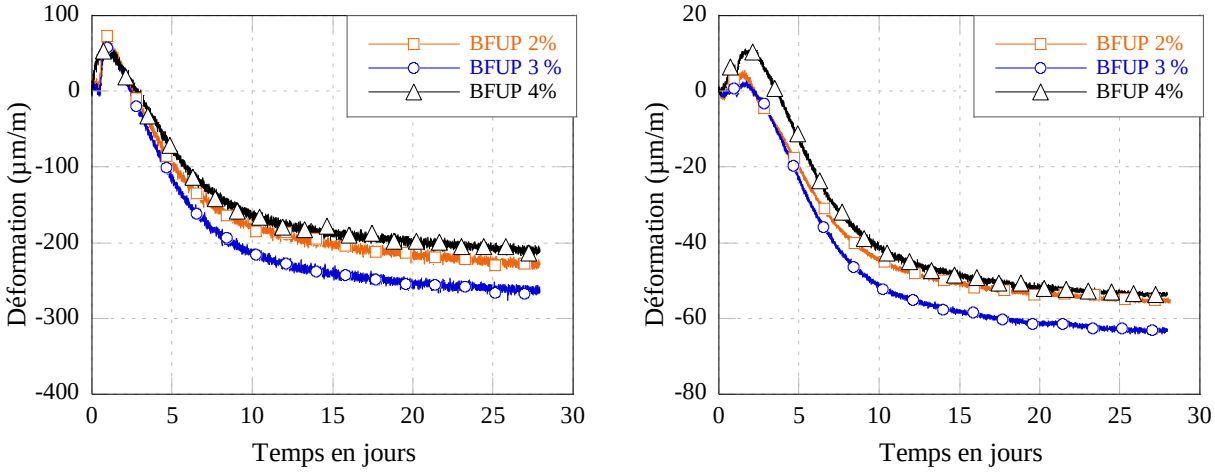
Pour étudier l'impact de la variation du dosage en fibres sur le retrait restreint ainsi que sur la marge de déformation disponible pour confiner la RAG, l'essai développé est mené sur différentes gammes de BFUP, soit les BFUP 2%, 3% et 4%.vol de fibres. Dans cette section les résultats des deux phases de l'essai sont présentés.

5.3.2.1 Résultats de l'essai de retrait restreint

Les mesures de retrait libre sont réalisées sur deux prismes pour chaque gamme de BFUP testée. Pour chaque condition testée, les deux courbes obtenues sont très similaires et la courbe moyenne est donc utilisée dans la suite des analyses. La Figure 5.12a présente les courbes moyennes du retrait libre pour chaque matériau. La courbe présente, au début, une déformation positive, signe de gonflement puis le retrait augmente pour atteindre une déformation totale de -230 µm/m, -270 µm/m et -215 µm/m pour les BFUP 2%, 3% et 4% respectivement. L'expansion observée est expliquée par le réchauffement de la réaction d'hydratation.

L'évolution du retrait restreint mesuré sur les anneaux de BFUP est, quant à elle, illustrée à la Figure 5.12B. Les courbes des différentes gammes de BFUP testées sont continues et ne présentent aucune chute brusque des déformations, signe qu'aucune fissure ne s'est développée dans le BFUP. Ceci signifie qu'une réparation en BFUP résiste bien à la condition de retrait restreint. La déformation moyenne atteinte par le BFUP 3% est de -65 µm/m. Elle représente 24% de la déformation libre mesurée sur le prisme correspondant. La déformation restreinte moyenne dans les anneaux de BFUP 2% est, quant à elle, comparable. Elle atteint -55 µm/m, soit 23.9% du retrait libre correspondant. De même, la déformation de retrait restreint du BFUP 4% est de -54 µm/m; elle représente 26% du retrait libre du même BFUP.

Il est possible de constater que les courbes ont globalement la même tendance. Cette similitude est attendue vu que les trois matériaux ont la même matrice. L'impact des fibres est limité sur ces BFUP notamment parce que le volume de pâte de chacun des mélanges est identique. L'ajout des fibres est fait en réduisant le sable du même volume, ainsi la portion du matériau générant le retrait (pâte de ciment) est identique. De plus, les anneaux de retrait restreint ont les mêmes caractéristiques géométriques, d'où le retrait restreint semblable obtenu pour les différentes gammes testées.



a) Courbes de retrait libre mesuré sur prismes adaptés

b) Déformation de retrait restreint

Figure 5.12 Déformations de retrait libre et restreint des BFUP testées

L'évolution du degré de restreinte que procurent les anneaux de BFUP testés est présentée sur la Figure 5.13. Tel qu'attendu, étant donné les mesures de retrait libre et restreint similaires, le BFUP 2% procure une restreinte de l'ordre de 77% comparé à 78% pour le BFUP 3% et 76% pour le BFUP 4%. Il est intéressant de constater que le BFUP, quel que soit le dosage en fibre, génère un niveau de restriction des déformations un peu plus important que pour le BHP (Section 5.3.1.1) Malgré cette restreinte élevée, les BFUP ne développent pas pour autant de macrofissures sous les effets d'entrave jusqu'à 28 jours.

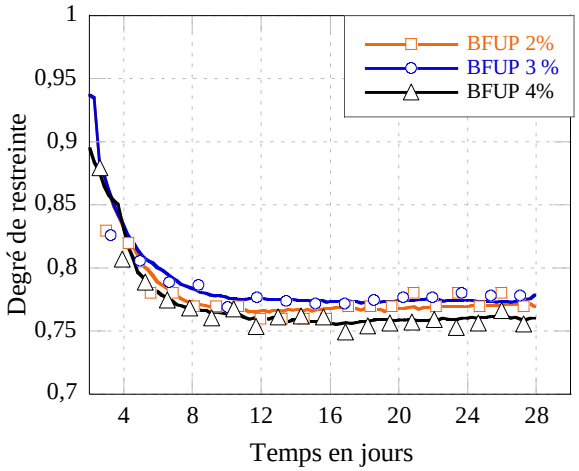


Figure 5.13 Degré de restreinte des gammes de BFUP testées

La Figure 5.14 présente une comparaison de la contrainte résiduelle réelle, la contrainte élastique théorique (négligeant l'effet de la viscoélasticité) et la résistance à la traction de toutes les gammes de BFUP testées en fonction du temps. Les contraintes élastiques théoriques calculées sont égales à 6.3 MPa, 6.7 MPa et 5.2 MPa pour le BFUP 2%, 3% et 4%.vol respectivement. En raison du comportement viscoélastique important du BFUP activé sous la condition de retrait restreint, les contraintes réelles induites dans les anneaux sont considérablement atténuées à 2.1 MPa, 2.5 MPa et 2 MPa respectivement. Les contraintes relâchées par la viscoélasticité sont donc supérieures aux contraintes résiduelles réelles générées dans le BFUP et représentent environ 67%, 63% et 61% des contraintes élastiques théoriques après 28 jours pour BFUP 2%, 3% et 4% respectivement.

Par ailleurs, pour toutes les gammes de BFUP testées, il est possible d'observer que les contraintes résiduelles réelles n'atteignent en aucun cas la résistance à la traction du BFUP correspondant, elles représentent moins de 17% à 20% de cette dernière. Ceci montre que les BFUP étudiés dans ce projet présentent un potentiel de fissuration extrêmement faible sous les effets du retrait restreint.

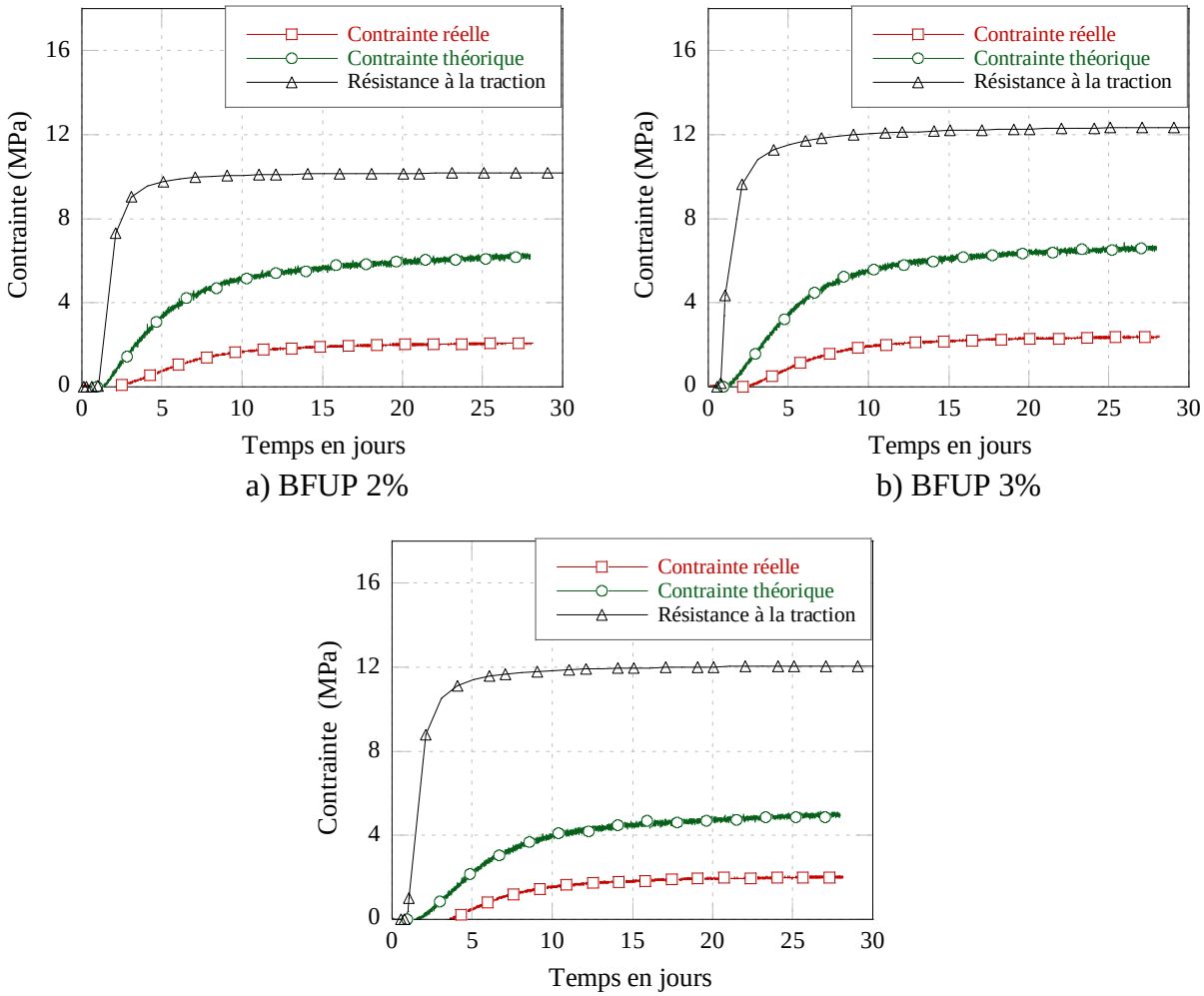


Figure 5.14 Contraintes réelles et élastiques ainsi que résistance à la traction calculées pour les gammes de BFUP testées

La Figure 5.15 illustre l'évolution du degré de relaxation de chaque matériau, calculée à partir du rapport entre la contrainte résiduelle réelle et la contrainte élastique théorique. Étant donné que les niveaux de contraintes développés dans les BFUP sont équivalents, les degrés de relaxation sont aussi comparables, soit 67%, 63% et 61% pour le BFUP 2%, 3% et 4% respectivement.

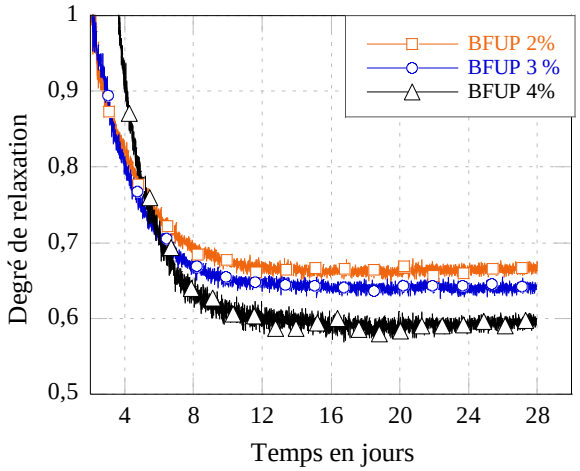


Figure 5.15 Degré de relaxation calculé pour différentes gammes de BFUP

À partir de la contrainte réelle résiduelle générée dans le BFUP et à l'aide des courbes pré-pic de la résistance à la traction directe à 28 jours (Annexe C) mesurée sur des spécimens du même BFUP, la déformation équivalente développée dans l'anneau de BFUP et consommée par le retrait restreint est déterminée (Section 3.1.1). Le Tableau 5.4 résume les résultats de l'essai de retrait restreint mené sur différentes gammes de BFUP. Il recense les contraintes de traction ortho-radiales induites ainsi que les déformations consommées par effets de retrait restreint. De manière globale, les niveaux de contraintes atteintes sous condition de retrait restreint sont faibles et semblables pour les différents BFUP testés, car leurs modules d'élasticité testés à 28 jours sont presque égaux. Les déformations consommées par le retrait restreint sont, par conséquent, faibles et ne dépassent pas 0.01%.

Tableau 5.4 Résumé des résultats de retrait restreint pour la variation du dosage en fibre dans le BFUP

Gamme de BFUP testée	Contrainte développée dans l'anneau de BFUP (MPa)	Déformation consommée par le retrait restreint (%)
BFUP 2%	2.1	0.0048
BFUP 3%	2.5	0.0058
BFUP 4%	2	0.0050

5.3.2.2 Résultats de l'essai d'expansion

L'évolution de la force verticale appliquée par la presse à 28 jours sur les anneaux en BFUP est tracée en fonction du temps écoulé depuis le début de l'essai sur la Figure 5.16. À l'aide des vidéos prises par les caméras installées à 120° autour des spécimens testés, la localisation d'une macrofissure est détectée pour chaque matériau. À partir de l'instant de fissuration déterminé sur les vidéos synchronisées avec le temps écoulé depuis le début de l'essai il est possible, sur la courbe illustrée sur la Figure 5.16, de déterminer la charge verticale qui correspond à l'instant de fissuration de chaque matériau. Un temps moyen de 960 s est obtenu pour les anneaux de BFUP 2%, correspondant à un niveau de charge de 596 kN. Les anneaux de BFUP 3% localisent plus tôt, soit après un temps moyen de 745 s du début de l'essai, pour un niveau de charge moins élevé de 415 kN. Finalement, le BFUP 4% localise après 715 s pour un niveau de charge similaire à celui qui provoque la fissuration de la réparation en BFUP 3%, soit 400 kN.

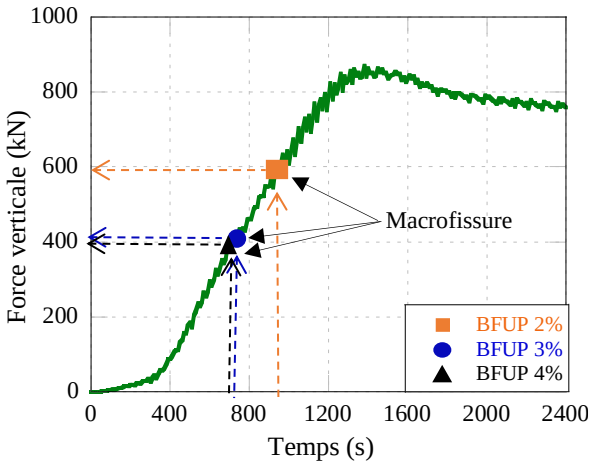


Figure 5.16 Instants moyens de macrofissuration des réparations en BFUP testées lors de l'essai d'expansion

La Figure 5.17 illustre les patrons de fissuration développés dans les anneaux testés. Les anneaux en BFUP 2% présentent plus de microfissures apparentes (Figure 5.17a) en comparaison au BFUP 3% (Figure 5.17b) et le BFUP 4% (Figure 5.17c). Les microfissures plus nombreuses qui apparaissent avant localisation d'une macrofissure pour le BFUP 2% pourraient être reliées à la

capacité de déformation supérieure de ce matériau ou au volume de fibres inférieur qui permet de mieux les observer.

a) BFUP 2%.vol

b) BFUP 3%.vol

c) BFUP 4%.vol

Figure 5.17 Patron de fissuration des différents anneaux en BFUP

Alors que la Figure 5.16 présente l'évolution de la charge verticale en fonction du temps, la Figure 5.18 présente l'évolution de la charge verticale appliquée en fonction de la déformation du rayon interne de l'anneau de BFUP. Le petit écart observé entre les déformations relevées sur les anneaux avec différentes gammes de BFUP est dû à des aspects de variabilité liés au placement du BFUP dans l'anneau ainsi qu'au placement du cœur expansif au début de l'essai d'expansion. De manière globale, l'évolution des déformations est très similaire pour toutes les gammes de BFUP et les courbes mesurées concordent.

À partir de la charge verticale correspondant à l'instant de fissuration de chaque matériau, déterminée sur la Figure 5.16, il est possible, sur la Figure 5.18, de déterminer la déformation dans le BFUP associée à chaque niveau de charge. Par exemple, le niveau de charge 596 kN ayant induit la macrofissuration dans l'anneau de BFUP 2% correspond à une déformation moyenne de 2827 µm/m pour les deux spécimens d'essai. De manière similaire, la mesure de charge de 415 kN ayant provoqué la macrofissuration dans le BFUP 3% est associé à une déformation moyenne moins élevée, de l'ordre de 1973 µm/m. Enfin, BFUP 4% localise une fissure pour une déformation mesurée de 1610 µm/m correspondant au niveau de charge de 400 kN.

Le BFUP 2% présente la marge de déformation la plus importante. Elle dépasse de 43% et 73% les déformation disponibles pour le BFUP 3% et 4% respectivement. Ceci est cohérent avec le comportement en traction directe des trois matériaux. En effet, le BFUP 2% procure la capacité de déformation la plus importante à 28 jours.

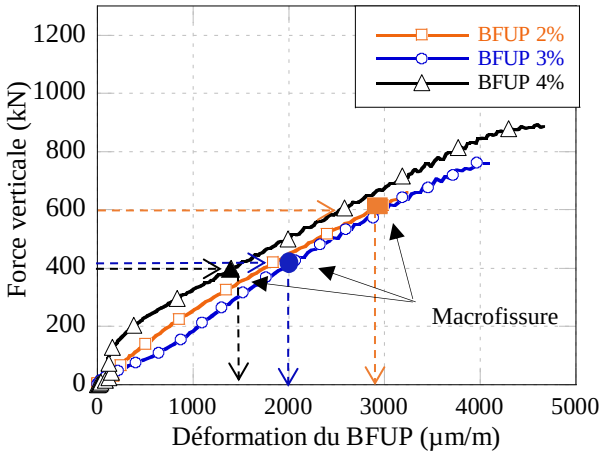


Figure 5.18 Évolution de la force en fonction de la déformation moyenne mesurée au rayon intérieur de l'anneau de BFUP

Le Tableau 5.5 résume les résultats de l'essai d'expansion appliqué aux différentes gammes de BFUP testées. La réparation en BFUP 2% procure une marge de déformation disponible pour confiner la RAG de 0.28%, même après avoir subi du retrait restreint pendant 28 jours. Les BFUP 3 et 4% procurent une marge de déformation inférieures de l'ordre de 0.2% et 0.16% respectivement. La marge de déformation disponible pour confiner la RAG est donc inversement proportionnelle au dosage en fibres dans la réparation. Ceci est cohérent avec la capacité de déformation supérieure, avec dosage en fibres inférieur. Comme le retrait restreint des BFUP est équivalent à tous les dosages en fibres, la marge de déformation disponible pour reprendre l'expansion de la RAG est donc supérieure à faible dosage en fibres. Cela ne signifie pas pour autant que le BFUP 3% et 4% soient moins intéressants, ils apportent de leur côté plus de confinement avec leur résistance à la traction supérieure.

Tableau 5.5 Récapitulatif des résultats de l'essai d'expansion (variation du dosage en fibres)

Gamme de BFUP	Charge verticale (kN)	Instant de fissuration (s)	Déformation disponible pour expansion de la RAG (%)
BFUP 2%	595	960	0.28
BFUP 3%	415	745	0.2
BFUP 4%	400	715	0.16

Le Tableau 5.6 résume les différentes déformations subies par les BFUP 2, 3 et 4% lors des essais réalisés. Il est possible de constater que l'addition de la déformation consommée par le retrait restreint et de la déformation d'expansion qui amène à la localisation d'une macrofissure est inférieure à la capacité de déformation maximale du même BFUP sein testé en traction directe à 28 jours. Ceci peut-être est dû au fait que les deux spécimens (anneau et spécimen de traction directe) ne sont pas testés avec la même configuration d'essai de traction, qu'il peut y avoir des effets de variabilité liés à l'orientation des fibres dans la réparation, ainsi qu'au fait que les effets

viscoélastiques lors de la phase de retrait restreint peuvent perturber/modifier légèrement la structure interne du béton (matrice et/ou ancrage des fibres).

Tableau 5.6 Bilan des résultats des essais de retrait restreint, d'expansion ainsi que l'essai de traction directe pour les gammes de BFUP testées

Gamme de BFUP	Déformation consommée par le retrait restreint (Phase 1) (%)	Déformation disponible pour confiner la RAG (Phase 2) (%)	Déformation totale (Phase 1 et 2) (%)	Capacité de déformation totale mesurée en traction directe (%)
BFUP 2%	0.0048	0.28	0.2841	0.3
BFUP 3%	0.0058	0.2	0.2058	0.25
BFUP 4%	0.0050	0.16	0.1650	0.2

5.3.3 Évaluation de l'influence des conditions aux limites des réparations en BFUP

Cette section s'intéresse à l'impact des conditions aux limites de la réparation en BFUP, notamment pour déterminer sa performance près des joints froids. Le BFUP 3% est utilisé pour toutes ces configurations avec joints et/ou armatures. Le BFUP 3% sans armature et sans joint est donc ici considéré comme la référence.

Introduction des armatures

Pour évaluer l'impact des armatures sur le comportement d'une réparation en BFUP 3% pour confiner la RAG, deux armatures de type HA de 5 mm de diamètre sont placées au milieu de la section de BFUP (Figure 5.19). Ainsi le pourcentage d'armature utilisé est de l'ordre de 1.2%. Pour assurer une continuité des contraintes dans ces armatures et éviter les longueurs de recouvrement qui encombreraient le spécimen et pourraient modifier les résultats, les armatures ont été soudées pour obtenir des armatures circulaires. La symétrie de l'essai est donc conservée.

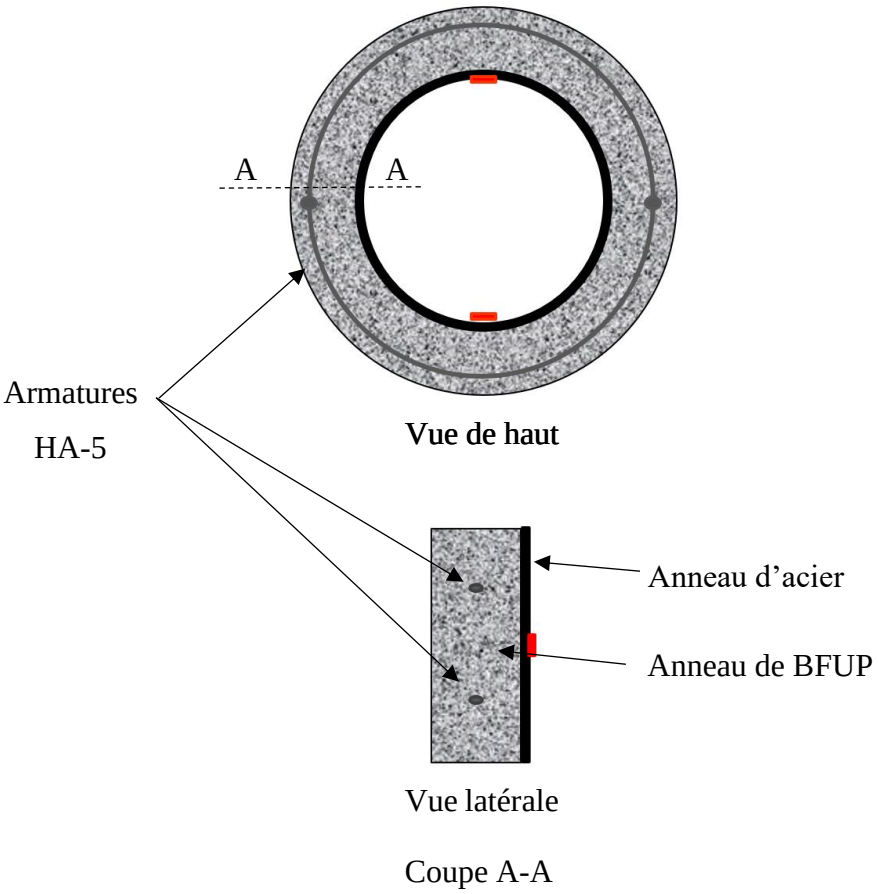


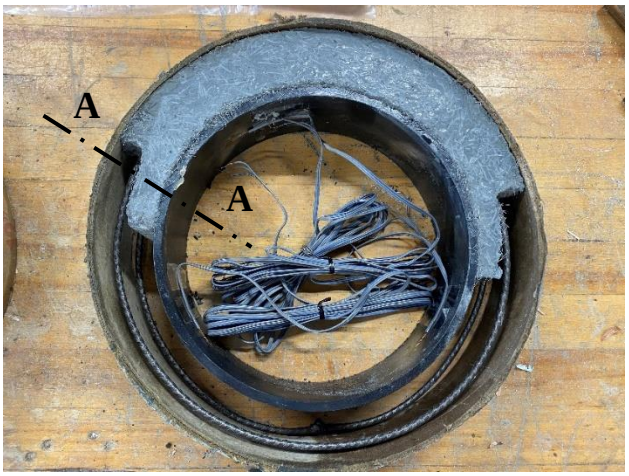
Figure 5.19 Anneau de BFUP avec armatures circulaires soudées

Pour mesurer le retrait libre de la réparation armée, les prismes de retrait adaptés sont aussi munis de deux armatures placées dans la section de BFUP (Figure 5.20).

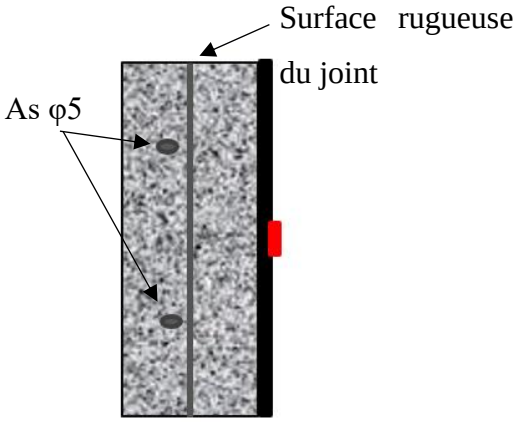
Figure 5.20 Prisme de retrait avec armatures

Introduction d'armatures et de joints froids

Afin d'étudier l'influence de la présence simultanée de joints froids et d'armatures dans la réparation proposée, les anneaux testés sont fabriqués en deux étapes. La première étape consiste à couler un demi-anneau (Figure 5.21), puis trois jours plus tard le deuxième demi-anneau. Ainsi deux joints froids sont créés. La forme des joints a été optimisée pour maximiser leur performance mécanique et leur étanchéité. La forme augmente beaucoup la surface de contact par rapport à un joint droit. De plus, elle rend la pénétration de l'eau plus complexe et longue, maximisant ainsi le potentiel de cicatrisation du joint dans le cas d'une ouverture en service. Par ailleurs, afin d'obtenir une surface rugueuse (Figure 5.22), la surface des joints est traitée par l'application d'un retardateur de prise sur la surface de contact (Type F commercialisé par Euclid). Ensuite, un décapage du produit désactivant est assuré par l'application d'un jet d'eau sous pression après démoulage.



a) Vue de dessus



b) Vue schématique de la coupe A-A

Figure 5.21 Anneau avec joints et armatures

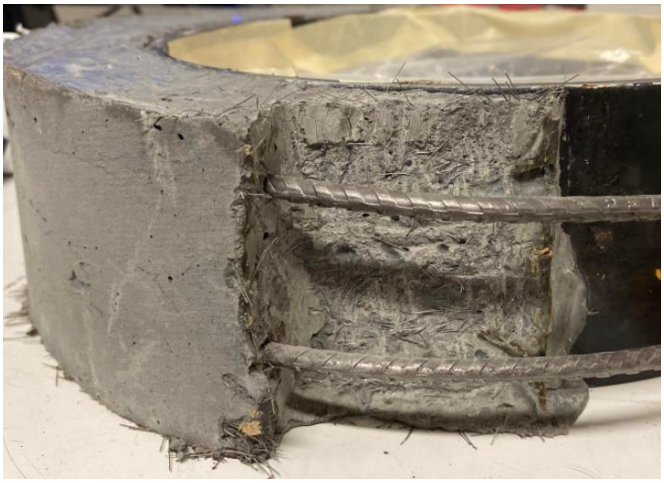


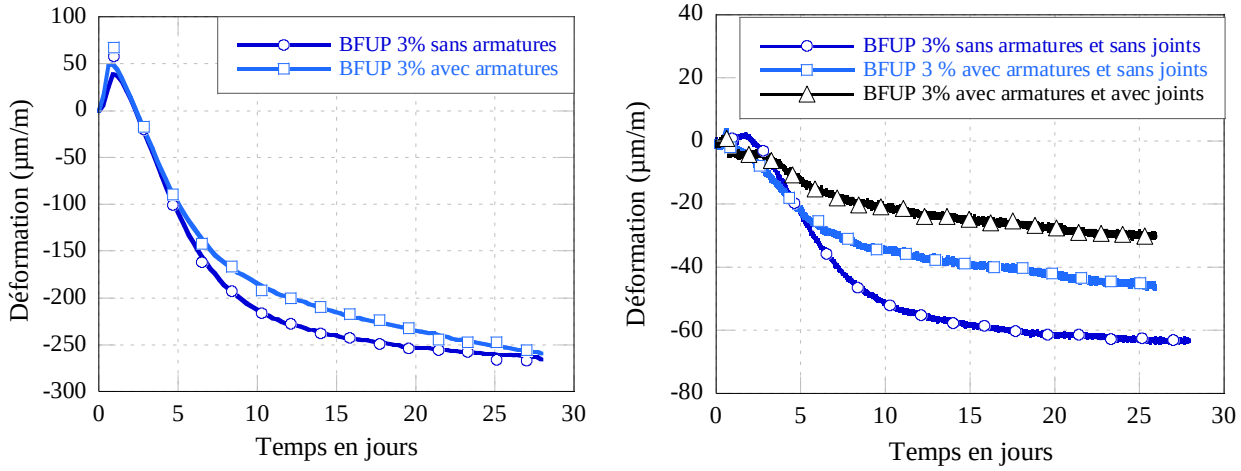
Figure 5.22 Surface de joint traitée

5.3.3.1 Résultats de l'essai de retrait restreint

La Figure 5.23a présente les courbes de l'évolution du retrait libre et restreint mesurés sur les spécimens en BFUP 3% avec et sans armature. Le gonflement observé au cours des premières 24h est dû à l'échauffement causé par la réaction d'hydratation. Les courbes montrent que l'introduction des armatures ne modifient pas significativement le retrait libre mesuré sur prismes. Les deux courbes se superposent et la déformation atteinte à 28 jours est de -260 µm/m. Ce résultat peut paraître surprenant; cependant, le pourcentage d'armature est assez faible (1.2%) et même inférieur au renforcement en fibres déjà présent dans le BFUP 3%.

La Figure 5.23b présente, quant à elle, l'évolution de la déformation moyenne du retrait restreint mesuré sur les anneaux de BFUP 3% pour 3 conditions : sans armature et sans joint, avec armatures et sans joint et avec armatures et joints respectivement. Alors que la déformation restreinte sur l'anneau sans armature et sans joint atteint -65 µm/m à jours (20% du retrait libre), le retrait restreint moyen de l'anneau avec armatures et sans joint est de l'ordre de -45 µm/m (14% du retrait libre). Ceci peut être expliqué par le fait que, cette fois, la présence d'armatures dans l'anneau augmente le niveau d'entrave. En comparaison au prisme de retrait libre, l'anneau amplifie l'effet d'entrave de l'armature car celle-ci est continue (soudée). Par ailleurs, tel que discuté à la Section 2.3.1.3, le degré de restreinte dans une réparation armée est directement lié au taux d'armature. Il augmente pour un taux d'armatures plus important. Pour les anneaux de BFUP avec armatures et avec joints,

la déformation est plus petite que celle des anneaux avec armatures et sans joint. Cette fois, la diminution n'est pas liée au degré de restreinte dans l'anneau, mais plutôt au relâchement qui peut survenir au niveau des joints. Ces zones de discontinuité présentent des points de faiblesse dans lesquels la déformation est moins restreinte. La déformation moyenne observée dans ce cas est de -31 µm/m. Il est intéressant de constater, pour ce cas particulier de réparation avec joints, que malgré la présence de zones de faiblesse, la courbe de déformation reste continue et ne présente pas de chutes brusques. Ceci démontre qu'aucune macrofissure n'est survenu dans les joints de l'anneau pendant la durée de l'essai restreint. La qualité d'adhérence du BFUP sur la surface des joints est donc excellente.



a) Courbes brutes du retrait libre

b) Déformation de retrait restreint

Figure 5.23 Déformation du retrait libre et restreint des configurations testées

Les mesures de retrait libre et restreint permettent, à l'aide des équation théoriques présentés à la Section 2.3.1.3, de déterminer l'évolution du degré de restreinte dans les anneaux de BFUP 3% sans armature et sans joint et dans ceux avec armatures et sans joint. La Figure 5.24 montre, tel qu'attendu, que l'anneau armé sans joint procure une restreinte plus importante de l'ordre de 83% comparée à 78% pour l'anneau non armé. Ceci est expliqué par le fait que l'introduction d'armatures dans une réparation augmente le niveau d'entrave des déformations. En se référant à l'Équation 6 présentée à la Section 2.3.2, il est aussi possible de démontrer que l'introduction d'armature dans une réparation diminue son module d'élasticité effectif en réduisant son fluage.

Pour l'anneau avec armatures et joints, le degré de restreinte n'a pas été calculé car il sera non significatif étant donné qu'aucun prisme adapté à cette configuration (prisme avec armatures et joints) n'a été testé en retrait libre.

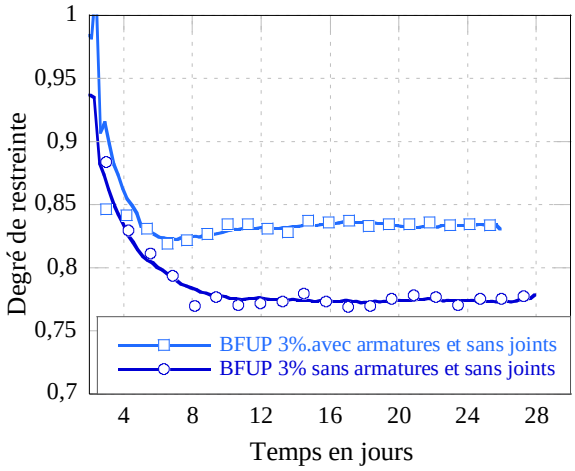


Figure 5.24 Degré de restreinte des deux configurations testées avec et sans armatures

5.3.3.2 Résultats de l'essai d'expansion

Étant donné qu'aucune macrofissure n'a été observée sur les anneaux de retrait restreint en présence d'armature et /ou de joint, l'essai d'expansion est réalisé sur tous les spécimens sans exception. La marge de déformation disponible pour chaque configuration peut donc être déterminée.

La synchronisation entre la cinétique d'évolution de la force verticale appliquée par la presse et les vidéos prises lors de l'essai permet de tracer la Figure 5.25. La localisation d'une macrofissure est détectée pour un temps moyen de 745 s pour les anneaux sans armatures et sans joints correspondant à un niveau de charge de 415 kN. Les anneaux avec armatures et sans joint localisent plus tard, soit après 905 s du début de l'essai, pour un niveau de charge plus élevé de 556 kN. Ceci montre que la présence d'armatures prolonge la marge de déformation disponible pour confiner la RAG. L'effet synergique du renforcement des fibres et de l'armature est ainsi obtenu. Par contre, pour les anneaux avec armatures et avec joints, la localisation survient beaucoup plus tôt pour un temps moyen de 385 s et un niveau de charge significativement plus bas de l'ordre de 85 kN. Ceci

suggère que cette configuration développe une capacité de déformation plus petite. Il est à noter que le niveau de charge n'est pas significatif vu que cette force correspond à la charge appliquée sur le cœur expansif; elle n'est pas directement liée à la déformation générée dans les anneaux testés.

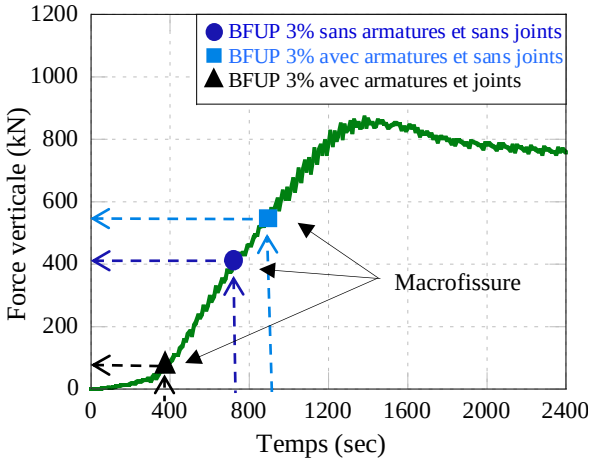


Figure 5.25 Instants moyens de macrofissuration des conditions testées

La Figure 5.26 présente l'évolution de la charge verticale appliquée en fonction de la déformation mesurée au rayon interne de l'anneau de BFUP. Toutes les courbes concordent, signe d'une distribution uniforme et similaire des contraintes de traction ortho-radiale dans tous les spécimens testés peu importe les conditions.

Le niveau de charge de 415 kN correspondent à une déformation moyenne dans l'anneau de BFUP sans armature et sans joint de 1973 µm/m. Les anneaux armés et sans joints développent quant à eux une déformation moyenne plus élevée de l'ordre de 2564 µm/m. Le renforcement de la réparation étudiée avec des armatures (1.2%) augmente significativement la capacité de déformation de la réparation. Elle permet de confiner des expansions de la RAG allant jusqu'à 0.26% sans développer de macrofissure. De plus, la fissuration dans cette configuration se développe différemment que pour un anneau non renforcé dont la fissuration de développe simultanément depuis les rayons intérieur et l'extérieur de l'anneau (Voir Figure 4.11). La fissuration de l'anneau avec armature s'initie au niveau du rayon externe de l'anneau de BFUP (Figure 5.27a), puis traverse progressivement l'épaisseur de la réparation jusqu'à atteindre le rayon intérieur pour une charge supérieure (Figure 5.27b). Ceci est logique, puisque l'armature est située

plus près du rayon intérieur de l'anneau que du rayon extérieur (Figure 5.21). La déformation maximale atteinte lorsque la fissure traverse complètement l'épaisseur du BFUP est de l'ordre de 0.40%. Ceci prouve que les armatures offrent une marge de déformation plus importante en condition fissurée en améliorant significativement le contrôle de l'ouverture de fissure.

En revanche, pour les anneaux armés incorporant des joints et des armatures, la fissure s'initie au niveau du joint, zone de faiblesse de cette configuration, pour 200 µm/m (correspondant au niveau de charge 85 kN). Cette marge de déformation est faible. À nouveau avec la présence de l'armature près du rayon intérieur de l'anneau, la macrofissure s'initie au niveau du joint, mais ne suit pas son profil en escalier. Elle traverse plutôt l'épaisseur de la réparation progressivement, tel que présenté sur la Figure 5.28, et se propage dans le BFUP adjacent et atteint le rayon intérieur pour un niveau de déformation nettement supérieur à celui requis pour l'initiation de la fissuration (Figure 5.29). À la lumière des essais réalisés sur BFUP 3%, la marge de déformation probable permettant de fissurer de manère traversante le BFUP est de l'ordre de 0.20%. Ainsi, pour les anneaux avec armatures et joints, une marge de déformation probable disponible pour confiner la RAG et obtenir une fissuration traversante est supérieure ou égale à 0.20%. Bien qu'elle présente une amorce de fissuration faible (0.02%), cette configuration de réparation avec armatures et joints permet de confiner, en condition fissurée, des expansions de la RAG allant jusqu'à 0.20%.

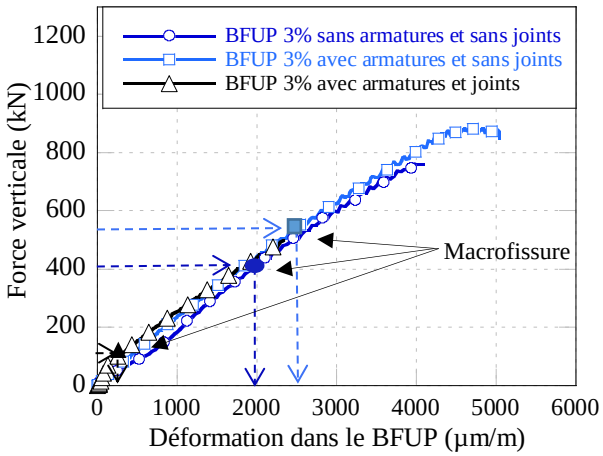
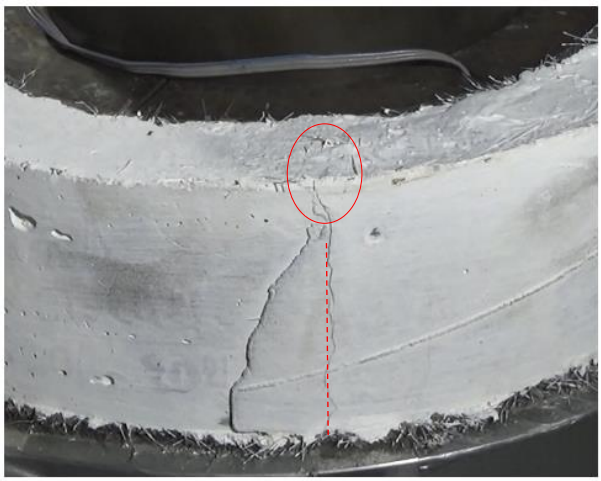


Figure 5.26 Évolution de la charge verticale de la presse en fonction de la déformation

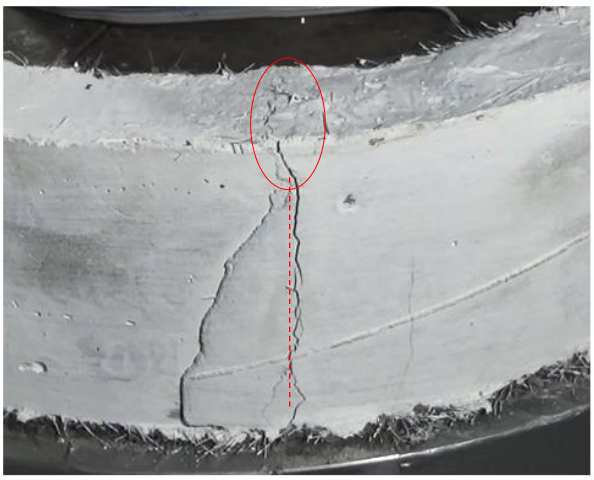
a) Développement de la macrofissure au rayon extérieur de l'anneau de BFUP

b) Macrofissure traversante

Figure 5.27 Développement de la macrofissure dans l'anneau de BFUP 3% armé sans joint



a) Amorce de fissure au niveau du joint



b) Macrofissure traversante

Figure 5.28 Développement de la macrofissure dans l'anneau de BFUP 3% avec armatures et joints

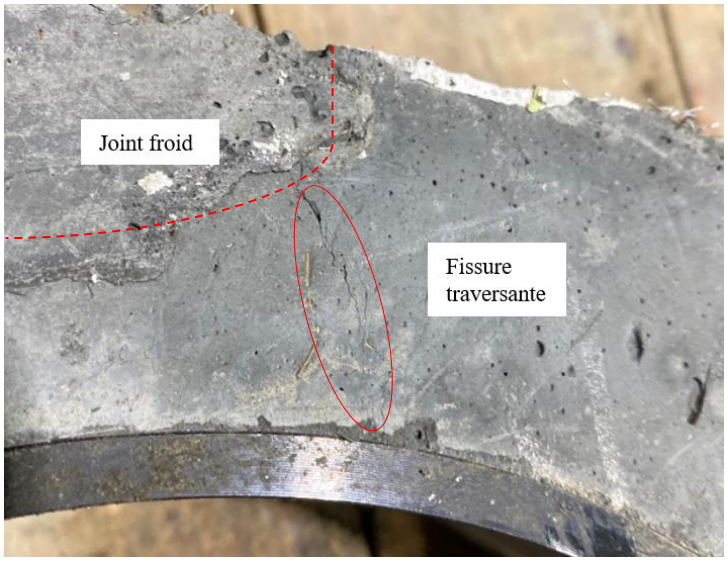


Figure 5.29 Fissure traversante se propage dans le BFUP

Le Tableau 5.7 résume les résultats de l'essai d'expansion appliqué aux différentes configurations testées. Pour un anneau sans armature et sans joint, la marge de déformation disponible pour confiner la RAG est de 0.20%. L'anneau avec armatures et sans joint procure quant à lui une marge de 0.26%, soit donc une augmentation de 30% de la capacité de la même réparation non armée sans développer de macrofissure. En condition fissurée, cette configuration présente une marge encore plus grande de l'ordre de 0.40% correspondant à la déformation atteinte lorsque la fissure traverse toute l'épaisseur de la réparation. Finalement, en présence de joints, la réparation armée présente des zones de faiblesse au niveau des points de reprise la déformation qui amorce la fissuration est de 0.02%. Toutefois, la marge de déformation probable disponible pour confiner la RAG est approximativement de l'ordre de 0.20% tel que discuté au paragraphe précédent.

Tableau 5.7 Résumé des résultats de l'essai d'expansion pour différentes conditions aux limites

Configuration testée	Charge verticale (kN)	Instant de fissuration (s) Initiale/Traversante	Capacité de déformation disponible pour expansion de la RAG (%) Initiation / traversante
BFUP 3% sans armatures et sans joints	415	745	0.20% / 0.20%
BFUP 3% avec armatures et sans joints	556	905	0.26% / 0.40%
BFUP 3% avec armatures et joints	85	385	0.02% / 0.20%

Enfin, le Tableau 5.8 résume les déformations subies pour les différentes conditions d'essai ici testées. Telle qu'indiqué à la Section 5.3.2, l'addition de la déformation consommée par le retrait restreint et de la déformation d'expansion qui amène à l'initiation de la localisation d'une macrofissure est, pour le BFUP 3% sans armature et sans joint, inférieure à la capacité de déformation maximale du même BFUP sein testé en traction directe à 28 jours. Cependant, la présence d'armatures dans la réparation compense cette perte de déformation et procure une marge de déformation comparable à la capacité du même BFUP testé en traction à 28 jours, soit 0.27%. Finalement, l'anneau de BFUP 3% avec joints et armatures développe une déformation totale 50 fois moins importante que la capacité déformationnelle du même BFUP testé en traction directe à 28 jours. Son comportement reste cependant supérieur à celui du BHP pour lequel la fissuration a eu lieu durant l'essai de retrait restreint, ne lui laissant plus de potentiel d'expansion en condition non-fissurée par la suite.

Tableau 5.8 Bilan des résultats des essais de retrait restreint, d'expansion ainsi que l'essai de traction directe pour les configurations de BFUP 3% testées

Configuration testée	Déformation consommée par le retrait restreint (Phase 1) (%)	Déformation disponible pour confiner la RAG sans macrofissures (Phase 2) (%)	Déformation totale (Phase 1 et 2) (%)	Capacité de déformation totale mesurée en traction directe (%)
BFUP 3% sans armatures et sans joints	0.0058	0.2	0.2058	0.25
BFUP 3% avec armatures et sans joints	0.0045	0.26	0.2645	-
BFUP 3% avec armatures et joints	0.0031	0.002	0.0051	-

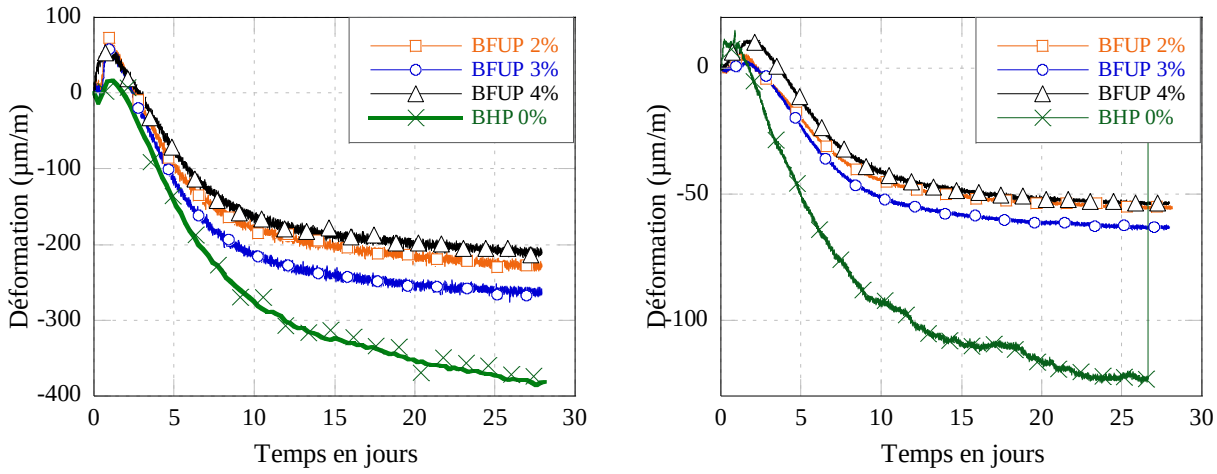
5.3.4 Signification pratique des résultats

Cette section se veut une discussion des résultats présentés aux Sections 5.3.1 à 5.3.3. Elle couvre une analyse comparative qui permettra de comparer la performance d'une configuration de réparation par rapport à une autre afin de pouvoir émettre certaines conclusions et recommandations pour des applications structurales réelles.

La Figure 5.30 regroupe les courbes de retraits libre et restreint des différents BFUP testés ainsi que du BHP. Alors que le retrait libre des différents BFUP est assez similaire quel que soit leur pourcentage de fibres (cf. Section 5.3.2), le retrait libre du BHP est plus important. Plusieurs facteurs expliquent ce résultat. Tout d'abord, étant donné que les spécimens n'étaient pas scellés lors des essais sur anneaux, le retrait ici présenté est un retrait total qui comprend le retrait endogène ainsi que le retrait de séchage. Dû à sa grande quantité de pâte cimentaire, il est attendu que le

BFUP présente un retrait endogène plus important que le BHP. Cependant, le retrait de séchage du BFUP est minime et bien moins important que le retrait de séchage du BHP. À cela s'ajoute le fait qu'un agent réducteur de retrait est utilisé dans le BFUP étudié, ce qui réduit d'autant plus son retrait total. La combinaison de ces facteurs (contribution du retrait endogène versus de séchage et utilisation du réducteur de retrait dans le BFUP) a ici induit un retrait plus important pour le BHP.

Le retrait libre total étant plus important pour le BHP, il est logique que sa déformation de retrait restreint le soit également (Figure 5.30b). Lors de l'essai de retrait restreint, le BHP fissure au 27ème jour (chute soudaine des déformations à la Figure 5.30b, alors qu'aucune macrofissure ne se développe dans les BFUP (courbes continues) durant la période d'essai, permettant ainsi d'assurer l'étanchéité de la réparation malgré la restriction de leur retrait par le substrat (l'ancien béton).



a) Courbes brutes de retrait libre

b) Déformation de retrait restreint des différents bétons testés

Figure 5.30 Déformation de retrait libre et restreint des béton testés

Étant donné la déformation plus importante induite dans l'anneau de BHP, la contrainte de traction ortho-radiale développée est environ 2 fois plus importante que dans les anneaux de BFUP tel qu'illustré sur la Figure 5.31, ce qui indique également que la déformation consommée par le retrait restreint plus importante pour le BHP. Considérant en plus que la résistance en traction du BHP est bien plus faible que celle des BFUP (4 MPa pour le BHP versus 10 à 13 MPa pour les BFUP), il est logique que l'anneau de BHP ait fissuré durant l'essai de retrait restreint.

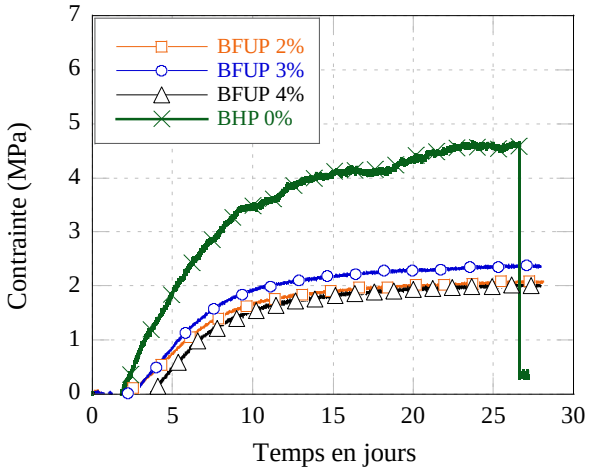
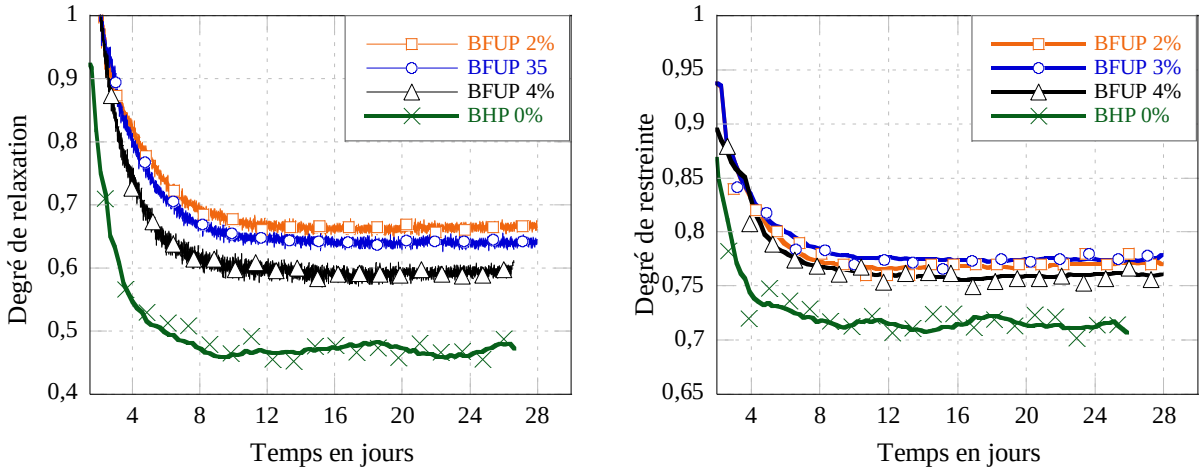


Figure 5.31 Contraintes résiduelles réelles induite dans les anneaux testés

Malgré la géométrie identique des anneaux testés et les modules d'élasticité assez similaires des BFUP et BHP testés, le degré de restreinte est moins important pour le BHP que pour les BFUP tel qu'illustré sur la Figure 5.32b. Ceci est expliqué par un module d'élasticité effectif *E'* plus important du BHP. En effet, les phénomènes viscoélastiques de fluage et de relaxation sont moins importants dans le BHP que dans le BFUP, ce qui résulte en un degré de relaxation moins important à la Figure 5.32a. Le module effectif étant inversement proportionnel au fluage (Section 2.3.1.3), il est donc plus important pour le BHP que pour le BFUP.



a) Degré de relaxation b) Degré de restreinte

Figure 5.32 Degrés de relaxation et de restreinte des bétons testés

En résumé, dans les conditions de cette étude, le BFUP étudié présente un retrait modéré comparé à un BHP. Cela est un réel atout car une réparation en BFUP consommerait moins de sa capacité de déformation sous condition d'entrave comparée au BHP, ou à un autre béton conventionnel. La différence de retrait entre le BFUP et le BHP étudiés pourrait cependant être réduite en présence d'une cure humide au jeune âge du béton. Quoiqu'il en soit, même en réduisant cette différence de retrait, le BHP est bien plus propice à fissurer sous condition d'entrave que le BFUP qui présente une résistance à la traction plus élevée, donc plus difficilement atteignable sous condition d'entrave, ainsi qu'un excellent comportement viscoélastique (fluage et relaxation) comparé à un BHP. Ces propriétés viscoélastiques contribuent à diminuer la contrainte de traction générée dans la réparation et donc à augmenter la marge de déformation disponible pour contenir ensuite les expansions de la RAG.

Par ailleurs, cette étude a montré que la variation du dosage en fibres n'impacte pas de manière significative le comportement du BFUP sous condition de retrait restreint. Par contre, lors de l'essai d'expansion, il a été démontré que la marge de déformation disponible pour la RAG est inversement proportionnelle au dosage en fibres dans la réparation. La marge maximale, de l'ordre de 0.28%, est donc obtenue pour une réparation en BFUP 2%. Quel que soit le pourcentage de fibres dans le BFUP, il a été démontré que la déformation totale (déformation consommée par le retrait restreint additionnée à la déformation disponible pour l'expansion de la RAG) est légèrement inférieure (5 à 20%) à la capacité de déformation maximale atteinte à 28 jours par le même BFUP sain testé en traction directe Ceci pourrait s'expliquer par la différence de configuration et d'orientation des fibres et/ou un léger impact des effets viscoélastiques.

L'étude d'une réparation en BFUP 3% armée a montré, quant à elle, que l'ajout d'armature augmente le degré de restreinte dans la réparation. Ce résultat n'est pas surprenant, car le degré de restreinte dans une structure est proportionnel au pourcentage d'armature incorporé. Malgré un degré de restreinte plus élevé dans la réparation armée, celle-ci procure une déformation disponible plus importante comparée à la même réparation sans armature. La marge de déformation disponible pour la RAG est donc plus grande dans une réparation armée. Un renforcement avec 1.2 % d'armature dans cette étude a augmenté la marge de déformation de 30% en comparaison avec la même réparation non armée. L'ajout d'armature dans la réparation en BFUP est donc très

avantageux. De plus, le contrôle de fissuration en présence d'armature prolonge cette marge jusqu'à 0.40% en condition fissurée. Étant donné la bonne reprise mécanique et l'étanchéité élevée des BFUP en condition fissurée, cette marge de 0.40% reste significative et offre un bon confinement malgré l'ouverture de fissure.

En revanche, pour la même réparation armée en BFUP 3% comprenant 2 joints froids, la macrofissure s'est initiée au niveau des joints au rayon extérieur de l'anneau pour 0.02% de déformation. Bien que cette marge soit faible, elle reste significative comparée à la performance de la même réparation en BHP non armé sans joint qui n'a pas résisté à la fissuration sous l'effet de son retrait restreint. De plus, malgré les zones de faiblesse que représentent les joints, ces derniers ne se sont pas ouverts durant toute la durée de l'essai de retrait restreint, la fissuration se développant plutôt à travers le BFUP adjacent. L'analyse des résultats suggère aussi qu'une marge de déformation disponible pour la RAG avant la création d'une fissuration traversante serait de l'ordre de 0.20% pour cette configuration. Par ailleurs, il faut aussi rester conscient que les joints restent très ponctuels sur la longueur d'une réparation structurale réelle et ne nuiront pas, à eux seuls, à l'étanchéité globale de la réparation (perméabilité très faible même en condition fissurée) si le BFUP de la réparation reste, lui, non macrofissuré. De plus, la capacité d'auto-cicatrisation du BFUP, surtout en présence d'eau, sera un atout supplémentaire par rapport à un béton conventionnel pour refermer partiellement les ouvertures de fissures potentielles et ainsi réduire d'autant plus la perméabilité de la réparation.

Afin de démontrer hors de tout doute le potentiel d'utilisation du BFUP pour confiner la RAG, Il importe de rappeler que la RAG est une réaction assez lente qui prend des années pour s'initier et évoluer (Section 2.1.3.1). En effet, les expansions uni-axiales relevées sur des structures atteintes par la RAG au Québec varient de 0.02% à 0.08% après 35 ans et leur expansion résiduelle est estimée de 0.01% à 0.02% (Smaoui, 2003). Bien que ce niveau d'expansion soit très élevé, la marge de déformation résiduelle après retrait restreint, que procure le BFUP, est nettement suffisante pour éviter la localisation de fissure dans la réparation. Un chemisage en BFUP pouvant confiner des expansions allant jusqu'à 0.28% devrait donc être capable de contenir les expansions de la RAG à court et long terme sans développer de macrofissures. De plus, l'intervention de réparation est appliquée sur une structure dont une portion des expansions délétères est déjà survenue. De part sa faible perméabilité à l'eau, paramètre indispensable à la progression de la RAG, la réparation en BFUP ralentira fort probablement la réaction et limitera ses expansions résiduelles. La réparation

en BFUP proposée permettra de confiner la RAG en offrant un scellement étanche qui prolongera la durabilité de la structure réparée en service.

Finalement, compte tenu des résultats obtenus dans ce projet, quelques recommandations peuvent être énoncées pour confiner l'expansion de structures atteintes par la RAG :

- Pour une réparation dont l'aspect scellement (étanchéité) prime sur le confinement (renforcement), il est recommandé d'utiliser le BFUP 2%.
- Pour une réparation dont l'aspect confinement (confinement) prime sur le scellement (renforcement), il est suggéré d'utiliser le BFUP 3% avec armatures.
- Pour les joints froids des réparations, il est recommandé d'augmenter la surface de contact, éviter les joints droits et d'utiliser des armatures de liaison à travers les joints afin de maximiser l'adhérence et l'étanchéité.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Ce chapitre se veut une rétrospective sur les objectifs principaux du projet ainsi que les conclusions tirées à partir des différentes conditions testées dans le programme expérimental principal mené dans le cadre de ce projet.

6.1 Rappel des objectifs

L'objectif principal du projet était d'évaluer le potentiel d'une réparation en BFUP à confiner les expansions causées par la réaction alcalis-granulats (RAG). Les objectifs spécifiques ont été définis pour atteindre l'objectif principal :

1. Développer et valider un dispositif d'essai capable de reproduire les effets du retrait restreint du BFUP de la réparation par le substrat (ancien béton), ainsi que l'expansion qui s'appliquera sur cette réparation si le gonflement de la structure dû à la RAG se poursuit dans le temps ;
2. Caractériser le comportement au jeune âge du BFUP dû au retrait restreint pour déterminer sa mise en charge initiale et sa déformation initiale ;
3. Caractériser le comportement à long terme du BFUP lorsque soumis à une expansion causée par la RAG pour déterminer sa capacité de déformation résiduelle ;
4. Évaluer la performance de différentes configurations de réparation en BFUP (pourcentage de fibres dans le BFUP, présence de joint froid, présence d'armature) pour contrôler les expansions causées par la RAG en assurant un certain niveau d'étanchéité de la structure. L'évaluation de ces différentes configurations permettra de faire un choix éclairé des paramètres de conception d'une réparation en BFUP.

6.2 Conclusions

6.2.1 Dispositif d'essai développé

Le dispositif d'essai développé dans ce projet de recherche est inspiré de l'essai de retrait restreint sur anneau (ASTM-C1581, 2004) et du montage de cœur expansif de Argouges et al. (2010). Ce

dispositif, composé d'un anneau central en acier et d'un anneau de béton autour de l'anneau d'acier, a permis de reproduire une restriction de catégorie élevée du retrait du béton et représentative de celle observée dans les structures, ce qui a permis d'activer le comportement viscoélastique des réparations testées. Dans un second temps, ce même dispositif a permis d'induire une expansion mécanique représentative de l'expansion de la RAG. Le retrait restreint ainsi que la déformation appliquée lors de l'essai d'expansion ont été mesurés grâce à des jauges de déformation collées sur le rayon intérieur de l'anneau d'acier. Ces données ont ensuite permis de déterminer la marge de déformation disponible pour contenir l'expansion due à la RAG suite aux effets du retrait restreint. Enfin, le dispositif donne des résultats reproductibles d'un spécimen à l'autres d'une même condition.

6.2.2 Résultats du programme expérimental principal

Le programme expérimental principal de ce projet a permis d'évaluer la performance de plusieurs configurations de réparations. Les résultats ont démontré qu'une réparation en BHP peut fissurer sous l'effet de son propre retrait restreint. Avec les conditions d'essai de ce projet (gamme de béton, cure, épaisseur, degré de restreinte, etc.), une fissure localisée s'est développée dans l'anneau en BHP au 27ème jour de l'essai de retrait restreint, donc avant même l'application d'un gonflement représentatif de la RAG. Une telle réparation en BHP pourrait donc difficilement confiner la RAG sans présence de renforcement étant donné sa faible résistance mécanique et sa capacité de déformation limitée.

En revanche, une réparation en BFUP se comporte bien sous l'effet de son retrait restreint. En effet, en comparaison à l'anneau en BHP, une contrainte de traction plus faible s'est développée dans l'anneau en BFUP sous conditions de retrait restreint. Ceci s'explique en partie par l'excellent comportement viscoélastique du BFUP qui présente un degré de relaxation des contraintes élevé de l'ordre de 61 à 68%. Ceci, additionné à l'excellente résistance en traction de ce matériau (10 à 13MPa selon le pourcentage de fibres considéré), lui confère un risque très faible de fissuration précoce sous l'effet de son retrait restreint.

En raison de la faible contrainte de traction induite par la restriction du retrait du BFUP, la déformation consommée par le BFUP en condition d'entrave est très faible (inférieure à 100 µm/m) et similaire quel que soit le dosage en microfibres d'acier. Considérant que le BFUP présente une grande capacité de déformation en traction avant la localisation d'une macrofissure, la faible

consommation des déformations en condition d'entrave fait en sorte que la marge de déformation disponible pour confiner la RAG est très importante. Il a été montré que cette marge de déformation est inversement proportionnelle au dosage en fibres dans le BFUP. Les BFUP 2%, 3% et 4% procurent une marge de 0.28%, 0.25% et 0.16% respectivement. Bien que les BFUP 3% et 4% présentent une déformation inférieure au BFUP 2%, ils procurent une résistance à la traction plus importante pour un effet de confinement accru.

Il a également été démontré que la déformation totale des réparations en BFUP testées (déformation consommée par le retrait restreint ainsi que déformation disponible pour la RAG) est inférieure à la capacité de déformation maximale des mêmes BFUP testés en traction directe à 28jours, ce qui pourrait s'expliquer par la différence de configuration et d'orientation des fibres et/ou un léger impact des effets viscoélastiques.

L'impact de la présence d'armatures avec ou sans présence de joints dans la réparation a aussi été évaluée dans ce projet. Les résultats ont montré un effet synergique entre les fibres du BFUP et l'armature, amenant à une plus grande capacité déformationnelle de la réparation en présence d'armature. En effet, bien que le degré de restreinte, et donc la déformation consommée lors de l'essai de retrait restreint, aient augmenté en présence d'un renforcement avec 1.2 % d'armature, cet ajout d'armature a permis d'augmenter de 30% la marge de déformation disponible pour reprendre les expansions dues à la RAG. En outre, l'armature permet un meilleur contrôle des fissures. En effet, la réparation armée a développé une fissure progressive qui débute au niveau de l'enrobage puis traverse graduellement l'épaisseur de la réparation. La déformation maximale atteinte lorsque la fissure atteint le rayon interne de la réparation est de 0.40%.

En ce qui concerne l'introduction de joints froids verticaux dans une réparation armée, ces zones, bien que difficilement évitables dans une réparation de grande dimension, constituent des zones de faiblesse. Il est cependant intéressant de noter que les joints ne se sont pas ouverts lors de l'essai de retrait restreint réalisé dans ce projet, contrairement au BHP qui avait macrofissuré à cette étape de l'essai. La marge de déformation pour la reprise des expansions dues à la RAG, sans localiser de macrofissure, de la configuration armée avec joints est cependant beaucoup plus faible qu'en l'absence des joints. Elle est de l'ordre de 0.02%, soit 14 fois moins importante que celle offerte par la même réparation sans joints. Ces valeurs quantitatives pourraient varier pour un pourcentage d'armature ou une configuration de joint différents, mais les tendances devraient demeurer

similaires. Cependant, la réalisation d'un joint performant a permis de faire propager la fissure dans le BFUP au lieu de suivre la forme de joint. Ceci suggère une marge de déformation en condition fissurée d'autant plus importante avoisinant 0.20% (marge probable pour faire fissurer le BFUP).

En considérants les niveaux d'expansions uni-axiales relevées sur les bétons structuraux d'ouvrages réels atteints par la RAG (0.02% à 0.08% après 35 ans (Smaoui, 2003)) ainsi que les déformations maximales de l'ordre de 0.5-0.7% atteintes au niveau de structures massives (Smaoui, 2003; Saouma, 2014, Fournier et al., 2018), les résultats tirés à partir de cette étude expérimentale mettent en évidence le potentiel du BFUP pour confiner ces expansions à court et long terme. De surcroit, la réparation proposée est directement coulée sur la structure atteinte dont une portion des expansions est déjà survenue. La réparation devra donc contenir les expansions résiduelles de la RAG qui sont très inférieurs à la marge de déformation disponible après retrait restreint du BFUP (jusqu'à 0.28%).

Finalement, les conclusions précédentes du présent projet de recherche démontrent clairement que, comparé à une réparation en BHP, l'utilisation du BFUP offre une bonne marge de déformation disponible avant la localisation d'une macrofissure sous l'effet du gonflement résultant de la RAG. Un gainage mince en BFUP autour d'une structure atteinte par la RAG permet donc d'assurer à la fois un confinement mécanique de la structure dû à l'excellent comportement en traction du BFUP et permet une réparation très peu perméable qui limite l'entrée supplémentaire d'humidité dans la structure, élément essentiel à la poursuite de la RAG. L'introduction d'armatures dans la réparation en BFUP permet d'améliorer sa performance et d'augmenter d'autant plus sa capacité déformationnelle. Ces armatures permettent également de contrôler l'ouverture au joint en présence de joints froids et donc de limiter la pénétration d'eau dans ces zones plus faibles. Ces zones restent cependant limitées localement et ne devraient pas affecter de manière significative la durabilité globale de la réparation.

6.3 Recommandations et perspectives

6.3.1 Amélioration du dispositif d'essai

Actuellement, la détermination de l'instant de fissuration, et donc de la marge de déformation disponible pour contenir la RAG, est basée sur les vidéos synchronisées avec le temps de réalisation de l'essai d'expansion. Cette méthode a permis de déterminer la déformation de la réparation à la

rupture. Bien qu'adéquate pour les besoins de cette étude, la méthode d'extraction de l'instant de macrofissuration pourrait être améliorée. Une instrumentation avec jauges de béton, extensomètres ou DIC (Digital Image Corrélation) pourrait être une solution qui permet de déterminer l'instant de fissuration avec un plus grand degré de précision. Aussi, les dimensions et formes des composantes du dispositif pourraient être variées pour permettre de tester la performance de réparations de formes et/ou épaisseurs différentes, renforcement différent et joint différent.

6.3.2 Programme d'essais complémentaires

Le programme expérimental entrepris a permis d'étudier la performance de plusieurs conditions de réparations. Cependant, afin d'étendre le champ d'application de la réparation proposée, d'autres paramètres seraient également très intéressants à évaluer. Parmi ceux-ci, les paramètres suivants peuvent être cités :

- La variation de l'épaisseur et/ou la forme de la réparation.
- La variation de l'amplitude du retrait. En effet, étant donné que l'état initial de la réparation, avant que celle-ci ne subisse de l'expansion, est largement tributaire du retrait, il serait intéressant d'étudier des BFUP présentant différents retraits, notamment dû à l'utilisation ou non de l'agent réducteur de retrait, sur la performance de la réparation.
- La variation de l'orientation des fibres. Il importe de rappeler que l'orientation des fibres joue un rôle fondamental sur la capacité de déformation et la résistance des BFUP. Or, les fibres étant orientés de manière plutôt favorable pour reprendre les efforts de traction induits dans la réparation testée dans ce projet, ce paramètre peut être étudié en faisant varier les techniques de coulées de l'anneau en BFUP.
- La variation des types de joints froids dans la réparation afin de déterminer si une géométrie de joint est favorable pour la réparation proposée.
- L'étude de l'effet de la cure.
- L'étude de l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement de la réparation (en appliquant l'expansion beaucoup moins vite. Ou plus réalistement, en faisant un cœur en béton atteint par la RAG avec et en lui appliquant les conditions requises (essais de RAG accélérés) pour une expansion relativement rapide).

- La variation du pourcentage d'armature incorporé dans la réparation. Étant donné l'avantage démontré de l'introduction d'armatures dans la réparation, une variation du pourcentage d'armatures ainsi que des conditions aux limites de celles-ci (soudures, longueurs de développement, etc.) seraient des paramètres à considérer au besoin.

6.3.3 Modèles numériques

Les résultats de ce projet de recherche ont permis d'évaluer différentes conditions de réparations en BFUP. Le comportement viscoélastique du BFUP a été quantifié avec précision. Ces données pourraient être transférées vers un modèle numérique réalisé sur un logiciel d'analyse par éléments finis. Une fois validé avec les résultats expérimentaux réalisés, le logiciel pourrait permettre d'évaluer des réparations avec des conditions non étudiées pour simuler avec précision un contexte de réparation structurale réelle.

RÉFÉRENCES

Abou Chakra, F. (2016). Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone: comparaison des codes.

Altoubat, S., Junaid, M. T., Leblouba, M., & Badran, D. (2017). Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites, 79* 9-20.

Altoubat, S. A., & Lange, D. A. (2001). Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age. *ACI Materials Journal, 98*(4), 323-331.

Argouges, M., & Gagné, R. (2010). *Étude des mécanismes et de la cinétique de l'autocicatrisation dans des mortiers cimentaires fissurés.* (Université de Sherbrooke.).

ASTM-C1581. (2004). Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage.

Beaurivage, F. (2009). *Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures.* (École Polytechnique de Montréal).

Becq-Giraudon, E. F. (1996). *Shrinkage cracking of concrete pavements at early age.* (Northwestern University).

Bernard, O. (2000). *Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents*. EPFL.

Bérubé, M.-A., Durand, B., Vézina, D., & Fournier, B. (2000). Alkali-aggregate reactivity in Quebec (Canada). *Canadian Journal of Civil Engineering, 27*(2), 226-245.

Bérubé, M.-A., Smaoui, N., Fournier, B., Bissonnette, B., & Durand, B. (2005). Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali–silica reaction. Part III: Application to existing structures. *Canadian Journal of Civil Engineering, 32*(3), 463-479.

Bérubé, M., & Carles-Gibergues, A. (1992). La durabilité des bétons face à l'alcaliréaction. *La durabilité des bétons* 285-351.

Bjøntegaard, Ø. (1999). *Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete*: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet.

Briffaut, M. (2010). *Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton: influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures.*

Charron, J.-P. (2004). *Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte*.

Charron, J., Zuber, B., Marchand, J., Bissonnette, B., & Pigeon, M. (2004). *Influence of temperature on the early-age behavior of concrete.* Paper presented at the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur (pp. 67-84).

Charron, J. P. (2019). *Notes de cours de l'École Polytechnique de Montréal*. Montréal, Québec, Canada:

Charron, J. P., Desmettre, C. (2013). *Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages d'art durables*. Montréal, Québec, Canada:

Chatterji, S. (2005). Chemistry of alkali–silica reaction and testing of aggregates. *Cement and Concrete Composites, 27*(7-8), 788-795.

Clayton, N. (1989). *Structural performance of ASR affected concrete.* Paper presented at the Proceedings of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Okada, K., Nishibayashi, S. and Kawamura, M., eds., Soc. of Mat. Sci (pp. 671-676).

De la Varga, I., Spragg, R. P., El-Helou, R. G., & Graybeal, B. A. (2019). Shrinkage Cracking Propensity of Ultra-High Performance Concrete.

Denarié, E. (2006). *SAMARIS D25b-Guidance for the use of UHPFRC for rehabilitation of concrete highway structures*. MCS/EU.

Dénarié, E., Damien, J., Nicolas, F., & Dominique, C. (2013). *Rejuvenation of maritime signalisation structures with UHPFRC*. Paper presented at the Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete,UHFFRC, Marseille,France.

Diamond, S. (1989). *ASR-another look at mechanisms.* Paper presented at the Proc. 8^< th> Intl. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction (pp. 115-119).

Dron, R., & Brivot, F. (1992). Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 1: Concepts. *Cement and Concrete Research, 22*(5), 941-948.

Esposito, R., Anaç, C., Hendriks, M. A., & Çopuroğlu, O. (2016). Influence of the alkali-silica reaction on the mechanical degradation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 28*(6), 04016007.

Figueira, R., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., de Almeida, J., Jorge, P., & Silva, C. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials, 222* 903-931.

Forster, S. W., Akers, D. J., Lee, M. K., Pergalsky, A., Arrand, C. D., Lewis, D. W., . . . Pisaneschi, R. R. (1998). Report on alkali-aggregate reactivity. *American Concrete Institute ACI, 221*(1).

Fournier, B., & Bérubé, M.-A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering, 27*(2), 167-191.

Fournier, B., Mitchell, D., Bastien, J., Sanchez, L., & Drimalas, T. (2018). Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms. *Cement and Concrete Research, 107* 284-303.

Gillott, J. E., & Swenson, E. G. (1969). Mechanism of the alkali-carbonate rock reaction. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2*(1), 7-23.

Graybeal, B., & Tanesi, J. (2007). Durability of an ultrahigh-performance concrete. *Journal of materials in civil engineering, 19*(10), 848-854.

Graybeal, B. A. (2006). *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure

Habel, k. (2004). *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete*. EPFL.

Habel, K., Charron, J.-P., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results. *Magazine of Concrete Research, 58*(3), 135-145.

Hassan, A., Jones, S., & Mahmud, G. (2012). Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Construction and building materials, 37* 874-882.

Hobbs, D. (1990). ALKALI-SILICA REACTION: ITS EFFECT ON CONCRETE MEMBERS AND STRUCTURES. DEVELOPMENTS IN STRUCTURAL ENGINEERING. PROCEEDINGS OF THE FORTH RAIL BRIDGE CENTENARY CONFERENCE, HERIOT-WATT UNIVERSITY, ENDINBURGH, SCOTLAND, AUGUST 21-23, 1990. VOLUMES 1 AND 2. *Publication of: Spon, E&FN*.

Hobbs, D. W. (1988). Alkali-silica reaction in concrete.

Hooton, R. (1995). *Test procedures for ASR.* Paper presented at the Proceedings of the third annual ICAR symposium: Concrete, bases, and fines (pp. 1995-1931).

Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites, 26*(5), 531-540.

Kamen, A. (2007). *Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques*. EPFL.

Khan, I., Castel, A., & Gilbert, R. I. (2017). Tensile creep and early-age concrete cracking due to restrained shrinkage. *Construction and Building Materials, 149* 705-715.

Kovler, K. (1994). Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and structures, 27*(6), 324.

Larive, C. (1997). *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques.*

Li, K., & Coussy, O. (2001). Evaluation de l'état mécanique des ouvrages dégradés par la réaction alcali-silice. *accepté par Revue française de génie civil*.

Messan, A. (2006). *Contribution à l'étude du comportemet au très jeune âge des structures minces en mortier.*

Moon, J.-H., Rajabipour, F., Pease, B., & Weiss, J. (2006). Quantifying the influence of specimen geometry on the results of the restrained ring test. *Journal of ASTM international, 3*(8), 1-14.

Moon, J. H., & Weiss, J. (2006). Estimating residual stress in the restrained ring test under circumferential drying. *Cement and Concrete Composites, 28*(5), 486-496.

Multon, S. (2003). *Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles.* (Université de Marne-la-Vallée).

Naaman, A. (2003). *Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites.* Paper presented at the Proc. 4th Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Ann Abor, University of Michigan (pp. 95-113).

Piérard, J., Dooms, B., & Cauberg, N. (2013). *Durability evaluation of different types of UHPC.* Paper presented at the Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (pp. 275-284).

Plumey, S., Jungwirth, J., & Muttoni, A. (2002). *Comportement des éléments en béton à ultra hautes performances*.

Rossi, P., Acker, P., & Malier, Y. (1987). Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Materials and Structures, 20*(6), 436-439.

Rossi, P., Charron, J. P., Bastien-Masse, M., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., & Ramanich, S. (2014). Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete. *Materials and structures, 47*(10), 1773-1785.

Salmon, M., & Godart, B. (1993). *Progression dans les connaissances sur les phénomènes d'alcalis-réactions.* Paper presented at the Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics (pp. 114-162).

Sanchez, L., Fournier, B., Jolin, M., Mitchell, D., & Bastien, J. (2017). Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research, 93* 17-31.

Saouma, V. (2014). *Numerical modeling of AAR*: CRC press.

Schwartzentruber, A., Philippe, M., & Marchese, G. (2004). Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar. *Cement and Concrete Composites, 26*(5), 573-580.

See, H. T., Attiogbe, E. K., & Miltenberger, M. A. (2003). Shrinkage cracking characteristics of concrete using ring specimens. *Materials Journal, 100*(3), 239-245.

Shaeles, C. A., & Hover, K. C. (1988). Influence of mix proportions and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs. *Materials Journal, 85*(6), 495-504.

Shah, H., & Weiss, J. (2006). Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. *Materials and structures, 39*(9), 887.

Siemes, A., & Visser, J. (2000). *Low tensile strength in older concrete structures with alkali-silica reaction.* Paper presented at the Bérubé, MA Fournier, B. Durand, B., Proceedings 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Québec, Canada, June, 1029-1038.

Smaoui, N. (2003). Contribution a l'evaluation du comportement structural des ouvrages d'art affectes de reaction alcalis-silice (RAS)(French and English text).

Smaoui, N., Bérubé, M.-A., Fournier, B., Bissonnette, B., & Durand, B. (2004). Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali–silica reaction. Part I: Experimental study. *Canadian Journal of Civil Engineering, 31*(5), 826-845.

Swamy, R., & Al-Asali, M. (1988). Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *Materials Journal, 85*(5), 367-374.

Tayeh, B. A., Bakar, B. A., Johari, M. M., & Voo, Y. L. (2013). Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation–a review. *Procedia Engineering, 54* 525-538.

Timoshenko, S., Timoshenko, S., & Goodier, J. (1951). *Theory of Elasticity, by S. Timoshenko and JN Goodier*: McGraw-Hill book Company.

Turcry, P., Loukili, A., Haidar, K., Pijaudier-Cabot, G., & Belarbi, A. (2006). Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering, 18*(1), 46-54.

Vernet, C. (2003). *UHPC microstructure and related durability performance laboratory assessment and field experience examples.* Paper presented at the Proc. of the Int. Symposium on High Performance Concrete.

Wang, J.-Y., Bian, C., Xiao, R.-C., & Ma, B. (2019). Restrained Shrinkage Mechanism of Ultra High Performance Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering, 23*(10), 4481-4492.

Wang, K., Jansen, D. C., Shah, S. P., & Karr, A. F. (1997). Permeability study of cracked concrete. *Cement and concrete research, 27*(3), 381.

Weiss, W. J., & Shah, S. P. (2002). Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry. *Materials and Structures, 35*(2), 85-91.

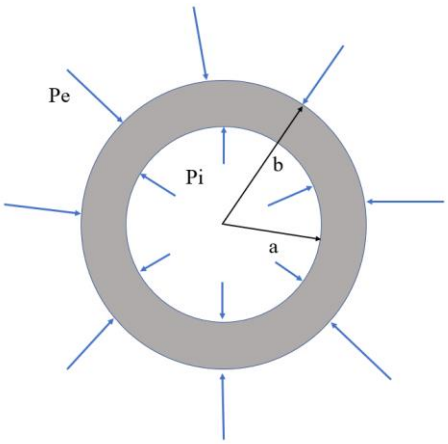
Weiss, W. J., Yang, W., & Shah, S. P. (1998). Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics, 124*(7), 765-774.

Wood, J. G., Young, J. S., & Ward, D. E. (1987). THE STRUCTURAL EFFECTS OF ALKALI-AGGREGATE REACTION ON REINFORCED CONCRETE--PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE ALKALI-AGGREGATE REACTIONS, OTTAWA, CANADA, 1986. *Publication of: NOYES PUBLICATIONS*.

Yoo, D.-Y., Banthia, N., & Yoon, Y.-S. (2017). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: shrinkage strain development at early ages and potential for cracking. *Journal of Testing and Evaluation, 45*(6), 2061-2070.

Yoo, D.-Y., Park, J.-J., Kim, S.-W., & Yoon, Y.-S. (2014). Influence of ring size on the restrained shrinkage behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Materials and structures, 47*(7), 1161-1174.

ANNEXE A DÉVELOPPEMENT DES ÉQUATIONS DE LA THÉORIE D'ÉLASTICITÉ DE THIMOSHENKO



Pi : Pression intérieure

Pe : Pression extérieure

a : Rayon interne

b : Rayon externe

Figure A.1 Schéma d'un anneau soumis à une pression interne et externe

L'équation 1 présente l'équation de départ basée sur la théorie d'élasticité appliquée à un cylindre creux soumis à des pressions interne et externe, tel qu'illustré sur la Figure A.1 (Timoshenko et al., 1951) :

$$\sigma_\theta(r) = -\frac{a^2 b^2 (Pe - Pi)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{Pi\, a^2 - Pe\, b^2}{b^2 - a^2} \tag{1}$$

Détermination de la pression résiduelle qui s'applique sur l'anneau d'acier :

L'anneau d'acier soumis au retrait du béton peut être représenté par un anneau soumis à une pression externe P_{res} tel que présenté sur la Figure A.2. La pression externe est dite « résiduelle » vu qu'une partie est relaxée par les effets de fluage.

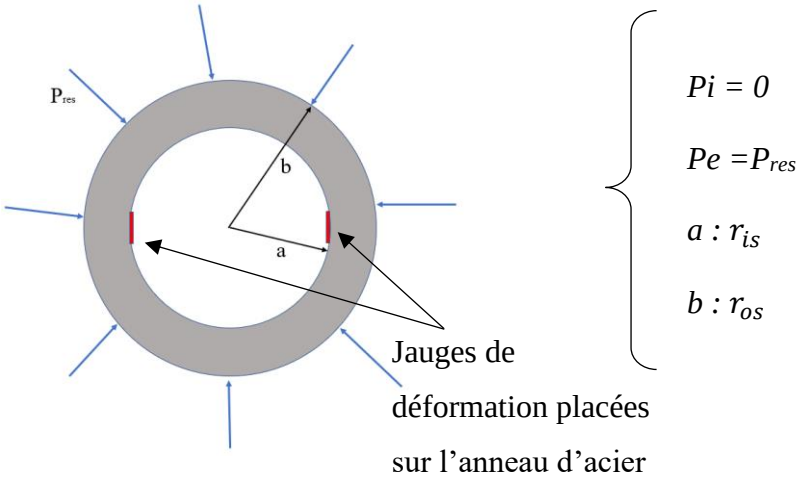


Figure A.2 Schéma de l'anneau d'acier soumis à une pression résiduelle virtuelle et hypothèses de calcul

En considérant les hypothèses citées sur la Figure A.2, l'équation (1) devient :

$$\sigma_\theta(r=a) = -\frac{{r_{is}}^2 {r_{os}}^2 P_{\text{res}}}{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2} \cdot \frac{1}{a^2} + \frac{-P_{\text{res}}\, {r_{os}}^2}{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2} = \frac{-2\, P_{\text{res}}\, {r_{os}}^2}{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2} \tag{2}$$

Les jauges de déformation placées sur la surface intérieure de l'anneau d'acier à mi-hauteur permettent de déterminer la déformation ortho-radiale ε_θ générée par le retrait du béton. La contrainte ortho-radiale développée au niveau du rayon intérieur de l'anneau d'acier peut être déterminée avec l'équation (3) :

$$\sigma_\theta(r = r_{is}) = \varepsilon\theta \,.\, \text{Es} \tag{3}$$

Où *Es* est le module d'élasticité de l'acier.

À partir des équations 2 et 3, la pression résiduelle peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{res}(t) = -\frac{({r_{os}}^2 - {r_{is}}^2)}{2.{r_{os}}^2} .\varepsilon\theta(t).\,\text{Es} \tag{4}$$

Détermination de la contrainte résiduelle dans le béton :

Ici, c'est l'anneau de béton qui est représenté par un anneau soumis à une pression interne fictive égale à la pression résiduelle (- P_{res}) appliquée par le BFUP sur l'acier (voir Figure A.).

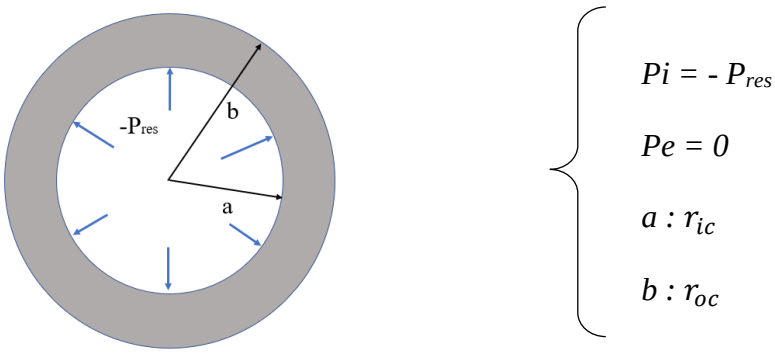


Figure A.3 Schéma de l'anneau de béton soumis à une pression virtuelle (-P_{res}) et hypothèses de calcul

En considérant les hypothèses citées ci-dessus sur la Figure A.3, l'équation (1) peut cette fois s'écrire sous forme :

$$\sigma_\theta(r) = -\frac{P_{\text{res}}\, {r_{ic}}^2 {r_{oc}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{ic}}^2} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{P_{\text{res}}\, {r_{ic}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{ic}}^2} \tag{5}$$

La contrainte ortho-radiale étant maximale au niveau du rayon intérieur du béton, selon l'équation (5), il importe de déterminer la contrainte développée à cet endroit, soit :

$$\sigma_\theta(r = a) = -\frac{P_{\text{res}}\, ({r_{ic}}^2 + b{r_{oc}}^2)}{{r_{oc}}^2 - {r_{ic}}^2} \tag{6}$$

Finalement, en injectant l'équation (4) dans l'équation (6), l'équation finale de la contrainte de traction ortho-radiale « résiduelle » développée dans le béton devient :

$$\sigma_{\theta\, Résiduelle}(t) = -\varepsilon\theta(t).E_s.\frac{{r_{os}}^2 + {r_{oc}}^2}{{r_{oc}}^2 - {r_{os}}^2} \cdot \frac{{r_{os}}^2 - {r_{is}}^2}{2 \cdot {r_{os}}^2} \tag{4}$$

ANNEXE B PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Un protocole expérimental a été élaboré et suivi pour chacune des deux phases d'essais, tel que décrit ci-dessous.

Protocole de la phase 1 (essai de retrait restreint) :

a) Collage des jauges de déformation sur l'intérieur de l'anneau d'acier: 2 jauges de déformation adaptées pour l'acier sont installées symétriquement à mi-hauteur au niveau du rayon intérieur de l'acier. Elles sont ensuite recouvertes d'un base-Coat pour les protéger contre l'humidité.

a) Préparation des coffrages et mise en place de la jauge de déformation pour la mesure du retrait libre: Le coffrage utilisé pour l'anneau de BFUP est un coffrage commercial cylindrique en carton de 12 po de diamètre coupé à une hauteur de 75 mm. Il est fixé sur une planche de bois à l'aide de fixations externe prévues à cet effet et qui évitent que le coffrage lève lors de la coulée du BFUP (Figure B.1a). L'anneau d'acier est quant à lui positionné au centre du coffrage grâce à des clous placés au centre. Pour le prisme de retrait libre, le coffrage consiste en un assemblage de planches de bois. Une jauge de déformation interne de marque TML est ensuite installée dans le sens longitudinal du spécimen, au centre à mi-hauteur (Figure B.1b). Cette jauge sera branchée sur le système d'acquisition au moins une heure avant la coulée du spécimen.

a) Coffrage de l'anneau

b) Coffrage du prisme adapté

Figure B.1 Coffrage de l'anneau et du prisme adapté

b) Coulée de BFUP: pour favoriser la capacité des fibres à contrôler les fissures de retrait et à reprendre des efforts de traction, elles doivent être positionnées perpendiculairement aux fissures de traction et donc parallèlement à la direction de la contrainte de traction. Pour obtenir une orientation des fibres optimale, la coulée de l'anneau se fait donc de manière circulaire et continue pour éviter la présence de zone sans fibres à la jonction de deux fronts de coulée. De cette manière, les fibres sont capables de reprendre les efforts orthoradiaux générés lors de l'essai de retrait et l'essai d'expansion. Pour être cohérent, le prisme de retrait libre est coulé avec une technique induisant une orientation similaire, soit favorable, en procédant à des allers-retours dans la direction longitudinale du prisme.

a) Acquisition des données : directement après la coulée, les jauges de déformation installées sur l'anneau d'acier sont connectées au système d'acquisition « VEE Pro 9.3» installé sur un ordinateur à proximité (Figure B.2). Les prises de mesures se font à chaque 10 minutes. Après 24h, l'anneau est démoulé et positionné sur une plaque ronde sur laquelle sont installés les trois LVDT à 120° tel qu'illustré à la Figure B.2. Ces derniers sont ensuite connectés au même système d'acquisition que les jauges de déformation. Les données sont ensuite acquisitionnées jusqu'à la réalisation de l'essai d'expansion qui a lieu au 28ème jour du BFUP.

Figure B.2 Instrumentation du spécimen et acquisition du retrait restreint

Protocole de la phase 2 (essai d'expansion) :

a) Préparation du spécimen : avant de réaliser l'essai d'expansion, l'anneau de BFUP est peint avec une peinture blanche coupée à l'eau. Ceci permet de bien visualiser le patron de fissuration et de mieux repérer visuellement la zone de localisation.

b) Installation du spécimen dans la presse: le spécimen ainsi que le support des LVDT sont installés sur la presse hydraulique de capacité 2.5 MN (presse de marque INSTRON). Ensuite, les caméras sont installées de manière à avoir une vue globale du spécimen.

c) Installation du cœur expansif: avant d'installer le cône, il faut s'assurer de bien positionner les pétales en gardant un espacement uniforme et de laisser passer les câbles des jauges à travers ces espacements comme présenté sur la Figure B.3. Le cylindre d'acier est placé au-dessus du cône permet d'avoir une meilleure visualisation de la surface supérieure de l'anneau lors de l'essai.

Figure B.3 Installation des pétales et du cône, composantes du cœur expansif

d) Branchement : À part le système directement lié à la presse et qui donne l'évolution de la force en fonction du déplacement, les jauges de déformations placées à l'intérieur de l'acier ainsi que les LVDT placés au niveau de la circonférence extérieure de l'anneau sont

rebranchés sur le système d'acquisition « VEE Pro 9.3» et prennent des mesures toutes les cinq secondes.

e) Essai d'expansion: l'essai d'expansion est piloté en déplacement. Un chargement en compression est appliqué sur le cône avec un taux de chargement de l'ordre de 0,3 mm/min. Le taux de chargement a été sélectionné de telle sorte à ce que l'essai ait une durée totale approximative de 30 minutes et pour que la vitesse ne soit pas trop rapide pour assurer un bon positionnement du cœur expansif au début de l'essai et permettre le captage de l'instant de localisation avec une bonne précision. L'essai est arrêté à la suite de la localisation et avant d'atteindre une déformation qui plastifie l'anneau d'acier.